



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Issue Brief 08 – Março 2025

Novos fertilizantes e seu modo de ação

Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Conteúdo

- 3 Pontos principais
- 5 Was ist das Problem?
- 6 Die Effizienz der Nährstoffverwendung in der Landwirtschaft
- 10 Neuartige Technologien für effizientere Düngemittel
- 20 Barrieren für eine weite kommerzielle Nutzung neuer Düngemitteltechnologien
- 22 Bewertung neuartiger Düngemittelprodukte
- 27 Wer muss was tun?
- 28 Wie würde Erfolg aussehen?
- 29 Referenzen
- 33 Autoren, Zitation und Kontakt



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Pontos principais

A eficiência da recuperação de nutrientes dos fertilizantes convencionais costuma ser inferior a 60% para o nitrogênio (N), devido às perdas por lixiviação e volatilização e, ainda menor, para o fósforo (P) e os micronutrientes, devido à forte retenção no solo.

Os chamados novos fertilizantes são formulações avançadas projetadas para melhorar a eficiência do uso de nutrientes e o desempenho das culturas, além de reduzir os impactos ambientais. Como a agricultura se concentra na sustentabilidade, o desenvolvimento desses fertilizantes é fundamental para alcançar simultaneamente a produtividade e resultados ambientais.

As tecnologias de eficiência aprimorada (Fig. 1) incluem fertilizantes tratados com inibidores, formulações de liberação lenta e controlada, revestimentos microbianos, nanofertilizantes e tecnologias de transporte (por exemplo, grafeno, hidróxidos duplos em camadas e estruturas metal-orgânicas). Embora promissoras, muitas inovações enfrentam desafios em termos de custo, escalabilidade e desempenho ambiental e agronômico de longo prazo.

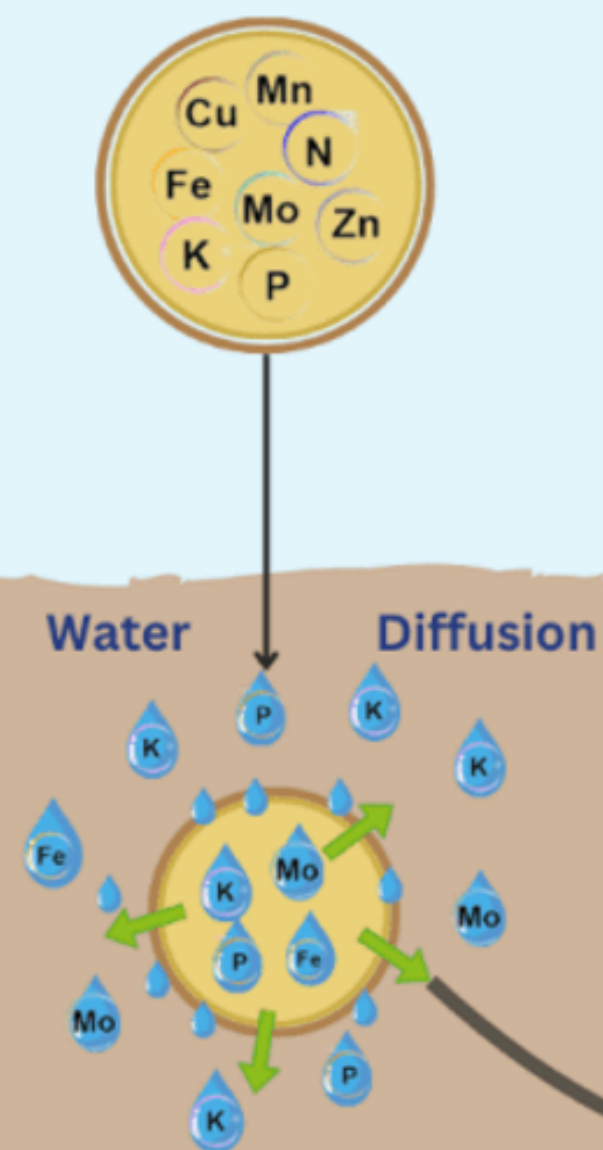
A adoção de novos fertilizantes geralmente é limitada por custos mais altos, benefícios agronômicos inconsistentes, problemas logísticos, complexidade de fabricação e obstáculos regulatórios. Além disso, muitas inovações carecem de testes de campo robustos para demonstrar vantagens econômicas e ambientais claras para os agricultores. Para avaliar as novas formulações de fertilizantes, quatro aspectos devem ser documentados: (1) modo de ação, (2) eficiência agronômica e ambiental, (3) facilidade de manuseio e logística e (4) custo, complexidade e pegada ambiental da fabricação. Testes rigorosos em condições de campo e protocolos experimentais padronizados são fundamentais para a validação.

Governos, indústrias, pesquisadores e agricultores devem colaborar para inovar, avaliar e adotar tecnologias de fertilizantes sustentáveis. Políticas, incentivos e estruturas regulatórias simplificadas são necessários para promover o desenvolvimento e o uso mais amplo. O sucesso envolveria fertilizantes relacionados à menor emissão de gases de efeito estufa, maior eficiência, melhor desempenho agronômico e uma pegada ambiental reduzida.

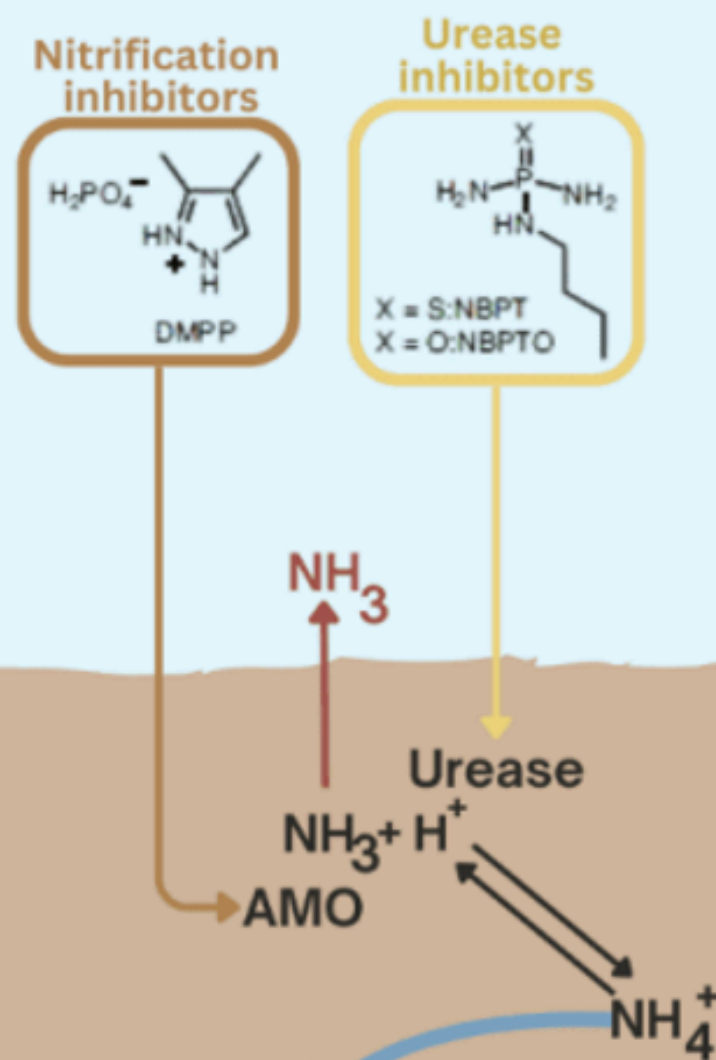


Novel fertilizers and their modes of action

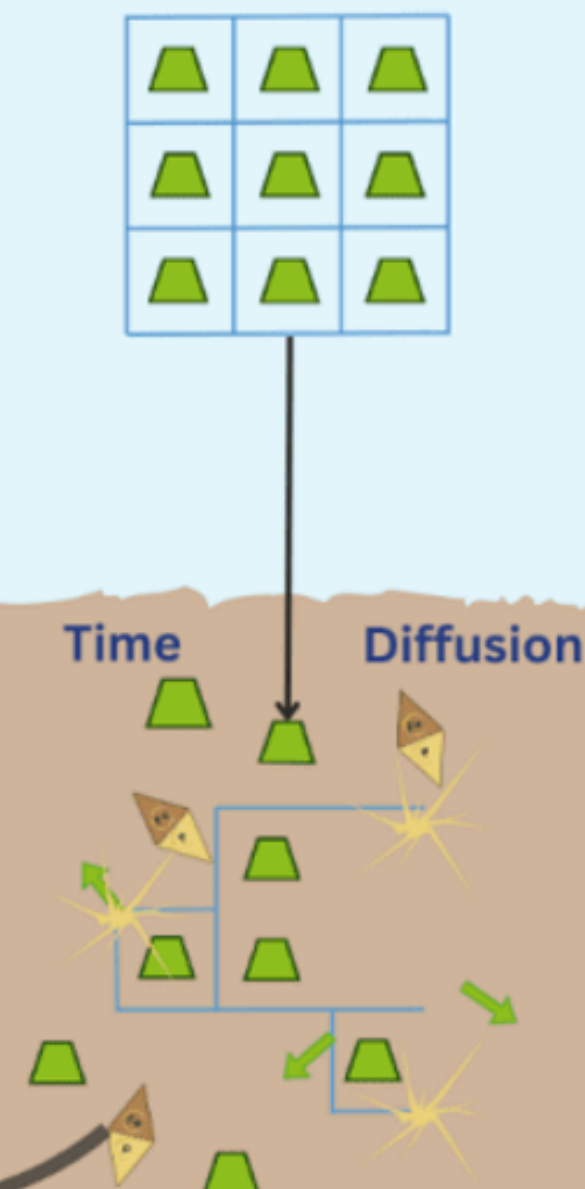
Coated fertilizers



Inhibitor-treated fertilizers



Metal-organic frameworks



Soil nutrients
available to plants

Figura 1. Exemplos de tecnologias de fertilizantes de eficiência aprimorada e como elas funcionam no campo.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Qual é o problema?

Os novos fertilizantes são formulações que incluem revestimentos, transportadores, inibidores, microrganismos, nanomateriais, entre outros, especificamente formulados para melhorar a eficiência do uso de nutrientes (EUNu) (ou, em inglês, NuUE, nutrient use efficiency), aprimorar o desempenho da cultura em termos de rendimento ou qualidade e/ou reduzir os impactos ambientais.

Essas formulações têm como objetivo melhorar o fornecimento de uma ampla gama de elementos essenciais ou benéficos para o crescimento das plantas(1), baseiam-se em diferentes mecanismos de ação e são usadas para diferentes fins. Com o impulso global para melhorar a sustentabilidade das práticas de produção agrícola, houve um aumento acentuado no número de publicações, patentes e produtos relacionados a novas tecnologias de fertilizantes. Compreender os modos de ação dos novos fertilizantes, desenvolver protocolos apropriados para sua avaliação e documentar claramente os resultados de desempenho com métricas adequadas é essencial para fornecer decisões informadas aos usuários finais desses produtos.

Com o aumento do número e do tipo de novos fertilizantes no mercado, torna-se imperativo ter definições claras das categorias de produtos, de suas eficácias e de como eles podem ser melhor avaliados para respaldar as alegações. Neste artigo, apresentamos uma análise dos principais modos de ação necessários para melhorar a eficiência do uso de nutrientes, os tipos de fertilizantes novos e os métodos robustos para avaliar o desempenho. Nosso foco são os fertilizantes inorgânicos predominantemente de origem sintética ou mineral e não consideramos os fertilizantes puramente orgânicos, os produtos microbianos, ou outros bioestimulantes.





