

## ALTERNATIVAS PARA ADUBAÇÃO FOSFATADA NA CULTURA DO GIRASSOL

Pedro Henrique da Silva<sup>1\*</sup>, Antonio Nolla<sup>1</sup>, Thiago Henrique de Souza<sup>1</sup>, Adriely Vechiato Bordin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus de Umuarama, Departamento de Ciências Agrônômicas. Estrada da Paca s/n, Bairro São Cristóvão, Umuarama - PR, CEP: 87507-190. E-mail: [pedrohsagro@gmail.com](mailto:pedrohsagro@gmail.com), [anolla@uem.br](mailto:anolla@uem.br), [enriquethiago18@gmail.com](mailto:enriquethiago18@gmail.com), [adrielyvechiato@hotmail.com](mailto:adrielyvechiato@hotmail.com)

\*autor correspondente: [pedrohsagro@gmail.com](mailto:pedrohsagro@gmail.com)

**RESUMO:** O girassol (*Helianthus annuus* L.) destaca-se pela produção de óleo vegetal, ocupando a quarta posição mundial, além do potencial para biodiesel e alimentação animal. Contudo, o potencial produtivo da cultura é frequentemente limitado pela baixa disponibilidade de fósforo em solos tropicais. O objetivo deste estudo foi reunir as pesquisas científicas a fim de comparar a eficiência de fontes fosfatadas (superfosfato triplo, fosfato natural reativo e pó de rocha) e analisar suas implicações para a viabilidade do cultivo de girassol. Em solos tropicais intemperizados, como Latossolos e Argissolos, a disponibilidade de fósforo é limitada pela alta fixação específica do íon fosfato com os óxidos de ferro e alumínio, formando compostos pouco solúveis. O superfosfato triplo proporciona liberação imediata do nutriente, porém está sujeito à rápida fixação em solos ácidos. O fosfato natural reativo apresenta liberação gradual e efeito residual pronunciado, sendo indicado para solos com pH abaixo de 5,5. O pó de rocha atua como fonte de liberação lenta, contribuindo para a fertilidade do solo ao longo do ciclo. A escassez de estudos específicos com o girassol reforça a necessidade de pesquisas que subsidiem recomendações de adubação fosfatada para a cultura.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Helianthus annuus*, fixação específica, solos tropicais.

## PHOSPHATE FERTILIZATION ALTERNATIVES IN SUNFLOWER CROP

**ABSTRACT:** Sunflower (*Helianthus annuus* L.) stands out for vegetable oil production, ranking fourth worldwide, in addition to its potential for biodiesel and animal feed. However, the productive potential of the crop is frequently limited by low phosphorus availability in tropical soils. The objective of this study was to gather scientific research in order to compare the efficiency of phosphate sources (triple superphosphate, reactive natural phosphate and rock powder) and analyze their implications for the viability of sunflower cultivation. In weathered tropical soils, such as Latosols and Argisols, phosphorus availability is limited by the high specific fixation of the phosphate ion with iron and aluminum oxides, forming poorly soluble compounds. Triple superphosphate provides immediate nutrient release, but is subject to rapid fixation in acid soils. Reactive natural phosphate presents gradual release and prolonged residual effect, being recommended for soils with pH below 5.5. Rock powder acts as a slow-

release source, contributing to soil fertility throughout the crop cycle. The scarcity of specific studies with sunflower reinforces the need for research to support phosphate fertilization recommendations for the crop.

KEY WORDS: *Helianthus annuus*, specific fixation, tropical soils.

## INTRODUÇÃO

Entre as culturas anuais de expressão econômica mundial, o girassol (*Helianthus annuus* L.) ocupa posição de destaque, tanto pela versatilidade de uso quanto pela adaptabilidade a diferentes sistemas de produção. Classificado na família Asteraceae e originário da América do Norte e Central, o girassol apresenta porte ereto, caule robusto e elevada taxa de crescimento vegetativo (Jardine e Barros, 2021). No contexto da produção de óleos vegetais, a espécie figura entre as quatro mais relevantes do mundo, posicionando-se atrás apenas do dendê, da soja e da canola (Bukowski e Swearingen, 2025). Seu aproveitamento, no entanto, vai além do setor alimentício, pois os grãos com alto teor lipídico conferem ao girassol potencial significativo para a produção de biodiesel, enquanto o farelo e a silagem derivados do processamento constituem importantes fontes proteicas na nutrição animal (Ebrahimian et al., 2022). No cenário nacional, a cultura concentra-se predominantemente no Cerrado brasileiro, onde o estado de Goiás responde por 70,95% da produção total, com 72,3 mil toneladas das 101,9 mil toneladas estimadas para a safra 2025/26 (CONAB, 2025). Nessa região, o girassol é frequentemente inserido em sistemas de rotação e sucessão com culturas de grãos, estratégia viável desde que conduzida em solos sem restrições físicas ou químicas relevantes (Castro e Leite, 2005).

O fósforo (P) desempenha papel fundamental em processos bioquímicos e fisiológicos, como a fotossíntese, respiração celular, transferência de genes e reprodução (Hawkesford et al., 2012). Sua deficiência afeta o crescimento desde os estádios iniciais, compromete o crescimento radicular, o que limita a absorção de água e nutrientes. Além disso, a deficiência de fósforo prejudica a formação de flores, sementes e frutos, pois essa fase reprodutiva exige alta demanda energética para síntese e transporte de compostos. O fósforo participa da estrutura do ATP (adenosina trifosfato), a principal molécula de armazenamento e transferência de energia nas células vegetais, sendo, indispensável para sustentar os processos metabólicos que ocorrem durante a fase reprodutiva (Stauffer e Sulewski, 2004). Em solos tropicais, como os

Argissolos, a disponibilidade de fósforo é frequentemente limitada pela alta reatividade do íon fosfato com os óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), formando fosfatos pouco solúveis, como o fosfato de ferro ( $\text{FePO}_4$ ) e o fosfato de alumínio ( $\text{AlPO}_4$ ), compostos de baixa disponibilidade às plantas (Santos et al., 2025; Spera et al., 1999). Diante desse desafio, a escolha adequada da fonte fosfatada torna-se estratégica para aumentar a eficiência do uso do fósforo no solo, atendendo às exigências nutricionais e reduzindo perdas por fixação.

As fontes de P apresentam distintos graus de solubilidade e efeito residual. O superfosfato triplo (SFT), por exemplo, possui 90-95% de solubilidade em água, o que resulta em liberação imediata do fosfato para as plantas após a aplicação, em solo úmido. Entretanto, em solos ácidos, grande parte do P solubilizado pode ser rapidamente adsorvido devido à presença de íons  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  nos coloides minerais, promovendo a formação de ligações fortes com os ânions fosfato, caracterizando a chamada fixação específica, o que reduz a disponibilidade do nutriente ao longo do tempo (Havlin et al., 2017). O fosfato natural reativo apresenta solubilidade intermediária em citrato neutro de amônio (20-40%) e baixa em água (0-4%), com liberação mais gradual e efeito residual, sendo indicado para solos com pH abaixo de 5,5. Já o pó de rocha, de baixa solubilidade imediata de água (< 2%) e citrato neutro de amônio (10-20%), atua como fonte de liberação lenta de fósforo e outros nutrientes ao longo do ciclo, contribuindo para a construção da fertilidade do solo. A comparação dessas fontes visa identificar estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis para o fornecimento de fósforo ao girassol em condições de elevada fixação do nutriente (Raij, 2011).

