

Campina Grande, PB / Março, 2026

O fósforo na agricultura

Disponibilidade no solo e
funções na planta

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

12 CONSUMO E
PRODUÇÃO
RESPONSÁVEIS



Embrapa

Algodão

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Algodão
Ministério da Agricultura e Pecuária**

ISSN 0103-0205 / e-ISSN 2966-0343

Documentos 304

Março, 2026

O fósforo na agricultura
Disponibilidade no solo e funções na planta

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Embrapa Algodão
Campina Grande, PB
2026

Embrapa Algodão

Rua Osvaldo Cruz, 1.143, Centenário
58428-095, Campina Grande, PB
www.embrapa.br/algodao
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Daniel da Silva Ferreira

Secretária-executiva

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Membros

Joao Henrique Zonta

Lucia Vieira Hoffmann

Marcone Cesar Mendonça das Chagas

Roseane Cavalcanti dos Santos

Ziany Neiva Brandão

Edição executiva

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Revisão de texto

Marcela Bravo Esteves

Normalização bibliográfica

Enyomara Lourenço Silva

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Geraldo Fernandes de Sousa Filho

Foto da capa

Oscar Fontão de Lima Filho

Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Algodão

Costa, Magna Maria Macedo Nunes.

O Fósforo na agricultura: disponibilidade no solo e funções na planta / Magna Maria
Macedo Nunes Costa. – Campina Grande : Embrapa Algodão, 2026.

PDF (56 p.) : il. color.– (Documentos / Embrapa Algodão, e-ISSN 2966-0343 ; 304).

1. Química do solo. 2. Fósforo. 3. Nutrição vegetal. I. Título. II. Embrapa Algodão.
III. Série.

CDD (21. ed.) 631.8

Enyomara Lourenço Silva (CRB-4/1569)

© 2026 Embrapa

Autora

Magna Maria Macedo Nunes Costa

Engenheira-agrônoma, doutora em Nutrição Mineral de Plantas,
pesquisadora da Embrapa Algodão, Campina Grande, PB

Apresentação

A reposição de nutrientes visa fornecer os elementos essenciais ao pleno crescimento e desenvolvimento das plantas. Nesse contexto, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) direciona suas pesquisas ao desenvolvimento de tecnologias e práticas agropecuárias que promovam uma nutrição balanceada, construam a fertilidade do solo a longo prazo e tornem os sistemas produtivos mais resilientes, sustentáveis e independentes de fontes de energia não renováveis. O fósforo representa um dos maiores desafios da agricultura brasileira. Uma vez aplicado ao solo, o elemento é intensamente adsorvido por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, o que exige aplicações em doses superiores à demanda imediata das culturas. Contudo, trata-se de um nutriente vital ao metabolismo vegetal, compondo moléculas essenciais como ésteres fosfóricos, fosfolípidos, nucleotídeos e ácidos fítics — componentes indispensáveis para que a planta complete seu ciclo de vida.

Este documento apresenta a dinâmica do fósforo no sistema solo-planta, abordando desde os processos metabólicos e sintomas de deficiência ou excesso até o papel crucial dos microrganismos e da matéria orgânica em sua disponibilidade. São discutidas, ainda, as principais fontes de fósforo e as práticas de adubação, com foco especial no desempenho das culturas de algodão, amendoim, gergelim, mamona e sisal. Mais do que um manual técnico, esta publicação busca incentivar a integração da temática 'fósforo' como prioridade em projetos de pesquisa voltados a solos e nutrição vegetal.

Temas como a nutrição fosfatada aliada à resistência a doenças, o desenvolvimento de materiais geneticamente mais eficientes no uso de P e a prospecção de microrganismos para solubilização de fósforo no solo são pilares para um agronegócio mais competitivo. Somasse a isso as estratégias de manejo em sistemas de base ecológica e familiar, reforçando o compromisso desta publicação com o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) da Agenda 2030.

Nair Helena Castro Arriel
Chefe-Geral da Embrapa Algodão

Sumário

Introdução	9
O fósforo no solo	10
O fósforo na planta	21
Sintomas de deficiência de fósforo	26
Sintomas de excesso de fósforo	31
Controle metabólico do fósforo nas plantas	32
Importância dos microrganismos do solo para a absorção de fósforo	32
Fontes de fósforo	34
Adubação com fósforo	37
A matéria orgânica do solo e a disponibilidade de fósforo	37
Efeito do fósforo no solo sobre as culturas do algodão, do amendoim, do gergelim, da mamona e do sisal	38
Algodão	38
Amendoim	40
Gergelim	42
Mamona	43
Sisal	44

Considerações finais	44
Referências	45

Introdução

O P (fósforo) é considerado um macronutriente primário para o desenvolvimento das plantas cultivadas. Desempenha várias funções vitais nas plantas, sendo considerado, por isso, um nutriente essencial. Faz parte dos nucleotídeos e das membranas fosfolipídicas, é responsável por armazenamento e transferência de energia na forma de ATP e compõe o inositol trifosfato — mensageiro secundário nas células vegetais (Marschner, 2022). Entretanto, é o nutriente menos prontamente disponível às raízes por causa da sua lenta taxa de difusão, por uma ocorrência em forma orgânica e pela interação com os constituintes do solo, como Fe e Al. Em muitos casos, mesmo quando a adubação fosfatada é feita de acordo com os resultados da análise do solo, a resposta das culturas é baixa, pois o P pode ser adsorvido aos coloides, tornando-se indisponível (Liu et al., 2014).

Por outro lado, o excesso de P no solo pode ser prejudicial ao meio ambiente porque existe uma probabilidade de ele entrar nos corpos d'água através do escoamento superficial e causar a proliferação de algas (Rezania et al., 2021). O manejo adequado do P cria sistemas agrícolas lucrativos ao mesmo tempo que reduz os impactos negativos sobre o meio (Withers et al., 2014).

Nos últimos anos, a agricultura brasileira tem apresentado recordes de produção. Segundo o Ministério da Agricultura e Pecuária, em 2023, o valor bruto da produção agropecuária brasileira (VBPA) atingiu o total de R\$ 1,150 trilhão, um recorde histórico numa série iniciada há 34 anos. Cinco produtos, que respondem por 82,0% do VBPA das lavouras, apresentam melhor desempenho: soja, milho, cana-de-açúcar, café e algodão (Pacheco, 2023). Esse desempenho deve-se, essencialmente, ao desenvolvimento tecnológico envolvendo a obtenção de variedades com alto potencial produtivo, à mecanização e ao aperfeiçoamento das práticas de manejo do solo e dos métodos de controle fitossanitário. Sob essa perspectiva, a adequada disponibilidade de fósforo está entre as condições necessárias à boa produtividade das culturas, uma vez que é comum sua deficiência em áreas agrícolas.

Dessa forma, a fim de otimizar o uso dos adubos fosfatados, reduzir os custos e manter patamares satisfatórios de produtividade, faz-se necessário que a pesquisa dê importância ao tema fósforo, para que seu fornecimento seja baseado em critérios técnico-científicos. Entre esses critérios, destacam-se: tipo de solo, teor de P no solo, pH do solo, necessidade da cultura em P e sistema de cultivo (Yan et al., 2020).

O fósforo no solo

O P no solo é encontrado sob duas formas: orgânica e inorgânica (Figura 1). Essas duas formas juntas constituem o P do solo. Embora o P total do solo seja geralmente alto, com teores variando entre 0,2 e 7,0 t/ha, 80% estão imobilizados e indisponíveis para a absorção pela planta (Nogalska et al., 2018).

Aproximadamente entre 30 e 65% do P total do solo está na forma orgânica, não prontamente disponível à planta, ao passo que o restante, entre 35 e 70%, apresenta-se sob a forma inorgânica (Nogalska et al., 2018). As formas orgânicas de P incluem resíduos de plantas e animais mortos e microrganismos do solo (Costa et al., 2017). A decomposição dos resíduos, deixando o P disponível para a absorção pelas raízes, é feita pelos microrganismos (Machado, 2021a). De acordo com Prasad e Chakraborty (2019), as formas de P inorgânico podem ser classificadas em três tipos:

- Fósforo na solução do solo: Este *pool* compreende o P inorgânico dissolvido na solução do solo que encontra-se facilmente disponível para a absorção pelas plantas. É geralmente referido como P-solução. Compreende os íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} . Se não for absorvido pelas raízes, eles podem ser perdidos para as argilas e os óxidos de Fe e Al através de adsorção; por precipitação na forma de fosfatos de Ca, Fe e Al; por imobilização, transformando-se em P-orgânico; por lixiviação, erosão e escoamento superficial (Prasad; Chakraborty, 2019).

- **Fósforo adsorvido:** Este *pool* compreende o P inorgânico adsorvido à superfície das argilas, óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) do solo. Nesse *pool*, o P é liberado lentamente para a absorção pela planta. É geralmente referido como P-lábil. Compreende a fração que mantém uma relação de equilíbrio com a solução, disponibilizando P à medida que ele é absorvido. A relação de equilíbrio entre o P-lábil e o P-solução é governada pelo fator capacidade, que consiste na resistência do solo às mudanças na concentração do elemento na solução. O estoque de P-lábil abastece a solução do solo à medida que o P é retirado do meio, seja por perdas (fixação) seja pela absorção radicular. A relação

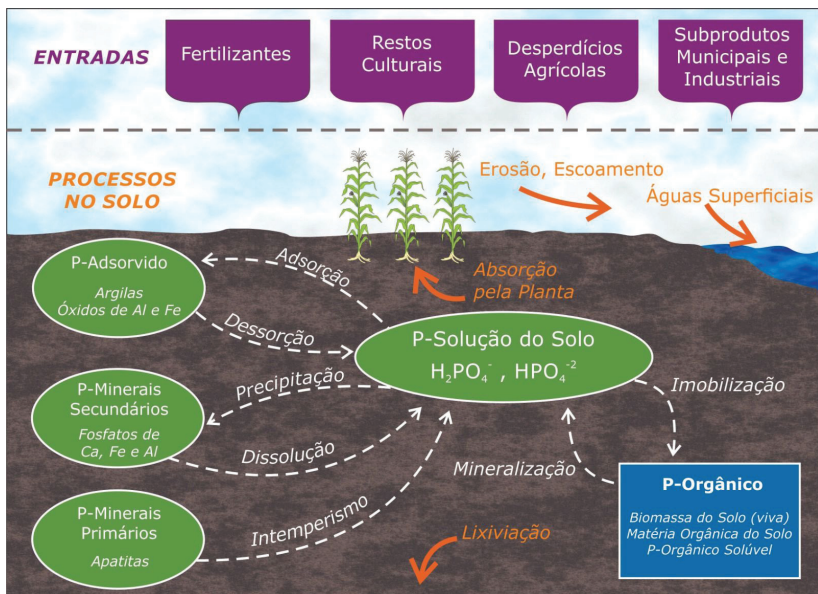


Figura 1. Representação esquemática do ciclo do fósforo no solo, com fontes de entrada de P no solo, caminhos pelos quais o P torna-se disponível/indisponível para a absorção pelas raízes das plantas e caminhos de saída/perda.

Fonte: Adaptado de Prasad e Chakraborty (2019).

Ilustração: Sérgio Cobel da Silva.

P-lábil/P-solução costuma ser bem grande. Em latossolos, por exemplo, é de 20 mil, no entanto, essa relação tende a diminuir à medida que diminui a fração argila (solos mais arenosos). Esse fenômeno constitui o poder tampão do solo à adubação fosfatada (Machado, 2021b).

- Fósforo mineral: Este *pool* compreende os minerais fosfatados primários e secundários presentes no solo. Exemplos de minerais fosfatados primários são: apatita, strengita e variscita. Os minerais fosfatados secundários incluem os fosfatos de Fe, Al e Ca. A liberação de P desse *pool* é extremamente lenta e ocorre quando o mineral sofre intemperismo hídrico. É geralmente referido como P não lábil. Durante o processo de intemperismo, libera os íons que são absorvidos pelas raízes (Prasad; Chakraborty, 2019).