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Eficiência do uso de nutrientes na agricultura

A eficiência do uso de nutrientes pelas culturas pode ser definida e medida de várias maneiras (2). A eficiência agronômica (EA) define o aumento da produtividade da cultura por unidade de fertilizante aplicado.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Para os agricultores, a EA é uma medida muito relevante, pois considera tanto a eficiência da absorção de nutrientes do fertilizante quanto sua conversão em produto colhido. Para comparar a eficiência da adição de um fertilizante, produto ou método de aplicação específico em diferentes culturas e ambientes, a eficiência de recuperação do fertilizante (ERF) é a medida preferida. Ela é calculada como o aumento de nutrientes absorvidos na biomassa da cultura acima do solo por unidade de nutriente aplicado em relação a um controle não fertilizado (2). Os estudos de campo são preferidos para quantificar a EA e a ERF do fertilizante, porque a eficiência de absorção dos nutrientes do fertilizante aplicados ao solo ou às folhas varia de acordo com o nutriente, o método de aplicação, o posicionamento, o momento, a taxa de aplicação, o tipo de solo e de cultura e as condições ambientais. A interpretação dos valores de EA e ERF precisa ser cuidadosa devido a essa complexidade de fatores. Outros indicadores de cultura são necessários para entender o modo de ação dos novos fertilizantes, especialmente a eficiência de absorção, translocação, distribuição e redistribuição de nutrientes na planta (2).

O nitrogênio (N) é o macronutriente mais facilmente perdido da zona radicular por lixiviação, escoamento ou perdas atmosféricas. As perdas de N por lixiviação são altas porque, independentemente da forma de fertilizante de N adicionada ao solo, os processos químicos, microbianos e enzimáticos convertem o N adicionado em formas que podem ser perdidas. Os processos microbianos e enzimáticos no solo convertem o N adicionado em amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-). O nitrato, por ser aniônico, não é fortemente retido no solo, pois as superfícies das partículas coloidais geralmente têm carga negativa líquida. A amônia (NH_3) é produzida por processos químicos e enzimáticos a partir da ureia e de fertilizantes à base de amônio e pode ser perdida para a atmosfera (volatilização). Além disso, os microrganismos podem converter o NO_3^- em outras formas gasosas (como N_2 e óxido nitroso, N_2O) facilmente perdidas para a atmosfera. Essas

formas gasosas de N são geradas dependendo da forma do fertilizante N adicionado e das condições atuais do solo, causando a transformação microbiana ou enzimática do N de uma espécie para outra (3).

Como consequência da transformação e da perda de N, a eficiência da aquisição do N do fertilizante pela cultura (EUN, eficiência de uso do N) medida em experimentos de campo varia de 10% a 75%, com uma média global de cerca de 50% (2, 4). Tanto práticas agronômicas mais precisas quanto o desenvolvimento de fertilizante visam aumentar a eficiência do uso do N. O objetivo geral é diminuir o movimento do N no solo (controlando a liberação do nutriente ou reduzindo a conversão em nitrato) ou diminuir sua conversão em formas gasosas, como amônia (NH_3), óxido nitroso (N_2O) e outros gases que contêm N.

As inovações no projeto de fertilizantes com N geralmente se concentram em formulações de liberação lenta ou controlada, mas essas duas opções não devem ser confundidas. Um fertilizante de liberação lenta é definido como um "fertilizante no qual, por hidrólise e/ou por biodegradação e/ou por solubilidade limitada, os nutrientes disponíveis para as plantas são distribuídos ao longo de um período de tempo, quando comparado a um produto "solúvel de referência"(5). Um fertilizante de liberação controlada é definido como um "fertilizante no qual a liberação de nutrientes é controlada, atendendo à taxa de liberação de nutrientes declarada e, ao tempo, de liberação declarada em uma temperatura especificada"(5). Essa taxa controlada de liberação de nutrientes é obtida pela modificação de formas de nutrientes prontamente disponíveis com mecanismos físicos reconhecidos, como revestimentos, oclusões, ou outros meios semelhantes. Ambos visam obter maior sincronia entre a liberação de nutrientes do fertilizante e a demanda de nutrientes da cultura (Fig. 2) reduzindo, assim, as perdas e aumentando a eficiência da recuperação.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

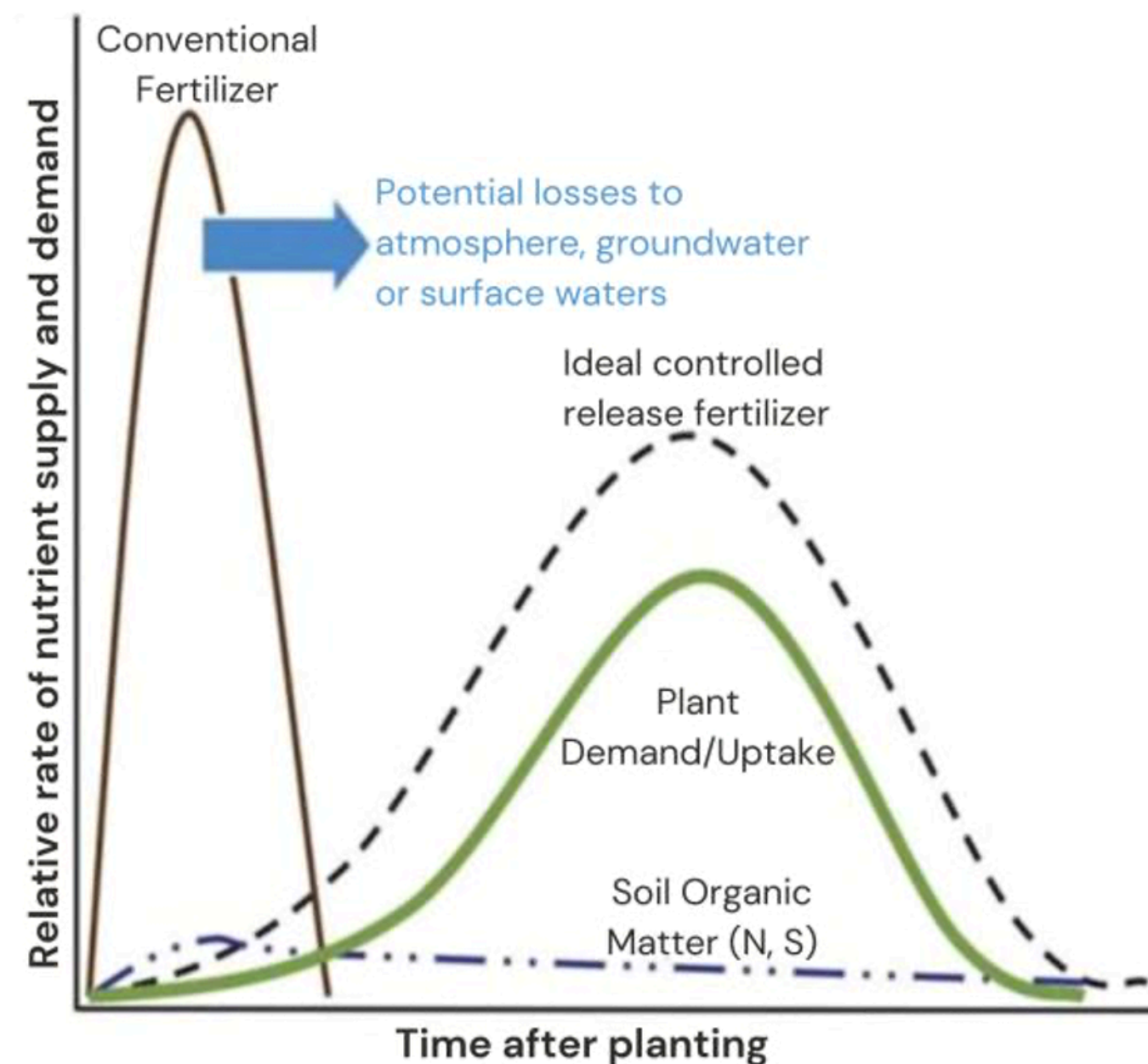


Figura 2. Taxas relativas de demanda da cultura por um nutriente (por exemplo, nitrogênio) e fornecimento de várias fontes. Os fertilizantes de liberação controlada visam atrasar a liberação de nutrientes para obter maior sincronia com a demanda de nutrientes da cultura. Fonte: adaptado de Lam et al. 2024 (6).

O fósforo (P) é adicionado ao solo principalmente na forma de orto ou polifosfatos aniônicos. Ao contrário do nitrato, os íons de fosfato reagem fortemente com os cátions do solo, como alumínio (Al), ferro (Fe), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), formando precipitados pouco solúveis ou complexos de superfície fortemente ligados. As perdas para a atmosfera são insignificantes e as perdas por lixiviação ou escoamento superficial também são relativamente pequenas na maioria dos solos. A eficiência de recuperação do fertilizante à base de P pela cultura é baixa no ano da aplicação, geralmente de 3% a 35%(2, 7, 8). Entretanto, o P do fertilizante fortemente retido no solo não está totalmente indisponível para as culturas. Com o tempo, as culturas podem acessar uma parte do P retido, geralmente chamado de "legado de P"(9). Ao aplicar P continuamente em um solo com deficiência de P, a EU do P aplicado aumenta e pode exceder 90% em solos com grandes estoques de legado de P (10).

Em solos com deficiência de P, os produtos que visam aumentar a eficiência do uso de fertilizantes à base de P devem aumentar a mobilidade do P aplicado no solo. Em solos com um histórico de aplicação de fertilizantes fosfatados que excede a remoção da cultura, o objetivo deve ser melhorar o acesso da planta ao legado de P para atingir um novo estado em que a EU seja alta, enquanto o nível de P armazenado no solo é reduzido. Na prática, isso envolve a fertilização em uma taxa ligeiramente inferior à da remoção da cultura por vários anos antes de voltar às taxas de reposição. Para esses solos, devem ser desenvolvidos novos produtos químicos ou microbianos que liberem parte desse legado de P para a absorção pela cultura.

A eficiência do uso de fertilizantes com K foi menos estudada mas, em geral, a EU varia de 30% a 50%. com base nos dados de absorção de nutrientes da cultura. Foram registrados valores de até 80% usando uma técnica de marcação de isótopos em condições de casa de vegetação (11).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Existem relativamente poucos dados sobre a eficiência de recuperação de fertilizantes secundários (por exemplo, Ca, Mg) e de micronutrientes. No ano da aplicação, a EU pode variar muito, principalmente dependendo da forma do fertilizante e do fato de ele ser aplicado no solo ou via foliar. Como exemplo, os cátions de micronutrientes cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) têm valores de EU particularmente baixos devido à sua forte retenção no solo, enquanto a aplicação foliar diretamente nas folhas pode resultar em uma EU muito mais elevada. No entanto, assim como no caso dos fertilizantes fosfatados, há um efeito agrônômico residual contínuo dos micronutrientes aplicados no solo (12), em que as aplicações anuais que excedem a demanda da cultura podem não ser necessárias. Consequentemente, para aumentar a EU desses nutrientes, os novos fertilizantes de micronutrientes devem se concentrar no aumento da mobilidade no solo, ou na aplicação de nutrientes diretamente na folhagem em formulações que garantam a absorção e/ou a movimentação efetiva por toda a planta.

A fertilização foliar pode complementar a fertilização das plantas via solo, contornando os processos adversos do solo. Entretanto, sua implementação requer uma boa penetração dos elementos minerais através das barreiras foliares e uma translocação eficaz dos nutrientes*(13*). Como os efeitos dos fertilizantes foliares são de curta duração e apenas pequenas quantidades de nutrientes podem ser aplicadas às folhas, muitas vezes são necessárias aplicações repetidas para manter os níveis de nutrientes. Além disso, a aplicação de fertilizantes foliares em altas concentrações, ou em condições quentes e ensolaradas pode causar queimaduras ou danos às folhas. Deve-se considerar, ainda, que, a aplicação foliar pode não ser eficaz nos estágios iniciais de crescimento, quando a parte aérea das plantas ainda não está totalment fechada. Também pode ocorrer o escoamento de alguns nutrientes da folhagem, principalmente em condições de alta precipitação.

Como a EU de muitos nutrientes geralmente é baixa no ano da aplicação, há um espaço considerável para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes por meio de novas tecnologias para criar fertilizantes de eficiência aprimorada (FEA). Aqui, resumimos as principais tecnologias e os desenvolvimentos recentes em inovações para produzir novos fertilizantes.