Nesse contexto, o presente artigo de revisão tem como objetivo comparar a eficiência agrônoma de cada fonte fosfatada e analisar suas implicações para a viabilidade do cultivo do girassol.

## REVISÃO

### CLASSIFICAÇÃO BOTÂNICA E ASPECTOS GERAIS DA CULTURA DO GIRASSOL

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma planta anual pertencente ao grupo das dicotiledôneas, classificada na ordem Asterales e na família Asteraceae (Joly, 1993). A espécie

tem origem no continente americano e estudos apontam que a domesticação ocorreu principalmente, na região do México e sudoeste dos Estados Unidos (Selmeczi-Kovacs, 1975). O girassol foi transportado para o continente europeu em 1510. Por volta de 1980, é reimplantado nos EUA, inicialmente, o uso foi como planta forrageira e posteriormente como oleaginosa, com o melhoramento genético de cultivares com rendimento (acima de 1.500 kg ha<sup>-1</sup> nas melhores condições da época) e alto teor de óleo (40 g de óleo para cada 100 g de semente seca) (Putt, 1997).

No Brasil, foi introduzido na época da colonização da região Sul do Brasil, no século XIX pelos colonos europeus. No entanto, durante muitos anos, o cultivo permaneceu limitado devido à baixa produtividade atribuída ao uso de cultivares não adaptadas às condições edafoclimáticas da região. Somente a partir de 1979, com o incentivo do Governo Federal por meio do Programa de Mobilização Energética, houve maior investimento em pesquisa, desenvolvimento de cultivares adaptadas e expansão da área plantada. Como resultado, nas últimas décadas, o girassol passou a se consolidar como alternativa viável em sistemas de rotação de culturas, sobretudo em regiões do Cerrado e Sul do Brasil, com crescente participação na produção de óleo vegetal, ração animal e biodiesel (Dall'Agnol et al., 1994).

Trata-se de uma cultura com ampla capacidade de adaptação a variadas condições edafoclimáticas, sendo cultivada em regiões de clima tropical, subtropical e temperado, com destaque para sua tolerância à deficiência hídrica moderada, solos de média fertilidade e ampla amplitude térmica (Dall'Agnol et al., 2005; Robinson, 1978). A espécie apresenta elevada variabilidade morfológica, podendo atingir entre 0,5 e 4 metros de altura, com diâmetro de caule variando de 15 a 90 milímetros e capítulos florais de até 50 centímetros de diâmetro. O ciclo fenológico é considerado curto, geralmente entre 90 e 120 dias após a semeadura, dependendo da cultivar e das condições edafoclimáticas (Mandarino, 2005). Sua importância para o agronegócio abrange diversos segmentos, incluindo a alimentação humana e animal por meio da produção de óleo, farelo e silagem, o uso ornamental e o potencial para produção de biodiesel, impulsionado pelo elevado teor de óleo nos grãos (Ebrahimian et al., 2022).

O fruto do girassol é classificado como um aquênio, que pode ser dividido em dois tipos principais: oleosos e não oleosos. Os oleosos são menores, de coloração preta, com cascas bem aderidas que representam de 20 a 30% do peso total do fruto. Após a extração do óleo, obtêm-se o farelo e seus derivados. Os aquênios não oleosos são maiores, possuem coloração rajada e

uma casca mais fibrosa, representando de 40 a 45% do peso do fruto, sendo facilmente removível (Carrão-Panizzi e Mandarino, 2005).

O aquênio contém, em média, 24% de proteínas, 47% de matéria graxa, 20% de carboidratos totais e 4% de minerais em sua composição. O óleo de girassol é uma fonte rica em ácidos graxos insaturados, com destaque para o ácido linoleico, que representa aproximadamente 60% de sua composição e é classificado como essencial por não poder ser sintetizado pelo organismo humano, sendo obtido exclusivamente pela ingestão de alimentos, principalmente óleos vegetais e espécies marinhas, como peixes e crustáceos (Mandarino, 2005).

A cultura do girassol concentra seus maiores cultivos nos estados de Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais, regiões que se caracterizam por solos de textura média a argilosa, boa drenagem, climas quentes, elevada radiação solar e chuvas bem distribuídas. Esses fatores, quando associados à correção do solo e ao manejo nutricional adequado, favorecem expressivamente o desempenho da cultura. Goiás lidera a produção nacional, respondendo por 70,95% do total produzido no país na safra 2024/2025, com 72,3 mil toneladas das 101,9 mil toneladas registradas (CONAB, 2025).

O potencial produtivo do girassol pode ultrapassar 3.000 kg ha<sup>-1</sup> em sistemas tecnificados. No entanto, a média nacional tem se mantido em torno de 1.600 kg ha<sup>-1</sup>. Nas safras 2024/2025 e 2025/2026, as produtividades registradas foram de 1.622 kg ha<sup>-1</sup> e 1.598 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Zalai et al., 2025; CONAB, 2025).

## **FÓSFORO NO SOLO**

A dinâmica do fósforo no solo é determinada por diversos fatores edáficos que modulam sua disponibilidade para as plantas. Entre os principais, destacam-se o pH do solo, a textura, o teor de óxidos e hidróxidos metálicos, a matéria orgânica, a atividade biológica e a capacidade tampão do solo. O pH regula a solubilidade do P, promovendo fixação por ferro e alumínio em solos ácidos e precipitação com cálcio em condições alcalinas, sendo a maior disponibilidade observada, em geral, entre pH CaCl<sub>2</sub> 5,0 e 6,2; solos de textura argilosa são ricos em óxidos apresentando maior poder de adsorção e tamponamento, reduzindo a concentração de P na solução e sua difusão até as raízes, enquanto solos de textura arenosa possuem menor retenção;

o teor de óxidos de Fe e Al determina a capacidade de fixação específica por meio de ligações covalentes; a matéria orgânica libera ácidos orgânicos e compostos de carbono que competem pelos sítios de adsorção nos colóides, bloqueia superfícies dos óxidos e fornece ácidos orgânicos quelantes que complexam  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ ; a atividade biológica mineraliza P-orgânico e produz enzimas fosfatases que hidrolisam ésteres fosfóricos; e a capacidade tampão representa a resistência à alteração da concentração de P na solução do solo (Novais et al., 2007; Barrow, 2017). Solos tropicais altamente intemperizados, como Latossolos e Argissolos, caracterizam-se por acidez elevada, elevada concentração de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), e predominância de argilas do tipo caulinita, o que resulta em baixa atividade da fração argilosa e alta capacidade de adsorção de fósforo (Novais et al., 2007; Raij, 2011).

