



Issue Brief 03, janeiro de 2022

A promover a entrega de nutrientes 4R

by the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Conteúdo

- 3 Pontos-chave
- 5 Qual é o problema?
- 7 Que resultados o conceito 4R produziu em diferentes regiões?
- 11 Quais barreiras limitam a adoção e a quantificação dos benefícios da 4R?
- 13 Como é que a estrutura 4R pode adequar-se aos futuros sistemas agrícolas?
- 16 Que novos princípios básicos são necessários para fonte, dosagem, tempo e local?
- 20 Como é que a 4R pode contribuir para os relatórios de desempenho de sustentabilidade?
- 24 Quem precisa fazer o que?
- 26 Como será o sucesso?
- 27 Referências
- 32 Autores, citação e contato



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

PONTOS-CHAVE

Para implementar a estratégia de Gestão de Nutrientes 4R, é necessário integrar mudanças nos objetivos agrícolas que apoiem uma gama mais ampla de resultados de sustentabilidade.

O novo Paradigma da Nutrição Vegetal Responsável oferece uma perspectiva para essa integração. Sugerimos mudanças para alinhar a estratégia aos sistemas agrícolas do futuro, que intensificam a produção, melhoram a nutrição humana, protegem e ampliam a biodiversidade, reduzem a pegada ambiental e de carbono e tornam os fluxos de nutrientes mais circulares.

Embora a Gestão de Nutrientes 4R tenha alcançado reconhecimento global, algumas barreiras limitam o seu impacto. Os resultados positivos dependem não só das boas práticas 4R, mas também das práticas em todos os aspetos do sistema agrícola. As prioridades entre os 12 resultados apresentados na Figura 1 (1) variam entre regiões e países, assim como as decisões específicas do 4R para a aplicação de nutrientes. Em muitos lugares, no entanto, existem oportunidades de ampliar a adoção de soluções digitais orientadas por dados para apoiar as decisões e acelerar a inovação por meio da gestão adaptativa na exploração agrícola. As escolhas entre as fontes de nutrientes devem incluir mais atributos circulares e inteligentes em relação ao clima, à dosagem, ao tempo e ao local de aplicação, que tornem as decisões mais precisas e dinâmicas.

A responsabilidade pelo desempenho exige a comunicação do progresso a todos os participantes da cadeia de valor agrícola, incluindo os usuários finais, os órgãos de gestão ambiental e os membros do setor. Os relatórios de desempenho propostos incluem o acompanhamento das práticas 4R, a medição dos resultados económicos na exploração agrícola e a avaliação dos benefícios sociais, ambientais e do solo. São urgentemente necessárias formas melhores de monitorizar a adoção e registar os principais resultados, incluindo metas com base científica e a aplicação mais profunda das tecnologias digitais. O setor dos fertilizantes precisa colaborar ainda mais com o setor agroalimentar para desenvolver e adotar padrões de sustentabilidade para a gestão de sistemas agrícolas, incluindo práticas holísticas de 4R e métricas de desempenho.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

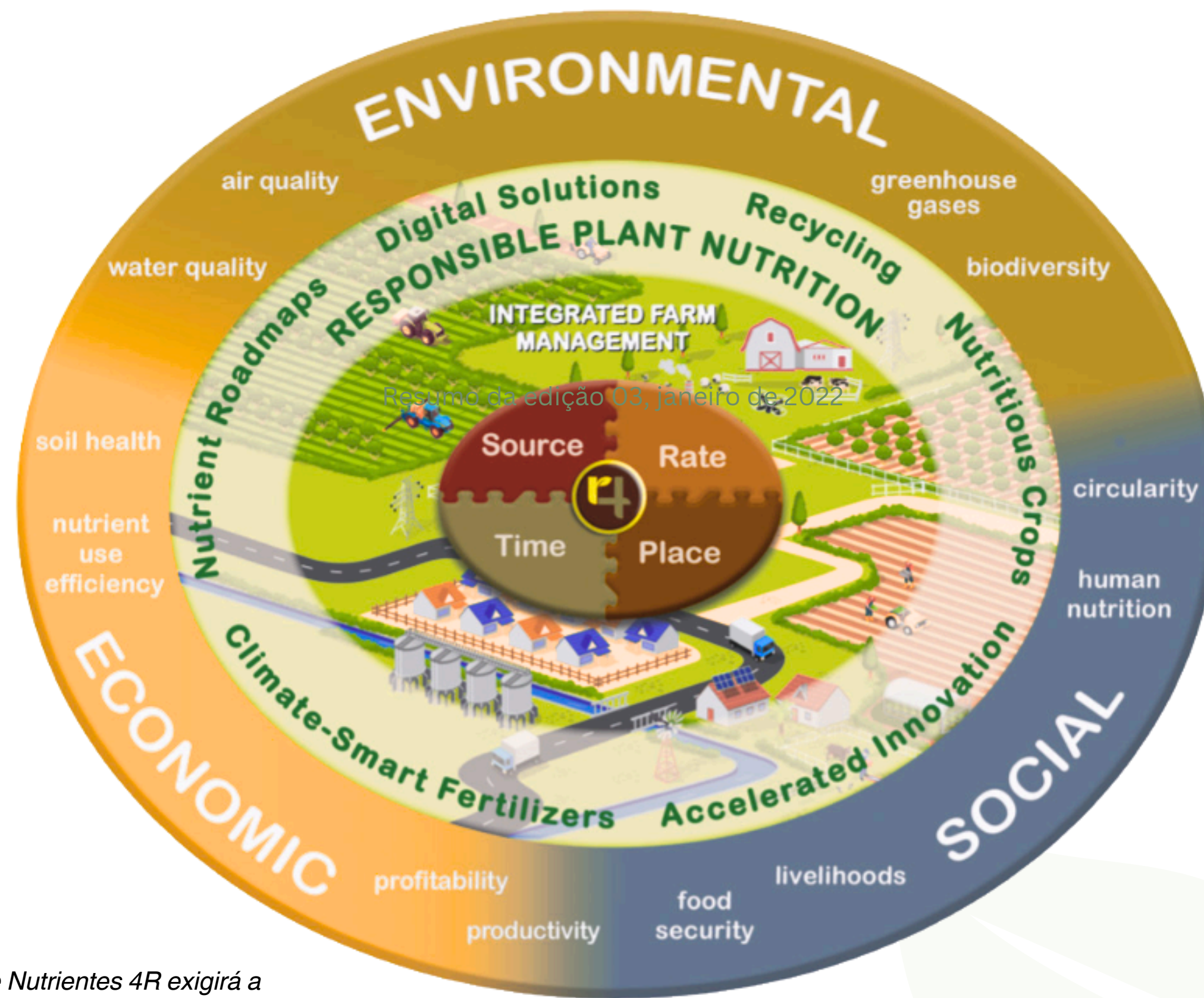


Figura 1. A promoção da Gestão de Nutrientes 4R exigirá a integração de sistemas agrícolas para apoiar as seis ações da Nutrição Vegetal Responsável e relatar os resultados de sustentabilidade.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

QUAL É O PROBLEMA?

As aplicações de nutrientes correspondem a uma grande proporção dos fluxos de nutrientes na maioria dos sistemas agrícolas e são geridas diretamente pelos agricultores e seus prestadores de serviços.

A proposta original da Gestão de Nutrientes 4R (Fixen, 2020) apresentava 4 componentes, definidos como quatro objetivos de gestão globalmente relevantes para as práticas de aplicação de nutrientes. Estes exigem a implementação de soluções específicas para diferentes regiões e sistemas de cultivo (Figura 2). Para cada um dos quatro componentes da tomada de decisão correta na aplicação de nutrientes, foram definidos princípios fundamentais que sintetizavam o entendimento científico subjacente.

O novo paradigma da Nutrição Responsável de Plantas ampliou o conceito de gestão de nutrientes (2). O foco na fonte, na dosagem, no tempo e no local de aplicação de nutrientes continua a ser muito relevante para o novo paradigma, mas o 4R, conforme originalmente concebido e aplicado no passado, não se conecta plenamente a todos os seus objetivos. A ligação pode ser aprimorada para reforçar a relevância da 4R no novo paradigma.