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Novas tecnologias candidatas para fertilizantes mais eficientes

Com os avanços em nanoquímica, ciência dos materiais, química de polímeros, mecanoquímica, bioquímica e métodos de fabricação ecológicos, estão surgindo opções de fertilizantes mais eficientes usando materiais recém-desenvolvidos. Uma seleção de inovações amplamente estudadas é discutida a seguir, reconhecendo que várias revisões científicas sobre o tema foram publicadas recentemente (13-17).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

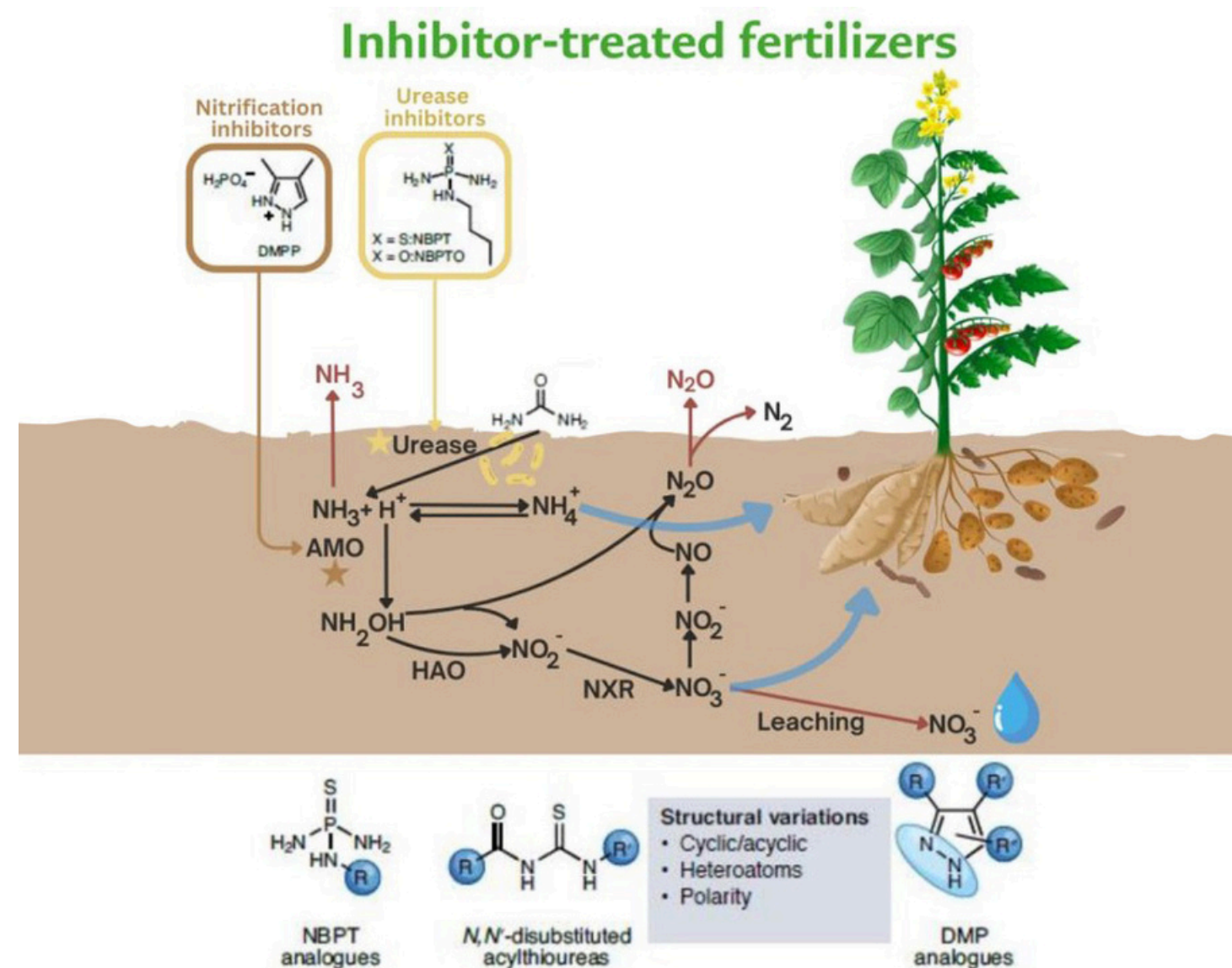


Figura 3: Inibidores químicos atuais e de próxima geração. Os processos visados pelos inibidores químicos são indicados por estrelas (amarelo para inibidores de urease, com NBPT como exemplo; azul para inibidores de nitrificação, com DMPP como exemplo). HAO - hidroxilamina oxidoreductase; NXR - nitrito oxidoreductase. Fonte: adaptado de Lam et al. 2022 (16).

Fertilizantes tratados com inibidores

Esse grupo de fertilizantes, às vezes também chamado de fertilizantes estabilizados, não é uma nova tecnologia propriamente dita, mas representa o tipo mais estabelecido e comercialmente disponível de formulação avançada de fertilizante projetada para aumentar a eficiência do uso de N. A tecnologia de inibidores de N se concentra em retardar a conversão de ureia em amônio, usando inibidores de urease e/ou de amônio em nitrato, usando inibidores de nitrificação (Fig. 3).

Os inibidores de nitrificação e urease foram descobertos há mais de 60 anos (18, 19) e muitos produtos no mercado são baseados em alguns ingredientes ativos principais. NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) e 2-NPT (N-(2-nitrofenil) fosfórico triamida) são inibidores de urease comumente usados. Dicyandiamide (DCD), nitrapyrin e 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) são os inibidores de nitrificação mais comuns. Novos inibidores entraram no mercado na última década, por exemplo, DMPSA (20) e pronitridina (21), um produto da reação da ureia com hidróxido de amônio, DCD e formaldeído. No entanto, eles se destinam principalmente ao uso com nitrato de ureia-amônio líquido ou amônia anidra.

De modo geral, os inibidores químicos de N têm modos de ação bem conhecidos e são opções particularmente úteis para mitigar as perdas por volatilização da amônia e as emissões de gases de efeito estufa como o óxido nitroso (3).

Estudos sobre o uso de inibidores de urease e nitrificação em combinação mostraram potencial para grandes reduções nas perdas de N gasoso (30-75%), enquanto os aumentos no rendimento da cultura (1-9%) e na eficiência de uso de N (8-15%) são modestos(6). Vários compostos estão sendo investigados quanto à sua capacidade de inibir a nitrificação(16, 22-24) e é provável que outros novos inibidores apareçam no mercado comercial em breve. Será importante garantir que qualquer nova química nessa área não represente nenhuma ameaça à qualidade do solo ou à segurança alimentar (25).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Revestimentos

Os revestimentos são geralmente usados com fertilizantes granulares altamente solúveis para controlar a liberação de nutrientes do grânulo (Fig. 4) e minimizar as perdas de nutrientes do solo para a atmosfera (N), pela lixiviação ou pelo escoamento (N, P e S) (26).

Assim como tecnologias de inibidores, os fertilizantes revestidos não são por si novidade, pois têm sido objeto de estudo por muitas décadas (27, 28). Os revestimentos podem ser compostos de vários materiais, incluindo nutrientes, resíduos de solo (por exemplo, enxofre, gesso, calcáreo), produtos químicos sintéticos (por exemplo, asfalto, termoplásticos, poliuretanos, resinas, polímeros), materiais orgânicos naturais (por exemplo, ceras, óleos, biochar, polímeros de base biológica, hidrogéis), ou inoculantes microbianos (por exemplo, bactérias, fungos).

Os fabricantes geralmente preferem as tecnologias de revestimento porque a fabricação subjacente dos produtos de fertilizantes básicos não exige nenhuma alteração. Assim, a formulação final do fertilizante pode ser mais flexível com a adição de outros nutrientes, bioestimulantes ou microrganismos ao produto básico. Dessa forma, o revestimento pode ser descentralizado para maior proximidade com o local de uso, reduzindo os riscos de degradação do revestimento no transporte. Os principais requisitos para a comercialização de novas tecnologias de revestimento são: i) baixo custo do material de revestimento; ii) tecnologia de revestimento econômica e escalonável; iii) biodegradabilidade no solo; iv) liberação de nutrientes programada para sincronização com a demanda da cultura; v) liberação com controle de temperatura e vi) qualidade física e estabilidade adequadas do grânulo (por exemplo, sem rachaduras durante o processamento, transporte ou a aplicação).

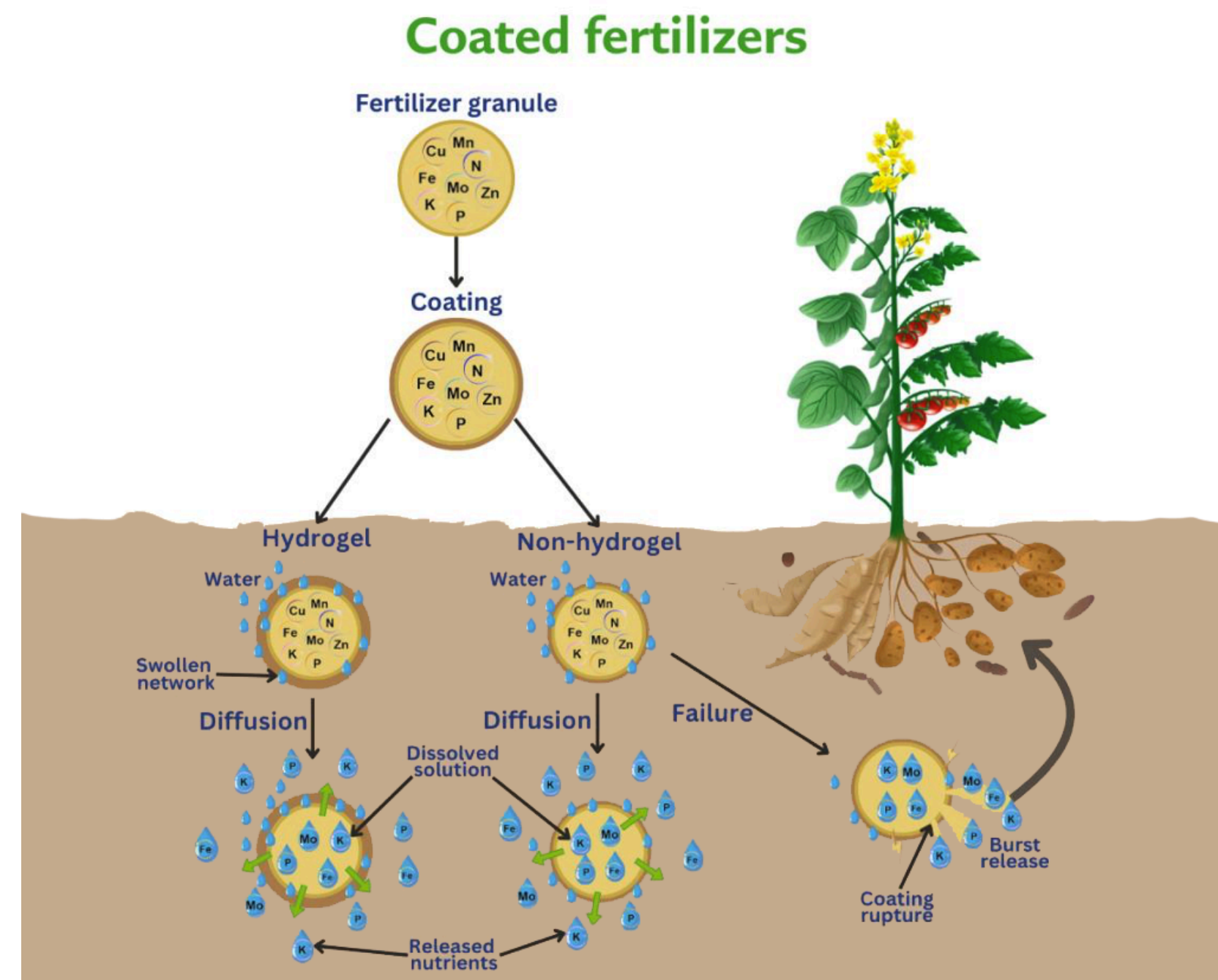


Figura 4. Mecanismos de liberação de nutrientes de fertilizantes solúveis revestidos.
Fonte: adaptado de Kassem et al. 2024 (15).