Em condições de baixa acidez (pH próximo a 6,0), a disponibilidade de P tende a ser maximizada, devido à redução das reações de precipitação com  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$  e da adsorção específica nos óxidos metálicos. Contudo, à medida que o pH diminui (abaixo de 5,5), aumenta-se a protonação das superfícies coloidais e intensifica-se a presença de cátions trivalentes, favorecendo a formação de fosfatos de ferro e alumínio pouco solúveis, como  $AlPO_4 \cdot 2H_2O$  e  $FePO_4 \cdot 2H_2O$  (Havlin et al., 2014). Essa retenção se dá majoritariamente por mecanismos de fixação específica, nos quais o ânion fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) é adsorvido por ligação bidentada aos sítios reativos das superfícies de óxidos de Fe e Al, tornando-se quimissorvido de forma praticamente irreversível em curto prazo (Barrow, 2017). Em solos com pH acima de 6,5, ocorre a precipitação do fósforo com cálcio, formando fosfatos dicálcicos ( $CaHPO_4$ ) e tricálcicos [ $Ca_3(PO_4)_2$ ], compostos de baixa solubilidade que reduzem a disponibilidade de P às plantas. Este processo, denominado retrogradação, é intensificado em solos com alta saturação por bases (>80%), onde a elevada atividade de  $Ca^{2+}$  favorece a formação desses precipitados (Havlin et al., 2014; Raij, 2004).

Solos argilosos, sobretudo aqueles com argilas de baixa atividade (caulinita) e alta superfície específica, como os Latossolos Distróficos, apresentam cargas positivas dependentes do pH e grande quantidade de óxidos, elevando a capacidade tampão do fósforo e a fixação específica (Melo e Wypych, 2019). Estima-se que, nesses solos, menos de 15% do fósforo aplicado via fertilizantes permaneça na fração lábil, efetivamente disponível às raízes, e que a eficiência de utilização agrônômica do nutriente possa ser inferior a 20% no primeiro ciclo de cultivo (Shen et al., 2011).

Além da acidez e da mineralogia da fração argila, a dinâmica do fósforo também é influenciada por fatores como a matéria orgânica e a atividade biológica. Compostos orgânicos podem competir com o fosfato pelos sítios de adsorção, deslocando o P previamente adsorvido e aumentando sua disponibilidade. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular, liberados por raízes ou microrganismos, atuam como agentes quelantes, formando complexos solúveis com Al e Fe, o que reduz a formação de fosfatos insolúveis e favorece a manutenção de P em formas lábeis (Richardson et al., 2011). Já a atividade microbiana influencia a ciclagem do fósforo por meio da mineralização da matéria orgânica e da liberação de fosfatases, enzimas que hidrolisam formas orgânicas de P, aumentando sua disponibilidade para as plantas (Shen et al., 2011).

Por fim, a capacidade tampão do fósforo no solo, que representa a resistência à alteração da concentração de P na solução, é diretamente proporcional à saturação dos sítios de adsorção e à densidade de cargas da fração coloidal. Solos com elevada capacidade tampão exigem maiores doses de P para atingir níveis críticos de disponibilidade para as plantas, comprometendo a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados, especialmente os de baixa solubilidade (Novais et al., 2007; Barrow, 2017).

## **IMPORTÂNCIA DO FÓSFORO E SUAS FONTES**

O fósforo (P) atua na transferência e armazenamento de energia por meio de compostos como o ATP (adenosina trifosfato) e o ADP (adenosina difosfato), que participam de reações metabólicas em praticamente todas as fases do ciclo vegetal (Malavolta, 2006). Na formação do sistema radicular, o fósforo estimula a emissão e o alongamento de raízes, o que amplia a exploração do solo e a absorção de água e nutrientes. No perfilhamento, o P atua como sinalizador energético, promovendo a multiplicação celular e o desenvolvimento de gemas laterais. Durante a floração e a maturação dos frutos, o fósforo é necessário para a síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA), proteínas e enzimas envolvidas na divisão celular e no enchimento de grãos ou frutos. Em sementes, o fósforo contribui para a formação de compostos de reserva (como fitina), o que aumenta o vigor e a germinação (Taiz et al., 2017).

No solo, o fósforo disponível para absorção pelas plantas está presente principalmente nas formas inorgânicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (meio ácido) e  $\text{HPO}_4^{2-}$  (meio alcalino), cuja predominância depende do pH da solução do solo. A absorção ocorre por meio de transportadores específicos

da membrana plasmática das células da epiderme e da rizoderme, especialmente da família PHT1, que atuam como simportes  $H^+$ -fosfato ( $HPO_4^{2-}$ ), utilizando o gradiente eletroquímico de prótons para transportar o fósforo para o interior da célula (Taiz et al., 2017). Como o fósforo apresenta baixa mobilidade no solo, sua movimentação até a superfície das raízes ocorre por três mecanismos: interceptação radicular (2%), fluxo de massa (8%) e difusão (90%), sendo este último o processo dominante. A absorção por difusão é severamente limitada pela fixação em óxidos de ferro e alumínio e pela baixa concentração de fósforo lábil na solução do solo em ambientes tropicais altamente intemperizados, como Latossolos e Argissolos (Malavolta, 2004).

Uma vez absorvido, o fósforo é rapidamente incorporado a compostos orgânicos essenciais à célula vegetal, como açúcares fosfatados, fosfolipídeos e nucleotídeos. Essa reação é catalisada pela ATP sintase e acontece tanto nas mitocôndrias, durante a fosforilação oxidativa, quanto nos cloroplastos, via fotofosforilação. Além disso, processos metabólicos no citosol, como a glicólise, também dependem da presença de fósforo, participando da ativação de açúcares e da transferência de energia química nas células vegetais. A ampla participação do fósforo nesses processos metabólicos explica sua importância em etapas fisiológicas fundamentais, como o crescimento radicular, formação de perfilhos e estruturas reprodutivas, maturação dos grãos, vigor de sementes e até na fixação biológica de nitrogênio (Hawkesford et al., 2012; Malavolta, 2006; Taiz et al., 2017).

A maioria dos solos brasileiros apresenta deficiência de fósforo disponível, ou seja, teores insuficientes para suprir as exigências nutricionais das culturas. Essa deficiência decorre do intenso intemperismo químico característico de regiões tropicais e subtropicais, onde altas temperaturas (entre 20 e 30 °C) e elevada pluviosidade ( $> 1.200 \text{ mm ano}^{-1}$ ) promovem a lixiviação contínua de bases e a completa solubilização da sílica dos minerais primários. Como consequência, ocorre o acúmulo de óxidos de ferro (goethita, hematita) e alumínio (gibbsita) na fração coloidal, que apresentam elevada capacidade de adsorção específica de fosfato, imobilizando o P em formas não lábeis e indisponíveis às plantas (Novais et al., 2007).

Considera-se que há limitação produtiva quando o teor de fósforo disponível, extraído por Mehlich-1, está abaixo de  $6 \text{ mg dm}^{-3}$  em solos argilosos ( $> 350 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e abaixo de  $12 \text{ mg dm}^{-3}$  em solos arenosos ( $< 150 \text{ g kg}^{-1}$  de argila). Esses valores variam conforme o teor de argila do solo, sendo que os solos argilosos são geralmente mais dependentes da reposição

frequente de fósforo, devido à sua alta capacidade de adsorção específica com o P (Santos et al., 2025).