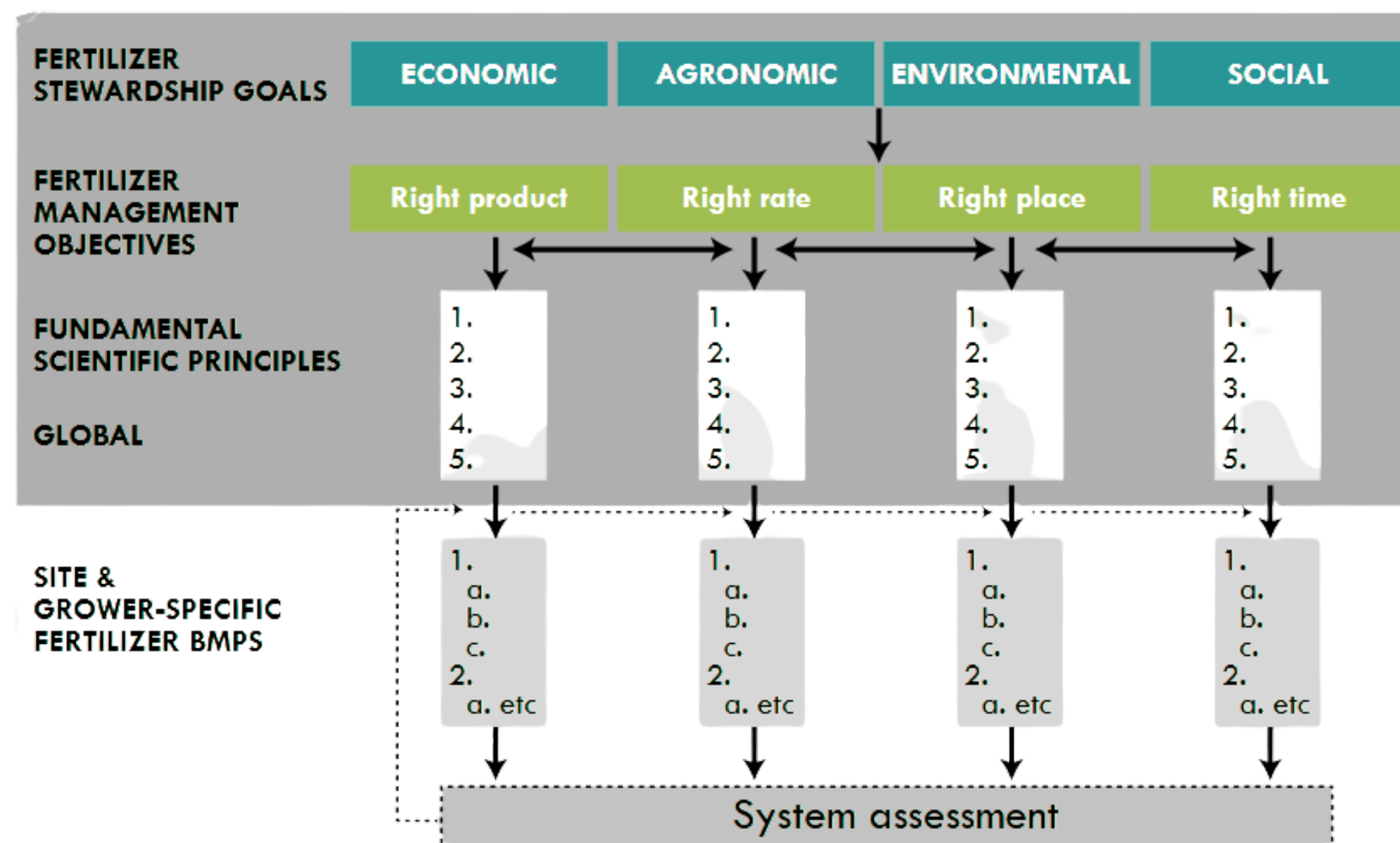


Figura 2. Estrutura original da Gestão de Nutrientes 4R, apresentada em 2007 (Fixen, 2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

As novas seis ações-chave para a implementação da Nutrição Vegetal Responsável abrem oportunidades e necessidades para os programas de implementação da 4R. Elas incluem:

1. Roteiros de nutrientes: Inserção de práticas 4R em políticas, modelos de negócios, plataformas e programas de verificação de sustentabilidade.
2. Soluções digitais: Entrega de decisões nutricionais 4R, orientadas por dados, mais precisas e dinâmicas.
3. Reciclagem: A otimização do uso de nutrientes renováveis requer escolhas sobre a "fonte certa", considerando formas recicladas sempre que possível.
4. Culturas nutritivas: Aplicações de nutrientes em culturas que melhoram a nutrição e a saúde humana.
5. Fertilizantes inteligentes em relação ao clima: Considerar a pegada de carbono da fonte de nutrientes, incluindo as emissões associadas à sua fabricação e ao seu uso.
6. Inovação acelerada: Testar os componentes 4R em sistemas de gestão adaptativos para uma aplicação mais rápida na prática.

O QUE ESTÁ A ACONTECER?

O conceito de gestão de nutrientes 4R alcançou reconhecimento global, mas o seu impacto continua limitado em grande escala. A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) inclui os princípios da Gestão de Nutrientes 4R no Código Internacional de Conduta para o Uso e Gestão Sustentável de Fertilizantes (3). O Manual de Nutrição Vegetal 4R (IPNI, 2016) (1), um documento de 130 páginas que detalha os princípios globais da gestão Gestão de Nutrientes 4R, foi traduzido para oito idiomas e amplamente distribuído nas Américas, na Ásia, na África e na Oceânia.



Figura 3. Os vários idiomas da 4R.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Que resultados o conceito 4R produziu em diferentes regiões?

As experiências regionais na implementação da 4R e os desafios para sua promoção diferem geograficamente de forma significativa. Algumas implementações foram realizadas sob a marca 4R, enquanto outras não, mas muitas representam abordagens semelhantes. Um histórico longo de investigação sobre fertilidade do solo e nutrição de plantas continua a informar as escolhas de práticas 4R, mesmo que a investigação não tenha sido conduzida sob a “marca” 4R.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

AMÉRICA DO NORTE

A gestão de nutrientes 4R tornou-se um conceito amplamente reconhecido, primeiro no setor de fertilizantes e depois entre cientistas agroambientais que trabalham com questões relacionadas a nutrientes agrícolas (4). O uso de práticas 4R foi reconhecido por mitigar as emissões de gases de efeito estufa. No primeiro protocolo de quantificação a ser implementado para a redução das emissões de óxido nitroso agrícola, o governo da província de Alberta, no Canadá, reconheceu a Gestão de Nutrientes 4R em 2010 (5). Uma avaliação das soluções climáticas naturais para o Canadá concluiu que uma maior adoção das práticas 4R poderia reduzir as emissões de gases de efeito estufa no país em mais 6,3 milhões de toneladas de equivalentes de dióxido de carbono por ano até 2030, contribuindo para 3% do compromisso do Canadá com o Acordo de Paris (6). Dois anos após seu lançamento, em 2014, o primeiro Programa de Certificação de Gestão de Nutrientes 4R nos Estados Unidos cresceu e passou a influenciar as aplicações de nutrientes em quase 40% das terras cultivadas na bacia hidrográfica do Lago Erie, no oeste do país (7), limitando as perdas de fósforo que provocam a proliferação de algas. Embora a eficiência no uso de nutrientes tenha melhorado nas últimas décadas, a quantificação das reduções efetivas nas emissões de óxido nitroso e na perda de fósforo permanece um desafio.

SUL DA ÁSIA

De 2009 a 2019, o conceito 4R Nutrient Stewardship foi incorporado a programas nacionais de investigação e extensão em vários países e tornou-se parte das narrativas dos programas de treinamento agrônomo e de campo do setor de fertilizantes. No entanto, a implementação mais ampla nas explorações agrícolas, além das parcelas de pesquisa, permanece um desafio. Definir os "direitos" do fertilizante - fonte, dosagem,

tempo e local - para as diversas culturas e sistemas de cultivo do subcontinente estava além da capacidade da maioria dos pequenos agricultores e de seus consultores, mas também de muitos investigadores. A necessidade de uma ferramenta de apoio à decisão simples e fácil de usar, que traduzisse o conceito 4R em recomendações de fertilizantes específicas para o campo, levou ao desenvolvimento do software Nutrient Expert (8), que seguiu uma nova abordagem para a Gestão de Nutrientes Específicos do Local, desenvolvida pela primeira vez na década de 1990 (9). O Nutrient Expert utiliza um banco de dados robusto de informações da exploração agrícola sobre rendimentos atingíveis, utilização de fertilizantes e adubos, equilíbrio de nutrientes e outras condições de cultivo. A utilização da ferramenta na exploração agrícola produziu benefícios de sustentabilidade, incluindo impactos na produção, na lucratividade, na saúde do solo, na eficiência do uso de nutrientes, na eficiência do uso de energia e água e nas emissões de gases de efeito estufa (10).

SUDESTE DA ÁSIA

Investigação e trabalho de extensão considerável em culturas de campo (arroz, milho) e plantações (dendê, café, cacau) foram apoiados pelo International Plant Nutrition Institute até 2019. Foram publicados manuais de campo sobre os princípios 4R para dendê, arroz, cana-de-açúcar, mandioca, borracha, manga, melancia e uva.

Verificou-se que os pequenos produtores de cacau na Indonésia variam consideravelmente quanto à capacidade de gerenciamento de fertilizantes (11).

Investigação sobre a gestão de fertilizantes no dendê não encontrou nenhum efeito do momento, mas efeitos substanciais da dosagem de aplicação sobre a eficiência do uso de nutrientes (12). As recomendações de fertilizantes baseadas na gestão de nutrientes 4R ajudaram os produtores de mandioca a colher os benefícios de seu investimento em fertilizantes (13). Um padrão de produção sustentável para o arroz foi desenvolvido em



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

2011 e inclui princípios para fontes de fertilizantes inorgânicos e orgânicos, bem como para o tempo e a dosagem (14).

CHINA

A agricultura na maior parte da China é tipicamente baseada em pequenos proprietários. O foco em altas produtividades, por meio do uso excessivo de fertilizantes, prejudicou a sustentabilidade ambiental do país (15). O uso da ferramenta digital Nutrient Expert para as práticas 4R manteve a produtividade e a lucratividade e aumentou a eficiência do uso de nutrientes (16, 17). A implementação da Gestão de Nutrientes 4R, juntamente com melhorias na gestão agrônômica, poderia melhorar o desempenho em relação aos padrões de referência definidos para o excedente de azoto e, assim, garantir a segurança alimentar e aumentar a eficiência do uso de azoto, melhorando a sustentabilidade ambiental e o retorno econômico (18). A implementação regional de tecnologias e práticas de gestão que seguem os princípios 4R deve ser cuidadosamente projetada para se adequar aos contextos biofísicos específicos do local (19). Foi demonstrado que o uso de uma abordagem de Gestão Integrada do Sistema Solo-Cultura melhorou a eficiência do uso do azoto e a produtividade das culturas de mais de 20 milhões de agricultores na China, de 2005 a 2015 (20).