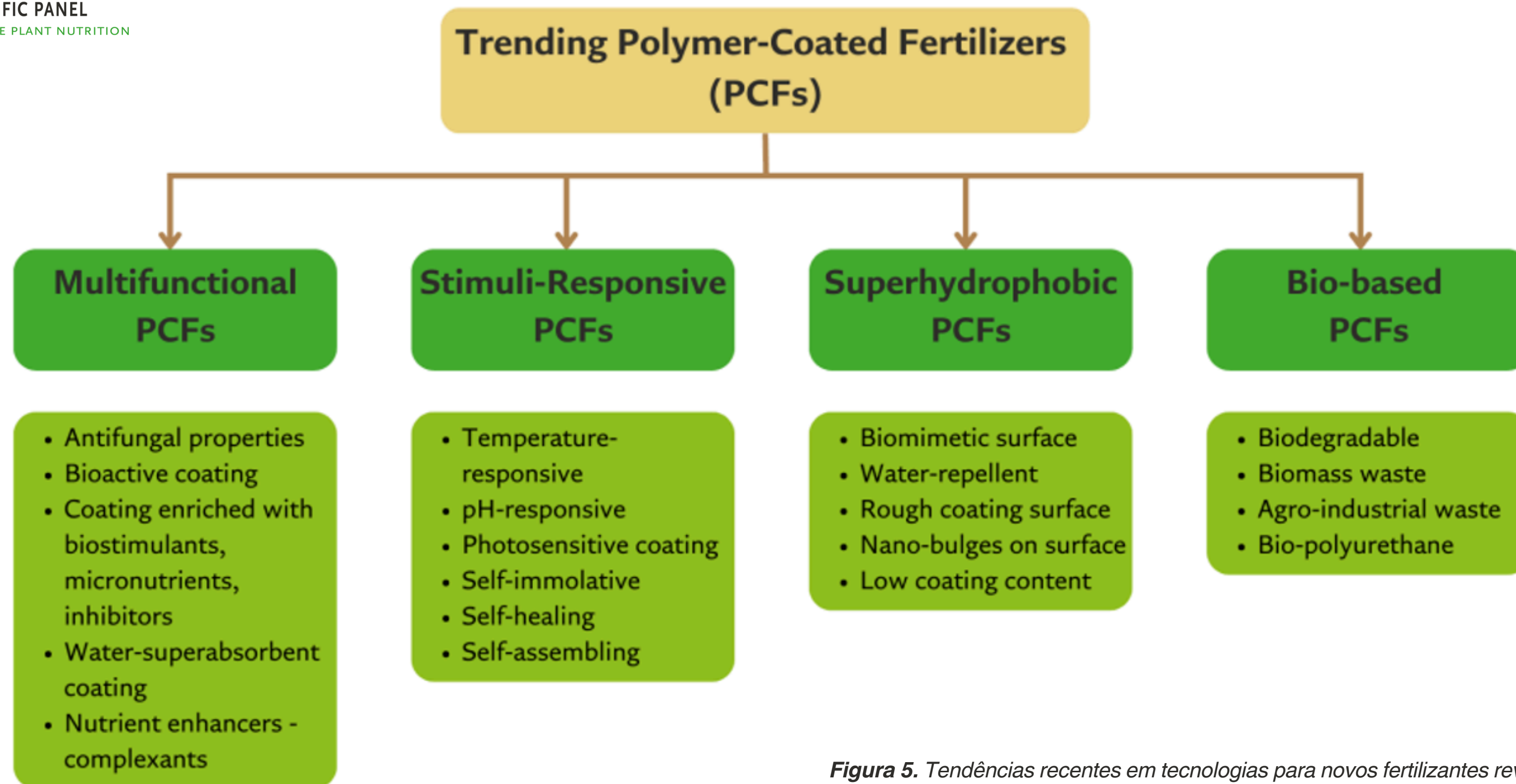


Figura 5. Tendências recentes em tecnologias para novos fertilizantes revestidos com polímeros (PCFs). Fonte: adaptado de Kassem et al. 2024 (15).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

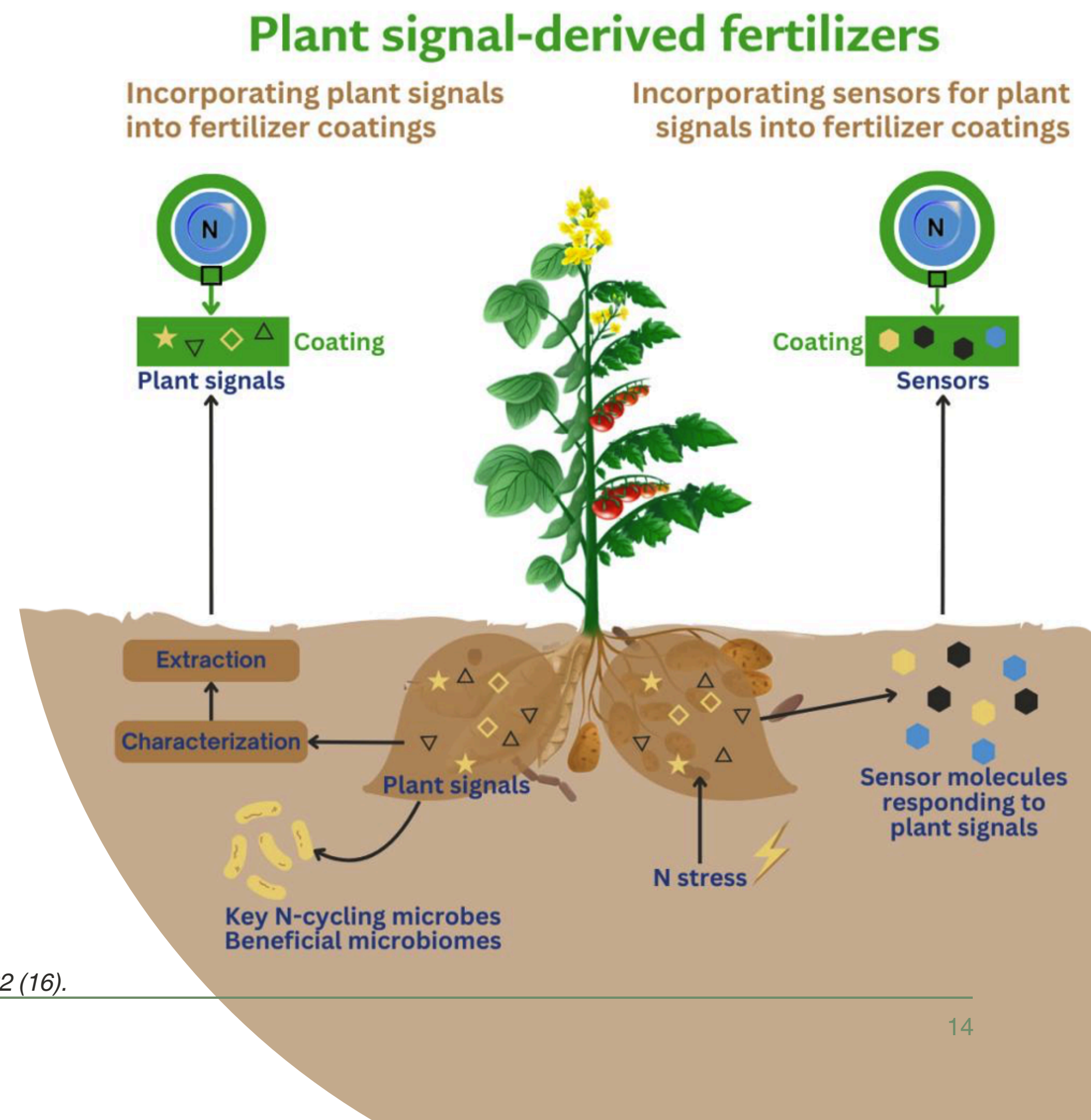
Devido à preocupação com a poluição plástica dos solos (29) quando compostos recalcitrantes são usados em fertilizantes revestidos com polímeros, as inovações em revestimentos de fertilizantes (Fig. 5) têm se concentrado mais em polímeros de base biológica, materiais de revestimento de hidrogel, revestimentos responsivos a estímulos, ou materiais com maior degradabilidade no solo (14, 15, 17, 30).

É importante observar que o objetivo não é retardar a liberação em si, mas sim controlar a liberação para sincronizar melhor a disponibilidade de nutrientes com a demanda da cultura. Notavelmente, os revestimentos de fertilizantes "inteligentes" visam liberar nutrientes solúveis encapsulados em resposta a mudanças na química da rizosfera ou na temperatura do solo, ou a compostos de sinalização das raízes (Fig. 6) que afetam a função microbiana ou da raiz (16, 31-33). Até o momento, essas são as principais ideias que foram propostas. A viabilidade de aproveitar esse modo de ação para produzir fertilizantes mais eficientes ainda não foi concretizada científica e comercialmente.

Também foram desenvolvidos revestimentos de polímeros que alegam aumentar a EUNu por meio da interação química com os constituintes do solo que reduzem a disponibilidade de P (Al, Fe ou Ca), mas há um debate científico considerável em relação à eficácia agrônômica desses revestimentos (34-37) e o modo de ação alegado não foi claramente demonstrado nas taxas de aplicação comercial (38, 39).

Um avanço mais recente é o desenvolvimento comercial de revestimentos biológicos formulados para a aplicação em fertilizantes granulares tradicionais (por exemplo, ureia,

Figura 6. Os futuros fertilizantes "inteligentes" podem conter revestimentos que permitem a liberação de nutrientes em resposta aos sinais das plantas. Fonte: adaptado de Lam et al. 2022 (16).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

fosfato monomamônico (MAP), fosfato diamônico (DAP), superfosfato triplo (STP) ou fertilizantes fluidos (por exemplo, nitrato de ureia e amônio (NUA), polifosfato de amônio (PFA), oligoelementos líquidos). Alguns deles até afirmam aumentar a EUNu do produto base. Eles podem ser compostos por bactérias ou fungos vivos, ou seus esporos, ou por enzimas. Há poucas informações publicadas sobre a sobrevivência desses microrganismos, ou se as enzimas permanecem ativas após a aplicação no solo, bem como sobre seu modo de ação ou efeitos sobre o rendimento da cultura (40). O ambiente químico da água dos poros do solo ao redor de um grânulo de fertilizante solúvel ou de um líquido de fertilizante (por exemplo, ureia, nitrato de amônio, polifosfato de amônio, oligoelementos líquidos) após a adição ao solo não favorece a sobrevivência dos microrganismos devido à alta força iônica da solução, ao pH frequentemente adverso da solução e, em alguns casos, às altas concentrações de elementos potencialmente tóxicos, como o Zn (41). A inovação em revestimentos microbianos para fertilizantes solúveis em água comumente usados precisará desenvolver formulações que maximizem a sobrevivência e o crescimento microbiano. Burke et al.(42), por exemplo, mostraram que os nanorrevestimentos podem proteger os fertilizantes microbianos.

Tecnologias de transporte

Esse grupo de tecnologias baseia-se no princípio de que os nutrientes podem ser carregados em uma estrutura "transportadora" que pode ser composta de nutrientes ou elementos não nutricionais. Normalmente, a matriz transportadora modifica de alguma forma a liberação de nutrientes, de modo que o fertilizante resultante tenha características de liberação diferentes das dos fertilizantes altamente solúveis. A seguir, descrevemos três categorias de materiais de suporte.

Hidróxidos duplos em camadas

Os hidróxidos duplos em camadas (HDC) compreendem uma classe de materiais que consistem em camadas de hidróxidos metálicos carregados positivamente. Entre as camadas, íons carregados negativamente e moléculas de água equilibram a carga. Essa classe de material é frequentemente descrita como "argilas aniônicas" porque podem trocar os ânions entre as camadas, o que os torna úteis para uso como fertilizantes (43).