A disponibilidade do fósforo lábil em solos ácidos é reduzida devido à sua fixação em compostos pouco solúveis, principalmente fosfatos de alumínio (variscita:  $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e fosfatos de ferro (estrengita:  $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), formados pela reação entre os íons fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) e  $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$  solúveis na solução do solo. Essa fixação é intensificada pela presença de altos teores de argila e, principalmente, de óxidos de ferro e alumínio na fração coloidal, que atuam como sítios ativos de adsorção. Por outro lado, em solos com pH alcalino, a principal forma de imobilização do fósforo ocorre por precipitação com cálcio, formando compostos pouco solúveis, como fosfatos dicálcicos ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), fosfatos tricálcicos [ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ], fosfatos octocálcico [ $\text{Ca}_8\text{H}(\text{PO}_4)_3$ ], hidroxiapatita [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ] e fluorapatita [ $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$ ], especialmente quando se utilizam fontes solúveis em ambientes de elevada saturação por bases. Esse processo é denominado retrogradação do fósforo, no qual o nutriente inicialmente disponível é convertido em formas menos solúveis ao longo do tempo. A faixa de pH que proporciona maior disponibilidade de fósforo no solo situa-se entre 5,0 e 6,2 (Raij, 2011; Raij, 2004).

Diante dessas restrições, a adoção de práticas que aumentem a eficiência de uso do fósforo é fundamental. Principalmente, em solos de textura argilosa, a escolha de fontes fosfatadas compatíveis com as características químicas do ambiente pode contribuir para reduzir as perdas por fixação e aumentar a disponibilidade do nutriente. Nessa condição, alternativas como a rochagem e o uso de fosfato natural reativo tornam-se mais eficientes, uma vez que o baixo pH favorece a dissolução dos fosfatos cálcicos presentes nessas fontes, liberando o fósforo na forma assimilável pelas plantas ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ). Isso é particularmente relevante considerando os altos custos dos fertilizantes fosfatados e a baixa eficiência média de aproveitamento do P no primeiro cultivo, frequentemente inferior a 20% (Yu et al., 2021).

Essa indisponibilidade decorre devido ao alto grau de intemperismo de regiões tropicais e subtropicais, que leva à formação de solos com predominância de óxidos de ferro e alumínio em sua fração coloidal, notadamente os Latossolos e Argissolos (Santos et al., 2025). Esses óxidos (goethita e hematita), assim como argilominerais 1:1 (a caulinita), apresentam elevada área superficial e grupos funcionais reativos, que atuam como sítios preferenciais de adsorção dos íons fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ ). Esse processo, denominado fixação específica do fósforo,

ocorre por ligação covalente (quimissorção) entre os fosfatos e as hidroxilas das superfícies dos óxidos, especialmente em pH entre 4,5 e 6,5, faixa na qual esses óxidos apresentam carga superficial predominantemente positiva, favorecendo a adsorção de ânions. À medida que o pH do solo se eleva, essa carga positiva é neutralizada, aproximando-se do ponto de carga zero (PCZ) dos óxidos. O PCZ varia conforme a mineralogia: goethita e hematita apresenta PCZ em 8,5, gibbsita em 7,5 e a caulinita em 3,5. Isso reduz a afinidade pelas espécies aniônicas e, conseqüentemente, diminui a fixação do fósforo (Alleoni et al., 2019).

A rochagem, também denominada como pó de rocha ou remineralizador, tem se consolidado como fertilizante insolúvel alternativo, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados. Essa prática baseia-se no uso de rochas moídas com capacidade de liberar gradualmente nutrientes, como fósforo, potássio, cálcio e magnésio, além de fornecer micronutrientes como ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B), silício (Si) cobalto (Co) e molibdênio (Mo), cuja disponibilidade varia conforme a composição química da rocha utilizada durante o ciclo da cultura (Ramos et al., 2022). A eficiência dos remineralizadores está diretamente relacionada a fatores, tais como a natureza mineralógica da rocha (minerais formadores da rocha), sua composição química total, granulometria (desejável fração abaixo de 0,3 mm) e as condições físico-químicas do solo, como pH, textura e umidade. Em particular, a presença de CaO e de MgO pode contribuir para a correção da acidez do solo, com elevação do pH e redução da concentração de alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ) (Theodoro et al., 2006).

Do ponto de vista legal, a Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013, define remineralizador como o material de origem que tenha passado apenas por processos mecânicos de moagem e classificação de tamanho, sem sofrer transformações químicas ou térmicas, e que seja capaz de alterar os índices de fertilidade do solo mediante a liberação de macro e micronutrientes, além de melhorar as propriedades físicas, químicas e/ou atividade biológica do solo (Brasil, 2013).

A rochagem apresenta vantagens significativas, como melhorias diretas nos atributos químicos e físicos do solo, destacando-se a elevação do pH e da capacidade de troca catiônica, a redução do alumínio trocável e o fornecimento de macro e micronutrientes. Esses efeitos resultam em maior eficiência do sistema solo-planta, uma vez que os nutrientes são liberados de forma gradual, reduzindo perdas por lixiviação e proporcionando efeito residual prolongado.

Adicionalmente, o uso de matérias-primas disponíveis regionalmente contribui para a viabilidade econômica da técnica, ao reduzir custos logísticos, especialmente aqueles relacionados ao frete, além de permitir o aproveitamento sustentável de rejeitos da mineração (D'Oliveira et al., 2023).

Segundo a Codevasf (2023), o uso de rochas moídas com finalidade agrícola pode reduzir em até 40% o volume de rejeitos industriais, desde que o material atenda aos critérios estabelecidos na Instrução Normativa nº 05/2016 do MAPA. Para ser registrado como remineralizador de solo, o pó de rocha deve apresentar, no mínimo, 9% de soma de bases (CaO; MgO; K<sub>2</sub>O), K<sub>2</sub>O ≥ 1% e teor superior a 25% de SiO<sub>2</sub>. Além disso, é obrigatório a comprovação de eficácia agrônômica em pelo menos dois cultivos agrícolas distintos, conduzidos por instituições de pesquisa reconhecidas. Não podem conter teores de contaminantes acima dos limites legais. Os teores máximos permitidos são: 15 mg kg<sup>-1</sup> de arsênio (As), 10 mg kg<sup>-1</sup> de cádmio (Cd), 200 mg kg<sup>-1</sup> de chumbo (Pb), 0,1 mg kg<sup>-1</sup> de mercúrio (Hg), além da exigência de ausência de radioatividade e risco microbiológico. Essas restrições garantem que o uso agrícola seja ambientalmente seguro e tecnicamente eficaz, promovendo o reaproveitamento sustentável de materiais da mineração (Brasil, 2016).