ÁFRICA SUB-SAARIANA

Reconhecendo que a produtividade das colheitas nos sistemas agrícolas de pequenos agricultores da África Subsaariana precisa aumentar para enfrentar os muitos desafios de subsistência que essas comunidades enfrentam, a Cúpula de Fertilizantes de Abuja, em 2006, solicitou um aumento no uso de fertilizantes. A Aliança para uma Revolução Verde na África integrou esse apelo na sua estratégia de solo, com foco na Gestão Integrada da

Fertilidade do Solo (ISFM). O ISFM é descrito como "um conjunto de práticas de gestão da fertilidade do solo que necessariamente inclui o uso de fertilizantes, fertilizantes orgânicos e germoplasma melhorado, combinado com o conhecimento de como adaptar essas práticas às condições locais, visando maximizar a eficiência do uso agrônômico dos nutrientes aplicados e melhorar a produtividade das culturas. Todos os insumos precisam ser gerenciados de acordo com princípios agrônômicos sólidos" (21). Assim, o ISFM adota os princípios do 4R e acrescenta boas práticas agrônômicas. O uso de práticas ISFM, incluindo variedades híbridas e combinações de insumos orgânicos com fertilizantes, aumentou a eficiência agrônômica por kg de azoto aplicado, atingindo valores de até 40 kg, em comparação com 17 kg nas práticas locais (22). As dosagens de adoção do "ISFM completo" são geralmente da ordem de 10 a 25% entre as comunidades de pequenos agricultores envolvidas (23). Mais recentemente, o Nutrient Expert e outras ferramentas para a Gestão de nutrientes específicos do local em arroz, milho e mandioca também foram desenvolvidos e testados na África Subsaariana (24). Ainda há muitas oportunidades para se obter uma adoção em maior escala.

AUSTRÁLIA-NOVA ZELÂNDIA

Vários programas na Austrália adotam os princípios da 4R, mas não são necessariamente rotulados como tais. Em Queensland, a preocupação com o escoamento de nutrientes das bacias costeiras para a Grande Barreira de Corais





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

resultou no programa de gerenciamento de nutrientes "Six-Easy Steps Toolbox", desenvolvido pelo setor açucareiro (25). O programa Fertcare do setor de fertilizantes adota explicitamente a gestão de nutrientes 4R. Ele treinou quase 4.000 profissionais na Gestão de fertilizantes para aumentar a produtividade, minimizar os problemas ambientais e garantir a segurança alimentar. Os setores de laticínios e grãos adotaram os 4Rs em suas recomendações para o uso de fertilizantes. A Gestão de nutrientes também se beneficiou de uma investigação coordenada, sob a bandeira de "Better Fertiliser Decisions for Crops" (Melhores decisões sobre fertilizantes para culturas), que produziu informações agrupadas sobre as respostas das culturas e das pastagens aos fertilizantes e forneceu uma base documentada para recomendações de nutrientes mais personalizadas na exploração agrícola (26). Na Nova Zelândia, onde predominam os sistemas pastoris, o orçamento de nutrientes apoiado pelo OverseerFM é usado por mais de 11.000 explorações agrícolas, impulsionado pela legislação ambiental referente à qualidade das águas superficiais e subterrâneas (27).

AMÉRICA LATINA

Embora os aportes de fósforo às culturas no Brasil sejam atualmente muito superiores à absorção das culturas, os testes de campo sugerem que o uso combinado de plantio direto, culturas de cobertura e a adoção de práticas 4R poderiam melhorar a eficiência geral do uso de fósforo (28). Em contrapartida, os balanços de nutrientes das culturas estão em déficit na Argentina e na Bolívia (29). Quando integradas à rotação de culturas, ao cultivo de cobertura e à aplicação equilibrada de fertilizantes, as práticas 4R proporcionam não apenas produtividade agrícola, mas também proteção e conservação dos solos (30). Uma investigação de campo sobre o milho nos Pampas da Argentina mostrou que as práticas de gestão "ecologicamente intensivas" - que incluíam práticas 4R

para a fonte de azoto, dosagem e tempo - melhoraram a produtividade do milho sem aumentar a emissão de óxido nitroso (31). Outro estudo na Argentina constatou emissões menores de óxido nitroso por unidade de produção de soja em rotação com cereais, em comparação à monocultura de soja (32). Um conjunto de práticas de agricultura de conservação, que incluía a gestão de fertilizantes azotados, reduziu a erosão do solo, melhorou a saúde do solo e a rentabilidade da produção agrícola na região andina do Equador (33).

EUROPA

As abordagens de políticas agroambientais na Europa diferem bastante das da América do Norte, assim como as tendências no uso de nutrientes agrícolas. A Europa enfatiza mais as abordagens regulatórias em comparação que as voluntárias (34). Historicamente, os excedentes de nutrientes na Europa Ocidental eram maiores do que nos Estados Unidos. O excedente cumulativo de fósforo no século passado na Europa equivale a 63 anos de remoção da safra atual, enquanto o mesmo número para os Estados Unidos é de 18 anos (35). As mudanças impulsionadas pela regulamentação nos últimos 25 anos na União Europeia reduziram as cargas de nitrato agrícola no ambiente aquático e melhoraram a eficiência no uso de nutrientes, mas essas questões m na vanguarda das políticas ambientais e agrícolas que impulsionam a agricultura. A qualidade da água europeia, por exemplo, está ameaçada pelo aumento das proporções de N:P (36). O setor de fertilizantes na Europa inclui a 4R no seu conceito de Infinite Nutrient Stewardship e desenvolveu iniciativas para cumprir as metas das políticas nacionais e da UE, incluindo tecnologias de agricultura de precisão, uma ferramenta para estimar a pegada de carbono da fabricação de fertilizantes (37), um plano de ação de economia circular e apoio à implementação de um indicador de eficiência do uso de azoto (38).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Quais barreiras limitam a adoção e a quantificação dos benefícios da 4R?

Apesar das diferenças regionais nas implementações da Gestão de Nutrientes 4R descritas acima, os pontos em comum também são evidentes, principalmente a necessidade de uma melhor integração com as boas práticas de agronomia, conservação do solo e gestão ambiental.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

A estrutura original do 4R incluía a avaliação dos resultados de sustentabilidade e o refinamento contínuo por meio da Gestão adaptativa, conforme indicado na Figura 2. Embora as métricas para essas avaliações tenham sido descritas na seção 9.3 do Manual de Nutrição Vegetal 4R (1), o progresso nos relatórios tem sido limitado. Em algumas regiões, as organizações do setor conseguem registrar a área de cultivo e o número de agricultores ou consultores que praticam algum nível de gestão de nutrientes 4R. Mas não muito mais do que isso.

O principal fator para a adoção que ocorreu até agora é a lucratividade e a redução de riscos - benefícios econômicos para a exploração agrícola. É necessário ampliar o reconhecimento dos benefícios ambientais e sociais mais amplos da 4R, recompensando os agricultores pela adoção dessas práticas.

A mensuração da contribuição da adoção das práticas 4R para esses resultados enfrenta vários desafios, incluindo.

- Falta de recursos disponíveis para monitorizar e avaliar de forma aprofundada
- Vários fatores que determinam as escolhas "certas" para um determinado campo agrícola
- Questões de privacidade que limitam a disposição e a capacidade dos agricultores de compartilhar dados
- Investigação insuficiente que documente os impactos de práticas 4R específicas (4)
- As métricas abrangem uma série de escalas e é difícil avaliar as compensações e sinergias (39)

As combinações de fonte, dosagem, tempo e local para aplicações de nutrientes que aumentam a sustentabilidade dos sistemas de cultivo são específicas do local, porque:

- Os solos diferem em sua capacidade de fornecimento de nutrientes e em outras propriedades
- As culturas diferem nas suas necessidades nutricionais
- As culturas respondem de forma diferente às aplicações de nutrientes, dependendo do solo, do clima, do tempo e do nível de gerenciamento do agricultor
- Os processos que afetam as perdas de nutrientes e a magnitude das possíveis perdas variam conforme o solo, a paisagem, o clima e o tempo.
- O dano ambiental decorrente das perdas de nutrientes varia conforme a forma do nutriente perdido e as características do ecossistema em que ele flui.
- Os objetivos de produção diferem entre os agricultores, dependendo de sua escala e condição socioeconômica
- As prioridades das partes interessadas quanto aos resultados influenciados pela aplicação de nutrientes variam regionalmente, dependendo do status socioeconômico, dos valores culturais, das políticas e dos riscos percebidos e reais



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Como é que a estrutura 4R pode adequar-se aos futuros sistemas agrícolas?