Os hidróxidos duplos em camadas têm a fórmula geral



em que M é um metal e A é um ânion. Originalmente, esses minerais naturais ou sintéticos foram aplicados para remover poluentes aniônicos de suprimentos de água, incluindo fosfato (44, 45). Rapidamente surgiu o interesse em usar os materiais carregados com P como fertilizantes e, mais recentemente, para o desenvolvimento de novos fertilizantes de molibdênio (Mo) de liberação lenta (46).

Descobriu-se que a liberação de P dos fertilizantes HDC carregados de P era lenta, mas a eficiência agronômica excedia a dos fertilizantes de P solúvel em solos ácidos em até 4,5 vezes(47, 48), mas os valores de eficiência de uso ainda eram extremamente baixos (<3%). Posteriormente, descobriu-se que o melhor desempenho agronômico se devia à dissolução do HDC, que atuava como agente de calagem no solo, e não às características de liberação de P do fertilizante.

Como em muitas fontes de P de liberação lenta, a forma e a colocação do fertilizante são essenciais para a dissolução e a eficácia da absorção pela cultura. A granulação dos materiais em pó reduz drasticamente a dissolução e a aquisição de nutrientes pela



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

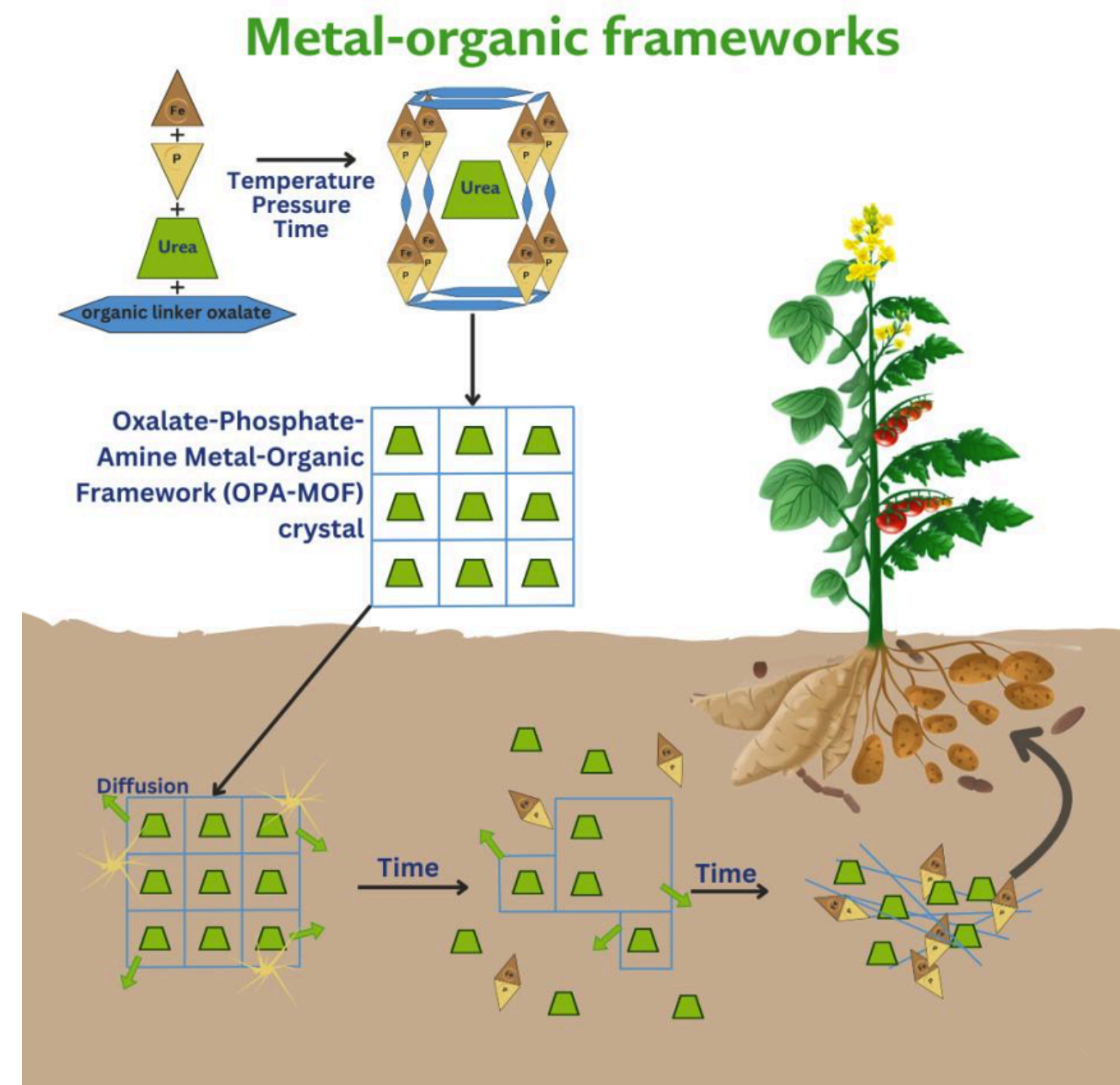
cultura (48). Portanto, as avaliações agronômicas precisam ser realizadas com a forma do produto que provavelmente será usada pelos agricultores. Outra limitação dos dos HDCs é o conteúdo de nutrientes dos produtos finais, pois a base do transportador geralmente inclui elementos não nutritivos que normalmente não são adicionados ao solo (por exemplo, Al, Fe), resultando em baixos teores de nutrientes de fertilizantes, por exemplo, <10% de P (49).

Estruturas orgânicas de metal

As estruturas orgânicas metálicas (EOMs, Fig. 7) são estruturas moleculares porosas compostas por íons metálicos (por exemplo, Cu, Fe-, Zn etc.) ligados por moléculas orgânicas. Os poros da estrutura podem ser projetados para reter gases ou íons, tornando as EOMs adequadas para aplicações em muitos setores. A possível aplicação de EOMs para a formulação de fertilizantes foi relatada há relativamente pouco tempo (50, 51). O modo de ação desses materiais consiste em prender ou reter nutrientes dentro da estrutura de poros e liberá-los lentamente, à medida que os ligantes orgânicos se degradam lentamente no solo.

Semelhante aos materiais HDC, há benefícios se os metais na estrutura forem nutrientes de plantas (normalmente necessários para serem aplicados no solo), tornando alto o teor de nutrientes da formulação. A viabilidade do aumento de escala da produção de fertilizantes EOM foi demonstrada recentemente (52). Entretanto, ainda não foram demonstradas vantagens significativas de rendimento ou economia de custos com o uso desses materiais como fertilizantes em relação aos produtos convencionais.

Figura 7. Projeto básico de estruturas metal-orgânicas baseadas em N, P e Fe e seus modos de ação após a adição ao solo. Fonte: adaptado de Anstoetz et al. 2015 (50).





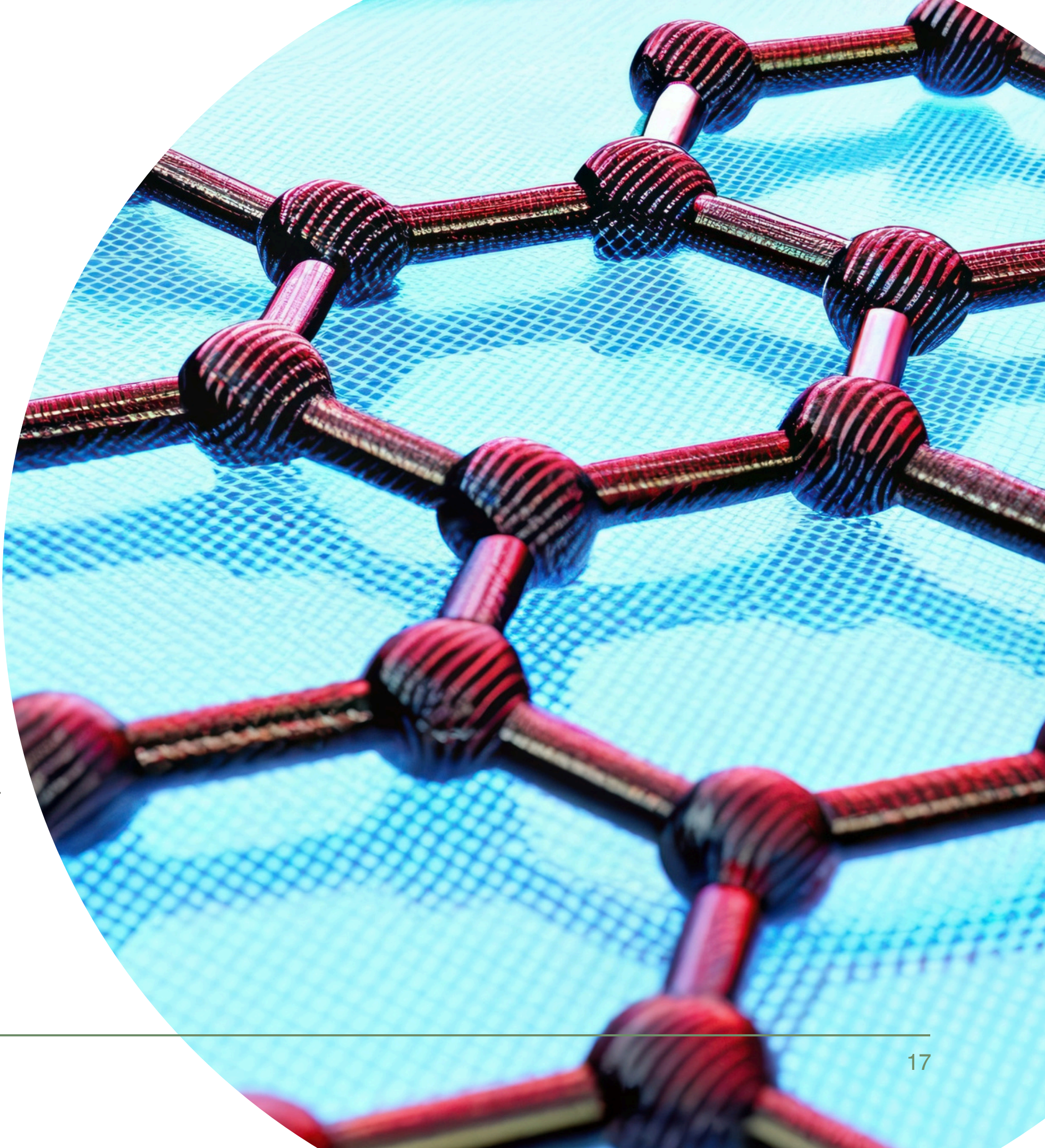
SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Materiais à base de grafeno

O grafeno, um material descoberto em 2004, compreende folhas bidimensionais ultrafinas de átomos de carbono (C) com propriedades químicas e físicas exclusivas que resultaram em amplas aplicações desse material na indústria. O grafeno pode ser oxidado em óxido de grafeno para conferir uma forte carga negativa à superfície do material, permitindo a retenção de nutrientes catiônicos ou a fixação de nutrientes aniônicos por meio de pontes catiônicas. Zhang et al.(53) foram os primeiros a usar o óxido de grafeno como material de revestimento em grânulos de nitrato de potássio (KNO_3) para conferir características de liberação lenta ao fertilizante. Desde então, vários estudos examinaram a capacidade dos materiais à base de grafeno de atuar como transportadores de nutrientes (54, 55), como revestimentos para retardar a liberação de nutrientes (56) ou para melhorar a qualidade física do fertilizante (57).

Assim como ocorre com outras tecnologias de transporte, um dos problemas com o uso de materiais à base de grafeno como fertilizantes é a diluição do conteúdo de nutrientes na formulação final devido ao C no material de transporte. É improvável que o C dos fertilizantes à base de grafeno beneficie a saúde do solo, já que não é uma fonte de C para os microrganismos e pode gerar preocupações devido à persistência no solo (58). Além disso, os custos das matérias-primas e o aumento da escala de produção podem impedir a adoção comercial dessa tecnologia de fertilizantes. Por fim, o teste de eficácia de quaisquer novas formulações precisa passar do laboratório/estufa para a fábrica e para o campo para que haja aceitação e implementação comercial.