Quando o P é disponibilizado ao solo por meio de fontes inorgânicas, que são os fertilizantes químicos — superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), monoamônio fosfato (MAP), difosfato diamônio (DAP), fosfatos naturais e escória de Thomas —, ou fontes orgânicas — esterco, compostos, biofertilizantes, bioestimulantes, biossólidos e restos de plantas/animais mortos —, circula entre os vários *pools* por meio de processos como mineralização, imobilização, adsorção, precipitação, dessorção, intemperismo e dissolução (Ahmad et al., 2022). Esses processos serão explicados a seguir.

a) Mineralização e imobilização

A mineralização é um processo no qual o P orgânico no solo é convertido em P inorgânico através de macrorganismos como minhocas, cupins, formigas e aracnídeos, e de microrganismos como bactérias, leveduras, fungos, actinomicetos, protozoários e algas (Chen et al., 2020). A imobilização, por sua vez, é o processo reverso, durante o qual a forma inorgânica de P é revertida à forma orgânica através da fixação pelas células microbianas. É muito comum ocorrer quando restos culturais com alta relação carbono/fósforo são incorporados ao solo. Quando esses restos se decompõem, o P volta a tornar-se

disponível na solução do solo por meio da mineralização. Por se tratar de processos biológicos, eles são altamente influenciados pela umidade, temperatura, aeração e pH do solo; pela razão C orgânico/P orgânico dos restos vegetais; pela população microbiana; pelo nível de fragmentação dos restos vegetais; pela presença de substâncias nitrogenadas, etc. (Prasad; Chakraborty, 2019).

b) Adsorção e dessorção

Adsorção é um processo no qual o P presente na solução é atado/ligado à superfície das partículas do solo (Fink et al., 2014). Essas partículas são as argilas silicatadas e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al (coloides inorgânicos), mas também podem ser a matéria orgânica (coloides orgânicos). É um processo rápido e reversível. Solos bastante intemperizados possuem grande capacidade de adsorção de fosfatos, conseqüentemente, reduzindo sua disponibilidade às plantas. Em ambientes tropicais, como é o caso da maioria dos solos brasileiros, grande parte do Pi do solo encontra-se adsorvido. O P em solução apresenta teores muito baixos — em torno $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P —, devido à baixa solubilidade dos compostos fosfatados e à alta capacidade de adsorção de fosfato. Quanto maior a concentração de óxidos e hidróxidos de Fe e Al no solo, maior o potencial para a adsorção de P. Também, solos com maior teor de argila adsorvem mais P do que os solos arenosos. A adsorção de fosfato aos coloides do solo ocorre por ligação covalente — ligação química caracterizada pelo compartilhamento de elétrons —, também chamada de adsorção específica. Diferentemente da ligação iônica — ligação química baseada na atração eletrostática de íons com cargas opostas —, a ligação covalente é de baixa reversibilidade (Pereira et al., 2021).

Dessorção é o processo pelo qual o P adsorvido pode ser liberado para a solução do solo, tornando-se disponível para a absorção pelas raízes das plantas. Dessa forma, constitui-se, basicamente, no processo de liberação de uma substância ou material de uma interface entre uma superfície sólida e uma solução. É considerado o processo reverso das reações de adsorção. Em situações de deficiência de

nutrientes, é o processo de dessorção que controla a quantidade e a taxa da liberação dos elementos para as plantas. Assim como ocorre com a adsorção, são também os óxidos e hidróxidos de Fe e Al que contribuem para a dessorção de P. Quando ocorre o desbloqueio dos sítios de retenção, há um aumento na disponibilidade do nutriente. O fenômeno é controlado pela concentração das espécies livres de P na solução, pelo pH, pela temperatura, pela quantidade do elemento adicionado através da adubação e pelo tempo de contato entre o solo e a solução (Carvalho et al., 2000).

c) Intemperismo, precipitação e dissolução

Os solos contêm minerais que são ricos em P. Esses minerais são classificados como primários ou secundários. Por meio do intemperismo, vão se decompondo com o tempo e liberando P para a solução do solo. Minerais primários, tais como as apatitas, são muito estáveis e resistentes ao intemperismo, fazendo com que o P seja liberado muito lentamente em comparação com os minerais secundários como fosfato de Ca, Fe ou Al (Prasad; Chakraborty, 2019). A apatita é encontrada em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, sendo uma importante fonte de P, com teor de P_2O_5 variando entre 5 e 15%. Por isso, a principal aplicação da apatita está na fabricação de ácido fosfórico, que serve como matéria-prima para fertilizantes fosfatados. De maneira geral, a apatita pode ser encontrada em pegmatitos de origem hidrotermal, corpos de magnetita titanífera e rochas alcalinas (Toledo; Pereira, 2001).

A precipitação, por sua vez, é um processo em que íons metálicos como Fe^{3+} e Al^{3+} —predominantes em solos ácidos— e Ca^{2+} —predominante em solos alcalinos— reagem com os íons fosfatos presentes na solução do solo para formar minerais tais como fosfatos de Fe, Al ou Ca (Valencia-Gica et al., 2010). Esses fosfatos de metais podem liberar o P para a solução do solo, mas a taxa de liberação é muito lenta (Austruy et al., 2014).

Já a dissolução é uma forma de intemperismo que ocorre quando o fosfato de mineral é dissolvido, liberando o fosfato de volta à solução do solo.

d) Perda de fósforo

O P é removido do solo por absorção pelas culturas, escoamento superficial, erosão e lixiviação (Figura 1) (Prasad; Chakraborty, 2019). O escoamento superficial é a principal causa da perda de P do solo (Wang et al., 2013). A água do escoamento carrega para outro lugar tanto o P dissolvido na água, quanto o P contido nas partículas de solo erodido. A lixiviação é a perda de P solúvel da subsuperfície à medida que a água percola verticalmente para baixo no perfil do solo. Em geral, a perda de solo por lixiviação é mínima quando comparada à perda por escoamento superficial. Esses dois processos têm o potencial de causar eutrofização — processo de poluição de corpos d'água, como rios e lagos, que acabam adquirindo uma coloração turva e ficando com níveis baixíssimos de oxigênio dissolvido na água —, provocando a morte de diversas espécies animais e vegetais e com altíssimo impacto nos ecossistemas aquáticos (Kalkhajeh et al., 2021).

Enquanto processos como intemperismo, dissolução, mineralização e dessorção aumentam a disponibilidade de P no solo para a absorção pelas plantas, imobilização, adsorção, precipitação, escoamento superficial e erosão decrescem a disponibilidade (Prasad; Chakraborty, 2019) (Figura 2). A compreensão dos fenômenos básicos da dinâmica do P no solo é importante para a tomada de decisão sobre a necessidade de adição e para a definição das doses e dos modos de aplicação de fertilizantes fosfatados (Santos et al., 2008).

a) Matéria orgânica

A matéria orgânica é um importante fator que controla a disponibilidade de P. Com o aumento do seu volume no solo, a disponibilidade de P aumenta (Hawkins et al., 2022). Isso ocorre devido às seguintes razões: i) A mineralização da matéria orgânica no solo libera formas disponíveis de P às plantas; e ii) as moléculas orgânicas competem com as argilas e com os óxidos e hidróxidos de Fe e Al pelo fosfato adsorvido, reduzindo a retenção de P. Isso faz com que a disponibilidade de P em solos não adubados com fosfatos dependa exclusivamente

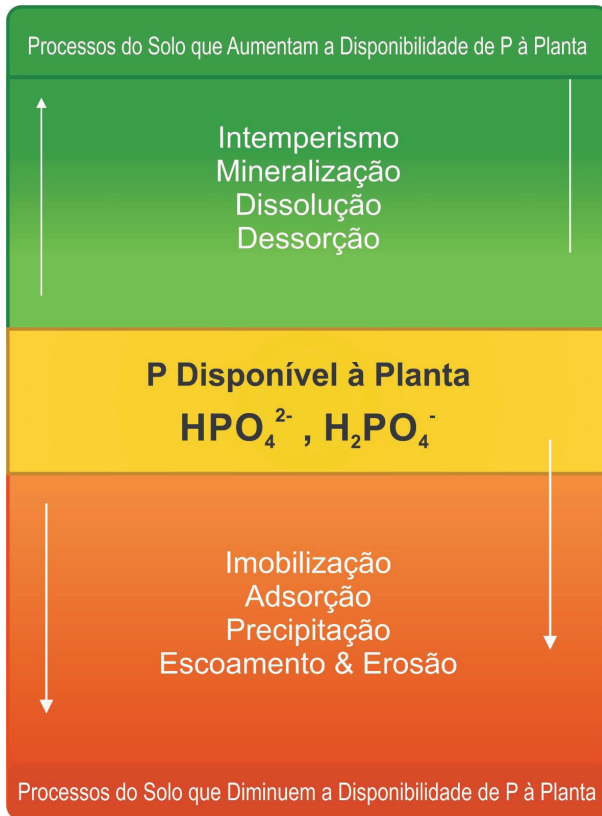


Figura 2. Processos do solo que afetam a disponibilidade de fósforo para a absorção pelas plantas.

Fonte: Adaptado de Prasad e Chakraborty (2019).

Ilustração: Sérgio Cobel da Silva.

da ciclagem de compostos orgânicos. Entretanto, para que o fósforo associado à matéria orgânica do solo seja aproveitado pelas plantas, é preciso que haja a conversão do P-orgânico ao inorgânico via mineralização enzimática. Os ácidos orgânicos provenientes do metabolismo de microrganismos do solo, responsáveis pela decomposição da

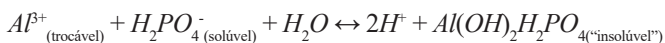
matéria orgânica, contribuem significativamente para a solubilização de fosfatos. Dessa forma, os sistemas de manejo que promovem aumento de matéria orgânica no solo contribuem para o incremento de formas mais lábeis de P (Santos et al., 2020).

b) Teor de argila

Solos com maiores teores de argila têm alta capacidade de retenção de P porque as partículas de argila têm uma área superficial por volume muito grande, que pode adsorver o P facilmente. Por sua vez, solos com baixos teores de argila têm baixa capacidade de retenção de P por terem uma área superficial por volume muito pequena, não armazenando o elemento. Machado e Souza (2012) quantificaram os teores de P disponível, após incubação de solos com diferentes texturas. Os tratamentos foram testemunha (sem aplicação de P) e doses crescentes de P_2O_5 (50; 100; 200 e 400 mg dm^{-3}), utilizando o fosfato monoamônico de liberação controlada, em solo argiloso, médio e arenoso. Eles avaliaram o P disponível aos 30, 60 e 90 dias da incubação do fertilizante com o solo. Os resultados demonstraram que o solo argiloso apresentou maior disponibilidade do nutriente quanto maior a dose aplicada (Figura 3).

c) pH do solo

O pH ideal do solo para a máxima disponibilização de P encontra-se na faixa de 6,0 a 7,0 (Penn; Camberato, 2019). Sob baixos pHs (solos ácidos), há maiores teores de Fe e Al, que formam ligações muito fortes com o fosfato, tornando o P indisponível (Viviani et al., 2010). A acidificação dos solos ocorre mais frequentemente em regiões tropicais úmidas e deve-se à substituição de cátions trocáveis por íons H^+ e Al^{3+} no complexo de troca, absorção de cátions básicos pelas plantas e uso de fertilizantes de caráter ácido. O Al em concentração elevada, além de ser tóxico às plantas, pode interferir na disponibilidade de P no solo, que tende a reagir com o Al solúvel, formando fosfatos de Al de baixa solubilidade em solos ácidos.



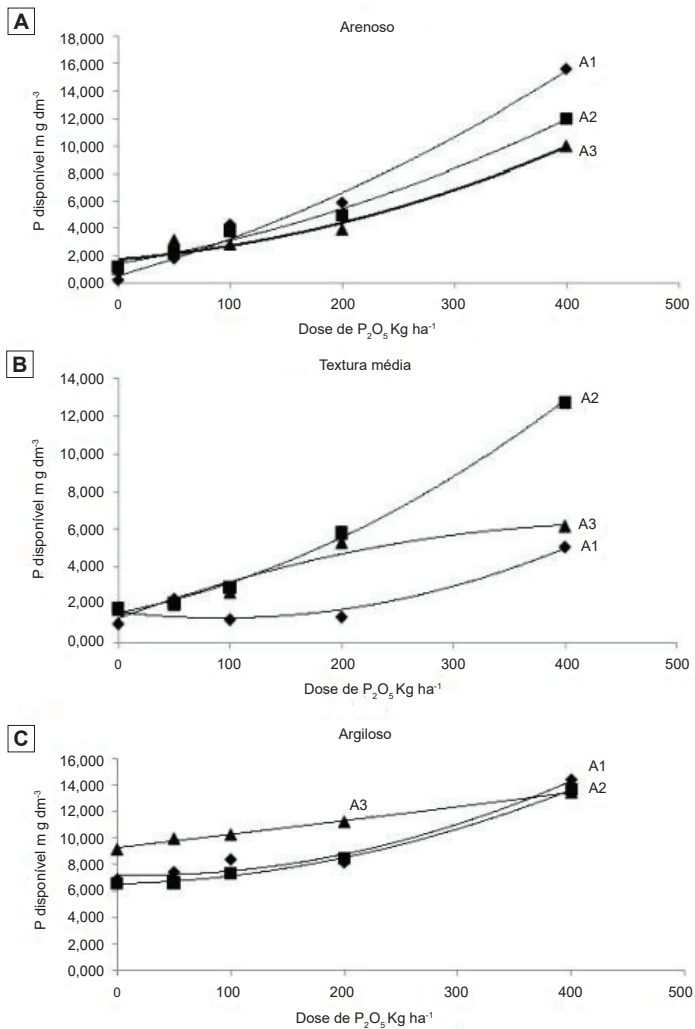
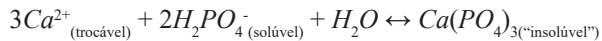


Figura 3. Teor de fósforo em Mehlich⁻¹. (A) solo arenoso, (B) solo com textura média e (C) solo argiloso, após 30 (A1), 60 (A2) e 90 (A3) dias da aplicação do fertilizante fosfatado MAP de liberação lenta. Patos de Minas, MG, 2009. (*)Nível de significância 5%.