As considerações a seguir devem ter destaque no desenvolvimento de programas futuros para implementar a Gestão de Nutrientes 4R.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Integrar com sistemas agrícolas em transição

Os sistemas agrícolas integrados do futuro incluirão práticas 4R, mas as escolhas de gerenciamento de muitos outros componentes - incluindo agronomia, diversidade de culturas, drenagem, pecuária, pragas, sementes, conservação do solo e água (Figura 1) - também influenciam os fluxos de nutrientes agrícolas. A conservação do solo é particularmente importante para atender aos critérios da definição ainda em evolução da agricultura regenerativa (40), assim como para a integração com sistemas de pecuária (41). Os sistemas agrícolas que exploram a fixação biológica de azoto por meio de rotações, intercalação e culturas de cobertura também aumentam a eficiência do uso do azoto. Em nível de paisagem, os fluxos de nutrientes entre os sistemas de produção de terras agrícolas, pastagens e gado devem ser integrados e otimizados (42). A reconstrução dos vínculos entre a pecuária e as terras agrícolas oferece oportunidades para a intensificação sustentável da agricultura na China (43) e em outras regiões. A mecanização, a irrigação e a fertirrigação oferecem grandes oportunidades para expandir a gama de opções disponíveis para o agricultor gerenciar as aplicações de nutrientes e aumentar a produtividade de todo o sistema e a eficiência do uso de nutrientes. Isso é de particular importância nos atuais sistemas agrícolas de pequenos agricultores.

A diversidade de culturas e os sistemas alimentares também precisam fazer a transição para atender melhor às necessidades de saúde humana e segurança nutricional (44). Os compradores de grãos, os processadores e os governos precisam oferecer incentivos para aumentar o valor nutricional das culturas produzidas, como foi feito, por exemplo, com o selênio na Finlândia (45). A fertilização de culturas alimentícias com micronutrientes específicos, por meio de abordagens agronômicas, pode resultar em diversos benefícios para a saúde dos consumidores (46). A aplicação foliar de fertilizantes azotados durante

e/ou logo após a antese tem efeitos específicos sobre a proteína do grão (47). A aplicação foliar de micronutrientes após a antese também afeta as concentrações de zinco, selênio e iodo nos grãos, e sugere-se que seja uma estratégia altamente eficaz para lidar com a fome oculta nas populações humanas do mundo em desenvolvimento (48). Também foi demonstrado que a fertilização adequada com azoto é necessária para uma biofortificação bem-sucedida do trigo (49) e do milho para silagem (50) com zinco e ferro. A iniciativa HarvestPlus já desenvolveu novos cultivares biofortificados com zinco, ferro e vitamina A, que atualmente atingem mais de 20 milhões de pessoas e têm a oportunidade de aumentar para um mil milhão (51). Isso também requer soluções de fortificação baseadas em fertilizantes direcionados em escala.

Use soluções digitais orientadas por dados para apoiar as decisões

Os revendedores de fertilizantes e outros prestadores de serviços em muitos países agora oferecem aplicações de nutrientes guiadas por GPS, além de amostragem de solo em zonas de subcampo e monitoramento de culturas. Essas tecnologias proporcionam aplicação mais precisa, menor sobreposição e maior eficiência no campo. Muitas empresas agrícolas também oferecem serviços que utilizam dados do monitor de produtividade e imagens aéreas ou de satélite para orientar as decisões de gerenciamento de nutrientes. Essas tecnologias geralmente concentram-se na dosagem e no momento de aplicação dos fertilizantes, mas também podem exigir mudanças na fonte e na colocação. Há grandes oportunidades de vincular melhor essas tecnologias e soluções para utilizar todos os dados disponíveis nas decisões em nível de exploração agrícola (52). Diferentes tecnologias são apropriadas para a agricultura em diferentes escalas. O uso do Nutrient Expert ou de ferramentas similares de suporte a decisões é um exemplo de solução digital relevante para pequenos agricultores.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

O apoio a decisões baseado em modelos para a Gestão de azoto também foi aplicado com agricultores de terras secas na Austrália, usando o APSIMd (53). O uso de sistemas de consultoria com suporte digital e a mecanização com tecnologias adequadas e neutras em termos de escala, como o nivelamento de terras a laser (54), têm potencial relevante para milhões de pequenos agricultores.

Inovar utilizando a gestão adaptativa

A gestão adaptativa na exploração agrícola e a investigação aplicada, incluindo sistemas de inovação aberta, podem levar ao desenvolvimento acelerado e ao refinamento de tecnologias práticas que geram benefícios econômicos e ambientais (55). Por exemplo, inovações recentes que estão a ser melhoradas na América do Norte incluem o uso de modelos de culturas orientados pelo clima para prever variações ano a ano na quantidade ideal de azoto a ser aplicada. O Climate Fieldview da Bayer, o Encirca Premium da Corteva e o Adapt-N da Yara permitem que os produtores usem dados meteorológicos em tempo real para ajudar a ajustar as aplicações de azoto às necessidades das culturas específicas do local e da estação nos seus campos (56). Embora essas também possam ser consideradas soluções digitais orientadas por dados, a agregação de dados de muitos produtores de uma região permite uma inovação e um refinamento mais rápidos dos algoritmos de decisão, dando suporte à Gestão adaptativa. As parcerias público-privadas que compartilham dados sobre a resposta das culturas aos nutrientes podem apoiar esses objetivos (57).





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Que novos princípios básicos são necessários para fonte, dosagem, tempo e local?

Os princípios dos quatro componentes (fonte, dosagem, tempo, local) aplicam-se mais diretamente à escala do campo e da exploração agrícola. As decisões específicas que seguem esses princípios precisam ser adaptadas aos solos, culturas, climas, sistemas agrícolas e até mesmo às cadeias de valor envolvidas. Estas também devem considerar os tipos de exploração agrícola, a aversão ao risco e o capital financeiro. Propomos aqui novos princípios dos 4Rs que abordam as lacunas identificadas anteriormente na obtenção de uma nutrição responsável das plantas, com justificativa de apoio. Os demais princípios originais também estão listados, mas descritos com mais detalhes em IPNI (2016) (1).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Princípios para a fonte correta

1. **Fornecer os nutrientes em formas quantificáveis e disponíveis.** A forma aplicada pode ser de liberação imediata ou lenta, mas o teor de nutrientes deve ser conhecido para que as necessidades da cultura sejam atendidas. Os fertilizantes comerciais são vendidos com base em padrões de qualidade e solubilidade; os adubos e as fontes recicladas podem ser analisados quanto ao conteúdo e à disponibilidade de nutrientes, ou podem ser usadas tabelas apropriadas de conteúdo de nutrientes (58).
2. **Utilize fertilizantes “inteligentes” para o clima.** As formas climaticamente inteligentes de fertilizantes são aquelas que geram menores emissões de gases de efeito estufa, tanto no fabrico quanto na pós-aplicação. Os fertilizantes diferem muito na sua pegada ambiental por unidade de nutriente aplicado (59). As inovações do setor para a produção de fertilizantes solares (60), amônia verde e ureia azul (61) podem levar a menores pegadas futuras de azoto (62). Os inibidores da nitrificação e da hidrólise da ureia, bem como os revestimentos de fertilizantes, estão disponíveis há décadas, mas sua adoção tem sido limitada. Um dos principais motivos é o custo, em relação à sua eficácia em termos de melhoria da produtividade e da eficiência do uso de nutrientes (63), que muitas vezes é relativamente menor do que a redução de 20 a 40% nas emissões de óxido nitroso que eles podem alcançar (64). As inovações futuras incluem formas nanoparticuladas de nutrientes, aptâmeros e revestimentos sensíveis aos sinais das plantas, constituindo os "fertilizantes inteligentes" que liberam nutrientes em resposta à atividade microbiana e à demanda das plantas (65). A escolha de formas de baixa emissão contribui para reduzir as emissões do Escopo 3 do setor de fertilizantes.
3. **Utilizar formas recicladas sempre que possível.** A aplicação de estrume, bio-sólidos e composto no solo reduz a necessidade de fertilizantes manufaturados e

contribui para diminuir a pegada ambiental total da agricultura. Entretanto, nas explorações agrícolas que importam ração, os nutrientes contidos nos dejetos podem exceder as necessidades das culturas na terra disponível. As tecnologias de recuperação de nutrientes dos dejetos em formas mais concentradas, como a estruvita (66) ou os fosfatos de cálcio (67), permitem que os nutrientes sejam transportados por distâncias maiores. Foram propostos diretrizes e roteiros para o desenvolvimento dessas tecnologias de fertilizantes de base biológica (68). A inovação está a avançar para processar diferentes fluxos de resíduos em novas formas de fertilizantes com excelente potencial de aplicação. Por exemplo, o processo de estruvita da Ostara agora captura fósforo de estações de tratamento de águas residuais em Atlanta, Edmonton, Saskatoon e um total de 22 sistemas em todo o mundo, com capacidade para produzir 25.000 toneladas por ano de fertilizante de fosfato de amônia e magnésio de liberação controlada. A Anuvia, da Flórida, comercializa nutrientes orgânicos para plantas produzidos a partir de resíduos de alimentos. Outros exemplos notáveis incluem a Ductor, que produz bioenergia e um fertilizante N líquido a partir de unidades de biogás, a Elemental, que produz fertilizantes a partir de várias formas de resíduos alimentares no Reino Unido, e a Grassland Fertilisers, que produz formas granulares de baixa análise a partir de resíduos de confinamento de gado.