O estudo de Grosselli (2021) avaliou em condições de campo o efeito do pó de rocha basáltica (0 a 7,5 t ha<sup>-1</sup>) e biocarvão (0 a 18 t ha<sup>-1</sup>) no cultivo de feijão em Latossolo Vermelho. O pó de rocha elevou o pH (4,8 → 5,5 com 2,5 t ha<sup>-1</sup>), aumentou o fósforo disponível (2,85 → 6,8 mg dm<sup>-3</sup> com 5 t ha<sup>-1</sup> + biocarvão) e reduziu o alumínio tóxico (0,30 → 0,00 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> com 7,5 t ha<sup>-1</sup> + biocarvão). Em relação à massa seca do feijão, a máxima eficiência técnica foi alcançada com a aplicação de 4,6 t ha<sup>-1</sup> de pó de rocha, resultando em uma produção de 81,8 g de massa seca.

Os fosfatos naturais são concentrados apatíticos e fosforíticos, obtidos através do beneficiamento de minérios fosfáticos extraídos de jazidas sedimentares, ígneas ou metamórficas. Esses materiais podem ou não passar por processos físicos de concentração, como lavagem ou flotação, com o objetivo de separar as apatitas dos minerais indesejáveis presentes no minério bruto. Por apresentarem baixa solubilidade em água, os fosfatos naturais são classificados como fertilizantes de liberação lenta, sendo utilizados em solos ácidos, para acelerar a solubilidade. A diminuição do pH favorece o fornecimento de prótons que auxiliam no rompimento das estruturas da apatita para a liberação do P (Horowitz e Meurer, 2004).

Os fosfatos naturais podem ser classificados, segundo sua origem, como sedimentares, ígneas ou metamórficos. Os fosfatos sedimentares apresentam estrutura cristalográfica semelhante à francolita, com cristais finos, alto grau de substituição isomórfica, baixa rigidez estrutural e alta porosidade, características que conferem maior reatividade. Jazidas com essas propriedades são encontradas principalmente no norte da África, Oriente Médio e Estados Unidos. Já os fosfatos de origem ígnea as apatitas [ $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$ ] desses depósitos possuem estrutura cristalográfica rígida, com cristais de maiores dimensões e composição próxima à fluorapatita. Esse tipo de depósito é típico de regiões como o Brasil e a Rússia. Fosfatos metamórficos, por sua vez, derivam de ambos os tipos anteriores, mas sofreram transformações químicas e estruturais ao longo do tempo por meio de processos metamórficos, alterando suas propriedades originais (Lopes et al., 2004). Os fosfatos fosforíticos (sedimentares) são agronomicamente superiores aos apatíticos (ígneas), pois possuem cristais menores, estrutura mais porosa e maior solubilidade em ácido cítrico, resultando em liberação mais rápida do P no solo (Lopes et al., 2004; Horowitz e Meurer, 2004).

A eficiência agrônômica dos fosfatos naturais reativos (FNR) está diretamente relacionada a fatores como origem geológica, granulometria (partículas menores aumentam a superfície de contato com o solo, acelerando a dissolução), condições edáficas (pH baixo e alta umidade favorecem a solubilização; em solos argilosos, o efeito dreno de  $\text{Ca}^{2+}$  e P acelera a dissolução dos fosfatos apatíticos em relação aos solos arenosos; presença de  $\text{Ca}^{2+}$  na solução reduz dissolução), espécie cultivada (culturas com sistema radicular agressivo e alta exsudação de ácidos orgânicos, como gramíneas tropicais, promovem maior solubilização do fosfato natural reativo) e tempo decorrido desde a aplicação (a dissolução é gradual, com máxima eficiência agrônômica geralmente observada após 2-3 anos) (Sousa e Lobato, 2004; Lopes et al., 2004). O modo de aplicação também influencia sua eficácia. Aplicações localizadas na linha de semeadura, por limitarem o contato do produto com o solo, resultam em menor solubilização do fósforo do fosfato natural, reduzindo a resposta agrônômica inicial. Por isso, recomenda-se a aplicação a lanço com posterior incorporação ao solo, prática que distribui o fosfato natural reativo em maior volume de solo (camada de 0-20 cm), aumentando o contato entre as partículas do fertilizante e a solução ácida do solo, o que acelera a dissolução dos fosfatos e aumenta a taxa de liberação do nutriente (Sousa e Lobato, 2004).

Para fins de recomendação agrônômica, estudos de eficiência e comercialização, os fosfatos naturais reativos são avaliados com base na porcentagem de  $P_2O_5$  solúvel em ácido cítrico a 2% (relação 1:100) e no teor de  $P_2O_5$  total. No mercado brasileiro, os principais fosfatos naturais reativos comercializados apresentam os seguintes teores médios de  $P_2O_5$ : Arad (33%  $P_2O_5$  total; 12% solúvel em ácido cítrico), Marrocos (32%  $P_2O_5$  total; 10% solúvel em ácido cítrico), Gafsa (29%  $P_2O_5$  total; 12% solúvel em ácido cítrico); Djebel Onk (29%  $P_2O_5$  total; 11% solúvel em ácido cítrico) e Carolina do Norte (30%  $P_2O_5$  total; 13% solúvel em ácido cítrico). Esses valores servem como referência na escolha da fonte fosfatada conforme a demanda nutricional da cultura e as características do solo (Horowitz e Meurer, 2004).

A avaliação da disponibilidade de fósforo no solo após a aplicação de fosfato natural reativo exige atenção, especialmente quanto ao uso do extrator Mehlich-1. Esse método, utilizado em laboratórios, pode superestimar os teores de fósforo disponível no primeiro ano de aplicação, ao solubilizar frações do nutriente ainda não completamente reagidas no solo. Esse efeito tende a desaparecer entre o segundo e o terceiro ano após a aplicação, período necessário para a completa dissolução dos fosfatos aplicados, especialmente quando utilizados a lanço com incorporação (Oliveira et al., 2015). Para solos que recebem fosfatos naturais reativos, a extração de fósforo por resina de troca aniônica é mais indicada, pois apresenta maior relação com o P efetivamente disponível às plantas, ao quantificar preferencialmente a fração lábil do nutriente, sem superestimações. A resina é constituída por um material sintético, de natureza orgânica e estrutura porosa tridimensional, contendo grupos funcionais com carga positiva que promovem a remoção do fósforo da solução do solo por mecanismo de troca iônica. Esse processo mantém baixa a concentração de P na solução do solo, promovendo a transferência gradual do nutriente das formas sólidas lábeis para a solução, sem a necessidade de ataque ácido forte. (Novais et al., 2007; Raij, 2004).

Em termos legais, os fosfatos naturais estão regulamentados pela Lei nº 12.890/2013 e pelo Decreto nº 8.384/2014, sendo os critérios técnicos de registro, garantia e comercialização estabelecidos pela Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). De acordo com essa normativa, para que um produto seja classificado como fosfato natural reativo, ele deve atender aos seguintes requisitos: conter mínimo de 27% de  $P_2O_5$  total e 28% de Ca; apresentar pelo menos 30% do teor total de  $P_2O_5$  solúvel em ácido cítrico a 2%, na proporção 1:100 (m/v); possuir granulometria adequada,

com no mínimo 85% das partículas passando na peneira de 0,0075 mm (ABNT nº 200). Além disso, o produto deve ser obtido exclusivamente por extração mineral natural e beneficiado por flotação, sendo vedado o uso de processos químicos de tratamento (Brasil, 2018).