Fonte: Machado e Souza (2012).

A disponibilidade de P em solos ácidos altamente intemperizados é governada, principalmente, pelo fosfato ligado ao alumínio, que aparentemente é a forma mais lábil de P no solo, comparando-se às demais formas (Viviani et al., 2010).

Sob altos pHs (solos alcalinos), quando o Ca é o cátion dominante, o fosfato tende a se precipitar com ele (Viviani et al., 2010).



Dessa forma, a calagem do solo deve ser feita com acompanhamento técnico, levando-se em consideração o pH, o nível de Ca e a textura do solo, uma vez que um erro na dosagem do calcário, colocando-o em excesso, poderá acarretar a indisponibilidade do P, prejudicar o desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, diminuir a produção (Viviani et al., 2010).

d) Outros fatores

Temperatura, umidade e aeração do solo podem afetar a decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, a taxa de mineralização de P. Por exemplo, em climas quentes e úmidos, a matéria orgânica se decompõe mais rapidamente do que em climas frios e secos. A decomposição da matéria orgânica é realizada por uma variedade de organismos, como bactérias, fungos, algas e insetos, que a utilizam como fonte de alimento e energia. Esses organismos fazem o uso de enzimas para quebrar moléculas grandes em pequenas, que podem ser absorvidas pelas células para produzir outros compostos e energia. À medida que a decomposição prossegue, nutrientes são liberados para manter a fertilidade do solo e a saúde dos ecossistemas. A taxa de decomposição aumenta com o aumento da temperatura, pois as enzimas funcionam melhor em temperaturas elevadas. No entanto, acima de certo patamar, a atividade dos organismos pode ser inibida ou até mesmo paralisada. Também, a decomposição é favorecida em ambientes úmidos e aeróbicos, pois as moléculas de água e de oxigênio são essenciais à sobrevivência e reprodução. Dessa forma, seca e anaerobiose são deletérias à decomposição da matéria

orgânica do solo e, conseqüentemente, à liberação de P às raízes das plantas (Machado, 2023).

Os vários componentes do ciclo do fósforo podem ser separados em três categorias: P-lábil, P-não lábil e P-solução (Figura 4).



Figura 4. Formas de fósforo no solo.

Fonte: Adaptado de Prasad e Chakraborty (2019).

Ilustração: Sérgio Cobel da Silva.

O P-não lábil é considerado o maior de todos os *pools* e corresponde ao P-fixado (Leite et al., 2016). O elemento não está disponível para a absorção pelas raízes das plantas e compreende os minerais primários (fosfatos inorgânicos insolúveis) e os compostos orgânicos contendo P que não se mineralizam facilmente (Selhorst et al., 2024). O P-lábil é considerado o *pool* ativo e consiste do P adsorvido aos minerais secundários e à matéria orgânica, o qual se mineraliza facilmente. O P-solução é o menor dos três *pools* e compreende os fosfatos inorgânicos e uma pequena fração de P-orgânico (Alamãs et al., 2017). É a forma que está prontamente disponível para a absorção pelas plantas.

Estes três *pools* coexistem em equilíbrio um com o outro. Quando as plantas removem P da solução do solo, o elemento é repostado pelo *pool* ativo ou P-lábil (Haney et al., 2013). Similarmente, quando a concentração de P-lábil decresce, o nutriente é liberado do P-não lábil, que está fixado, para o *pool* ativo, mas de uma forma muito

lenta (Fernandes et al., 2015). As formas de P mais absorvidas pelas plantas são os íons ortofosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}), cuja disponibilidade depende do pH do solo.

Forma predominante	H_3PO_4	\leftrightarrow	H_2PO_4^-	\leftrightarrow	HPO_4^{2-}	\leftrightarrow	PO_4^{3-}
pH do meio	< 2	-	2 - 7	-	7 - 12	-	> 12

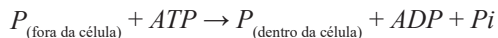
O pH interfere na quantidade de cargas positivas, ou seja, nos grupamentos protonados da superfície, e, como consequência, a adsorção de P deve ser máxima com baixos valores de pH. Com o aumento dessa variável, entretanto, diminui-se a presença do P na forma H_2PO_4^- em relação a HPO_4^{2-} , preferencialmente adsorvida, contrabalançando o decréscimo no potencial eletrostático do plano de adsorção (Viviani et al., 2010). A adubação com fertilizantes químicos aumenta temporariamente a concentração de P no solo disponível às plantas, suprimindo a necessidade pelo nutriente durante todo o ciclo da cultura. Entretanto, essa adubação deve ser sempre precedida de uma análise de solo, uma vez que a aplicação de P, além da necessidade das culturas, constitui um desperdício econômico (Miranda et al., 2002). Fósforo aplicado em excesso na adubação fica suscetível a perdas por escoamento superficial e erosão, podendo promover o crescimento de algas nos reservatórios hídricos, comprometendo a qualidade da água (Cortez, 2019).

O fósforo na planta

O fósforo é absorvido da solução do solo nas formas de H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-} , predominando a primeira. Antes que ocorra a absorção propriamente dita, é preciso ocorrer o contato do P com a raiz. Esse

contato se dá predominantemente pelo processo de difusão (cerca de 94%), governado pelo movimento do íon a favor de um gradiente de concentração (Sadegh-Zadeh et al., 2008). Diante dessa condição, o P só se movimenta no solo a curtas distâncias. Sendo assim, a aplicação de adubos fosfatados deve ser feita de forma localizada, próximo ao sistema radicular, de modo a favorecer a absorção.

Além disso, o P é absorvido de forma ativa em razão de ir contra um gradiente eletroquímico, ou seja, um gradiente de concentração e um gradiente elétrico entre as células das raízes e o meio exterior. O gradiente de concentração de P chega a ser até 1000 vezes maior dentro da célula em relação à solução do solo, e o gradiente elétrico ocorre em razão do citosol ser repleto de cargas negativas em relação ao apoplasto. Dessa forma, a absorção do P é feita por proteínas transportadoras localizadas na membrana plasmática, as quais, por sua vez, utilizam energia do ATP para vencer esse gradiente eletroquímico desfavorável e colocar o íon fosfato dentro da célula radicular.



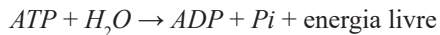
Depois de absorvido pelas raízes, o P encontra cinco possíveis destinos: (a) ingressa no compartimento metabólico (citoplasma celular e suas organelas), onde vai ser assimilado em compostos orgânicos; (b) uma pequena fração ingressa nas vias biossintéticas de lipídeos fosfatados, DNA e RNA, tornando-se componente estrutural da célula; (c) uma quantidade variável de P é perdida pela célula via efluxo, particularmente em condições de alto suprimento do nutriente no meio externo; (d) ocorre influxo e armazenamento no vacúolo para regular a homeostase de P inorgânico no interior da célula; e (e) o P é transportado para o xilema onde fará o transporte a longa distância para a parte aérea (Yang et al., 2023).

A redistribuição das folhas para outras partes da planta se dá exclusivamente na forma orgânica através do floema. Sendo prontamente móvel no floema, tanto no sentido ascendente como no descendente, as folhas novas são supridas não só pelo fosfato absorvido pelas raízes, mas também pelas formas orgânicas originadas das folhas mais velhas (Roch et al., 2019). Assim, plantas deficientes em P

demonstram primeiramente os sintomas de deficiência nas folhas mais velhas (Ferreira, 2012). Os compostos orgânicos fosfatados formados pelas células vegetais podem ser divididos em quatro grandes grupos:

a) Ésteres fosfóricos

São as trioses-fosfato e as hexoses-fosfato, como a frutose 1,5-bifosfato e os compostos intermediários do seu desdobramento. Nas ligações químicas desses compostos estão a energia necessária para mover todo o metabolismo vegetal. Cerca de 70% de todo P contido nesses ésteres vão formar apenas nove compostos: glicose-6-fosfato, adenosina tri-fosfato (ATP), uridina di-fosfato glicose (UDPG), ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), frutose-6-fosfato, uridina di-fosfato (UDP), manose-6-fosfato e uridina tri-fosfato (UTP) (Domingos et al., 2003). Quando a planta necessita de energia em alguma etapa dos seus processos metabólicos, a molécula de ATP sofre reação de hidrólise — quebra da molécula em presença de água. Por ser uma reação exergônica, libera alta quantidade de energia, cerca de 7 kcal mol⁻¹, de um dos fosfatos. Após a perda de um P, a molécula se transforma em adenosina di-fosfato (ADP):



O citoplasma das células vegetais contém ADP e Pi, resultantes da utilização metabólica do ATP. Na glicólise, parte da energia liberada é armazenada para formar ATP a partir da ligação entre o ADP e o Pi:

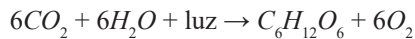


Portanto, o ADP em ligação com o Pi forma uma estrutura orgânica que contém três fosfatos, o ATP, o qual armazena energia temporariamente, pois a todo momento a célula precisa de combustível metabólico para desempenhar as suas funções (De Col et al., 2017).

b) Fosfolipídeos

São componentes das membranas biológicas, conferindo-lhes uma natureza lipídica. São formados por uma molécula de glicerol que se liga de um lado a um grupo fosfato, e do outro, a dois ácidos

graxos. Ligados ao grupo fosfato podem aparecer colina, serina, etanolamina ou inositol, constituindo os diversos tipos de fosfolipídios. Os ácidos graxos contêm entre 14 e 24 átomos de carbono, sendo geralmente um saturado e outro insaturado. Diferenças no comprimento da cadeia e no grau de saturação dos ácidos graxos influenciam diretamente na estrutura da membrana. A presença de duplas ligações provoca dobras na cadeia de carbono, acarretando um aumento na permeabilidade da membrana (Champeyroux et al., 2020). Cerca de 40% do total de fosfolipídeos das células fotossintetizantes estão contidos nos tilacoides, que são membranas altamente desenvolvidas, as quais contêm proteínas necessárias para o processo da fotossíntese:



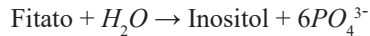
c) Nucleotídeos

São formados por base nitrogenada + pentose + um a três radicais de ácidos fosfóricos, podendo estar livres na forma de ATP ou ADP, ou combinados em ácidos nucleicos, DNA ou RNA. O DNA é uma macromolécula responsável por armazenar a informação genética da célula, e o RNA é a macromolécula responsável por copiar, carregar e traduzir a informação genética contida do DNA. A principal função do P nos nucleotídeos é formar uma ponte estrutural entre os nucleosídeos (base nitrogenada + pentose), que são as unidades do código genético. Os nucleotídeos se ligam através de ligações fosfodiésteres: o grupo fosfato ligado ao carbono 5 de um nucleosídeo liga-se ao carbono 3 de um nucleotídeo, unindo os grupos e formando uma cadeia polimérica. O começo da cadeia é representado por um trifosfato, conhecido como terminação 5', e o fim por um grupo OH, conhecido como terminação 3'. Essa reação é catalisada na célula pela DNA polimerase, na replicação do DNA, e pela RNA polimerase, na síntese de RNA (Watson; Crick, 1953).

d) Ácido fítico

Também chamado de fitato quando encontrado na forma de sais de cálcio, magnésio, ferro e zinco, é a principal forma de armazenamento

de fósforo nas plantas, encontrado principalmente nas sementes e importante durante o processo de germinação. A hidrólise do ácido fítico é realizada pela enzima fitase, uma fosfomonoesterase específica, que hidroliza um fósforo de cada vez, formando inositol e seis grupamentos fosfatos (Pi):



Durante a germinação da semente, o teor de ácido fítico diminui grandemente, mas os teores de fosfato inorgânico e mioinositol não acumulam, tendo em vista que são rapidamente metabolizados (Yuan et al., 2017).

Além disso, a energia produzida na planta durante os processos de fotossíntese e respiração é armazenada principalmente na forma de ATP, pois a ligação fosfatada altamente energética, quando quebrada, é utilizada nos processos metabólicos da célula como transporte de solutos através das membranas, crescimento da parte aérea e da raiz, absorção ativa e síntese de macromoléculas.