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Nanomateriais

Os nanomateriais são materiais que contêm 50% ou mais de partículas ou constituintes com pelo menos uma dimensão na faixa de 1-100 nm(59). Os nanomateriais são interessantes porque o comportamento do material em nanoescala é muito diferente do comportamento do mesmo material em tamanho grande, já que a relação entre a área da superfície e o volume é muito grande. Além disso, devido ao seu tamanho pequeno e dependendo da carga da superfície, os nanomateriais podem ser mais móveis nos solos do que o nutriente equivalente na forma iônica (60). Portanto, eles podem entrar nas plantas por rotas diferentes das dos nutrientes na forma iônica (13, 61, 62). Nos últimos 15 anos, várias revisões examinaram a possível aplicação de nanomateriais para o projeto de fertilizantes, seja como nanomateriais ou como nanocarreadores de nutrientes (61, 63-67). Todos eles são efetivamente novos fertilizantes em suspensão com os sólidos suspensos nanométricos. Alguns nanofertilizantes podem oferecer benefícios não nutricionais ao crescimento das plantas, atuando como bioestimulantes. Por exemplo, eles podem aumentar a eficiência da fotossíntese, ampliando a faixa de resposta à luz dos cloroplastos e melhorando o transporte de elétrons (68). Como apenas pequenas quantidades de nutrientes podem ser aplicadas às folhas das plantas pela via foliar, os fertilizantes de micronutrientes nanométricos provavelmente serão mais bem-sucedidos do ponto de vista agrônomo do que os fertilizantes foliares de macronutrientes nanométricos.

O fornecimento preciso de nutrientes ou outras moléculas às plantas por meio de nanotecnologia ainda está em desenvolvimento, com barreiras científicas e sociais significativas a serem superadas (69). Atualmente, há mais de 600 publicações em periódicos com nanofertilizantes em seus títulos (ISI Web of Science, acessado em fevereiro de 2025), mas, com a notável exceção de produtos como Nano-Ureia ou Nano-DAP na Índia, suas aplicações comerciais permaneceram muito limitadas. Em muitos

casos, não há uma avaliação agrônoma rigorosa dos nanofertilizantes aplicados no solo em condições de campo, enquanto as preocupações com a saúde ocupacional criticam a logística da aplicação de nanofertilizantes, exceto como suspensões líquidas. Os riscos ambientais ou de saúde de longo prazo decorrentes da introdução regular de nanopartículas em ecossistemas gerenciados e naturais e em suas cadeias alimentares ainda não foram totalmente avaliados (70).

Os nanofertilizantes também foram avaliados em condições de casa de vegetação, mas esses estudos muitas vezes também carecem de rigor (71). Embora o destino das nanopartículas no solo seja pouco estudado, os estudos de nanotoxicologia do solo mostraram que os nanomateriais se agregam aos colóides do solo (heteroagregação), perdendo rapidamente sua forma "nano" (72). Sugeriu-se que os nanofertilizantes foliares são mais eficazes do que os fertilizantes foliares convencionais (32, 69). Embora os resultados de estudos mecanicistas fundamentais indiquem novos modos de entrada nas plantas e translocação, as alegações de eficácia em relação aos produtos convencionais ainda não têm suporte sólido (13, 73) e ainda há grandes lacunas na avaliação rigorosa de campo (13). Conforme observado acima, os nanomateriais foram propostos como revestimentos para fertilizantes que contêm microrganismos benéficos para melhorar a sobrevivência microbiana (42) mas, mais uma vez, a implementação comercial ainda não ocorreu.

Nesse campo em rápida mudança, uma meta-análise inicial da eficácia dos nanofertilizantes em comparação com os produtos convencionais sugeriu que a EUNu poderia ser aumentada em até 29% (74). No entanto, o custo de fabricação dos nanofertilizantes foi apontado como um impedimento para a adoção generalizada (75), mesmo quando se supõe uma EUNu muito maior do que a dos produtos convencionais



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

(de 7 a 27 vezes maior). Claramente, como a eficiência do uso convencional de nutrientes está atualmente entre 10 e 80%, o escopo para aumentar a EUNu em mais de 10 vezes é limitado.

Os primeiros nanofertilizantes, especialmente a nano ureia e o nano DAP, foram comercializados recentemente na Índia (76, 77), o que representa um estudo de caso com o qual muito pode ser aprendido. Os cientistas levantaram preocupações (78) que devem ser abordadas, especialmente em termos de compreensão científica subjacente do modo de ação, bem como em termos de avaliação rigorosa de campo. Embora os estudos hidropônicos tenham fornecido os primeiros indícios de efeitos bioestimuladores da nanouréia na assimilação de N e na biossíntese de clorofila (79), as pesquisas até agora ainda não elucidaram um modo de ação claro (plausível). Além disso, muitos dos testes de campo realizados até o momento apresentam lacunas metodológicas em termos de projeto de tratamento (por exemplo, falta de controles adequados, falta de curvas completas de resposta ao N, taxas de N utilizadas), medições ou análise e interpretação de dados. No final, a avaliação agrônômica e econômica independente dos novos nanoprodutos determinará quais nanofertilizantes são eficazes e econômicos para serem usados pelos agricultores (veja abaixo).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Barreiras ao uso comercial mais amplo de novas tecnologias de fertilizantes

O uso comercial de fertilizantes em todo o mundo ainda é dominado por "produtos básicos", como ureia, MAP, DAP, muriato de potássio, etc., com base em tecnologia desenvolvida em meados do século passado.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Além de uma diversidade cada vez maior de formulações e combinações de nutrientes em produtos fertilizantes, provavelmente as inovações mais utilizadas na tecnologia de fertilizantes desde então foram os inibidores usados para "estabilizar" produtos N e revestimentos de fertilizantes para retardar ou controlar a liberação de nutrientes (principalmente N). No entanto, esses produtos ainda constituem apenas uma pequena porcentagem do mercado global de fertilizantes atualmente. Por que isso acontece?

Os novos fertilizantes atuais tendem a ser mais caros do que os produtos convencionais e os benefícios agrônômicos ou de EUNu geralmente não são grandes em comparação com o custo adicional (80). A maioria dos agricultores exige a demonstração de um benefício econômico claro antes de adotar uma nova tecnologia, a menos que sejam oferecidos outros incentivos mais amplos. Por exemplo, nos Estados Unidos, iniciativas como o Environmental Quality Incentives Program e o Conservation Stewardship Program oferecem assistência técnica e financeira aos agricultores que adotam esses novos fertilizantes, incluindo produtos com N estabilizado. Esses programas visam reduzir as perdas de N e, ao mesmo tempo, apoiar a produtividade das culturas e a sustentabilidade ambiental. No Canadá, iniciativas como o Canola 4R Advantage Program, apoiado pelo On-Farm Climate Action Fund, oferecem incentivos para a implementação de práticas de manejo de nutrientes 4R, que incluem o uso de novos fertilizantes, como aqueles com N estabilizado.

Diversas publicações científicas exploram o desenvolvimento de novas formulações de fertilizantes. No entanto, poucas das tecnologias sugeridas estão disponíveis como produtos comerciais para os agricultores. Por que isso acontece? Primeiro, precisamos considerar e fechar a "lacuna de eficiência de recuperação" - em média, as plantas

recuperam de 40% a 60% do N e do K aplicados nos fertilizantes. Em comparação, a recuperação de P dos fertilizantes varia de <10% em solos com deficiência de P a >80% em solos com um longo histórico de uso de fertilizantes. Muitos ganhos de eficiência são limitados quando testados em condições de campo realistas; portanto, afirmações exageradas de melhorias de eficiência devem ser vistas com cautela.

Muitas tecnologias emergentes descritas na literatura científica não serão desenvolvidas comercialmente porque os benefícios da inovação em termos de rendimento, EUNu ou proteção ambiental não são significativos o suficiente para justificar o aumento dos custos de produção ou aplicação. Além disso, muitas questões não relacionadas à agronomia, à EUNu ou a benefícios ambientais precisam ser satisfeitas para a comercialização efetiva de qualquer nova tecnologia - custos de energia e matérias-primas, segurança do fornecimento de matérias-primas, novos requisitos de capital para fabricação, escalabilidade da fabricação, logística e custos de transporte, manuseio e aplicação de novos produtos e considerações de saúde e segurança ocupacional. Essas questões raramente são consideradas em publicações de pesquisa (70).

Por fim, pode haver barreiras políticas ou regulatórias para a adoção de novas tecnologias, por exemplo, preocupações ambientais e com a saúde humana em relação a microplásticos (de revestimentos de polímeros), nanomateriais, possível transferência de novos produtos químicos para a cadeia alimentar (25), etc. Isso requer consideração em um estágio inicial do desenvolvimento de novos produtos e a coleta de informações e dados adequados para garantir a segurança do produto.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Avaliação de novos produtos fertilizantes

Quatro aspectos devem ser considerados para avaliar uma nova formulação de fertilizante, incluindo o entendimento do modo de ação do fertilizante, a avaliação de sua eficiência agronômica e ambiental, a avaliação da logística e da facilidade de manuseio da nova formulação e a facilidade, o custo e a pegada ambiental da fabricação.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION



Modo de ação

O modo de ação alegado deve ser testado, divulgado (publicado) e verificado. A experimentação para verificar o modo de ação dependerá principalmente do tipo de fertilizante e da natureza da invenção. Por exemplo, um novo produto de N que alega atrasar a liberação de formas de N disponíveis para as plantas precisa ser avaliado quanto à cinética de liberação de N, de preferência no solo, e comparado à liberação de N de um fertilizante de referência comumente usado pelos agricultores. Um novo produto que alega liberar P de formas indisponíveis no solo precisa ser testado quanto à dissolução/liberação de P para a solução do solo a partir da fase sólida no solo, de preferência usando princípios de diluição isotópica, que podem medir tanto o P em solução quanto o P adsorvido à fase sólida que está em equilíbrio com a solução do solo (81). Um nanofertilizante que alega aumentar a produtividade da cultura ou a eficiência do uso de nutrientes precisa ser testado quanto aos efeitos diretos de fornecimento de nutrientes envolvidos, bem como quanto às respostas bioestimulatórias que possam afetar o crescimento (71). A compreensão dos modos de ação requer uma pesquisa detalhada usando técnicas científicas avançadas. Por exemplo, o estudo do movimento de nanopartículas em solos ou plantas requer muito cuidado e várias técnicas diferentes (71), inclusive diferentes técnicas de rotulagem (82). Da mesma forma, a análise da expressão genética detalhada, bem como as medições fisiológicas, são necessárias para desvendar respostas específicas (hormonais) à aplicação de um produto que pode, além de transportar nutrientes, atuar como bioestimulante.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Desempenho agronômico e ambiental

Os ganhos de eficiência agronômica e ambiental alegados precisam ser verificados. As primeiras indicações de eficiência de um novo produto podem ser obtidas em ambiente controlado ou em condições de estufa, com métodos experimentais adequados, ou seja, quantidade, forma e colocação de produto semelhantes aos destinados ao uso no campo. Para avaliar novos produtos, muitas vezes os experimentos em casa de vegetação usam meios de crescimento inadequados, por exemplo, vermiculita, perlita, misturas para vasos, areia pura e quantidades, forma e colocação de produtos não representativos (por exemplo, pós finos misturados uniformemente no solo quando o produto pretendido será colocado em faixas na forma granular em condições de campo).

Por fim, e o mais cedo possível, o desempenho de novos produtos deve ser avaliado em condições de campo. Recentemente, foram propostas diretrizes gerais para a avaliação de novas soluções de nutrição vegetal (83).

A avaliação a campo deve ocorrer em vários locais/anos e com o tipo de cultura apropriado (para aquele produto), colocação e gerenciamento. Naturalmente, a combinação local/solo/cultura precisa ser deficiente no(s) nutriente(s) que está(ão) sendo avaliado(s). Os projetos experimentais exigem parcelas de controle adequadas (sem adição de nutrientes). Por exemplo, um

Diretrizes para Avaliação de Produtos Fertilizantes de Eficiência Aprimorada (FEA) (83):

- Um comitê científico criou protocolos com foco em projeto experimental, medições de cultura e solo, avaliações de perdas ambientais e administração de dados.
- As diretrizes foram desenvolvidas com a contribuição de pesquisadores internacionais, partes interessadas do setor e organizações agrícolas para padronizar a pesquisa dos FEA e promover o compartilhamento de dados e aprimorar a compreensão científica dos FEA.