Os fertilizantes fosfatados solúveis são produtos industrializados obtidos pelo tratamento químico de fosfatos naturais com ácido fosfórico e ácido sulfúrico, resultando em compostos de alta solubilidade em água que disponibilizam o fósforo de forma imediata para absorção pelas plantas, sendo preferencialmente utilizados para correções rápidas de deficiências de P (Malavolta, 2006). Apesar da eficiência inicial, em solos tropicais ácidos e intemperizados, o aproveitamento dessas fontes é reduzido para 15% a 25%, em decorrência da rápida adsorção específica do nutriente nos óxidos de ferro e alumínio. Adicionalmente, apresentam elevado custo por unidade de fósforo em relação às fontes naturais, fontes amoniacais como MAP e DAP possuem potencial acidificante pela liberação de prótons ( $H^+$ ) durante a nitrificação do amônio, e o setor agrícola brasileiro enfrenta alta vulnerabilidade pela dependência de importações, que representam mais de 80% dos fertilizantes consumidos anualmente (Malavolta, 2006; Novais et al., 2007; Weiss, 2026).

Os fertilizantes fosfatados solúveis podem ser classificados, segundo sua composição química, como superfosfatos simples, superfosfatos triplos e os fosfatos de amônio (MAP e DAP). O superfosfato triplo apresenta a mais alta concentração de  $P_2O_5$  (45%) entre os fertilizantes sólidos não nitrogenados, com estrutura cristalina do fosfato monocálcico monoidratado  $[Ca(H_2PO_4)_2H_2O]$ , alta solubilidade em água ( $20\text{ g L}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ ) e rápida disponibilização no solo. Os fosfatos de amônio (MAP e DAP) combinam fósforo e nitrogênio em suas estruturas moleculares. O MAP  $[(NH_4)H_2PO_4]$  contém 50% de  $P_2O_5$  e 11% de N, enquanto o DAP  $[(NH_4)_2HPO_4]$  apresenta 46% de  $P_2O_5$  e 18% de N, apresentando solubilidades ainda mais elevadas ( $430\text{ g L}^{-1}$  para MAP e  $575\text{ g L}^{-1}$  para DAP a  $20^\circ\text{C}$ ). Já o superfosfato simples, além do fósforo, fornece enxofre e cálcio como nutrientes secundários. Estes fertilizantes são típicos da indústria química mundial, com grandes centros produtores nos Estados Unidos, China, Marrocos e Brasil (Prochnow et al., 2004; Creste, 2004).

A eficiência agronômica dos fertilizantes fosfatados solúveis está diretamente relacionada a fatores como solubilidade do produto, pH do solo, capacidade de fixação de fósforo, teor de matéria orgânica, forma de aplicação e sincronização com a demanda da cultura (Raij, 2011). O modo de aplicação influencia sua eficácia. Aplicações localizadas no sulco de

plântio, ao concentrarem o fertilizante em pequeno volume de solo, reduzem o contato com sítios de adsorção e mantêm maior disponibilidade inicial do fósforo. Esta prática é especialmente recomendada para o superfosfato triplo e fosfatos de amônio. A aplicação a lanço, embora permita maior distribuição no perfil do solo, pode resultar em maior fixação em solos argilosos e ácidos, reduzindo a eficiência do fertilizante (Sousa e Lobato, 2004).

Para fins de recomendação agrônômica e estudos de eficiência, os fertilizantes fosfatados solúveis são avaliados com base no teor de  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio + água (CNA +  $H_2O$ ). No mercado brasileiro, os principais fertilizantes fosfatados solúveis comercializados apresentam os seguintes teores médios de  $P_2O_5$ : Superfosfato Triplo (41-46%), MAP (48-52%), DAP (45-48%) e Superfosfato Simples (18-20%). O superfosfato triplo se destaca pela alta concentração de fósforo e ausência de nitrogênio, sendo preferido para culturas que não necessitam de adubação nitrogenada ou em situações em que se deseja aplicar fósforo independentemente do nitrogênio (Raij, 2011).

A avaliação da disponibilidade de fósforo no solo após a aplicação de fertilizantes solúveis deve considerar a rápida reação destes produtos no solo. Diferentemente dos fosfatos naturais, os fertilizantes solúveis liberam fósforo imediatamente após a dissolução, mas também estão sujeitos à fixação rápida em solos com presença de óxidos de Fe e Al. O extrator Mehlich-1, amplamente utilizado no Brasil, é adequado para avaliar o P disponível proveniente destes fertilizantes, apresentando boa correlação com a resposta das culturas. Em solos ácidos (argilosos e arenosos), a eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados solúveis pode ser aumentada por meio da calagem, prática que reduz a atividade dos óxidos de Fe e Al responsáveis pela fixação específica do fósforo. Embora a fixação seja mais intensa em solos argilosos devido à maior concentração de óxidos, a calagem beneficia ambos os tipos texturais, pois eleva o pH para a faixa de entre 5,0 e 6,2, aumentando a disponibilidade de P (Sousa e Lobato, 2004; Raij, 2004).

Os fertilizantes fosfatados solúveis são regulamentados no Brasil pela Lei nº 12.890/2013 e pelo Decreto nº 8.384/2014, sendo seus critérios de registro, garantias mínimas e comercialização definidos pela Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018, do MAPA. Conforme essa normativa, o superfosfato triplo deve apresentar, no mínimo, 41% de  $P_2O_5$  total, com pelo menos 36% solúvel em água, além de 10% de cálcio total. Já o superfosfato simples deve conter, no mínimo, 18% de  $P_2O_5$  total (sendo 16% solúvel em água), 16% de cálcio e 10%

de enxofre, todos em teores totais. O fosfato monoamônico (MAP) deve possuir, no mínimo, 48% de  $P_2O_5$  total (44% solúvel em água) e 9% de nitrogênio total, enquanto o fosfato diamônico (DAP) deve conter ao menos 45% de  $P_2O_5$  (38% solúvel em água) e 17% de nitrogênio. Exigem que a granulometria das partículas esteja entre 1,0 mm e 4,8 mm (Brasil, 2018).

## DISCUSSÃO

Estudos comprovam que a adubação fosfatada exerce papel determinante no desempenho produtivo do girassol, sobretudo em solos tropicais, onde a disponibilidade natural de fósforo costuma ser limitada em função da forte adsorção pelos minerais da fração argilosa. Nesse contexto, Eltz et al. (2010), ao avaliarem seis doses de fósforo (0; 40; 80; 120; 160 e 200  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ ) aplicadas via superfosfato triplo em solo com teor inicial de 10,9  $mg\ dm^{-3}$  de P, observaram que a máxima eficiência econômica foi alcançada com a dose de 66  $kg\ ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ . Nessa condição, a produtividade atingiu 2.215  $kg\ ha^{-1}$  de grãos, evidenciando resposta expressiva da cultura ao nutriente. Os teores de fósforo no solo, determinados pelo extrator Mehlich-1, variaram de 9,5 a 56,0  $mg\ dm^{-3}$  entre as doses avaliadas, indicando aumento progressivo da disponibilidade do nutriente conforme a elevação das doses aplicadas. Esses resultados reforçam a eficiência do superfosfato triplo como fonte prontamente solúvel de fósforo, especialmente em sistemas de produção que demandam resposta rápida da cultura.