A acumulação de amido e açúcares em folhas de plantas deficientes em P resulta de uma menor exportação, pois a baixa produção de ATP limita o carregamento do floema. Além disso, há uma menor demanda de P nos pontos de crescimento. Também, quando o teor de P inorgânico (Pi) é baixo do citossol, a triose-fosfato produzida na fotossíntese não é transportada para fora do cloroplasto, uma vez que o transportador requer a entrada de um Pi nessa organela para a saída de uma molécula de triose-fosfato (Takemoto et al., 2018). Dessa forma, em vez de ser direcionada para o caminho biossintético da sacarose, a triose-fosfato vai para a síntese de amido nos cloroplastos (Lee et al., 2014).

O P também exerce a função de sinalizador celular, intermediando os sinais ambientais à resposta celular através de uma biomolécula conhecida como inositol-trifosfato (IP₃). Dessa forma, o IP₃ é um mensageiro secundário envolvido na transdução de sinal em células biológicas. Esse sinalizador é produzido pela ação da fosfolipase C sobre o fosfatidilinositol 4,5-bifosfato, que é um dos fosfolípídeos de membranas. O inositol 1,4,5-trifosfato é liberado para o citoplasma, onde irá produzir a liberação de íons cálcio de dentro dos estoques

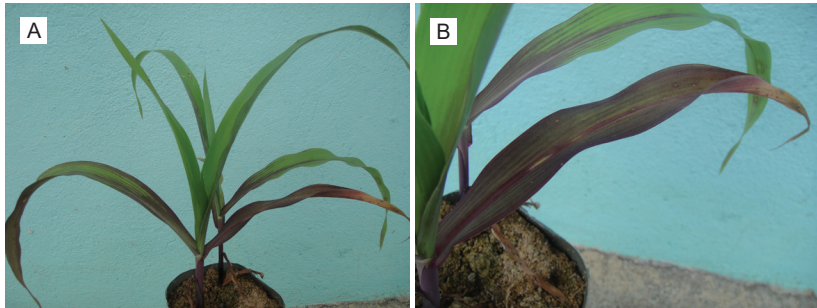
intracelulares, os retículos endoplasmáticos. Esses íons Ca^{2+} estimulam a atividade da calmodulina, que é uma das mais importantes proteínas das células eucariotas. Cada molécula de calmodulina se liga a quatro íons cálcio, alterando-se de configuração e permitindo a interação com outras proteínas da célula, como cinases e fosfatases, e alguns receptores de membranas, como canais iônicos e fatores de transcrição. Portanto, IP_3 e calmodulina regulam várias funções metabólicas das células vegetais (Inácio et al., 2011).

Diante do fato de que nos solos tropicais altamente intemperizados predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia de ligação e as formas orgânicas altamente estabilizadas física e quimicamente (Santos et al., 2008), e diante da importância do P na nutrição mineral das plantas, é frequente que culturas nos solos tropicais respondam bem à adubação fosfatada, aumentando os seus teores foliares bem como a produção e a produtividade (Silva et al., 2015). Também, plantas deficientes em P vão apresentar sintomas bem característicos, frequentemente relacionados às suas funções já vistas — armazenamento e transferência de energia, constituição dos ácidos nucleicos, estabilidade das membranas celulares e sinalização celular.

Sintomas de deficiência de fósforo

A Figura 5 a seguir mostra sintomas de deficiência de P em milho.

Os sintomas de deficiência de P no milho começam a aparecer quando as plantas ainda são jovens e ocorre inicialmente nas folhas mais velhas porque o P é um nutriente facilmente móvel no floema (Ferreira, 2012). O sintoma característico é uma cor roxo-avermelhado do limbo foliar, que ocorre em virtude do aumento na produção do pigmento antocianina, que, por sua vez, se acumula em um fundo de cor verde-escuro devido à alta concentração de clorofila causada pela redução na divisão e alongamento celular em plantas deficientes em P (Figura 5). Essa coloração pode se estender até o colmo da planta.



Fotos: Mágua Maria Macedo Nunes Costa

Figura 5. Sintomas de deficiência de fósforo (P) em plantas de milho (A); detalhe da coloração roxo-avermelhada nas folhas mais velhas (B).

Fonte: Adaptado de Ferreira (2012).

As antocianinas são pigmentos flavonoides sintetizados na face citoplasmática do retículo endoplasmático e armazenados nos vacúolos, onde são protegidos da oxidação pelo baixo pH. A deficiência de P deve desencadear o aumento da expressão de genes da via biossintética das antocianinas. Acredita-se que o principal papel desse pigmento seja a fotoproteção dos complexos coletores de luz do PSII, pela dissipação de energia térmica excedida pela absorção excessiva de fótons (Manetas; Buschmann, 2011).

A Figura 6, a seguir, mostra sintomas de deficiência de P em feijão-caupi.

Assim como no milho, os sintomas de deficiência de P no feijão-caupi começam a aparecer quando as plantas ainda são jovens e ocorre inicialmente nas folhas mais velhas porque o P é um nutriente facilmente móvel no floema. Inicialmente, o limbo foliar adquire uma tonalidade mais verde do que o habitual, devido à menor taxa de crescimento e ao acúmulo de clorofila. Com o decorrer da deficiência, começam a aparecer manchas pardas internervais nas folhas (Figura 6) por causa do acúmulo de amido nos cloroplastos (Ferreira, 2012).

A falta de P no citosol das células vegetais diminui a atividade do translocador de Pi na membrana do cloroplasto, o qual troca o fósforo inorgânico do citosol pela triose fosfato do cloroplasto (Takemoto et al., 2018). Dessa forma, a triose fosfato fica retida no estroma do

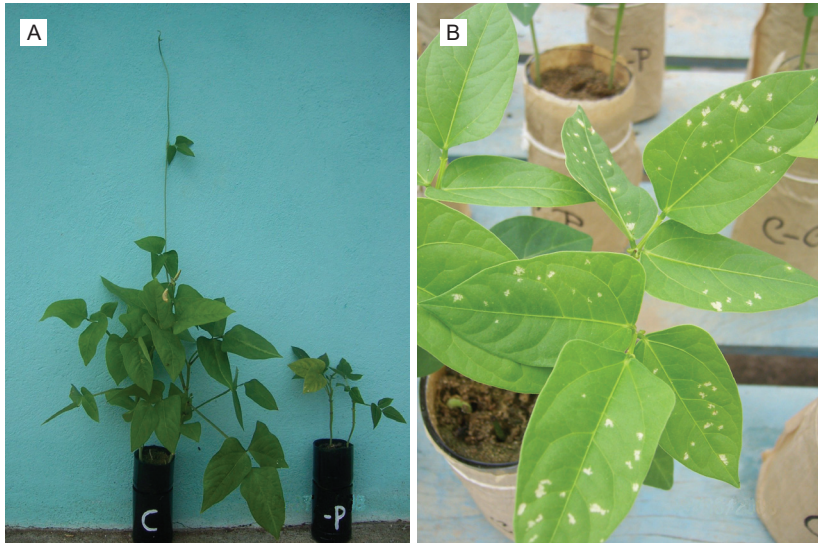


Figura 6. Sintomas de deficiência de fósforo (P) em plantas de feijão-caupi: Planta à esquerda com P e planta à direita sem P. Note a redução do crescimento (A); limbo foliar com manchas pardas internervais (B).

cloroplasto e vai ser usada na rota biossintética do açúcar de reserva, o amido, ao invés de na sacarose, a qual constitui o açúcar de transporte que, por sua vez, é usado principalmente nos pontos de crescimento da planta (Lee et al., 2014). Daí o retardo visível no porte da planta sob deficiência de P.

A Figura 7 a seguir mostra sintomas de deficiência de P em sorgo sacarino.

Nas folhas de sorgo sacarino, os sintomas de deficiência de P aparecem primeiramente nas folhas mais velhas e se caracterizam por manchas irregulares, começando de modo disperso pelas bordas, na porção mediana (Lima Filho, 2014). As manchas coalescem, estendendo-se ao longo do limbo, em três direções, para a bainha, nervura central e ponta (Lima Filho, 2020). Essas manchas têm coloração marrom e aparência enrugada. Evoluem para necrose retilínea ao longo da borda foliar (Figura 7). O crescimento da planta é reduzido.



Fotos: Oscar Fontão de Lima Filho

Figura 7. Sintomas de deficiência de fósforo (P) em folhas de sorgo sacarino. Manchas enrugadas de coloração marrom.

Fonte: Lima Filho (2014).

Esses sintomas de deficiência de P no sorgo sacarino têm a ver com as suas funções fisiológicas: aquisição, armazenamento e liberação de energia para o metabolismo da planta; constituinte de fosfoproteínas e fosfolípídeos e parte da estrutura dos ácidos nucleicos DNA e RNA que são responsáveis, respectivamente, pelo armazenamento e transferência da informação genética da célula (Marschner, 2022).

Na Figura 8, observam-se os sintomas de deficiência de P em pinhão-mansão.

No pinhão-mansão, a deficiência de P se caracteriza por crescimento reduzido ou nanismo conforme pode ser visualizado na planta à esquerda (Figura 8). Observa-se também um verde mais escuro em



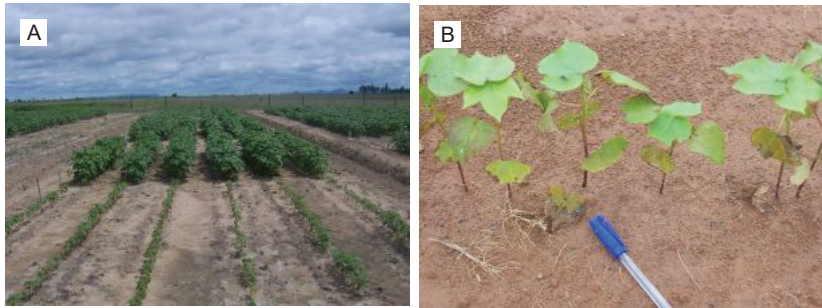
Figura 8. Sintomas de deficiência de fósforo (P) em plantas de pinhão-mansão. Redução do crescimento na planta à esquerda.

Fonte: Lima Filho (2020).

relação à planta da direita devido ao fato de a taxa de crescimento da planta sob falta de P decrescer mais em relação à síntese de clorofila (Santos et al., 2017).

A Figura 9 a seguir mostra sintomas de deficiência de P em algodão (Borin et al., 2013).

A deficiência de P reduz a fotossíntese, o acúmulo e a translocação dos carboidratos para as maçãs do algodoeiro. Como resultado, as plantas se desenvolvem muito lentamente (Figura 9A). As folhas mais velhas ficam avermelhadas, como consequência do acúmulo de antocianina, e com manchas ferruginosas nas bordas, evoluindo para o secamento. Além disso, pode haver o avermelhamento do caule (Borin et al., 2013) (Figura 9B). Em situação de deficiência severa, há queda de botões florais, redução do tamanho e baixa retenção das maçãs. Independentemente da forma como os sintomas são expressos, o resultado é a redução da produtividade (Borin et al., 2013).



Fotos: Gilvan Barbosa Ferreira

Figura 9. Sintomas de deficiência de fósforo (P) em plantas de algodoeiro. (A) diferença de crescimento entre plantas semeadas no mesmo dia. Plantas à frente com porte reduzido em comparação às de trás, adubadas com P e com crescimento normal. (B) deficiência severa de P - redução do crescimento, clorose, avermelhamento do caule e folhas mais velhas com manchas ferruginosas nas bordas, evoluindo para o secamento.

Fonte: Adaptado de Borin et al. (2013).

Sintomas de excesso de fósforo

Devido à sua dinâmica no solo, conforme visto no item 2, raramente ocorrem sintomas de excesso de P nas plantas cultivadas. Entretanto, Shane e Lambers (2006) encontraram pintas vermelho-escuras nas folhas mais velhas de *Grevillea crithmifolia* como sintoma de toxicidade desse nutriente. É pertinente citar que o excesso de P pode diminuir a absorção dos micronutrientes catiônicos (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} e Mn^{2+}) pelas raízes por causa da formação e precipitação de fosfatos metálicos e, caso os cátions consigam ser absorvidos, eles formarão, no xilema, fosfatos de Fe, Cu, Na e Mn, os quais reduzirão o transporte para a parte aérea, causando sintomas de deficiência desses micronutrientes (Cocozza et al., 2020). Outra hipótese é que pode haver efeito de diluição: com o maior crescimento da planta em decorrência da aplicação do P, podem aparecer sintomas de deficiência dos micronutrientes (Marschner, 2022).

Controle metabólico do fósforo nas plantas

Vários mecanismos foram desenvolvidos pelas plantas para permitir a aquisição e a utilização de P em solos deficientes no elemento. De acordo com Emami et al. (2018), eles podem ser agrupados em duas categorias: 1) Mecanismos que aumentam a absorção de P e 2) Mecanismos que aumentam a eficiência da planta em utilizar o P absorvido no seu metabolismo.