Componentes essenciais do projeto experimental e conjuntos mínimos de dados:

- Os ensaios devem incluir tratamentos de controle, comparações de fertilizantes padrão e taxas variáveis de FEA.
- A replicação adequada, o bloqueio e a inclusão de metadados importantes (por exemplo, histórico de campo, propriedades do solo) são necessários para obter resultados robustos.
- A coleta consistente de dados essenciais garante a comparabilidade e a integração entre os testes.
- Os metadados incluem o histórico do solo e da cultura, as condições ambientais e as metodologias dos ensaios.

Estrutura em três níveis:

- Nível 1: Projeto experimental e metadados.
- Nível 2: Métricas de desempenho agronômico e do solo.
- Nível 3: Medições de perdas ambientais (por exemplo, escoamento de nutrientes e emissões gasosas).

Medições de impacto ambiental:

- O documento descreve métodos para avaliar a perda de nutrientes via água (por exemplo, lixiviação de nitrato) e emissões gasosas (por exemplo, óxido nitroso e amônia).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

experimento de campo no qual um produto aplicado via foliar é avaliado requer um controle que receba apenas água, enquanto todas as outras entradas de nutrientes são as mesmas. Da mesma forma, para avaliar se um nanofertilizante aplicado via foliar também pode ter um efeito bioestimulante, é necessário um controle adicional no qual apenas o nutriente dissolvido é aplicado via foliar, sem nanopartículas.

Outro problema frequentemente encontrado é a comparação com o que se aplica em termos de taxas de fertilizantes. Por exemplo, em muitos testes de campo, a aplicação de um novo produto fertilizante em combinação com uma "taxa de N recomendada" reduzida ou completa é comparada à aplicação de N na taxa de N recomendada. No entanto, se a taxa de N recomendada era muito alta para começar (não era agrônômica ou economicamente ideal), uma taxa de N reduzida provavelmente resultará no mesmo rendimento (ou até um pouco maior), independentemente de um novo produto ter sido aplicado ou não. Esse fenômeno tem sido particularmente comum em estudos recentes sobre nanofertilizantes e produtos microbianos. Para avaliar adequadamente a eficácia desse produto, é necessário realizar testes de campo que incluam pelo menos quatro ou cinco níveis diferentes de N, cada um com e sem o novo produto a ser avaliado. Isso permitirá estimar o desempenho do novo produto na taxa ideal de N derivada da curva de resposta ao N.

Vários outros requisitos de projeto também são recomendados para a análise estatística adequada dos dados: casualização, replicação e análise estatística robusta dos dados (84). As combinações das respostas das culturas ao novo produto em vários locais/solos/anos em uma distribuição de probabilidade cumulativa é uma maneira atraente de avaliar a eficácia do novo produto (85, 86). Como demonstrado de forma elegante por Karamanos et al. (87), a análise estatística parametrizada incorretamente pode facilmente levar a falsos positivos (erros do Tipo 1).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Qualidade física, manuseio e segurança

Junto com a eficiência agronômica do produto, a logística e a facilidade de manuseio da nova formulação são igualmente importantes. O produto deve ser fisicamente robusto - para produtos granulares, isso significa boa dureza dos grânulos, baixa higroscopicidade, boa resistência à abrasão, baixa geração de poeira, baixa tendência de aglomeração e boa fluidez. A compatibilidade para mistura com outros fertilizantes também deve ser avaliada. O desenvolvimento de novos produtos também precisa garantir que as novas formulações não representem problemas de saúde ocupacional ou de segurança na fabricação ou no manuseio pelos agricultores devido às suas características físicas, por exemplo, nanodustos ou outros ingredientes perigosos respiráveis.

Fabricação

O desenvolvimento de novas formulações precisa considerar questões de fabricação, como custos de matéria-prima, disponibilidade e segurança de fornecimento, custos de capital para a instalação de novos equipamentos para a fabricação, complexidade e escalabilidade da fabricação, insumos de energia, bem como produção e tratamento de fluxos de resíduos.

A razão pela qual muitas novas formulações de fertilizantes identificadas na literatura científica não obtêm sucesso comercial é que elas não consideram adequadamente todos os fatores acima e talvez se concentrem demais em apenas um ou dois dos principais requisitos. A exploração de diferentes designs de produtos e a escalabilidade em termos de fabricação e custo devem se tornar parte integrante do processo de inovação, em um estágio anterior ao que geralmente é feito.



Quem precisa fazer o quê?

Governos:

Adotar políticas e estabelecer programas que funcionem em vários setores do governo, da indústria e da academia para incentivar e recompensar a inovação em tecnologias de fertilizantes. Melhorar e simplificar as estruturas regulatórias em que a eficácia é demonstrada de forma independente e com protocolos cientificamente rigorosos acordados internacionalmente. Promover o compartilhamento de conhecimento, a educação e a colaboração entre setores e incentivar abordagens de economia circular. Se for o caso, ofereça incentivos financeiros para a adoção de tecnologias.

Setor:

Fornecer recursos e impulsionar a inovação interna e externamente para desenvolver novas tecnologias de fertilizantes. Colaborar com o governo e cientistas acadêmicos para desenvolver fertilizantes que minimizem os impactos adversos sobre o meio ambiente, incluindo fertilizantes N estabilizados, fertilizantes de liberação inteligente/controlada e tecnologias disruptivas. Avaliar novos produtos usando protocolos acordados que sejam mais robustos e transparentes(83). Estabelecer metas de redução de carbono e comprometer-se com metas de sustentabilidade. Comunicar com transparência as características e os benefícios dos produtos.

Pesquisadores:

Inovar tecnologias que melhorem a EUNu e minimizem os danos ambientais. Trabalhar mais estreitamente com os cientistas e engenheiros do setor nos estágios iniciais para desenvolver produtos que possam ser formulados e fabricados a baixo custo e com baixa necessidade de energia. Trabalhar em várias disciplinas para trazer novas ideias e inovações para o projeto de fertilizantes. Avaliar os custos/benefícios de novos produtos em um estágio inicial dos programas de pesquisa e trabalhar com os agricultores/praticantes para identificar as formulações mais viáveis, práticas e seguras em nível de fazenda. Ser crítico em relação às próprias inovações, passar rapidamente para uma avaliação de campo rigorosa e contar com diretrizes de avaliação robustas e padronizadas(83). Publicar pesquisas em revistas de acesso aberto (se possível) e comunicar os resultados agrônômicos e de EUNu, tanto negativos quanto positivos.

Agricultores e outros

profissionais:

Participar de programas de avaliação de campo com novos produtos de fertilizantes, fornecer retorno robusto sobre a facilidade de manuseio e o desempenho na fazenda. Defender produtos mais sustentáveis, exigir transparência no desempenho e apoiar os inovadores locais.



Como seria o sucesso?

1

Muitos fertilizantes novos se tornam disponíveis e aumentam a produtividade das culturas e a eficiência do uso de nutrientes, reduzem ainda mais as emissões de gases de efeito estufa e outras perdas de nutrientes para o meio ambiente, melhoram a qualidade dos alimentos, têm melhores características de manuseio, têm uma pegada de energia menor para a fabricação e minimizam a produção de fluxos de resíduos.

2

Os governos adotam critérios baseados em evidências para o registro e a rotulagem de novos produtos fertilizantes que incluem uma avaliação independente do desempenho agrônômico e ambiental.

3

O setor aumenta os recursos direcionados a novas tecnologias de fertilizantes e desenvolve parcerias com o governo/academia para impulsionar a inovação, além de utilizar mais amplamente protocolos experimentais padronizados para avaliar o desempenho agrônômico e ambiental de novos produtos fertilizantes. Os governos e outros investidores oferecem incentivos para que projetos de pesquisa multissetoriais desenvolvam novos produtos de fertilizantes, estimulando parcerias público-privadas, bem como pesquisas mais abertas e pré-competitivas sobre novos modos de ação, materiais, formulações etc.

4

Os agricultores têm acesso a uma variedade maior de produtos fertilizantes com benefícios comprovados de desempenho e participam de programas de avaliação de fertilizantes usando protocolos harmonizados. As informações sobre o desempenho do produto tornam-se mais transparentes e disponíveis para que os agricultores façam escolhas informadas.



Referências

1. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Plant nutrients are essential for the alleviation of chronic and hidden hunger. *Issue Brief 05* (2023).
2. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Defining nutrient use efficiency in responsible plant nutrition. *Issue Brief 04* (SPRPN, Paris, France, 2023).
3. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Mitigating greenhouse gas emissions through responsible plant nutrition. *Issue Brief 07* (2024).
4. L. You et al., Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices. *Nat Commun.* 14, 5747 (2023).
5. ISO, International Standard ISO/DIS 7851 Fertilizers, soil conditioners and beneficial substances —Classification (ISO, 2021).
6. S. K. Lam, B. Pan, X. Liang, A. R. Mosier, D. Chen, in Improving nitrogen use efficiency in crop production, J. K. Ladha, Ed. (Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, UK, 2024), pp. 201–221.
7. T. M. McBeath, M. J. McLaughlin, J. K. Kirby, R. D. Armstrong, The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. *Plant Soil.* 358, 337–348 (2012).
8. X. Yu, C. Keitel, F. A. Dijkstra, Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. *Global Food Security.* 29, 100545 (2021).
9. B. L. Turner, P. J. Kim, Terminology for residual and legacy phosphorus. *Plant Soil.* 501, 237–239 (2024).
10. A. E. Johnston, J. K. Syers, A new approach to assessing phosphorus use efficiency in agriculture. *Better Crops with Plant Food.* 93, 14–16 (2009).
11. X.-Y. Chen et al., Natural potassium (K) isotope fractionation during corn growth and quantification of K fertilizer recovery efficiency using stable K isotope labeling. *ACS Earth and Space Chemistry.* 6, 1876–1889 (2022).
12. R. F. Brennan, Residual value of zinc fertiliser for production of wheat. *Aust. J. Exp. Agric.* 41, 541 (2001).
13. S. Husted et al., What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in Plant Science.* 28, 90–105 (2023).
14. E. Priya, S. Sarkar, P. K. Maji, A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 12, 113211 (2024).
15. I. Kassem, E.-H. Ablouh, F.-Z. El Bouchtaoui, M. Jaouahar, M. El Achaby, Polymer coated slow/ controlled release granular fertilizers: Fundamentals and research trends. *Progress in Materials Science.* 144, 101269 (2024).
16. S. K. Lam et al., Next-generation enhanced-efficiency fertilizers for sustained food security. *Nat Food.* 3, 575–580 (2022).
17. S. Govil, N. van Duc Long, M. Escribà-Gelonch, V. Hessel, Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Industrial Crops and Products.* 219, 119160 (2024).
18. A. M. Hyson, Fertilizer composition comprising urea and dithiocarbamates. *United States Patent Office Patent* 3,073,064, 15th January 1960, assigned to E.I. du Pont de Nemours and Company, USA (1960).
19. C. A. I. Goring, Control of nitrification by 2-chloro-6-(trichloro-methyl) pyridine. *Soil Sci.* 93 (1962).
20. M. Staal et al., Process for obtaining a fertilizer composition comprising a DMPSA nitrification inhibitor via adding DMPSA or the salts thereof into the fertilizer melt. *Patent WO2020127870A1* (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