Princípios originais para a fonte correta

1. Adequar as propriedades físicas e químicas do solo.
2. Reconhecer sinergismos entre elementos e fontes de nutrientes.
3. Reconhecer a compatibilidade da mistura de materiais.
4. Reconhecer os benefícios e as sensibilidades dos elementos associados.
5. Controlar os efeitos de elementos não nutritivos.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

4. **Considerar inoculantes biológicos.** Para as culturas de leguminosas, a utilização de várias estirpes de rizóbio é bem conhecida e apoiada como um método para garantir a fixação biológica de quantidades consideráveis de azoto, e a sua otimização é fundamental para a intensificação sustentável (69). Os biofertilizantes foram definidos como microorganismos vivos que melhoram a nutrição das plantas mobilizando ou aumentando a disponibilidade de nutrientes nos solos (70). Várias bactérias e fungos benéficos são usados atualmente como biofertilizantes e podem colonizar com sucesso a rizosfera, o rizoplane ou o interior da raiz. No entanto, apesar de seu potencial, os biofertilizantes ainda não substituíram os fertilizantes químicos convencionais na agricultura comercial. As respostas de crescimento à inoculação com fungos micorrízicos arbusculares são, em geral, inconsistentes (71).

Princípios para a dosagem correta

1. **Address variability in crop response.** Year to year variation in weather, and spatial variability within and among fields, and their interaction, lead to differences in crop response to applied nutrients (72, 73). Weather is an important driver of crop nutrient requirement, but traditional recommendations often do not vary from year to year. Incorporating weather in the decision process for nitrogen rates has been shown to improve outcomes for maize production in North America (74), for commercial crops in Australia (53), and for a wheat-maize system in North China Plain (75).

Princípios originais para a dosagem correta

1. Avaliar as necessidades nutricionais das plantas.
2. Avaliar a adição de nutrientes do solo.
3. Prever a eficiência do uso de fertilizantes.
4. Considerar os impactos dos recursos do solo.
5. Considerar a economia e a lei dos retornos decrescentes.

Princípios para o momento certo

1. **Abordar as mudanças na necessidade de nutrientes durante o desenvolvimento da planta.** Foi demonstrado que o ajuste dinâmico das aplicações de nutrientes durante o desenvolvimento da planta é viável em muitos sistemas de cultivo, incluindo dendê (76), milho (77), algodão fertirrigado (78) e trigo (79, 80). Uma abordagem de machine learning que utiliza dados meteorológicos durante a estação mostrou-se promissora para prever as necessidades de azoto na produção de amêndoas na Califórnia (81) e de canola no leste do Canadá (82). Esse ajuste dinâmico também é possível com o uso de ferramentas tão simples quanto tabelas de cores de folhas, smartphones ou sintomas visuais de deficiência.

Princípios originais para o momento certo

1. Avaliar o momento da absorção pela planta.
2. Avaliar a dinâmica da adição de nutrientes no solo.
3. Reconhecer a dinâmica da perda de nutrientes do solo.
4. Avaliar a logística das operações de campo.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Princípios para o lugar certo

1. **Aplicar fertilizantes de forma a evitar perdas.** A aplicação adequada de nutrientes na exploração pode minimizar as perdas fora do local pretendido. Muitas empresas estão a desenvolver sistemas de avaliação remota ou proximal para prever onde os nutrientes são mais bem aplicados utilizando tecnologias de distribuição de fertilizantes de dosagem variável (83). A aplicação de fertilizantes de dosagem variável em mirtilo selvagem, por exemplo, com base no gradiente de inclinação e na cobertura da cultura, reduziu as perdas de fósforo por escoamento sem reduzir a produção, em comparação com a aplicação de fertilizantes de dosagem uniforme (84). Num sistema de milho-soja em Iowa, descobriu-se que a fertilização de dosagem variável reduziu as aplicações de fósforo e a variabilidade espacial nos níveis de fósforo no solo, reduzindo, assim, o potencial de perda de fósforo (85). Em solos de pH alto, a incorporação de ureia, em vez de deixá-la na superfície, pode reduzir as perdas de amónia (86, 87). A colocação de fontes de fosfato abaixo da superfície do solo pode reduzir as concentrações e as cargas de fósforo dissolvido na água de drenagem (88), especialmente em sistemas de cultivo com sistema de conservação (89).

Princípios originais para o lugar certo

1. Considerar onde estão a crescer as raízes das plantas.
2. Considerar as reações químicas do solo.
3. Adequar-se aos objetivos do sistema de preparação do solo.
4. Gerir a variabilidade espacial.

Em resumo, as fontes de nutrientes precisam ser mais circulares e inteligentes em relação ao clima e à dosagem. O tempo e o local de aplicação precisam ser mais precisos e dinâmicos.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Como é que a 4R pode contribuir para os relatórios de desempenho de sustentabilidade?

Os agricultores, o setor, a sociedade civil e os governos têm necessidades cada vez maiores, porém distintas, de monitorizar e relatar o desempenho da sustentabilidade em relação às metas baseadas na ciência.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Nos casos em que a implementação da 4R alcançou algum grau de reconhecimento, ela geralmente foi impulsionada por expectativas específicas das partes interessadas. Por exemplo, o Programa de Certificação 4R do Lago Erie concentrou-se em práticas que reduziriam as perdas de fósforo e a proliferação de algas, mantendo a lucratividade da produção agrícola. A Gestão Integrada da Fertilidade do Solo concentrou-se em aumentar a produção agrícola e a segurança alimentar, aumentando a rentabilidade e reduzindo os riscos para os pequenos agricultores. Cada região e cada sistema de cultivo terão prioridades diferentes para as partes interessadas.

A determinação das prioridades das partes interessadas, no entanto, ocorre a um nível muito além da escala da exploração agrícola e é essencialmente o trabalho de plataformas de sustentabilidade como a Field to Market ou outras organizações com estruturas de governança adequadas à representação dos interesses das partes interessadas. Por esse motivo, descrevemos alguns componentes centrais de responsabilidade universal como estrutura para a 4R e como podem vincular-se a qualquer uma das plataformas de sustentabilidade existentes. A estrutura exige o acompanhamento das práticas 4R e do desempenho económico ao nível da exploração agrícola. A comunicação dos impactos ambientais e sociais, que não é possível medir diretamente em nível de exploração agrícola, ocorreria em nível regional ou em programas e iniciativas colaborativas que envolvem métodos e modelos de estimativa com base científica. A quantificação desses impactos geralmente requer dados detalhados sobre as práticas específicas da exploração agrícola empregadas e as propriedades específicas do solo.

Acompanhar as práticas 4R e o desempenho económico no nível da exploração agrícola

A implementação da 4R no nível da exploração agrícola inclui o acompanhamento dos quatro componentes da prática e dos seus resultados económicos imediatos. Uma abordagem para o acompanhamento das práticas 4R utiliza tabelas, desenvolvidas com a contribuição de especialistas, que descrevem conjuntos específicos de práticas de fonte-dosagem - local-tempo para sistemas de cultivo específicos, nos níveis básico, intermediário e avançado de gestão (90). As quatro métricas de desempenho da Figura 1, mensuráveis em nível de exploração agrícola, incluem produtividade, lucro, eficiência no uso de nutrientes e saúde do solo.

- Produtividade, definida como rendimento do produto comercializável.
- O lucro, a diferença entre as receitas e as despesas, apoia os meios de subsistência dos agricultores.
- A eficiência do uso de nutrientes pode ser monitorizada como uma proporção entre os resultados e os insumos, ou como um excedente ou déficit.
- A saúde do solo pode concentrar-se na fertilidade do solo, mas também inclui aspetos biológicos e físicos do solo que apoiam a produtividade, a capacidade de retenção de água disponível e o armazenamento de carbono.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

As informações sobre essas quatro áreas de desempenho são para o benefício do gestor da exploração agrícola, mas também podem contribuir para o relatório de desempenho ambiental e social, quando compartilhadas com um agregador com a devida proteção da privacidade. Várias dessas métricas foram defendidas por sua relevância para a prestação de serviços de ecossistemas. Por exemplo, a concentração de fósforo nos testes de solo foi proposta como uma métrica do impacto agrícola sobre a biodiversidade, a saúde do solo e o risco de contaminação da água, associada à produtividade das pastagens na Nova Zelândia (39). Além disso, o excedente de azoto foi proposto como um indicador de emissões de óxido nitroso, a ser usado por empresas da cadeia de abastecimento de alimentos e por outras para quantificar mudanças agregadas, em escala regional, nas emissões de gases de efeito estufa (91). Abordagens personalizadas que mantenham os níveis de azoto dentro de limites seguros ajudam a evitar compensações entre as emissões de óxido nitroso e a alta produtividade das culturas (92). Uma análise de mais de 10.000 combinações de dados agrícolas de anos de campo na Holanda - compartilhada com uma empresa de consultoria que fornece suporte a decisões - mostrou como os efeitos da Gestão e do clima sobre os rendimentos e a eficiência do uso de azoto podem ser usados para avaliar o desempenho produtivo, econômico e ambiental (93).