Os mecanismos que aumentam a absorção de P incluem maior crescimento radicular, mudança na arquitetura das raízes, proliferação de pelos radiculares, associação com micorrizas, maior produção e excreção de fosfatases, exsudação de ácidos orgânicos e aumento na quantidade de proteínas transportadoras de P. Já os mecanismos que aumentam a eficiência na utilização de P são redução da taxa de crescimento, maior produção de biomassa por unidade de P absorvido, retranslocação de P dentro da planta, diminuição de etapas metabólicas que requerem P e utilização de vias respiratórias alternativas (Pant et al., 2015).

Importância dos microrganismos do solo para a absorção de fósforo

Os microrganismos são habitantes do solo e, na rizosfera, contribuem com a disponibilidade de P às plantas, aumentando a superfície de absorção do sistema radicular pela associação com fungos micorrízicos e mineralizando e solubilizando o P através de fungos e bactérias (Tang et al., 2014).

As micorrizas são associações ou simbioses mutualísticas entre fungos e raízes de plantas. Os açúcares produzidos na fotossíntese

vão servir para alimentar os fungos e, em troca, estes últimos fornecem à planta hospedeira água e nutrientes minerais do solo (Slimani et al., 2024). Existem dois tipos de micorrizas: as ectomicorrizas e as endomicorrizas. As ectomicorrizas predominam em espécies arbóreas de gimnospermas e angiospermas de clima temperado, sendo bastante comuns em coníferas. Elas colonizam apenas os espaços entre as células, formando a chamada rede de Hartig, que se estende como um manto fúngico ao redor das raízes (Islam; Ohga, 2013).

As endomicorrizas ou micorrizas arbusculares são a simbiose mais comum entre plantas e microrganismos. Elas penetram nas células das raízes, formando arbúsculos, que são estruturas constituídas por hifas altamente especializadas, e que, por sua vez, promovem as trocas metabólicas entre o fungo e a planta hospedeira (Shahzad et al., 2020).

De acordo com Costa (2024), os fungos micorrízicos têm a capacidade de aumentar a absorção de P pela planta através dos seguintes mecanismos:

- As hifas são capazes de absorver o P do solo mais rapidamente do que as raízes.
- A produção de hifas exige menos energia da planta do que a produção de raízes.
- Hifas penetram em poros onde as raízes não conseguem, aumentando assim o volume de solo explorado.
- As hifas são mais efetivas do que as raízes em competir por P com os microrganismos de vida livre do solo.
- A cinética de absorção de P pelas hifas tem Km mais baixo em relação às raízes, possibilitando a absorção do elemento numa concentração no solo em que as raízes não seriam mais capazes (Silveira; Cardoso, 2004).

O benefício obtido com a colonização micorrízica varia com o suprimento de P: quando o P é limitante, a simbiose é inibida; quando

a disponibilidade de P é baixa, as micorrizas se proliferam e há aumento na absorção do elemento; e, em altas doses, o fungo torna-se um parasita da planta, não sendo mais compensadora a simbiose (Abdel-Fattah, 2014). As micorrizas também estimulam a fixação biológica do N_2 por rizobactérias, principalmente em virtude da maior absorção de P (Püschel et al., 2017).

Além das micorrizas, outros microrganismos solubilizadores de fosfato são representados por uma gama de bactérias e fungos do solo, em que predominam os gêneros *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Penicillium* e *Arpergillus*. Eles agem por meio da produção e liberação de ácidos orgânicos, que solubilizam formas precipitadas de P, como os fosfatos de Fe e Al nos solos ácidos, e os fosfatos de Ca nos solos alcalinos (Azevedo et al., 2017). Exemplos são os ácidos glucônico, oxálico e cítrico. Os microrganismos do solo também desempenham importante função na mineralização de formas orgânicas de P nos solos, tais como fitatos, fosfolipídeos e ácidos nucleicos. Enzimas do tipo fosfatase ácida e fitase atuam nessa mineralização (Pan et al., 2024).

Fontes de fósforo

Os fertilizantes fosfatados são a principal fonte de P para a agricultura, e seu uso está diretamente relacionado à sustentabilidade dos sistemas agrícolas. De acordo com Boschiero (2023), eles são produtos oriundos da extração, moagem e tratamento de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas que contenham o elemento químico na sua composição. Seu principal benefício é o fornecimento de P para a nutrição das plantas. As principais fontes são:

a) Superfosfato simples

Também conhecido como Super Simples ou SSP, é um composto químico cuja fórmula é $Ca(H_2PO_4)_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$. É obtido a partir do tratamento com ácido sulfúrico de rochas fosfatadas, como a apatita

e a fosforita. O resultado da acidificação é um fertilizante com cerca de 20% de P na forma de P_2O_5 , 20% de Ca e 12% de S, elementos considerados macronutrientes essenciais às plantas (Rohrig, 2023).

b) Superfosfato triplo

Também conhecido como Super Triplo ou STP, é um composto químico cuja fórmula é $Ca(H_2PO_4)_2$. É obtido a partir do tratamento com ácido fosfórico de rochas fosfatadas, como a apatita e a fosforita. O resultado da acidificação é um fertilizante com cerca de 40% de P na forma de P_2O_5 e 12% de Ca, elementos considerados macronutrientes essenciais às plantas. Não possui S na sua composição (Boschiero, 2024).

c) Monoamônio fosfato

Também conhecido como Fosfato Monoamônico ou MAP, é um composto químico cuja fórmula é $NH_4H_2PO_4$. É um fertilizante granulado de liberação rápida, obtido por meio do tratamento da amônia com ácido fosfórico. O resultado é um fertilizante com no mínimo 48% de P e 9% de N amoniacal. Possui um pH inicial entre 3,5 e 4,2, ou seja, acidifica o solo. Dessa forma, seu uso é mais limitado a solos neutros e alcalinos para evitar zonas tóxicas às plantas (Gazola et al., 2013).

d) Difosfato diamônico

Também conhecido como Fosfato Diamônico ou DAP, é um composto químico cuja fórmula é $(NH_4)_2HPO_4$. É um fertilizante granulado de liberação rápida obtido por meio do tratamento da amônia com ácido fosfórico. O resultado é um produto com no mínimo 45% de P e 17% de N amoniacal. Possui um pH de aproximadamente 7,5, ou seja, não acidifica o solo (Boschiero, 2024).

e) Fosfatos naturais

Fosfato Natural ou Fosfato Natural Reativo é um fertilizante fosfatado produzido a partir de rochas sedimentares altamente porosas

e reativas, formadas pela deposição de restos animais marinhos (Benício, 2023). Essas rochas são então moídas e concentradas, resultando em um adubo fosfatado menos solúvel em água, o que traz vantagem em relação às fontes anteriores, mais solúveis, uma vez que o P tem uma grande capacidade de se fixar no solo, tornando-se indisponível às culturas. Possui entre 12 e 13% de P_2O_5 (Machado, 2021b).

f) Termofosfatos

Termofosfatos são fertilizantes fosfatados obtidos pelo processo de calcinação (900 a 1200°C) ou fusão (1400 a 1500°C) da rocha fosfática, seguido por choque térmico que proporciona a quebra da estrutura cristalina, permitindo 94% da solubilização do P_2O_5 em ácido cítrico, percentagem muito superior aos outros fertilizantes fosfatados. Apresentam baixa solubilidade em água, o que faz do termofosfato uma fonte de P com liberação gradativa fomentada pela acidez natural da solução do solo ou influência da rizosfera. Essa liberação mais lenta possibilita sua menor adsorção às partículas do solo e, conseqüentemente, maior absorção pelas plantas e maior eficiência de uso do fertilizante ao longo do tempo (Faria et al., 2022).

g) Fosfatos alternativos

Entre os adubos fosfatados alternativos, destacam-se a escória de Thomas e a farinha de ossos. A escória de Thomas é um fertilizante fosfatado que é feito de subprodutos das indústrias de aço, obtendo o P a partir de minerais de ferro. Sua composição é $Ca_5(PO_4)_2SiO_2$ mais escórias em forma de óxidos (P_2O_5 , MgO, CaO, SiO_2 e micronutrientes). A farinha de ossos é um fertilizante orgânico rico em P e Ca, obtido a partir de ossos de animais autoclavados e moídos, o que evita a presença de microrganismos patogênicos. Por ser rica em Ca, também evita a acidez do solo, além de ser uma excelente fonte de P às plantas (Ferreira et al., 2020).

Adubação com fósforo

O P é considerado um nutriente insolúvel em água. Daí sua mobilidade no solo não ocorrer por fluxo de massa, que é o movimento do elemento a favor do gradiente de pressão da água, e sim por difusão, que é o movimento a favor do gradiente de concentração. Sendo assim, o movimento do P no solo é considerado muito baixo em relação a elementos como N e K, por exemplo, que se movimentam por fluxo de massa. Somado a isso, há a adsorção do P às argilas e aos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, tornando-o indisponível às raízes (Machado, 2021b). Diante desse contexto, a aplicação de adubos fosfatados deve ser feita de uma única vez, por ocasião do plantio, numa quantidade superior ao que as plantas realmente necessitam para completar o seu ciclo de vida e de forma que as raízes cresçam e encontrem o nutriente nas suas proximidades. É recomendado que a adubação não seja feita a lanço, e sim ao lado da semente ou abaixo dela. É recomendado que o pH do solo esteja na faixa de 5,5 a 6,5 para que o nutriente realmente fique disponível à absorção pelas raízes. Em pH alto, ocorre a formação de fosfato de cálcio e, pH baixo, formam-se fosfatos de ferro e alumínio, todos indisponíveis às plantas (Sousa et al., 2016).

A matéria orgânica do solo e a disponibilidade de fósforo

A matéria orgânica (MO) tem uma grande importância na disponibilidade de P no solo. Seus ácidos húmicos e fúlvicos apresentam bastante cargas negativas e competem pelo P com as cargas negativas das argilas e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, deixando o elemento livre na solução e prontamente disponível para a absorção pelas raízes (Santos et al., 2020). Além disso, ácidos húmicos e fúlvicos

formam complexos organometálicos com o Fe e o Al que mostram fraca interação, contribuindo ainda mais para a disponibilidade do P à planta. A MO ainda possui a capacidade de bloquear os sítios de ligação de P das argilas e dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, fazendo com que a disponibilidade do nutriente em solos não adubados com fertilizantes fosfatados dependa unicamente da ciclagem dos compostos orgânicos (Caron et al., 2015).

Durante a decomposição da MO, os microrganismos do solo produzem ácidos orgânicos que vão servir para solubilizar o P proveniente das formas insolúveis. Dessa forma, sistemas de manejo que servem para aumentar a MO também aumentam as formas de P-lábil do solo, os quais repõem imediatamente o P-solução, quando o elemento é absorvido pelas raízes (Figura 4). Entre as práticas agrícolas que aumentam a MO do solo, destacam-se: adubação orgânica, adubação verde, cobertura viva, cobertura morta, cultivo mínimo, plantio direto, sucessão e consórcio (Kimble, 2011).

Efeito do fósforo no solo sobre as culturas do algodão, do amendoim, do gergelim, da mamona e do sisal

Algodão

O algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) é a cultura de maior importância no mercado internacional de commodities. O desempenho da safra 2023/2024 de algodão, com uma colheita de mais de 3,7 milhões de toneladas, elevou o Brasil ao posto de maior produtor do mundo. O país também se tornou, oficialmente, e pela primeira vez na história, o maior exportador de algodão do mundo, superando os

Estados Unidos (Silva, 2024). Esse resultado se deu graças às pesquisas e inovações nas áreas de melhoramento genético, controle biológico, biotecnologia, mecanização agrícola, sanidade vegetal e sistemas de produção, possibilitando o aumento da produtividade de algodão a pequenos, médios e grandes cotonicultores do Brasil.

Uma das etapas mais importantes do sistema produtivo é a adubação. Plantas bem nutridas quantitativamente e proporcionalmente revelam maior potencial para enfrentar estresses bióticos e abióticos. Segundo Valdovino et al. (2022), o algodoeiro é uma planta exigente em fósforo para se desenvolver e produzir adequadamente. A cultura exige cerca de 25 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para cada tonelada de algodão em caroço produzida, porém, a resposta à adubação com fósforo também depende da área de contato, do adubo utilizado e do teor de P disponível no solo. O fósforo no algodoeiro estimula o crescimento das raízes, o florescimento e o desenvolvimento das maçãs. Também resulta em maior produtividade e melhor qualidade, como, por exemplo, o comprimento e a resistência da fibra.

