

EDIÇÃO EM PORTUGUÊS

O ferro (Fe) é um nutriente exigido por seres vivos como micro-organismos, plantas, animais e humanos. Foi primeiramente reconhecido como um nutriente necessário para as plantas em meados do século XIX, quando uvas deficientes em Fe foram tratadas com sucesso utilizando aplicações foliares de sais de Fe. O Fe é componente de muitas enzimas vitais para as plantas e é exigido em uma ampla gama de funções biológicas. É comum na crosta terrestre e, como resultado, a maioria dos solos contém Fe em abundância, mas em formas com baixa solubilidade e, algumas vezes, não prontamente disponíveis para a absorção pelas plantas.

Ferro nos solos

O Fe é abundante em muitas rochas e minerais e, à medida que os solos se desenvolvem, pode haver tanto enriquecimento como diminuição de Fe. A diminuição comumente leva à deficiência e o enriquecimento pode causar toxicidade em condições específicas. Os minerais secundários (óxidos) dos solos são a principal fonte de Fe para uso pelas plantas, que é adsorvido ou precipitado em partículas minerais do solo e na matéria orgânica. Embora o Fe seja muito abundante, sua disponibilidade para a absorção pelas plantas é bastante baixa.

Ferro nas plantas

As raízes das plantas absorvem Fe da solução do solo mais prontamente como íons Fe^{2+} (ferroso), mas também, em alguns casos, como íons Fe^{3+} (férico). A natureza química do Fe permite que ele desempenhe papel essencial em reações de oxidação e redução, respiração, fotossíntese e reações enzimáticas. Por exemplo, o Fe é um importante componente de enzimas usadas por bactérias fixadoras de nitrogênio.

A concentração de Fe nos tecidos foliares varia entre as espécies de plantas, mas geralmente situa-se entre 50 ppm e 250 ppm (base em peso seco). Se a concentração de Fe for menor do que 50 ppm, geralmente há sinais de deficiência, ao passo que efeitos tóxicos podem ser observados quando a concentração excede 500 ppm.

A solubilidade de minerais que contêm óxido de Fe no solo é muito baixa e, portanto, as raízes das plantas possuem dois caminhos principais para acessar os íons Fe^{2+} ou Fe^{3+} . A primeira estratégia ocorre em espécies de dicotiledôneas e espécies de monocotiledôneas não gramíneas, nas quais os íons Fe^{3+} são reduzidos a íons Fe^{2+} antes de entrar nas raízes por intermédio de membranas seletivas. Esse processo envolve a excreção pelas raízes de vários compostos orgânicos e ácidos no solo. Na segunda estratégia, as raízes de espécies de gramíneas obtêm Fe excretando um quelato orgânico (sideróforo) que solubiliza o Fe do solo, permitindo absorção acentuada.



FOTO IPNI BIACHINI.



FOTO IPNI SHARMA E KUMAR.



FOTO IPNI SHARMA E KUMAR.

Deficiência de ferro em soja (esquerda), sorgo (no meio) e trigo (direita).

Fatores do solo e deficiência de ferro

A maioria dos solos contém Fe em teores adequados para a nutrição de plantas, mas fatores químicos e ambientais restringem sua absorção pelas plantas. As deficiências de Fe são comumente observadas em solos com elevado pH (> 7,5), especialmente onde há abundância de carbonato de cálcio (calcário). A solubilidade do Fe é bastante aumentada à medida que o pH do solo cai, atingindo o patamar ácido.

Solos contendo abundância de carbonato de cálcio podem formar íons bicarbonato (HCO_3^-) se ficarem excessivamente úmidos, interferindo na absorção de Fe pelas plantas. Essa inibição geralmente é temporária, e os sintomas de deficiência de Fe desaparecem quando o excesso de água é drenado e o solo se aquece.

Quando os solos se tornam saturados, os íons Fe^{3+} são convertidos a Fe^{2+} por ação microbiana. Os íons Fe^{2+} estão em uma forma muito mais solúvel e podem até mesmo causar toxicidade em algumas variedades de arroz em solos inundados em condições fortemente ácidas.