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Compartilhe dados rastreados para relatar o desempenho

A quantificação dos principais resultados materiais fornece informações importantes para todos os envolvidos na cadeia de valor, desde os agricultores até os consumidores. Nem tudo o que é rastreado precisa ser compartilhado e relatado, mas a quantificação desses resultados está vinculada às principais práticas. Os resultados ambientais associados à 4R em sistemas agrícolas que podem ser importantes incluem a biodiversidade (94), as emissões líquidas de gases de efeito estufa (incluindo os sumidouros de carbono do solo) e a qualidade do ar e da água, conforme mostrado na Figura 1. Um plano 4R pode contribuir com uma parte importante das informações sobre as atividades agrícolas necessárias para as plataformas de sustentabilidade relevantes - colaborações do setor agroalimentar que já incluem muitos fabricantes de fertilizantes e retalhistas - que relatam os resultados ambientais às partes interessadas. Por exemplo, a Field to Market Alliance for Sustainable Agriculture reconhece conjuntos específicos de práticas de azoto 4R para o cálculo das emissões de óxido nitroso dos sistemas de cultivo de milho e trigo nos Estados Unidos, na sua [Fieldprint Platform](#) (95). Ela exige dados de práticas de nutrientes 4R em quatro de suas oito métricas: biodiversidade, gases de efeito estufa, energia e qualidade da água. O [Ecosystem Services Market Consortium](#) utiliza um nível ainda mais detalhado de práticas 4R para gerar créditos comercializáveis, com base em modelos validados de eficácia na redução das emissões de gases de efeito estufa. Várias outras plataformas estão a evoluir, incluindo as plataformas voluntárias de agricultura de carbono lideradas pelo setor da [Indigo Ag](#), [Truterra](#), [Bayer](#), [Nutrien](#), [Yara](#) e muitas outras. Atualmente, muitas empresas de alimentos e fornecedores de insumos agrícolas buscam definir e reduzir as suas emissões e sua pegada de "Scope 3", o que pode incluir todos os indicadores dessa categoria associados à produção agrícola na sua cadeia de abastecimento.

Um plano 4R - ou mesmo um plano de gestão de toda a exploração agrícola - está menos diretamente relacionado aos impactos sociais sobre segurança alimentar, nutrição humana, meios de subsistência e circularidade (Figura 1), mas esses impactos são resultados coletivos de atividades em explorações agrícolas individuais e em toda a cadeia de abastecimento. Portanto, é fundamental fazer as ligações através de plataformas colaborativas e inventários governamentais. Os indicadores de segurança alimentar e de nutrição humana, ao nível global e nacional, são publicados pela FAO, pelos governos nacionais e por outras organizações. Os meios de subsistência refletem o benefício para a subsistência dos agricultores que pode ser derivado da adoção de práticas gratificantes que apoiam os benefícios sociais, e também incluem o emprego criado no agronegócio em atividades inovadoras que apoiam a promoção da 4R. A melhoria do acesso equitativo à participação e aos benefícios também pode ser considerada na implementação de programas 4R (96). A circularidade dos nutrientes é uma métrica relativamente nova, destinada a refletir a contribuição para uma economia mais circular por meio do aumento da reutilização e da reciclagem, reduzindo, assim, o esgotamento de recursos finitos. Foi publicada uma metodologia para calcular indicadores de transição circular (97). A forma exata como isso seria medido, calculado ou relacionado ao uso de nutrientes em nível da exploração agrícola requer discussão, mas deve refletir uma alocação mais otimizada de estrume e outros resíduos biológicos para solos onde os nutrientes são mais necessários e a reciclagem segura de nutrientes para reduzir a dosagem de esgotamento de recursos naturais finitos (98).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

QUEM PRECISA FAZER O QUÊ?

As diretrizes a seguir descrevem as funções de cada grupo de partes interessadas na promoção da Gestão de Nutrientes 4R. Elas baseiam-se nas funções descritas pela FAO (3) e pelo Painel Científico sobre Nutrição Responsável de Plantas (2). As recomendações e ações específicas variam de um país para outro, dependendo das prioridades regionais e do nível de desenvolvimento técnico.

Retalhistas de fertilizantes, prestadores de serviços agrícolas e consultores de culturas:

Fornecer aos agricultores informações baseadas em evidências sobre práticas específicas dos 4Rs e práticas agronômicas responsáveis. Em colaboração com os agricultores, apoiar a Gestão adaptativa nas explorações agrícolas e a investigação que avalia produtos e aditivos de fertilizantes e práticas de dosagem-tempo-local, quanto aos impactos no rendimento, na eficiência do uso de nutrientes e na saúde do solo. Garantir que os serviços de extensão atendam às práticas e aos padrões de qualidade da 4R. Apoiar e promover o uso seguro e adequado de nutrientes provenientes de fontes recicladas.

Agricultores e outros usuários de fertilizantes:

Otimizar a gestão de nutrientes por meio de combinações disponíveis de fonte, dosagem, tempo e local, com base nas necessidades da cultura e nas condições de fertilidade do solo, utilizando ferramentas adequadas de apoio à decisão. Participar em avaliações na exploração agrícola de combinações específicas de 4R. Procurar recomendações de fornecedores de serviços agrícolas certificados e reconhecidos profissionalmente. Sempre que possível, compartilhar dados sobre a 4R e as práticas agronômicas para que as plataformas relatem, reconheçam e recompensem o melhor desempenho de sustentabilidade. Certifique-se de que as fontes de nutrientes disponíveis localmente - incluindo estrume, composto e resíduos de culturas - sejam utilizadas adequadamente.

Cientistas:

Trabalhar com consultores de culturas e agricultores, definir e descrever padrões de práticas 4R relevantes para sistemas agrícolas mais regenerativos. Desenvolver, validar e conferir credibilidade a métodos de previsão de resultados ambientais e sociais decorrentes dessas mudanças no sistema agrícola. Apoiar a sua incorporação em plataformas de que elaboram relatórios de desempenho de sustentabilidade. Investigar as barreiras socioeconômicas e ecológicas à adoção de práticas 4R pelos agricultores e identificar oportunidades de políticas e tecnologias para enfrentá-las. Desenvolver metodologias para avaliações em vários níveis dos programas de implementação da 4R. Desenvolver novas fontes de nutrientes mais eficientes, inteligentes quanto ao clima e favoráveis à economia circular.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

QUEM PRECISA FAZER O QUÊ?

Setor de fertilizantes:

Implementar sistemas de apoio à decisão e recomendações para a escolha da fonte, dosagem, tempo e local, de acordo com os princípios 4R. Fornecer ou disponibilizar as fontes certas no momento certo. Fornecer ao comprador, inclusive aos agricultores, informações sobre a pegada ambiental dos fertilizantes. Colaborar com instituições de investigação, governos e organizações da sociedade civil para desenvolver padrões de sustentabilidade para a cadeia de valor agrícola, incorporando práticas 4R e métricas de desempenho. Treinar retalhistas, agrónomos e agricultores sobre os princípios 4R, práticas 4R específicas do local e práticas responsáveis do sistema de cultivo. Incentivar a inovação e fornecer recursos para desenvolver tecnologias de reutilização e reciclagem de nutrientes para uso seguro como fertilizantes. Ao nível regional, fornecer apoio alavancado para investigação pública sobre questões importantes relacionadas aos 4Rs.

Governos:

Facilitar a recolha de dados estatísticos com maior nível de detalhe para apoiar a implementação das práticas 4R. Apoiar cientistas e projetos de investigação no desenvolvimento de modelos para avaliar o impacto das práticas 4R no desempenho da sustentabilidade. Adotar políticas que incentivem e recompensem a adoção de práticas 4R, a produção de alimentos mais nutritivos, o desenvolvimento e o uso de fertilizantes inteligentes para o clima, e a inovação na reciclagem de nutrientes provenientes de resíduos. A Parceria e Competição Conjunta EPA-USDA sobre Fertilizantes da Próxima Geração para o Avanço da Sustentabilidade Agrícola nos Estados Unidos é um excelente exemplo da colaboração entre o governo e o setor para incentivar a inovação no desenvolvimento de fertilizantes.

Comerciantes, processadores e retalhistas do setor

alimentar:

Reconhecer e recompensar as práticas de 4R adotadas nos produtos vendidos. Incluir as práticas 4R e as métricas de desempenho nos padrões de produção sustentável para acelerar a adoção de práticas 4R codesenhadas com os agricultores.

Organizações da sociedade civil:

Defender o reconhecimento e a premiação da gestão de nutrientes 4R em plataformas colaborativas que promovam a agricultura sustentável. Comunicar os sucessos na mudança de comportamento e os benefícios resultantes para os ecossistemas e a sociedade.

Investidores:

Investir em tecnologias, empresas e organizações que apoiem a 4R como um meio reconhecido para promover a gestão de nutrientes.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

COMO SERÁ O SUCESSO?

1

A colaboração no setor agroalimentar levou ao desenvolvimento de agências confiáveis com as quais os agricultores estão dispostos a compartilhar dados sobre as práticas de aplicação de nutrientes para fins de monitorização, avaliação e elaboração de relatórios dos resultados de sustentabilidade.

2

Os setores de fertilizantes e agropecuária desenvolveram, de forma colaborativa, padrões de práticas 4R que integram a gestão de fertilizantes e estrume para abordar o ciclo de nutrientes entre terrenos aráveis, pastagens e gado.

3

As tecnologias digitais são cada vez mais usadas nas explorações agrícolas de diferentes escalas, tanto para fins de investigação e gestão adaptativa da exploração quanto para o compartilhamento de dados e a relação de resultados de sustentabilidade.

4

São aceites práticas para a seleção da fonte, da dosagem, do tempo e do local de aplicação, que abordam prioridades específicas dos sistemas regionais de cultivo. Estas são usadas pelos agricultores e reconhecidas pelos compradores de produtos agrícolas.