Entretanto, embora fertilizantes solúveis apresentem elevada eficiência agrônômica imediata, seu uso contínuo pode implicar custos elevados e menor sustentabilidade a longo prazo, o que tem impulsionado a busca por fontes alternativas de fósforo. Nesse sentido, o uso de remineralizadores, como o pó de rocha basáltica, tem se destacado como estratégia complementar ou substitutiva. Souza (2022), ao estudar a aplicação desse material em Neossolo Quartzarênico e Argissolo Amarelo Distrófico sob condições controladas, verificou melhorias significativas nos atributos químicos do solo após 60 dias de incubação. Houve elevação do pH, aumento da soma de bases, da capacidade de troca catiônica e da saturação por bases, além da redução do alumínio trocável, fator frequentemente limitante ao crescimento radicular em solos ácidos. Paralelamente, observou-se incremento nos teores de macro e micronutrientes, incluindo fósforo, cálcio, magnésio, enxofre, potássio, cobre, ferro, manganês e zinco.

Ainda que o estudo de Souza (2022) tenha sido conduzido com a cultura do milho, os resultados indicam potencial relevante para aplicação em sistemas com girassol, especialmente considerando a melhoria geral da fertilidade do solo e a liberação gradual de nutrientes. As respostas positivas observadas no crescimento das plantas, como aumento no diâmetro do colmo, no índice de área foliar e na produção de massa seca, sugerem que o remineralizador pode contribuir para o desenvolvimento vegetal de forma mais equilibrada e sustentável. As doses de máxima resposta, de 30 t ha<sup>-1</sup> no Neossolo e 20 t ha<sup>-1</sup> no Argissolo, evidenciam que, apesar da necessidade de maiores quantidades em comparação aos fertilizantes solúveis, os efeitos residuais e a melhoria das propriedades do solo podem compensar esse fator ao longo do tempo.

Uma alternativa relevante no manejo da adubação fosfatada é o uso de fosfatos naturais reativos, que apresentam menor solubilidade imediata, porém maior efeito residual. Bortoluzzi (2017), ao avaliar o momento de aplicação desse insumo em relação à calagem para o capim-marandu, verificou que o manejo da aplicação influencia diretamente o desempenho inicial das plantas. A aplicação do fosfato natural reativo 20 dias após a calagem resultou em maior número de folhas e perfilhos no primeiro corte, possivelmente devido à melhor condição química do solo no momento da disponibilização do fósforo. Por outro lado, a aplicação simultânea com o corretivo proporcionou maior produção de massa foliar, indicando que diferentes estratégias podem favorecer distintos componentes do crescimento vegetal.

Embora não tenham sido observadas diferenças nos cortes subsequentes, os resultados sugerem que o efeito residual do fosfato natural reativo pode contribuir para a manutenção da fertilidade ao longo do tempo. Esse aspecto é particularmente importante em culturas como o girassol, que podem se beneficiar de uma liberação mais gradual de fósforo, sobretudo em sistemas de cultivo menos intensivos ou em solos com alta capacidade de fixação do nutriente. Além disso, o uso combinado de calagem e fosfatos naturais pode otimizar a eficiência desses materiais, uma vez que o aumento do pH do solo favorece a solubilização do fósforo contido nessas fontes.

A adoção de alternativas à adubação fosfatada convencional, como remineralizadores e fosfatos naturais reativos, deve ser analisada de maneira integrada, considerando características do solo, exigências da cultura e objetivos do sistema de produção. Estratégias que associem fontes solúveis, para suprimento imediato, com fontes de liberação gradual, visando efeito

residual, podem representar uma abordagem mais equilibrada, tanto do ponto de vista agronômico quanto econômico. Nesse contexto, a cultura do girassol apresenta potencial para responder positivamente a diferentes manejos de fósforo, desde que estes sejam adequadamente ajustados às condições edafoclimáticas e ao nível tecnológico adotado.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ausência de recomendações técnicas específicas para a adubação fosfatada do girassol em diversos estados brasileiros representa uma lacuna relevante no manejo nutricional da cultura, sendo comum a adoção de doses utilizadas para outras oleaginosas ou a extrapolação de recomendações de regiões distintas. O estado do Paraná exemplifica essa situação, uma vez que seu manual de adubação e calagem não contempla recomendações específicas para o girassol, evidenciando a necessidade de estudos que avaliem fontes e doses de fósforo em diferentes condições edafoclimáticas do país, visando subsidiar recomendações mais precisas e eficientes para a cultura.

Ressalta-se que a literatura científica sobre o efeito de fontes fosfatadas especificamente para o girassol ainda é escassa, sendo grande parte dos estudos conduzidos com outros tipos de culturas. Considerando que o girassol apresenta exigências nutricionais próprias, a extrapolação de resultados obtidos em outras espécies deve ser analisada com cautela, reforçando a necessidade de estudos experimentais que avaliem a eficiência agronômica de diferentes fontes fosfatadas para essa oleaginosa em solos tropicais com elevada capacidade de fixação de fósforo.

### REFERÊNCIAS

ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.; CASAGRANDE, J.C.; SOARES, M.R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade brasileira de Ciência do Solo, 2019. p.1077-1128.

ALLEONI, L.R.F.; MELLO, J.W.V.; ROCHA, W.S.D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade brasileira de Ciência do Solo, 2019. p.765-825.

BARROW, N.J. The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.410, n.1-2, p.401-410, 2017.

BORTOLUZZI, F.M. CABRAL, C.E.A.; MACHADO, R.A.F.; ABREU, J.G.; CABRAL, C.H.A.; BARROS, L.V. Fosfato natural reativo aplicado em épocas distintas e associado a fertilizantes nitrogenados afetam a produção de capim-marandu. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v.74, n.1, p.9-16, 2017.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018. Aprova as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais destinados à agricultura.** Brasília: Diário Oficial da União - DOU, 2018. 49p.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura.** Brasília: Diário Oficial da União - DOU, 2016. 8p.

BRASIL. **Lei nº 12.890, de 10 de dezembro de 2013. Altera a Lei no 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, 2013. 1p.

BUKOWSKI, M.; SWEARINGEN, B. **Oil crops outlook: may 2025.** Washington: Economic research service, 2025. 13p. Disponível em: [https://www.ers.usda.gov/sites/default/files/\\_laserfiche/outlooks/112583/OCS-25e.pdf](https://www.ers.usda.gov/sites/default/files/_laserfiche/outlooks/112583/OCS-25e.pdf). Acesso em: 12 de jul. 2025.

CARRÃO-PANIZZI, M.C.; MANDARINO, J.M.G. Produtos proteicos do girassol. In: LEITE, R.M.V.B.C.; BRIOGHENTI, A.M.; CASTRO, C. (Eds.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p.51-66.