Com o objetivo de estudar o efeito de biofertilizante e pó de rocha sobre o crescimento e a produtividade do algodoeiro cv. BRS 286, foi conduzido um experimento no Território do Sertão Alagoano, município de Água Branca (Costa et al., 2023). Os tratamentos foram representados por um fatorial 2 x 2, consistindo de duas doses de condicionador de solos (0 e 5%) constituído de ácidos húmicos e fúlvicos, e duas doses de pó de rocha (0 e 100 kg ha⁻¹), MB-4. Foi concluído que os ácidos húmicos e fúlvicos, ricos em carbono e nitrogênio, só serviram para desenvolver a parte vegetativa da planta, não tendo influência sobre a produtividade de pluma de algodão. Entretanto, o material rico em fósforo — pó de rocha — foi o que contribuiu para o aumento da produtividade. Infere-se que o fator que mais limita a produtividade de algodoeiro nas condições estudadas é o fósforo, devendo o agricultor dar bastante importância a esse fato. Ademais, os pós de rocha são abundantes e baratos na região do estudo, especialmente o MB-4, sendo seu uso de alta viabilidade para o algodão, pois eleva a relação custo:benefício.

Por ser um recurso limitado e não renovável, o suprimento de P pode se esgotar nos próximos 300 anos. Nesse contexto, a melhoria na eficiência de mobilização de P residual do solo bem como o aumento da superfície de absorção das raízes e da aquisição do nutriente aplicado via adubo é essencial ao manejo sustentável. O uso conjunto de fontes orgânicas e inorgânicas de P é considerado a melhor maneira de as raízes de algodoeiro terem acesso ao elemento, melhorando a capacidade de retenção de água, a capacidade de troca de cátions e a aeração do solo; a eficiência do uso do fósforo (UEP); a disponibilidade do P no solo; a germinação das sementes; a taxa de crescimento da planta e a produtividade.

Além disso, o uso de bactérias solubilizadoras de fosfato (BSP), inoculadas às sementes de algodão, aumenta a interação da rizosfera com as raízes, aumentando a absorção do P. As BSPs produzem ácidos orgânicos que reduzem o pH e liberam as formas indisponíveis de P, aumentando a UEP (Ali; Ahmad, 2021).

Amendoim

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) pertence à família Fabaceae, sendo considerada uma importante planta leguminosa consumida em todo o mundo devido à sua riqueza em calorias, óleos, proteínas e vitaminas. É originária da América do Sul, sendo já cultivada pelas populações indígenas antes da chegada dos colonizadores europeus. É consumido in natura, torrado, cozido ou industrializado. Seus subprodutos — óleo, farinha e farelo — são amplamente utilizados por possuírem alto teor de proteína (Souza; Ferrarezi Junior, 2022). No Brasil, a produtividade de amendoim na safra 2021/2022 foi de 744 mil toneladas, 24,6% a mais do que na safra anterior, tendo São Paulo como o estado de maior área cultivada, com 179 mil hectares (Companhia [...], 2022).

Uma das etapas mais importantes do sistema produtivo é a adubação. Plantas bem nutridas quantitativamente e proporcionalmente apresentam maior potencial para enfrentar estresses bióticos e

abióticos. Segundo Campos e Alecrim (2022), o amendoim responde eficientemente à adubação fosfatada, com algumas pesquisas apresentando aumento na produção de vagens e grãos em resposta a doses crescentes de P_2O_5 , entretanto a adubação deve ser precedida de análise de solo. Silva et al. (2008a), estudando o efeito da adubação fosfatada na cultura do amendoim (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de P_2O_5), observaram que houve aumento do número e do peso de vagens por planta e da massa de 100 sementes, além de redução na porcentagem de casca. O número de sementes por vagem e o teor de óleo não foram influenciados pelo fósforo.

Embora a planta de amendoim seja considerada rústica, a adubação fosfatada é uma importante ferramenta para se alcançar altas produtividades. O fornecimento de P favorece o desenvolvimento radicular, o acúmulo de reservas, o crescimento da planta e a formação de grãos. O amendoim tem facilidade em utilizar o P, principalmente em locais onde o solo é pobre nesse elemento, embora a eficiência nutricional varie de cultivar para cultivar. Pesquisas atuais com faixas de doses têm evidenciado aumento de até 49% na produtividade. Doses crescentes de 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P_2O_5 proporcionaram produtividades de até 6.500 kg ha⁻¹. Houve um aumento substancial na produção de vagens por planta, conseqüentemente de grãos; no número de grãos por vagem e no peso de 100 sementes. Entretanto, esse aumento não foi linear, seguindo uma curva em forma de parábola, decorrente da lei dos Incrementos Decrescentes (Campos; Alecrim, 2022).

Uma pesquisa foi conduzida em casa de vegetação por Hippler et al. (2011) para avaliar a interação entre fungos micorrízicos arbusculares nativos (FMA) e doses crescentes de P (0, 20, 40, 60 e 180 mg kg⁻¹) em plantas de amendoim. Concluiu-se que as doses crescentes de adubação fosfatada promoveram aumento no desenvolvimento das plantas. Os FMA promoveram a produção máxima de massa seca total do amendoim na dose estimada de 114,0 mg kg⁻¹ de P. A maior colonização radicular e eficiência micorrízica foram verificadas na dose 60 mg kg⁻¹ de P.

Gergelim

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma planta anual herbácea originária do continente africano, pertencente à família das pedaliáceas. Seu cultivo ocorre em cerca de 71 países, especialmente dos continentes asiático e africano, sendo Índia e China responsáveis por 70% da produção mundial de sementes dessa oleaginosa, que é estimada em 3,6 milhões de toneladas, obtidas em 7,5 milhões de hectares e com produtividade média de 478,2 kg ha⁻¹. O Brasil produz cerca de 16 mil toneladas, em uma área de 25 mil hectares e com rendimento em torno de 650 kg ha⁻¹ (Pontes et al., 2021).

O gergelim extrai do solo quantidades elevadas de fósforo (P), que variam conforme a produção, o estado nutricional, a variedade utilizada e a parte da planta colhida. Em geral, a planta precisa de 14 kg ha⁻¹ de P₂O₅ para produzir 1.000 kg ha⁻¹ de sementes. Isso empobrece o solo nesse elemento. Para garantir a produtividade de plantios posteriores, o P precisa ser repostado pela adubação. A planta de gergelim absorve pouco fósforo até o trigésimo dia após o plantio. A partir dessa data, a exigência da planta pelo nutriente cresce rapidamente e alcança a demanda máxima dos 60 aos 90 dias, decrescendo até o final do ciclo. Para obter-se maior eficiência na adubação fosfatada, devem ser levados em consideração a exigência da cultivar em P e o tipo de solo. Além disso, o P deve ser totalmente aplicado por ocasião do plantio (Arriel et al., 2001).

Nas plantas de gergelim, os sintomas de deficiência de fósforo são: plantas sem ramificações, de caules finos e de porte baixo; as folhas superiores apresentam coloração verde forte e as mais velhas ficam opacas, escuras e exibem uma coloração verde-acinzentada; ocorre necrose nas folhas mais velhas, que, em seguida, caem (Arriel et al., 2001). Uma pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar o efeito de diferentes níveis de adubação fosfatada (0, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅) no cultivo do gergelim. Houve aumento linear na altura das plantas, na altura de inserção da primeira cápsula, no número de cápsulas por planta, no número de sementes por cápsula, no peso de mil sementes e na produtividade por planta (Carneiro et al., 2016).

Mamona

A mamona (*Ricinus communis* L.) é uma espécie pertencente à família Euphorbiaceae, sendo considerada como uma planta tóxica. Originária da Etiópia, se espalhou pelos países do Oriente Médio, Índia e China. Os principais países produtores são Índia, Moçambique, China, Brasil, Mianmar e Etiópia, correspondendo a 97% do cultivo mundial. A mamona possui grande potencial para uso em diferentes condições ecológicas. Na maior parte das vezes, seu cultivo tem como objetivo a produção de óleo (Ergun, 2022).

A nutrição e a adubação da mamoneira exercem grande importância no processo produtivo. Dessa forma, se por um lado há grande necessidade de fertilizantes, por outro, os custos financeiros com adubação são elevados, fazendo-se necessário otimizar cada vez mais o uso desses insumos, com a finalidade de se obter maior rendimento com o menor custo possível. Com o aumento de produtividade esperado, é possível pagar o financiamento do investimento tecnológico com a cultura e aumentar a renda líquida do produtor. A adubação mineral com 120 kg ha⁻¹ de fósforo incrementa a produtividade de sementes em 62,5% (Sofiatti et al., 2010).

Um estudo foi realizado em um Planossolo Háplico, em Pelotas, RS, para estudar a resposta das cultivares de mamoneira 'AL Guarany 2002' e 'Lyra' a cinco doses de P (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Os teores foliares de cálcio e boro na cv. 'Lyra' diminuíram com o aumento da adubação fosfatada. A dose de P influenciou o teor de nitrogênio, que aumentou com a aplicação de até 56 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e de ferro, que decresceu com o uso de até 65 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A adubação fosfatada aumentou a produtividade de grãos. Para a cv. 'Lyra', as doses de máxima eficiência técnica e econômica foram, respectivamente, 90 e 78 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e, para a 'AL Guarany 2002', 156 e 134 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Oliveira et al., 2010).

Sisal

A *Agave sisalana* Perrine, popularmente conhecida como sisal, é uma planta herbácea monocotiledônea pertencente ao gênero *Agave*. Esse gênero é originário da América Central e do Norte e, atualmente, possui ocorrência em países tropicais e subtropicais como Brasil, Tanzânia, Quênia, Madagascar, China e México. A fibra de suas folhas é usada para produzir tapetes, cordas e fios, enquanto outras partes da planta abastecem a produção de celulose, ração animal e até fibra de vidro. O sisal possui alta capacidade de suportar condições ambientais secas devido à sua propriedade de conservar água em suas folhas. Por isso, a agaveicultura ocupa uma extensa área na região semiárida do Nordeste. O Brasil lidera a produção e exportação mundial de sisal, e cerca de 80% da produção brasileira é direcionada ao mercado externo. O plantio está concentrado no estado da Bahia, responsável por 94,2% da área cultivada no país (Leite et al., 2023).

Os agaves são plantas perenes que têm um seu ciclo produtivo entre 08 e 12 anos, sendo xerófitas; sua anatomia e metabolismo estão adaptados para utilizar eficientemente a água e, portanto, estão capacitadas para viver em condições áridas e semiáridas (Queiroga, 2021). A deficiência de fósforo pode limitar a produtividade do sisal no Brasil, diminuindo sua rentabilidade e tornando a cultura pouco lucrativa. Uma das alternativas para a reposição de parte do P extraído pela cultura é a restituição do resíduo do desfibramento, prática que é recomendada há muito tempo (Severino et al., 2023). Como apenas 3 a 5% da folha corresponde a fibra aproveitável, constituída de celulose, os 95 a 97% restantes contêm a maior parte dos nutrientes extraídos anualmente pela cultura. Uma outra alternativa está em fazer a adubação fosfatada conforme os resultados da análise do solo, aplicando entre 30 e 70 kg ha⁻¹ de P (Silva et al., 2008b).

Considerações finais

Considerando que o P é um macronutriente que exerce importantes funções nas plantas, fazendo parte de moléculas essenciais

ao metabolismo como o ATP, o DNA, o RNA, os fosfolípidos e o IP_3 ; estimula o desenvolvimento das raízes e garante boa formação de frutos e sementes; e tem uma baixa eficiência nutricional nas regiões tropicais com seus solos altamente intemperizados — o que faz com que o produtor aplique uma quantidade de P bem superior ao que as plantas necessitam para o seu crescimento e produção —, é importante que instituições de pesquisa agropecuária deem ênfase às pesquisas relacionadas ao fósforo nos sistemas agrícolas.

Há uma ampla variedade de temas a serem desenvolvidos para aumentar a eficiência nutricional das fontes de P. Nesse contexto, temas como melhores métodos de aplicação para as mais diversas culturas, interação do P com outros nutrientes no solo, bioinsumos como fontes de P, nutrição fosfatada e resistência de plantas a fitopatógenos, utilização do melhoramento convencional e da biotecnologia para o desenvolvimento de materiais que tenham maior eficiência nutricional nesse elemento e manejo de P em sistemas de produção de base ecológica e/ou familiar são pertinentes na atualidade para as sustentabilidades ambiental, social e econômica.

Referências

ABDEL-FATTAH, G. M.; ASRAR, A. A.; AL-AMRI, S. M.; ABDEL-SALAM, E. M. Influence of arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertilization on the gas exchange, growth and phosphatase activity of soybean (*Glycine max L.*) plants. **Photosynthetica**, v. 52, n. 4, p. 581-588, 2014.