5

A inovação em tecnologia e gestão resultou em produtos fertilizantes registados que utilizam azoto e fósforo extraídos de estrume e de outros resíduos biológicos, em formas transportáveis adequadas para uso como fertilizantes.

6

Os sistemas de cultivo regenerativo que fornecem cobertura verde ao solo são apoiados pelas recomendações das práticas 4R.

7

Métodos e padrões robustos foram adotados para avaliar melhor a gestão de nutrientes e orientar investimentos adicionais em investigação e políticas de apoio à inovação acelerada em nível de exploração agrícola, paisagem e país.

8

Um selo verde para produtos agrícolas cultivados com práticas que protegem a biodiversidade, que reconhece e exige dados sobre práticas e desempenho 4R.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

1. IPNI. 4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition. (International Plant Nutrition Institute, 2016).
2. SPRPN. A new paradigm for plant nutrition. Issue Brief 01. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, Paris, France. (2020).
3. FAO. International code of conduct for the sustainable use and management of fertilizers. (2019).
4. Fixen, P. E. A brief account of the genesis of 4R nutrient stewardship. Agron. J. 112, 4511–4518 (2020).
5. Alberta Government. Quantification Protocol for Agricultural Nitrous Oxide Emission Reductions Specified Gas Emitters Regulation, version 2.0. (2015).
6. Drever, C. R. et al. Natural climate solutions for Canada. Sci. Adv. 7, (2021).
7. Vollmer-Sanders, C., Allman, A., Busdeker, D., Moody, L. B. & Stanley, W. G. Building partnerships to scale up conservation: 4R Nutrient Stewardship Certification Program in the Lake Erie watershed. J. Great Lakes Res. 42, 1395–1402 (2016).
8. Pampolino, M. F., Witt, C., Pasuquin, J. M., Johnston, A. & Fisher, M. J. Development approach and evaluation of the Nutrient Expert software for nutrient management in cereal crops. Comput. Electron. Agric. 88, 103–110 (2012).
9. Dobermann, A. et al. Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. F. Crop. Res. 74, 37–66 (2002).
10. Sapkota, T. B. et al. Crop nutrient management using Nutrient Expert improves yield, increases farmers' income and reduces greenhouse gas emissions. Sci. Rep. 11, 1564 (2021).
11. Hoffmann, M. P. et al. Fertilizer management in smallholder cocoa farms of Indonesia under variable climate and market prices. Agric. Syst. 178, 102759 (2020).
12. Tao, H.-H. et al. Fertilizer management effects on oil palm yield and nutrient use efficiency on sandy soils with limited water supply in Central Kalimantan. Nutr. Cycl. Agroecosystems 112, 317–333 (2018).
13. Luar, L. et al. Cassava Response to Fertilizer Application. Better Crop. with Plant Food 102, 11–13 (2018).
14. SRP. The SRP Standard for Sustainable Rice Cultivation (Version 2.1), Sustainable Rice Platform. (2020).
15. Wu, Y. et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 115, 7010 (2018).
16. Xu, X. et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. F.Crop.Res.157,27–34 (2014).
17. Wang, Y. et al. Agronomic and environmental benefits of nutrient expert on maize and rice in Northeast China. Environ. Sci. Pollut. Res. (2020).
18. Zhang, C., Ju, X., Powlson, D. S., Oenema, O. & Smith, P. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China. Environ. Sci. Technol. (2019).
19. Li, T. et al. Exploring optimal nitrogen management practices within site-specific ecological and socioeconomic conditions. J. Clean. Prod. 241, 118295 (2019).
20. Cui, Z. et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers. Nature 555, 363–366 (2018).
21. Vanlauwe, B. et al. Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Consequences for Implementation and Dissemination. Outlook Agric. 39, 17–24 (2010).
22. Vanlauwe, B. et al. Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: unravelling local adaptation. SOIL 1, 491–508 (2015).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

23. Nkonya, E. Replication Data for: Mapping Adoption of ISFM Practices Study - The Case of Kenya, Rwanda & Zambia. (2017).
24. Chivenge, P., Saito, K., Bunquin, M. A., Sharma, S. & Dobermann, A. Co-benefits of nutrient management tailored to smallholder agriculture. Glob. Food Sec. 30, 100570 (2021).
25. Pearson, R. G., Connolly, N. M., Davis, A. M. & Brodie, J. E. Fresh waters and estuaries of the Great Barrier Reef catchment: Effects and management of anthropogenic disturbance on biodiversity, ecology and connectivity. Mar. Pollut. Bull. 166, 112194 (2021).
26. Conyers, M. K. et al. Making Better Fertiliser Decisions for Cropping Systems in Australia (BFDC): knowledge gaps and lessons learnt. Crop Pasture Sci. 64, 539–547 (2013).
27. Murray, W. & Freeman, M. Effective use of Overseer in regulation. In: L. D. Currie and M. J. Hedley, editors, Science and policy: nutrient management challenges for the next generation. Occasional Report No. 30, Fertiliser and Lime Research Centre, Palmerston North, NZ. p. 1-6. (2017).
28. Withers, P. J. A. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Sci. Rep. 8, 2537 (2018).
29. Jobbágy, E., Aguiar, S., Garibaldi, L. & Piñeiro, G. Impronta ambiental de la agricultura de granos en Argentina: revisando desafíos propios y ajenos. Cienc. Hoy 29, (2021).
30. Fontana, M. B. et al. Long-term fertilizer application and cover crops improve soil quality and soybean yield in the Northeastern Pampas region of Argentina. Geoderma 385, 114902 (2021).
31. Picone, L. I. et al. Nitrous oxide emissions in maize on mollisols in the Pampas of Argentina. Geoderma Reg. e00362 (2021).
32. Piccinetti, C. F., Bacigaluppo, S., Di Ciocco, C. A., De Tellería, J. M. & Salvagiotti, F. Soybean in rotation with cereals attenuates nitrous oxide emissions as compared with soybean monoculture in the Pampas region. Geoderma 402, 115192 (2021).
33. Barrera, V. H., Delgado, J. A. & Alwang, J. R. Conservation agriculture can help the South American Andean region achieve food security. Agron. J., (2021).
34. van Grinsven, H. J. M. et al. Losses of Ammonia and Nitrate from Agriculture and Their Effect on Nitrogen Recovery in the European Union and the United States between 1900 and 2050. J. Environ. Qual. 44, 356–367 (2015).
35. Bruulsema, T. W., Peterson, H. M. & Prochnow, L. I. The science of 4R nutrient stewardship for phosphorus management across latitudes. J. Environ. Qual. 48, (2019).
36. Bouwman, A. F. et al. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. Sci. Rep. 7, 40366 (2017).
37. Hoxha, A. & Christensen, C. The carbon footprint of fertiliser production: Regional reference values. Proceedings 805. Paper presented to the International Fertiliser Society, Prague, Czech Republic, 8 May 2018.
38. EUNEP. EU Expert Panel, Nitrogen Use Efficiency (NUE). Guidance document for assessing NUE at farm level (Wageningen University, Alterra, Wageningen, NL). (2016).
39. Macintosh, K. A. et al. Transforming soil phosphorus fertility management strategies to support the delivery of multiple ecosystem services from agricultural systems. Sci. Total Environ. 649, 90–98 (2019).
40. Schreefel, L., Schulte, R. P. O., de Boer, I. J. M., Schrijver, A. P. & van Zanten, H. H. E. Regenerative agriculture – the soil is the base. Glob. Food Sec. 26, 100404 (2020).
41. Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A. & Sumberg, J. Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. Outlook Agric. 0030727021998063 (2021).
42. Spiegall, S. et al. Manuresheds: Advancing nutrient recycling in US agriculture. Agric. Syst. 182, 102813 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

43. Jin, S. et al. Decoupling livestock and crop production at the household level in China. Nat. Sustain. 4, 48–55 (2021).
44. Fears, R., ter Meulen, V. & von Braun, J. Global food and nutrition security needs more and new science. Sci. Adv. 5, eaba2946 (2019).
45. Alfthan, G. et al. Effects of nationwide addition of selenium to fertilizers on foods, and animal and human health in Finland: From deficiency to optimal selenium status of the population. J. Trace Elem. Med. Biol. 31, 142–147 (2015).
46. Chen, X.-P. et al. Harvesting more grain zinc of wheat for human health. Sci. Rep. 7, 7016 (2017).
47. Ferrari, M. et al. Comparing Soil vs. Foliar Nitrogen Supply of the Whole Fertilizer Dose in Common Wheat. Agronomy 11, (2021).
48. Zou, C. et al. Simultaneous Biofortification of Wheat with Zinc, Iodine, Selenium, and Iron through Foliar Treatment of a Micronutrient Cocktail in Six Countries. J. Agric. Food Chem. 67, 8096–8106 (2019).
49. Kutman, U. B., Yildiz, B. & Cakmak, I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil 342, 149–164 (2011).
50. Grujicic, D., Yazici, A. M., Tutus, Y., Cakmak, I. & Singh, B. R. Biofortification of Silage Maize with Zinc, Iron and Selenium as Affected by Nitrogen Fertilization. Plants 10, (2021).
51. Bouis, H. E. & Saltzman, A. Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. Glob. Food Sec. 12, 49–58 (2017).
52. Basso, B. & Antle, J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. Nat. Sustain. 3, 254–256 (2020).
53. Carberry, P. S. et al. Re-inventing model-based decision support with Australian dryland farmers. 3. Relevance of APSIM to commercial crops. Crop Pasture Sci. 60, 1044–1056 (2009).
54. Aryal, J. P., Mehrotra, M. B., Jat, M. L. & Sidhu, H. S. Impacts of laser land leveling in rice–wheat systems of the north–western indo-gangetic plains of India. Food Secur. 7, 725–738 (2015).
55. Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. & Müller, A. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. Agric. Syst. 195, 103313 (2022).
56. Sela, S., Woodbury, P. B. & van Es, H. M. Dynamic model-based N management reduces surplus nitrogen and improves the environmental performance of corn production. 13, 54010 (2018).
57. Ransom, C. J. et al. Data from a public–industry partnership for enhancing corn nitrogen research. Agron. J. (2021).
58. Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W. & Beaton, J. p 412-420 in Soil Fertility and Fertilizers: an Introduction to Nutrient Management, 8th edition. Pearson. (2014).
59. Hasler, K., Bröring, S., Omta, S. W. F. & Olf, H.-W. Life cycle assessment (LCA) of different fertilizer product types. Eur. J. Agron. 69, 41–51 (2015).
60. Comer, B. M. et al. Prospects and Challenges for Solar Fertilizers. Joule 3, 1578–1605 (2019).
61. Driver, J. G. et al. Blue Urea: Fertilizer With Reduced Environmental Impact. Frontiers in Energy Research 7, 88 (2019).
62. Tallaksen, J., Bauer, F., Hulteberg, C., Reese, M. & Ahlgren, S. Nitrogen fertilizers manufactured using wind power: greenhouse gas and energy balance of community-scale ammonia production. J. Clean. Prod. 107, 626–635 (2015).
63. Abalos, D., Jeffery, S., Sanz-Cobena, A., Guardia, G. & Vallejo, A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. Agric. Ecosyst. Environ. 189, 136–144 (2014).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