CASTRO, C.; LEITE, R.M.V.B.C. Principais aspectos da produção de girassol no Brasil. In: LEITE, R.M.V.B.C.; BRIOGHENTI, A.M.; CASTRO, C. (Eds.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p.571-605.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). **Uso de pó de rocha na agricultura:** Boletim Informativo dos Projetos Públicos de Irrigação. Brasília: Codevasf, 2023. 3p. Disponível em: '<https://www.codevasf.gov.br/assuntos/agricultura-irrigada/projetos-de-irrigacao/bip/18a-edicao/uso-de-po-de-rocha-na-agricultura>. Acesso em: 15 jan. 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos.** CONAB, Brasília, v.13, n.2, p.11, 2025.

CRESTE, J.E. Adubação fosfatada na cultura dos citros. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira.** Piracicaba: Potafos, 2004. p.329-355.

DALL'AGNOL, A.; CASTIGLIONI, V.B.R.; TOLEDO, J.F.F. A cultura do girassol no Brasil. In: PUIGNAU, J. (Ed.). **Mejoramiento genético de girasol**. Montevideo: IICA / PROCISUR, 1994. p.37-41.

DALL'AGNOL, A.; VIEIRA, O.V.; LEITE, R.M.V.B.C. Origem e histórico do girassol. In: LEITE, R.M.V.B.C.; BRIOGHENTI, A.M.; CASTRO, C. (Ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p.1-12.

D'OLIVEIRA, P.S.; ROCHA, W.S.D.; MARTINS, C.E. **Uso de pó de rocha em plantas forrageiras**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2023. 15p. (Comunicado técnico, 96).

EBRAHIMIAN, E.; DENAYER, J.F.M.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; KARIMI, K. Biomethane and biodiesel production from sunflower crop: A biorefinery perspective. **Renewable Energy**, Amsterdam, v.200, p.1352-1361, 2022.

ELTZ, F.L.F.; VILLALBA, E.H.; LOVATO, T. Adubação fosfatada para girassol sob sistema plantio direto no Paraguai. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.4, p.899-904, 2010.

GROSSELLI, M.A. **Influência do uso de pó de rocha basáltica e biocarvão em Latossolo Vermelho distroférrico e no cultivo orgânico de Phaseolus vulgaris antecedido por plantas solubilizadoras**. 2021. 107p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal da Fronteira Sul, Laranjeiras do Sul, 2021.

HAMMAD, H.; TAHIR, M.A.; SABAH, N.U.; SARWAR, G.; AFTAB, M.; MANZOOR, M.Z.; RIAZ, A.; NIAZ, A.; ARIF, M. Phosphorus utilization efficiency by sunflower (*Helianthus annuus* L.) from sparingly soluble P source under P deficient environment. **Pakistan Journal of Agricultural Research**, Sargodha, v.34, n.2, p.294-299, 2021.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MØLLER, I.S.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. Amsterdam: Elsevier, 2012. p.135-189.

HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Chennai: Pearson Education, 2017. 520p.

HAVLIN, J.L.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. Harlow: Pearson Education, 2014. 528p.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.665-687.

JARDINE, J.G.; BARROS, T.D. **Agroenergia (girassol): relatório de 2021**. Campinas: Embrapa Territorial, 2021. 1p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materiasprimas/girassol#:~:text=O%2>

O girassol é uma planta, tem poucas ramificações no ápice'. Acesso em: 02 jul. 2025.

JOLY, A.B. **Botânica introdução à taxonomia vegetal**. 11.ed. São Paulo: Editora Nacional, 1993. 777p.

LOPES, A.S.; SILVA, C.A.P.; BASTOS, A.R. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.13-34.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E. O fósforo na planta e interações com outros elementos. In. YAMADA, T.; ABDALLA, R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. 726p.

MANDARINO, J.M.G. Óleo de girassol como alimento funcional. In: LEITE, R.M.V.B.C.; BRIOGHENTI, A.M.; CASTRO, C. (Ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p.43-49.

MELO, V.F.M.; WYPYCH, F. Caulinita e haloisita. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p.427-504.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-550.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.605-663.

PUTT, E.D. Early history of sunflower. In: SCHNEITER, A.A. (Ed.). **Sunflower technology and production**. Madison: American Society of Agronomy, 1997. p.1-19.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI - International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAIJ, B.V. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.107-115.

RAMOS, C.G; HOWER, J.C.; BLANCO, E.; OLIVEIRA, M.L.S.; THEODORO, S.H. Possibilities of using silicate rock powder. **Geoscience Frontiers**, Beijing, v.13, n.1, art.101185, 2022.

RICHARDSON, A.E.; LYNCH, J.P.; RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; SMITH, F.A.; SMITH, S.E.; HARVEY, P.R.; RYAN, M.H.; VENEKLAAS, E.J.; LAMBERS, H.; OBERSON, A.; CULVENOR, R.A.; SIMPSON, R.J. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.349, n.1-2, p.121-156, 2011.

ROBINSON, R.G. Production and culture. In: CARTER, J.F. (Ed.). **Sunflower science and technology**. Madison: ASA, 1978. p.89-95.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAÚJO, J.C.; LIMA, H.N.; MARQUES, F.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6 Ed. Brasília: Embrapa, 2025. 393p.

SELMECZI-KOVACS, A. Akklimatisation und verbreitung der sonnenblume in Europa. **Acta Ethnographica Academiae Hungaricae**, Budapest, v.24, n.1, p.47-88, 1975.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, Rockville, v.156, n.3, p.997-1005, 2011.

SILVEIRA, T.C.; PEGORARO, R.F.; PORTUGAL, A.F.; RESENDE, A.V. Produção da mamoneira submetida a combinações com fontes de fósforo e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.1, p.52-57, 2015.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.157-200.

SOUZA, G.V.L. **Avaliação da eficiência agrônômica do pó de rocha basáltica como remineralizador de solos**. 2022. 45p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2022.

SPERA, S.T.; REATTO, A.; MARTINS, É.S.; CORREIA, J.R.; CUNHA, T.J.F. **Solos arenos-quartzosos no cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 48p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.; ROCHA, E.L.; REGO, K.G. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. **Espaço e Geografia**, Brasília, v.9, n.1, p.263-292, 2006.

WEISS, G. **Brasil bate recorde de importação de fertilizantes em 2025**. São Paulo: CNN Brasil, 2026. 4p. Disponível em: '<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/agro/brasil-bate-recorde-de-importacao-de-fertilizantes-em-2025/>'. Acesso em: 20 de jan. 2026.

JARDINE, J.G.; BARROS, T.D. **Agroenergia (girassol)**: relatório de 2021. Campinas: Embrapa Territorial, 2021. 1p. Disponível em: '<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacaotecnologica/tematicas/agroenergia/biodiesel/materiasprimas/girassol#:~:text=O%20girassol%20é%20uma%20planta,tem%20poucas%20ramificações%20no%20ápice>'. Acesso em: 02 jul. 2025.

ZALAI, M.; BOJTOR, C.; NAGY, J.; SZÉLES, A.; MONOKI, S.; IILÉS, Á. Challenges in precision sunflower cultivation: The impact of the agronomic environment on the quality of precision sowing techniques and yield parameters. **AgriEngineering**, Basel, v.7, n.5, art.705145, p.1-24, 2025.