As plantas que crescem em solos com baixo teor de matéria orgânica são geralmente mais suscetíveis à deficiência de Fe do que aquelas que se desenvolvem em solos com matéria orgânica abundante. Os compostos de húmus são eficientes em formar ligações e liberar íons Fe na solução do solo. As partes do campo que sofrem erosão (baixo teor de matéria orgânica no solo) tendem a ser mais suscetíveis à deficiência de Fe.

Como muitos fatores ambientais e do solo se combinam para regular o fornecimento de Fe para as plantas, não há um método que seja mais amplamente aceito para análise de solos que possa prever a necessidade de adubação suplementar.

Sintomas de deficiência e toxicidade de ferro

Os sintomas de deficiência de Fe são universais entre as espécies de plantas, geralmente causando enfezamento e amarelecimento de folhas mais jovens. As folhas jovens deficientes em Fe desenvolvem clorose (amarelecimento) entre as nervuras, enquanto estas permanecem inicialmente verdes. À medida que a deficiência se torna mais severa, as folhas mais jovens se tornam de amarelo-pálidas a brancas. O jovem tecido é impactado primeiro porque o Fe é muito pouco móvel dentro das plantas e não é prontamente translocado dos tecidos mais velhos para os mais jovens.

A toxicidade de Fe é relativamente rara, mas os sintomas incluem folhas bronzeadas e listradas. Esses efeitos são resultado do excesso de radicais hidroxila que interrompem funções celulares. Em decorrência da importância de manter as concentrações de Fe nos tecidos das plantas dentro de níveis adequados, todo o processo de absorção deste nutriente pelas raízes (ou seja, o movimento das raízes para as brotações, o armazenamento e a liberação dentro das células da planta) é altamente regulado.

A análise de Fe nos tecidos pode ser complicada, uma vez que qualquer grão de poeira presente na superfície da folha também contém Fe. Assim, a lavagem ou o enxágue das folhas é recomendado antes da análise de Fe. A maioria das análises de tecidos é feita com amostras de folhas jovens, pois estas geralmente são as que primeiro apresentam os sintomas de deficiência.

Adubação em casos de deficiência de ferro

Quando fertilizantes inorgânicos contendo Fe são adicionados ao solo (por exemplo, sulfato férrico, sulfato ferroso, fosfato ferroso de amônio, sulfato ferroso de amônio e óxido de ferro), estes são rapidamente convertidos a formas solúveis e propiciam benefício mínimo para a nutrição das plantas. Os fertilizantes contendo Fe protegidos por um quelato orgânico podem ser eficientemente aplicados no solo para corrigir deficiências nas plantas. Por exemplo, fertilizantes quelados como Fe-EDDHA e Fe-EDTA têm eficácia razoável (Tabela 1), mas seu custo é geralmente proibitivo para aplicações em grande escala. Os produtos foliares contendo sais ou quelatos de Fe são eficientes para corrigir deficiências deste nutriente durante o ciclo de cultivo das plantas, mas pode ser necessário repetir as aplicações para prevenir a recorrência da deficiência.

Resposta das culturas a ferro

Vários recursos podem ser usados para corrigir a deficiência de Fe nas plantas. Dependendo das condições locais, algumas dessas soluções podem ser mais práticas do que outras.

- Cultivar variedades de plantas especificamente adaptadas às condições locais e que sejam tolerantes a baixos teores de Fe no solo. Existem grandes diferenças genéticas entre as cultivares e uma mudança de variedade geralmente é eficiente para lidar com condições de solo mais desafiadoras (Figura 1).