AHMAD, M.; ISHAQ, M.; SHAH, W. A.; ADNAN, M.; FAHAD, S.; SALEEM, M. H.; KHAN, F. U.; MUSSARAT, M.; KHAN, S.; ALI, B.; MOSTAFA, Y. S.; ALAMRI, S.; HASHEM, M. Managing phosphorus availability from organic and inorganic sources for optimum wheat production in calcareous soils. **Sustainability**, v. 14, n. 13, 7669, 2022.

ALAMÁS, Á. R.; SAEVARSSON, H. T.; KROGSTAD, T. The partitioning of P in soil determines the fluxes and deliveries of labile P in soil solution. **Geoderma**, v. 306, p. 135-143, 2017.

ALI, H.; AHMAD, M. I. Agronomic efficiency and profitability of cotton on integrated use of phosphorus and plant microbes. **Brazilian Journal of Biology**, v. 81, n. 2, p. 484-494, 2021.

ARRIEL, N. H. C.; FIRMINO, P. de T.; BELTRÃO, N. E. de M.; SOARES, J. J.; ARAÚJO, A. E. de; SILVA, A. C.; FERREIRA, G. B. **A cultura do gergelim**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. 72 p. (Embrapa Informação Tecnológica. Coleção Plantar, 50).

AUSTRUY, A.; SHAHID, M.; XIONG, T.; CASTREC, M.; PAYRE, V.; NIAZI, N. K.; SABIR, M.; DUMAT, C. Mechanisms of metal-phosphates formation in the rhizosphere soils of pea and tomato: environmental and sanitary consequences. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 666-678, 2014.

AZEVEDO, L. C. B.; BERTINI, S. C. B.; FERREIRA, B. G.; CARNEIRO, I. S. M.; DORNELLES, M. S. Liquid organic fertilizer sprayed on shoots of *Phaseolus vulgaris* stimulates arbuscular mycorrhiza colonization and phosphate solubilizing microorganisms in soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 10, p. 1382-1389, 2017.

BENÍCIO, L. P. **O que é fosfato natural reativo e quais características o diferem das demais rochas**. São Paulo: OCP Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.ocpbrasil.com.br/pt-br/o-que-e-fosfato-natural-reativo-e-quais-caracteristicas-o-diferem-das-demais-rochas>. Acesso em: 30 jul. 2024.

BORIN, A. L. D. C.; FERREIRA, G. B.; CARVALHO, M. da C. S.; FERREIRA, A. C. de B.; BOGIANI, J. C. **Diagnose visual de deficiências nutricionais do algodoeiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2013. 11 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 134).

BOSCHIERO, B. N. **Fosfato (P_2O_5): quanto tempo durará as reservas minerais de rocha fosfática?** Piracicaba: Agroadvance, 2023. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-fosfato-p2o5-reservas-rocha-fosfatica/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

BOSCHIERO, B. N. **Superfosfato simples, superfosfato Triplo, MAP e DAP: veja a composição e diferenças dessas 4 fontes de fertilizantes fosfatados**. Piracicaba: Agroadvance, 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-superfosfato-simples-triplo-map-e-dap/>. Acesso em: 16 ago. 2024.

CAMPOS, A. A. V.; ALECRIM, A. O. **Manejo da adubação fosfatada em amendoim**. Uberlândia: Campos & Negócios, 2022. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/manejo-da-adubacao-fosfatada-em-amendoim/#:~:text=O%20fornecimento%20de%20f%C3%B3sforo%20para,%2C%20divis%C3%A3o%20celular%2C%20entre%20outras>. Acesso em: 20 ago. 2024.

CARNEIRO, J. S. da S.; SILVA, P. S. S.; FREITAS, G. A. de; SANTOS, A. C. dos; SILVA, R. R. da. Resposta do gergelim à adubação com esterco bovino e doses de fósforo no sul de Tocantins. **Revista Scientia Agraria**, v. 17, n. 2, p. 41-48, 2016.

CARON, V. C.; GRAÇAS, J. P.; CAMARGO e CASTRO, P. R. **Condicionadores do solo: ácidos húmicos e fúlvicos**. Piracicaba: ESALQ, 2015. 46 p. (ESALQ. Série Produtor Rural, 58).

CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 69-74, 2000.

CHAMPEYROUX, C.; STOOFF, C.; RODRIGUEZ-VILLALON, A. Signaling phospholipids in plant development: small couriers determining cell fate. **ScienceDirect**, v. 57, p. 61-71, 2020.

CHEN, Y.; SUN, R.; SUN, T.; CHEN, P.; YU, Z.; DING, L.; JIANG, Y.; WANG, X.; DAI, C.; SUN, B. Evidence for involvement of keystone fungal taxa in organic phosphorus mineralization in subtropical soil and the impact of labile carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 148, e107900, 2020.

COCOZZA, C.; BRILLI, F.; PIGNATTELLI, S.; POLLASTRI, S.; BRUNETTI, C.; GONNELLI, C.; TOGNETTI, R.; CENTRITTO, M.; LORETO, F. The excess of phosphorus in soil reduces physiological performances over time but enhances prompt recovery of salt-stressed *Arundo donax* plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 151, p. 556-565, 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIEMNTO. **Acompanhamento da safra de grãos**. Brasília: nono levantamento, 2022 (Safra 2021/2022). Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/>

boletim-da-safra-de-graos/9o-levantamento-safra-2021-22/9o-levantamento-safra-2021-22. Acesso em: 20 dez. 2022.

CORTEZ, H. Uso excessivo de fertilizantes fosfatados pode reduzir as funções microbianas críticas para a saúde das culturas. **EcoDebate**, 2019. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2019/03/20/uso-excessivo-de-fertilizantes-fosfatados-pode-reduzir-as-funcoes-microbianas-criticas-para-a-saude-das-culturas/>. Acesso em: 8 ago. 2024.

COSTA, A. da R.; SILVA JUNIOR, M. L.; KERN, D. C.; RUIVO, M. de L. P.; MARICHAL, R. Forms of soil organic phosphorus at black earth sites in the Eastern Amazon. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 1-12, 2017.

COSTA, M. M. M. N. **Micorrizas**: da associação mutualística com algodoeiro aos benefícios. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2024. 32 p. (Embrapa Algodão. Documentos, 296).

COSTA, M. M. M. N.; MEDEIROS, J. da C.; PEREIRA, J. R.; SABOYA, R. de C. C.; SANTOS, J. W. dos. **Adubação com biofertilizante e pó de rocha para o algodoeiro herbáceo em consórcio agroecológico com culturas alimentares e forrageiras**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2023. 20 p. (Embrapa algodão. Boletim de Pesquisa, 112).

DE COL, V.; FUCHS, P.; NIETZEL, T.; ELSÄSSER, M.; VOON, C. P.; CANDEO, A.; SEELIGER, I.; FRICKER, M. D.; GREFEN, C.; MØLLER, I. M.; BASSI, A.; LIM, B. L.; ZANCANI, M.; MEYER, A. J.; COSTA, A.; WAGNER, S.; SCHWARZLÄNDER, M. ATP sensing in living plant cells reveals tissue gradients and stress dynamics of energy physiology. **eLife**, v. 6, e26770, 2017.

DOMINGOS, J. B.; LONGHINOTTI, E.; MACHADO, V. G.; NOME, F. A química dos ésteres de fosfato. **Química Nova**, v. 26, n. 5, p. 745-753, 2003.

EMAMI, S.; ALIKHANI, H. A.; POURBABAEI, A. A.; ETESAMI, H.; ZADEH, B. M.; SARMADIAN, F. Improved growth and nutrient acquisition of wheat genotypes in phosphorus deficient soils by plant growth-promoting rhizospheric and endophytic bacteria. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 64, n. 6, p. 719-727, 2018.

ERGUN, Z. The effects of plant growth substances on the oil content and fatty acid composition of *Ricinus communis* L.: an in vitro study. **Molecular Biology Reports**, v. 49, n. 6, p. 5241-5249, 2022.

FARIA, L. de A.; PANTOJA, R. V. de L.; SANTOS, M. V. V. dos.

Termofosfato: você sabe o que é? Uberlândia: Campos & Negócios, 2022. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/termofosfato-voce-sabe-o-que-e/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

FERNANDES, D. M.; GROHSKOPF, M. A.; GOMES, E. R.; FERREIRA, N. R.; BULL, L. T. Fósforo na solução do solo em resposta à aplicação de fertilizantes fluidos mineral e organomineral. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 14-27, 2015.

FERREIRA, E.; SATURNINO, K. C.; SANTOS, T. R. dos. **Farinha de ossos calcinada:** alternativa tecnológica para calagem e fosfatagem em solos tropicais? Porto Velho: Edufro, 2020. 123 p.

FERREIRA, M. M. M. Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 1010. **Revista Agro@ambiente**, v. 6, n. 1, p. 74-83, 2012.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BYER, C.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum**, v. 36, n. 3, p. 379-387, 2014.

GAZOLA, R. de N.; BUZETTI, S.; DINALLI, R. P.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; CELESTRINO, T. de S. Efeito residual da aplicação de fosfato monoamônio revestido por diferentes polímeros na cultura de milho. **Revista Ceres**, v. 60, n. 6, p. 876-884, 2013.

HANEY, R. L.; WHITE, M. J.; ARNOLD, J. G.; HANEY, E. B.; HARMEL, R. D. Re-defining and quantifying inorganic phosphate pools in the soil and water assessment tool. **Journal of Social Science and Environmental Management**, v. 4, n. 8, p. 155-162, 2013.

HAWKINS, J. M. B.; VERMEIREN, C.; BLACKWELL, M. S. S.; DARCH, T.; GRANJER, S. J.; DUNHAM, S. J.; HERNANDEZ-ALLICA, J.; SMOLDERS, E.; McGRATH, S. The effect of soil organic matter on long-term availability of phosphorus in soil: Evaluation in a biological P mining experiment. **Geoderma**, v. 423, e115965, 2022.

HIPPLER, F. W. R.; MOREIRA, M.; DIAS, N. M. S.; HERMANN, E. R. Fungos micorrízicos arbusculares nativos e doses de fósforo no

desenvolvimento do amendoim RUNNER IAC 886. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 3, p. 605-610, 2011.

INÁCIO, M. C.; SILVA, E. de S. da; SOUZA, M. E. de; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Mensageiros secundários relacionados à ação dos hormônios vegetais. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 17, n. 4, p. 438-446, 2011.

ISLAM, F.; OHGA, S. Effects of media formulation on the growth and morphology of ectomycorrhizae and their association with host plant. **ISRN Agronomy**, v. 2013, 12 p., 2013.

KALKHAJEH, Y. K.; HUANG, B.; HU, W. Impact of preferential flow pathways on phosphorus leaching from typical plastic shed vegetable production soils of China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 307, e107218, 2021.

KIMBLE, J. Develop agricultural strategies to increase soil carbon sequestration and reducing greenhouse gases emission. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1222-1232, 2011.

LEE, S-K.; EOM, J-S.; VOLL, L. M.; PRASCH, C. M.; PARK, Y-L.; HAHN, T-R.; HÁ, S-H.; NA, G.; JEON, J. S. Analysis of a triose phosphate/ phosphate translocator-deficient mutant reveals a limited capacity for starch synthesis in rice leaves. **Molecular Plant**, v. 7, n. 11, p. 1705-1708, 2014.

LEITE, A. C. N.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. da; SILVA JUNIOR, J. M. da. Prospecção tecnológica e mapeamento do sisal e seus subprodutos (1889–2022). **Cadernos de Prospecção**, v. 16, n. 5, p. 1700-1714, 2023.

LEITE, J. N. F.; CRUZ, M. C. P. da; FERREIRA, M. E.; ANDRIOLI, I.; BRAOS, L. B. Frações orgânicas e inorgânicas do fósforo no solo influenciadas por plantas de cobertura e adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 11, p. 1881-1889, 2016.

LIMA FILHO, O. F. de. **Desordens Nutricionais em Plantas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2020. 26 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Comunicado Técnico, 257).

LIMA FILHO, O. F. de. **Guia de diagnose visual de deficiências nutricionais em sorgo-sacarina**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 14 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular Técnica, 31).

LIU, J.; YANG, J.; LIANG, X.; ZHAO, Y.; CADE-MENUN, B. J.; HU, Y. Molecular speciation of phosphorus present in readily dispersible colloids from agricultural soils. **Soil Science Society of America journal**, v. 78, p. 47-53, 2014.

MACHADO, B. de A. **O que é a prática da fosfatagem?** Piracicaba: Agroadvance, 2021a. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-fosfatagem/>. Acesso em: 30 jul. 2024.

MACHADO, B. de A. Reações do Fósforo no solo e práticas para minimizar efeitos. Piracicaba: Agroadvance, 2021b. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-reacoes-do-fosforo-no-solo-e-praticas/>. Acesso em: 20 jul. 2023.