64. Thapa, R., Chatterjee, A., Awale, R., McGranahan, D. A. & Daigh, A. Effect of Enhanced Efficiency Fertilizers on Nitrous Oxide Emissions and Crop Yields: A Meta-analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 80, 1121–1134 (2016).
65. Monreal, C. M., DeRosa, M., Mallubhotla, S. C., Bindraban, P. S. & Dimkpa, C. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. Biol. Fertil. Soils 52, 423–437 (2016).
66. do Nascimento, C. A. C., Pagliari, P. H., Faria, L. de A. & Vitti, G. C. Phosphorus Mobility and Behavior in Soils Treated with Calcium, Ammonium, and Magnesium Phosphates. Soil Sci. Soc. Am. J. 82, 622–631 (2018).
67. Szogi, A. A. & Vanotti, M. B. Removal of Phosphorus from Livestock Effluents. J. Environ. Qual. 38, 576–586 (2009).
68. Vaneeckhaute, C., Belia, E., Meers, E., Tack, F. M. G. & Vanrolleghem, P. A. Nutrient recovery from digested waste: Towards a generic roadmap for setting up an optimal treatment train. Waste Manag. 78, 385–392 (2018).
69. Mendoza-Suárez, M. A. et al. Optimizing Rhizobium-legume symbioses by simultaneous measurement of rhizobial competitiveness and N₂ fixation in nodules. Proc. Natl. Acad. Sci. 117, 9822 LP – 9831 (2020).
70. Mitter, E. K., Tosi, M., Obregón, D., Dunfield, K. E. & Germida, J. J. Rethinking Crop Nutrition in Times of Modern Microbiology: Innovative Biofertilizer Technologies. Front. Sustain. Food Syst. 5, 29 (2021).
71. Ryan, M. H. & Graham, J. H. Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops. New Phytol. 220, 1092–1107 (2018).
72. Ichami, S. M., Shepherd, K. D., Sila, A. M., Stoorvogel, J. J. & Hoffland, E. Fertilizer response and nitrogen use efficiency in African smallholder maize farms. Nutr. Cycl. Agroecosystems 113, 1–19 (2019).
73. Sogbedji, J. M., van Es, H. M., Klausner, S. D., Bouldin, D. R. & Cox, W. J. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. Soil Tillage Res. 58, 233–244 (2001).
74. Ransom, C. J. et al. Improving publicly available corn nitrogen rate recommendation tools with soil and weather measurements. Agron. J., (2021).
75. Michalczyk, A. et al. Model-based optimisation of nitrogen and water management for wheat–maize systems in the North China Plain. Nutr. Cycl. Agroecosystems 98, 203–222 (2014).
76. Webb, M. A conceptual framework for determining economically optimal fertiliser use in oil palm plantations with factorial fertiliser trials. Nutr. Cycl. Agroecosystems 83, 163–178 (2009).
77. Kabir, T., De Laporte, A., Nasielski, J. & Weersink, A. Adjusting Nitrogen Rates with Split Applications: Modelled Effects on N Losses and Profits Across Weather Scenarios. Eur. J. Agron. 129, 126328 (2021).
78. Bronson, K. F. et al. Improving Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in Surface- and Overhead Sprinkler-Irrigated Cotton in the Desert Southwest. Soil Sci. Soc. Am. J. 81, 1401–1412 (2018).
79. Dick, C. D., Thompson, N. M., Epplin, F. M. & Arnall, D. B. Managing Late-Season Foliar Nitrogen Fertilization to Increase Grain Protein for Winter Wheat. Agron. J. 108, 2329–2338 (2016).
80. Kersebaum, K. C. et al. Operational use of agro-meteorological data and GIS to derive site specific nitrogen fertilizer recommendations based on the simulation of soil and crop growth processes. Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C 30, 59–67 (2005).
81. Zhang, Z., Jin, Y., Chen, B. & Brown, P. California Almond Yield Prediction at the Orchard Level With a Machine Learning Approach. Front. Plant Sci. 10, 809 (2019).
82. Wen, G. et al. Machine learning-based canola yield prediction for site-specific nitrogen recommendations. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 241–256 (2021).
83. Fastellini, G. & Schillaci, C. Chapter 7 - Precision farming and IoT case studies across the world. in Agricultural Internet of Things and Decision Support for Precision Smart Farming (eds. Castrignanò, A. et al.) 331–415 (Academic Press, 2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

84. Rashid Saleem, S. et al. Impact of Variable Rate Fertilization on Nutrients Losses in Surface Runoff for Wild Blueberry Fields. Appl. Eng. Agric. 30, 179–185 (2014).
85. Wittry, D. J. & Mallarino, A. P. Comparison of uniform- and variable-rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Agron. J. 96, 26–33 (2004).
86. Sheppard, S. C., Bittman, S. & Bruulsema, T. W. Monthly ammonia emissions from fertilizers in 12 Canadian Ecoregions. Can. J. Soil Sci. 90, (2010).
87. Woodley, A. L. et al. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. Soil Sci. Soc. Am. J. n/a, (2020).
88. King, K. W. et al. Phosphorus Transport in Agricultural Subsurface Drainage: A Review. J. Environ. Qual. 44, 467–485 (2015).
89. Jarvie, H. P. et al. Increased soluble phosphorus loads to lake erie: Unintended consequences of conservation practices? J. Environ. Qual. 46, (2017).
90. Snyder CS. Suites of 4R Nitrogen Management Practices for Sustainable Crop Production and Environmental Protection. International Plant Nutrition Institute. (2016).
91. Eagle, A. J. et al. Quantifying On-Farm Nitrous Oxide Emission Reductions in Food Supply Chains. Earth's Futur. 8, e2020EF001504 (2020).
92. Maaz, T. M. et al. Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. Glob. Chang. Biol. n/a, (2021).
93. Silva, J. V. et al. Agronomic analysis of nitrogen performance indicators in intensive arable cropping systems: An appraisal of big data from commercial farms. F. Crop. Res. 269, 108176 (2021).
94. SPRPN. Achieving nature-positive plant nutrition: fertilizers and biodiversity. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. Paris, France. 12 (2021).
95. Young, K. M. & Thomson, A. Relating agronomic practices to environmental sustainability outcomes: energy use and greenhouse gases. Crop. Soils 52, 14–42 (2019).
96. Farnworth, C. R. et al. Gender and inorganic nitrogen: what are the implications of moving towards a more balanced use of nitrogen fertilizer in the tropics? Int. J. Agric. Sustain. 15, 136–152 (2017).
97. WBCSD. Circular transition indicators v2.0. World Business Council for Sustainable Development. (2021).
98. van der Wiel, B. Z. et al. Restoring nutrient circularity in a nutrient- saturated area in Germany requires systemic change. Nutr. Cycl. Agroecosystems 121, 209–226 (2021).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Autores, citação e contato

Autores: Membros da Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition (lead author underlined).

Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Bruno Gerard (UM6P, Morocco), Kaushik Majumdar (African Plant Nutrition Institute, Morocco), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Pytrik Reidsma (Wageningen University & Research, The Netherlands), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Eva Wollenberg (CGIAR Climate Change, Agriculture & Food Security Program, USA), Fusuo Zhang (China Agricultural University, China), Xin Zhang (University of Maryland Center for Environmental Science, USA)

Agradecimentos: We appreciate input received from Fernando Garcia, Raul Jaramillo, Luis Prochnow, and Eros Francisco on 4R outcomes in Latin America, and review comments from members of Fertilizer Canada, The Fertilizer Institute, and the International Fertilizer Association.

Citação: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2021. Furthering 4R Nutrient Stewardship. Issue Brief 03. Available at <https://sprpn.org>.

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