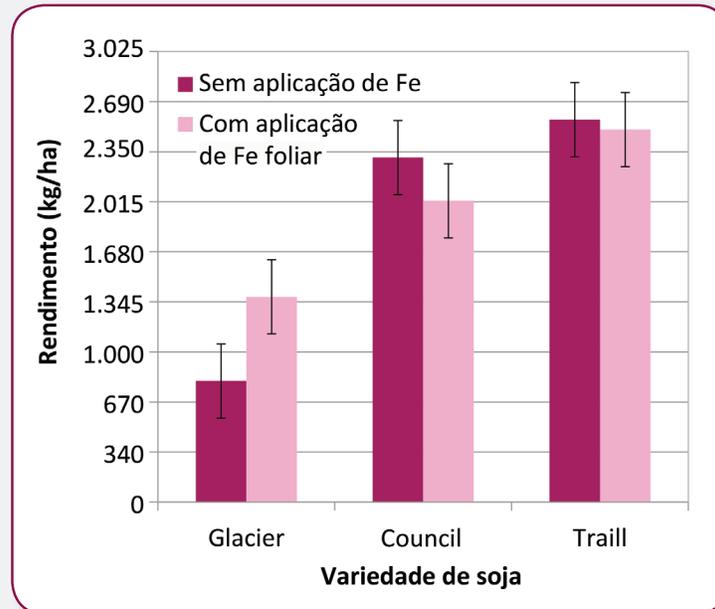


Figura 1. Rendimento de grãos de três variedades de soja cultivadas em solo calcário. A variedade Glacier, suscetível à deficiência de Fe, respondeu positivamente à aplicação foliar deste nutriente, enquanto nenhuma resposta foi observada para as variedades tolerantes Council e Traill. As barras representam diferença mínima significativa (DMS) a 5% de probabilidade. Fonte: Goos e Johnson (2000, tradução nossa).

- Aplicar fertilizante contendo Fe na forma de um sal inorgânico ou um material quelado ao solo.
- Fazer aplicações foliares de solução contendo Fe para prevenir ou corrigir deficiências. Essa prática não corrige quaisquer problemas ocultos no solo que possam impedir a adequada absorção de Fe, mas pode auxiliar na eliminação de limitações ao crescimento em decorrência da deficiência de Fe.
- Adicionar material que acidifique o solo com pH elevado para melhorar a solubilidade do Fe. Essa acidificação pode ser feita na área toda ou em tratamento localizado na zona radicular, o que, geralmente, é suficiente para melhorar a disponibilidade de Fe.
- Melhorar a disponibilidade de Fe cultivando duas espécies de plantas simultaneamente. A habilidade de uma cultura em solubilizar e absorver o Fe

algumas vezes resulta em compartilhamento deste nutriente com uma cultura acompanhante que tem menor capacidade de absorvê-lo (Tabela 1).

Tabela 1. Rendimento relativo de duas variedades de soja, uma suscetível e outra tolerante à deficiência de ferro, em comparação com a variedade tolerante cultivada em solo com teor adequado de ferro (100%).

Cultura acompanhante	Adubação com Fe-quelato	Variedade suscetível	Variedade tolerante
		Rendimento relativo (%)	
Não	Não	48 e	82 c
Não	Sim	71 d	87 bc
Sim	Não	73 d	76 cd
Sim	Sim	87 bc	93 ab

Os tratamentos incluíram adubação com Fe-quelato ou a presença de aveia como cultura acompanhante em solo com deficiência aguda de ferro.

Médias seguidas das mesmas letras não diferem no nível de 10% ($p \leq 0,10$) de significância para ambas as variedades.

Fonte: Kaiser e outros (2014, tradução nossa).

Referências

- GOOS, R. J.; JOHNSON, B. E. A comparison of three methods for reducing iron-deficiency chlorosis in soybean. *Agronomy Journal*, Madison, v. 92, no. 6, p. 1135–1139, 2000. doi: 10.2134/agronj2000.9261135x.
- KAISER, D. E.; LAMB, J. A.; BLOOM, P. R.; HERNANDEZ, J. A. Comparison of field management strategies for preventing iron deficiency chlorosis in soybean. *Agronomy Journal*, Madison, v. 106, no. 6, p. 1963–1974, 2014. doi: 10.2134/agronj13.0296.