MACHADO, G. B. **Decomposição da matéria orgânica – como funciona?** Belém: Portal do Biogás, 2023. Disponível em: <https://portaldobiogas.com/decomposicao-da-materia-organica/>. Acesso em: 8 ago. 2024.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E. de. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v. 8, n. 1, p. 1-7, 2012.

MANETAS, Y.; BUSCHMANN, C. The interplay of anthocyanin biosynthesis and chlorophyll catabolism in senescing leaves and the question of photosystem II photoprotection. **Photosynthetica**, v. 49, n. 4, p. 515-522, 2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 4. ed. New York: Academic Press, 2022. 672 p.

MIRANDA, L. N. de; AZEVEDO, J. A. de; MIRANDA, J. C. C. de; GOMES, A. C. Calibração de métodos de análise de fósforo e resposta do feijão ao fósforo no sulco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 11, p. 1621-1627, 2002.

NOGALSKA, A.; SKWIERAWSKA, M.; ZALUSZNIIEWSKA, A. Effect of meat and bone meal (MBM) and *Bacillus subtilis* on the content of nitrogen and phosphorus in soil and white mustard biomass. **Agricultural and Food Science**, v. 27, n. 4, p. 275-282, 2018.

OLIVEIRA, J. P. M. de; SCIVITTARO, W. B.; CASTILHOS, R. M. V.; OLIVEIRA FILHO, L. C. I. Adubação fosfatada para cultivares de mamoneira no Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, n. 8, p. 1835-1839, 2010.

PACHECO, V. **Produção agropecuária brasileira bate recorde histórico**. Joinville: Becomex, 2023. Disponível em: <https://becomex.com.br/producao-agropecuaria-recorde-historico-brasil/>. Acesso em: 23 jul. 2023.

PAN, C.; SUN, C.; QU, X.; YU, W.; GUO, J.; YU, Y.; LI, X. Microbial community interactions determine the mineralization of soil organic phosphorus in subtropical forest ecosystems. **Microbiology Spectrum**, v. 12, n. 3, e01355-23, 2024.

PANT, B-D.; PANT, P.; ERBAN, A.; HUHMANN, D.; KOPKA, J.; SCHEIBLE, W-R. Identification of primary and secondary metabolites with phosphorus status-dependent abundance in *Arabidopsis*, and of the transcription factor PHR1 as a major regulator of metabolic changes during phosphorus limitation. *Plant, Cell and Environment*, v. 38, n. 1, p. 172-187, 2015.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 120, 2019.

PEREIRA, D. S.; COSTA, Y. C. S. da; CARVALHO, L. B. de. O elemento P: formas e dinâmica em solos tropicais. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 5, 2021.

PONTES, S. F.; MATOS, R. R. S. S.; CORDEIRO, K. V.; SOUSA, M. O.; CARDOSO, J. P. S.; OLIVEIRA, P. S. T.; SILVA, T. F.; SANTOS, J. F.; SILVA, I. A. Utilização de substratos alternativos e substâncias húmicas para produção de mudas de gergelim. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 2, p. 35-45, 2021.

PRASAD, R.; CHAKRABORTY, D. **Phosphorus basics**: understanding phosphorus forms and their cycling in the soil - extension, 2019. Disponível em: <https://www.aces.edu/blog/topics/crop-production/understanding-phosphorus-forms-and-their-cycling-in-the-soil/>. Acesso em: 24 jul. 2023.

PÜSCHEL, D.; JANOUŠKOVÁ, M.; VOŘÍŠKOVÁ, A.; GRYNĐLEROVÁ, H.; VOSÁTKA, M.; JANSKA, J. Arbuscular mycorrhiza stimulates biological

nitrogen fixation in two *Medicago* spp. through improved phosphorus acquisition. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 390, 2017.

QUEIROGA, V. de P.; MEDEIROS, J. da C.; SILVA, O. R. R. F. da; FRANCO, C. F. de O. (ed.). **Sisal (*Agave sisalana*, Perrine)**: tecnologias de plantio e utilização. 1. ed. Campina Grande: AREPB, 2021. 217 p.

REZANIA, S.; KAMYAB, H.; RUPANI, P. F.; PARK, J.; NAWROT, N.; WOJCIECHOWSKA, E.; YADAV, K. K.; GHAHROUD, M. L.; MOHAMMADI, A. A.; THIRUGNANA, S. T.; CHELLIAPAN, S.; CABRAL-PINTO, M. M. S. Recent advances on the removal of phosphorus in aquatic plant-based systems. **Environmental Technology and Innovation**, v. 24, e101933, 2021.

ROCH, G. V.; MAHARAJAN, T.; CEASAR, S. A.; IGNACIMUTHU, S. The role of PHT1 family transporters in the acquisition and redistribution of phosphorus in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 38, n. 3, p. 171-198, 2019.

ROHRIG, B. **Saiba o que é e para que serve o superfosfato simples.**

Porto Alegre: Aegro, 2023. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/superfosfato-simples/#:~:text=O%20super%20simples%2C%20tamb%C3%A9m%20conhecido,c%C3%A1lcio%20e%2010%25%20de%20enxofre>. Acesso em: 16 de ago. 2024.

SADEGH-ZADEH, F.; SAMSURI, A. W.; SEH-BARDAN, B. J. Movement of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in undisturbed soil columns as affected by soil compaction. **Journal of Soil Science**, v. 3, n. 3, p. 157-163, 2008.

SANTOS, A. T. dos; VELHO, A. E.; FREITAS, T. S. de. **Fósforo e suas interações com a matéria orgânica.** Portão: ILSA, 2020. Disponível em: <https://ilsabrasil.com.br/fosforo-e-suas-interacoes-com-a-materia-organica/>. Acesso em: 29 de julho de 2024.

SANTOS, D. R. dos; GATIBONI, L. C.; KAMINSKY, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, E. F.; MACEDO, F. G.; ZANCHIM, B. J.; LIMA, G. P. P.; LAVRES, J. Prognosis of physiological disorders in physic nut to N, P, and K deficiency during initial growth. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 115, p. 249-258, 2017.

SELHORST, B. S.; SCHLINDWEIN, J. A.; PETERNELLA, W. S. Study of organic and inorganic forms of phosphorus in the soil under management systems and cropping successions. **Open Access Library Journal**, v. 11, e11318, 2024.

SEVERINO, L. S.; FRANCO, C. F. de O.; SOUSA, M. F. **Proposta de um modelo de produção sustentável e competitivo para o sisal brasileiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2023. 31 p. (Embrapa Algodão. Documentos, 289).

SHAHZAD, F.; ASGHAR, H. N.; MUSHTAQ, Z.; HADAYAT, A.; ZUHRA, N.; AHMAD, R.; ALI, M. A. Role of endomycorrhizae, rhizobacteria and compost to improve phosphorus availability in onion. **Asian Journal of Agriculture and Biology**, v. 8, n. 2, p. 194-200, 2020.

SHANE, M. W.; LAMBERS, H. Systemic suppression of cluster-root formation and net P-uptake rates in *Grevillea crithmifolia* at elevated P supply: a proteacean with resistance for developing symptoms of 'P toxicity'. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 413-423, 2006.

SILVA, F. M. O.; SOFIATTI, V.; DUTRA, I. C.; SILVA, D. M. A.; SUASSUNA, T. M. F. **Efeito da adubação mineral na cultura do amendoim**. In: BELTRÃO, N. E. de; SILVA, C. A. D. da; SANTOS, J. W. dos; LIMA, M. M. de A.; OLIVEIRA, E. M. de; SILVA, I. C. da. III Encontro de Produção Científica da Embrapa Algodão - EPC 2008. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008a. p. 16. (Embrapa Algodão. Documentos, 213).

SILVA, J. T. A. da; SIMÃO, F. R.; ALVES, J. J. M. Desenvolvimento vegetativo e produção do pinhão-manso em resposta à adubação fosfatada. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 319-322, 2015.

SILVA, M. A. da. **Brasil ultrapassa EUA e já é maior exportador de algodão do mundo**. Brasília: Agência Brasil, 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-07/brasil-ultrapassa-eua-e-ja-e-maior-exportador-de-algodao-do-mundo#:~:text=ouvir%3A,mundo%2C%20superando%20os%20Estados%20Unidos>. Acesso em: 19 de agosto de 2024.

SILVA, O. R. R. F. da; COUTINHO, W. M.; CARTAXO, W. V.; SOFIATTI, V.; SILVA FILHO, J. L. da; CARVALHO, O. S.; COSTA, L. B. da. **Cultivo do sisal no Nordeste brasileiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008b. 24 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 123).

SILVEIRA, A. P. D. da; CARDOSO, E. J. B. N. Arbuscular mycorrhiza and kinetic parameters of phosphorus absorption by bean plants. **Scientia Agrícola**, v. 61, n. 2, p. 203-209, 2004.

SLIMANI, A.; AIT-EL-MOKHTAR, M.; BEM-LAOUANE, R.; BOUTASKNIT, A.; ANLI, M.; ABOURAICHA, EI F.; OLFDOU, K.; MEDDICH, A.; BASLAM, M. Signals and machinery for mycorrhizae and cereal and oilseed interactions towards improved tolerance to environmental stresses. **Plants**, v. 13, n. 6, 826, 2024.

SOFIATTI, V.; GONDIM, T. M. de S.; SEVERINO, L. S.; FERREIRA, G. B.; VASCONCELOS, R. de A.; SILVA, F. M. de O.; SILVA, V. N. B.; SILVA, D. M. A. Adubação da mamoneira da cultivar BRS Nordestina em condições de sequeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 410-417.

SOUSA, D. M. G. de; NUNES, R. de S.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2016. 10 p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 26).

SOUZA, G. de P.; FERRAREZI JUNIOR, E. Produção de amendoim no estado de São Paulo e sua viabilidade. **Interface Tecnológica**, v. 19, n. 2, p. 620-629, 2022.

TAKEMOTO, M.; LEE, Y.; ISHITANI, R.; NUREKI, O. Free energy landscape for the entire transport cycle of triose-phosphate/phosphate translocator. **Structure**, v. 26, n. 9, p. 1284-1296, 2018.

TANG, X.; BERNANRD, L.; BRAUMAN, A.; DAUFRESNE, T.; DELEPORTE, P.; DESCLAUX, D.; SOUCHE, G.; PLACELLA, S. A.; HINSINGER, P. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 86-93, 2014.

TOLEDO, M. C. M. de; PEREIRA, V. P. A variabilidade de composição da apatita associada a carbonatitos. **Revista do Instituto Geológico**, v. 22, n.1/2, p. 27-64, 2001.

VALDOVINO, V. C.; COSSA, G. E.; PERCIANI, M. J. F.; GORRI, J.; LUCON, L. C. R. **Solução para deficiência de fósforo no algodoeiro**. Uberlândia: Campos & Negócios, 2022. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/solucao-para-deficiencia-de-fosforo-no-algodoeiro/>. Acesso em: 20 ago. 2024.

VALENCIA-GICA, R. B.; YOST, R. S.; PORTER, G. S.; PATNAIK, R. Retention, accumulation, and movement of phosphorus in a mollisol soil irrigated with dairy effluent in a tropical environment. **Soil Science**, v. 175, n. 10, p. 500-510, 2010.

VIVIANI, C. A.; MARCHETTI, M. E.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; GONÇALVES, M. C. Disponibilidade de fósforo em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 61-67, 2010.

WANG, L.; LIANG, T.; ZHANG, Q. Laboratory experiments of phosphorus loss with surface runoff during simulated rainfall. **Environmental Earth Sciences**, v. 70, p. 2839-2846, 2013.

WATSON, J. D.; CRICK, F. H. C. Genetical implications of the structure of deoxyribonucleic acid. **Nature**, v. 171, p. 964-967, 1953.

WITHERES, P. J. A.; SYLVESTER-BRADLEY, R.; JONES, D. L.; HEALEY, J. L.; TALBOYS, P. J. Feed the crop not the soil: rethinking phosphorus management in the food chain. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 12, p. 6523-6530, 2014.

YAN, X-T.; YANG, W.; CHEN, X.; WANG, M-K.; WANG, W.; YE, D.; WU, L. Soil Phosphorus Pools, Bioavailability and environmental risk in response to the phosphorus supply in the red soil of southern China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 20, 7384, 2020.

YANG, Y.; REN, S.; JIA, X.; ZENG, H.; WANG, L.; ZHU, Y.; YI, K. Measurement of total phosphorus and polyphosphate in *Chlamydomonas reinhardtii*. **Bio-Protocol**, v. 13, n. 11, 4692, 2023.

YUAN, F.; YU, X.; DONG, D.; YANG, Q.; FU, X.; ZHU, S.; ZHU, D. Whole genome-wide transcript profiling to identify differentially expressed genes associated with seed field emergence in two soybean low phytate mutants. **BMC Plant Biology**, v. 17, n. 6, p. 1-17, 2017.