21. K. D. Gabrielson, M. L. Epling, Reaction products and methods for making and using same. United States Patent Office Patent US9440890B2 (2016).
22. T. O. Brito et al., Design, syntheses and evaluation of benzoylthioureas as urease inhibitors of agricultural interest. RSC Adv. 5, 44507–44515 (2015).
23. B. I. Taggert, C. Walker, D. Chen, U. Wille, Substituted 1,2,3-triazoles: a new class of nitrification inhibitors. Sci Rep. 11, 14980 (2021).
24. D. Bobeck, A. A. Iman, S. L. Wertz, Agricultural compositions and methods for making and using same. In: USPTO (ed) United States Patent Office Patent Application Publication US2023/0112532 A1 (2023).
25. FAO, Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24, FAO. 2023. Food safety implications from the use of environmental inhibitors in agrifood systems. Food Safety and Quality Series, No. 24. Rome. (2023).
26. M. E. Trenkel, Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers (International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, 2010).
27. K. Lawton, Fertilizer coatings, the effect of coatings on the dissolution of fertilizers and the uptake of fertilizer potassium by plants. J. Agric. Food Chemistry. 9, 276–280 (1961).
28. A. Shaviv, Advances in controlled-release fertilizers. Adv.Agronomy. 71, 1–49 (2001).
29. I. Sa'adu, A. Farsang, Plastic contamination in agricultural soils: a review. Environmental Sciences Europe. 35, 13 (2023).
30. D. Lawrencia et al., Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release. Plants. 10 (2021).
31. X. Zhang, D. Chabot, Y. Sultan, C. Monreal, M. C. DeRosa, Target-molecule-triggered rupture of aptamer-encapsulated polyelectrolyte microcapsules. ACS Applied Materials & Interfaces. 5, 5500–5507 (2013).
32. C. M. Monreal, M. DeRosa, S. C. Mallubhotla, P. S. Bindraban, C. Dimkpa, Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils. 52, 423–437 (2016).
33. H. Mansouri et al., Advances in controlled release fertilizers: cost-effective coating techniques and smart stimuli-responsive hydrogels. Adv. Sustainable Syst. 7, 2300149 (2023).
34. R. E. Karamanos, D. Puurveen, Evaluation of a polymer treatment as enhancer of phosphorus fertilizer efficiency in wheat. Can. J. Soil Sci. 91, 123–125 (2011).
35. S. Cahill, R. J. Gehl, D. Osmond, D. Hardy, Evaluation of an organic copolymer fertilizer additive on phosphorus starter fertilizer response by corn. Crop Management. 12, CM-2013-0322-01-RS (2013).
36. S. H. Chien, D. Edmeades, R. McBride, K. L. Sahrawat, Review of maleic–itaconic acid copolymer purported as urease inhibitor and phosphorus enhancer in soils. Agron. J. 106, 423–430 (2014).
37. B. G. Hopkins, K. J. Fernelius, N. C. Hansen, D. L. Eggett, AVAIL Phosphorus Fertilizer Enhancer: Meta-Analysis of 503 Field Evaluations. Agronomy Journal. 110, 389–398 (2018).
38. F. Degryse, B. Ajiboye, R. D. Armstrong, M. J. McLaughlin, Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. Soil Sci. Soc. Am. J. 77, 2050–2059 (2013).
39. S. Doydora, D. Hesterberg, W. Klysubun, Phosphate solubilization from poorly crystalline iron and aluminum hydroxides by AVAIL copolymer. Soil Science Society of America Journal. 81, 20–28 (2017).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

40. W. Overbeek, T. Jeanne, R. Hogue, D. L. Smith, Effects of microbial consortia, applied as fertilizer coating, on soil and rhizosphere microbial communities and potato yield. *Frontiers in Agronomy*. 3 (2021).
41. I. T. Riley, M. H. Ryder, J. R. Rathjen, T. V. Lai, M. D. Denton, In vitro assessment indicates that fertilizers commonly used in legume production differentially inhibit commercial Rhizobial strains. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 56, 687–700 (2025).
42. B. Burke, G. Fan, P. Wasuwanich, E. B. Moore, A. L. Furst, Self-assembled nanocoatings protect microbial fertilizers for climate-resilient agriculture. *JACS Au*. 3, 2973–2980 (2023).
43. G. G. C. Arizaga, K. Satyanarayana, F. Wypych, Layered hydroxide salts: Synthesis, properties and potential applications. *Solid State Ionics*. 178, 1143–1162 (2007).
44. M. C. Hermosin, I. Pavlovic, M. A. Ulibarri, J. Cornejo, Removal of trinitrophenol from water by a layered double hydroxide. *Fresenius Environmental Bulletin*. 4, 41–46 (1995).
45. Y. Seida, Y. Nakano, Removal of phosphate by layered double hydroxides containing iron. *Water Research*. 36, 1306–1312 (2002).
46. M. Everaert et al., Layered double hydroxides as slow-release fertilizer compounds for the micronutrient molybdenum. *J. Agric. Food Chemistry*. 69, 14501–14511 (2021).
47. M. Everaert et al., Phosphate-exchanged Mg–Al layered double hydroxides: a new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 4, 4280–4287 (2016).
48. M. Everaert, F. Degryse, M. J. McLaughlin, D. de Vos, E. Smolders, Agronomic effectiveness of granulated and powdered P-exchanged Mg–Al LDH relative to struvite and MAP. *J. Agricultural Food Chemistry*. 65, 6736–6744 (2017).
49. M. Everaert et al., Enhancing the phosphorus content of layered double hydroxide fertilizers by intercalating polymeric phosphate instead of orthophosphate: A feasibility study. *Journal of Colloid and Interface Science*. 628, 519–529 (2022).
50. M. Anstoetz et al., Novel applications for oxalate-phosphate-amine metal-organic-frameworks (OPA-MOFs): can an iron-based OPA-MOF be used as slow-release fertilizer? *PLoS ONE*. 10, e0144169 (2015).
51. S. Basak et al., Metal-organic framework as nanocarriers for agricultural applications: a review. *Frontiers in Nanotechnology*. 6 (2024).
52. K. Wu, X. Xu, F. Ma, C. Du, Fe-based metal–organic frameworks for the controlled release of fertilizer nutrients. *ACS Omega*. 7, 35970–35980 (2022).
53. M. Zhang et al., Slow-release fertilizer encapsulated by graphene oxide films. *Chemical Engineering Journal*. 255, 107–113 (2014).
54. S. Kabiri et al., Graphene oxide: a new carrier for slow release of plant micronutrients. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9, 43325–43335 (2017).
55. I. B. Andelkovic et al., Graphene oxide-Fe(III) composite containing phosphate – A novel slow release fertilizer for improved agriculture management. *Journal of Cleaner Production*. 185, 97–104 (2018).
56. T. Li, B. Gao, Z. Tong, Y. Yang, Y. Li, Chitosan and graphene oxide nanocomposites as coatings for controlled-release fertilizer. *Water Air Soil Pollut.* 230, 1–9 (2019).
57. S. Kabiri et al., Cogranulation of low rates of graphene and graphene oxide with macronutrient fertilizers remarkably improves their physical properties. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 6, 1299–1309 (2018).
58. D. A. Navarro, M. Kah, D. Losic, R. S. Kookana, M. J. McLaughlin, Mineralisation and release of ¹⁴C-graphene oxide (GO) in soils. *Chemosphere*. 238, 124558 (2020).



Referências

59. European Union Observatory for Nanomaterials, Definition of nanomaterial (2024).
60. L. Xiong, P. Wang, P. M. Kopittke, Tailoring hydroxyapatite nanoparticles to increase their efficiency as phosphorus fertilisers in soils. *Geoderma*. 323, 116–125 (2018).
61. R. Nair et al., Nanoparticulate material delivery to plants. *Plant Science*. 179, 154–163 (2010).
- J. A. Raven, Commentary on the use of nutrient-coated quantum dots as a means of tracking nutrient uptake by and movement within plants. *Plant Soil*. 476, 535–548 (2022).
62. H. Guo, J. C. White, Z. Wang, B. Xing, Nano-enabled fertilizers to control the release and use efficiency of nutrients. *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 6, 77–83 (2018).
63. L. Marchiol, M. Iafisco, G. Fellet, A. Adamiano, Nanotechnology support the next agricultural revolution: Perspectives to enhancement of nutrient use efficiency. *Adv. Agronomy*. 161, 27–116.
64. P. M. Kopittke, E. Lombi, P. Wang, J. K. Schjoerring, S. Husted, Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes. *Environmental Science: Nano*. 6, 3513–3524 (2019).
65. R. Liu, R. Lal, Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. *Sci. Total Environ*. 514, 131–139 (2015).
66. S. Gupta, G. S. Gupta, P. Madheshiya, A. K. Mishra, S. Tiwari, Nano fertilizers for sustaining future farming : A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 62, 103446 (2024).
67. Z. Wang et al., Natural xylose-derived carbon dots towards efficient semi-artificial photosynthesis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 629, 12–21 (2023).
68. G. V. Lowry et al., Towards realizing nano-enabled precision delivery in plants. *Nat. Nanotechnol*. 19, 1255–1269 (2024).
69. T. Hofmann et al., Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture. *Nature Food*. 1, 416–425 (2020).
70. S. Husted et al., Nanotechnology papers with an agricultural focus are too frequently published with a superficial understanding of basic plant and soil science. *ACS Nano*. 18, 33767–33770 (2024).
71. G. Cornelis, K. Hund-Rinke, T. Kuhlbusch, N. van den Brink, C. Nickel, Fate and bioavailability of engineered nanoparticles in soils: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 44, 2720–2764 (2014).
72. C. L. Doolette, T. L. Read, N. R. Howell, T. Cresswell, E. Lombi, Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: A ⁶⁵Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers. *Science of The Total Environment*. 749, 142369 (2020).
73. M. Kah, R. S. Kookana, A. Gogos, T. D. Bucheli, A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotech*. 13, 677–684 (2018).
74. Y. Su et al., Cost-benefit analysis of nanofertilizers and nanopesticides emphasizes the need to improve the efficiency of nanoformulations for widescale adoption. *Nat. Food*. 3, 1020–1030 (2022).
75. K. N. Tiwari, Y. Kumar, Nano fertilizers for smart agriculture : A review. *Indian Journal of Fertilisers*. 19, 632–653 (2023).
76. Y. Kumar, T. Singh, R. Raliya, K. N. Tiwari, Nano fertilizers for sustainable crop production, higher nutrient use efficiency and enhanced profitability. *Indian Journal of Fertilisers*. 17, 1206–1214 (2021).
77. M. Frank, S. Husted, Is India's largest fertilizer manufacturer misleading farmers and society using dubious plant and soil science? *Plant Soil*. 496, 257–267 (2024).
- 78.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

79. N. Jangir et al., Nano urea outperforms equimolar bulk urea in the hydroponic growth of Arabidopsis thaliana by inducing higher levels of nitrogen assimilation and chlorophyll biosynthesis genes. *Journal of Plant Growth Regulation* (2024).
80. Y. P. Timilsena et al., Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 95, 1131–1142 (2015).
81. D. S. HAYMAN, B. Mosse, Plant growth responses to vesicular-arbuscular mycorrhiza III. Increased uptake of labile P from soil. *New Phytol.* 71, 41–47 (1972).
82. H. Chen et al., Approaches to nanoparticle labeling: a review of fluorescent, radiological, and metallic techniques. *Environment & Health*. 1, 75–89 (2023).
83. S. E. Lyons et al., Field trial guidelines for evaluating enhanced efficiency fertilizers. *Soil Science Society of America Journal* (2024).
84. R. Norton, How do you know that? - The need for evidence. *Better Crops*. 95, 24 (2011).
85. D. C. Edmeades, The agronomic effectiveness of lime-reverted and dicalcic superphosphates: A review. *New Zealand J. Agric. Res.* 43, 1–6 (2000).
86. D. C. Edmeades, The effects of liquid fertilisers derived from natural products on crop, pasture, and animal production: A review. *Aus. J. Agr. Res.* 53, 965 (2002).
87. R. E. Karamanos, D. N. Flaten, F. C. Stevenson, Real differences – A lesson from an agronomist's perspective. *Canadian J. Plant Sci.* 94, 433–437 (2013).

Autores, citação e contato

Autores: Membros da Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition.

Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Deli Chen (University of Melbourne, Australia), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Jian Feng Ma (Okayama University, Japan), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Marta Vasconcelos (Universidade Católica Portuguesa, Portugal), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Fangjie Zhao (Nanjing Agricultural University, China),

Citação: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2025. Novel fertilizers. Issue Brief 08. Available at <https://sprpn.org>.

Mais informações: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, info@sprpn.org