



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Issue Brief 05 – outubro de 2023

Os nutrientes vegetais são essenciais para o alívio da fome crónica e oculta

by the Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition



Conteúdo

- 3 Pontos principais
- 6 Questão 1: Os nutrientes vegetais salvaram mil milhões de pessoas da fome, mas a fome crónica continua generalizada
- 9 Questão 2: A fome oculta devido ao fornecimento insuficiente de micronutrientes minerais e vitaminas nos alimentos é um problema global
- 12 Questão 3: Os baixos níveis de nutrientes nas explorações agrícolas e a falta de diversidade nos sistemas alimentares são as principais causas da fome oculta
- 16 Soluções e ações necessárias
- 24 Quem precisa fazer o quê?
- 26 Como seria o sucesso
- 27 Referências
- 32 Autores, citação e contato



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Pontos principais

A maioria dos nutrientes minerais, aminoácidos essenciais, vitaminas e antioxidantes, hidratos de carbono, proteínas e gorduras que sustentam a nutrição humana é obtida diretamente das plantas ou indiretamente dos animais que as consomem (Fig. 1).

A nutrição da humanidade depende, portanto, do fornecimento de nutrientes às plantas, para que elas cresçam de forma ideal e produzam alimentos de qualidade nutricional adequada para apoiar a saúde e o bem-estar humanos.

A função dupla que os elementos minerais desempenham na saúde humana e das plantas exige um novo paradigma na nutrição das plantas e na estratégia de fertilizantes. Os cereais são a fonte mais importante de nutrição para a maior parte da população global. Portanto, melhorar a produtividade dos cereais e a biodisponibilidade dos nutrientes melhorando o fornecimento de nutrientes para as plantas tem grande potencial para aliviar a fome e a desnutrição. Frutas, frutos secos, legumes, oleaginosas, leguminosas e raízes e tubérculos proporcionam diversidade na dieta e são excelentes fontes de nutrientes. O seu consumo muitas vezes também aumenta a biodisponibilidade dos nutrientes derivados dos cereais.

Cerca de 10% da população mundial sofre de fome crónica, definida como a incapacidade persistente de ter acesso a alimentos suficientes. Ao mesmo tempo, 25% enfrentam a "fome oculta" causada por uma deficiência de micronutrientes minerais ou vitaminas na dieta (3, 4). Isso significa que dietas nutritivas e saudáveis estão fora do alcance de cerca de três mil milhões de pessoas (4, 5). Apesar dos enormes esforços feitos nas últimas cinco décadas, a fome crónica e oculta ainda persistem e estão até mesmo a aumentar (6, 7). Um motivo para essa tendência é o baixo nível de nutrientes numa proporção significativa dos solos agrícolas. Essas deficiências de nutrientes no solo são o resultado das práticas agrícolas, da exportação de nutrientes em produtos agrícolas colhidos e de condições desfavoráveis do solo. Assim, a nutrição desadequada ou desequilibrada das plantas limita a produtividade das culturas e compromete o valor nutricional e a qualidade dos alimentos produzidos (8, 9).

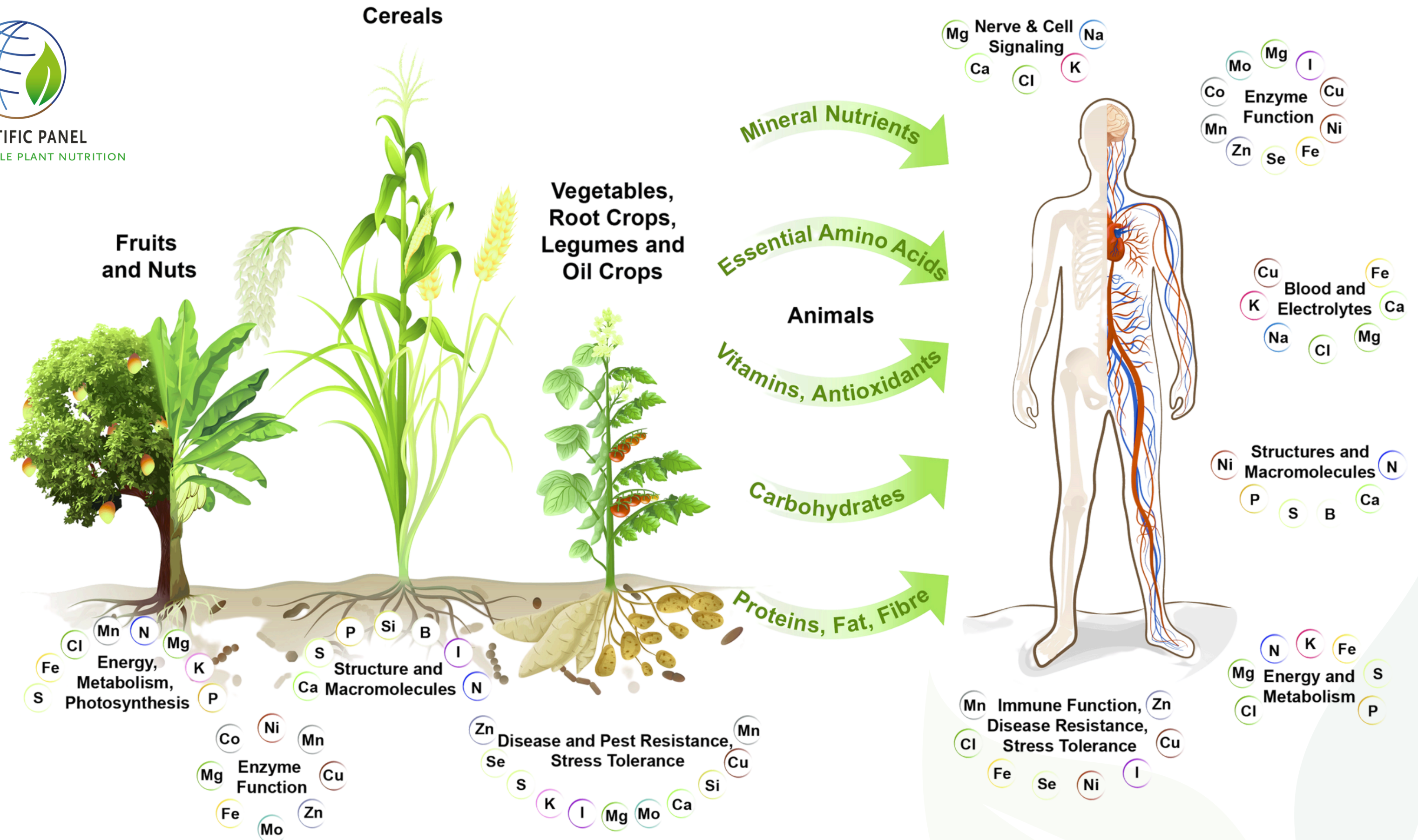


Figura 1. Dezanove elementos minerais (além de C, H e O) são necessários para o crescimento ideal das plantas e para apoiar a qualidade nutricional dos produtos alimentícios utilizados para consumo humano (1, 2).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Outro motivo pelo qual a fome crónica e oculta persiste globalmente é a falta de consciencialização. Os sistemas alimentares não se concentram adequadamente na saúde do consumidor, a produção e a distribuição de alimentos são injustas e muitos alimentos são perdidos ou desperdiçados (10). A falta de diversidade na dieta, a grande dependência de algumas culturas alimentares básicas e o acesso precário a alimentos vegetais e animais ricos em nutrientes também afetam a saúde humana em muitos países. Para aliviar a fome, são necessários métodos económicos para suprir as necessidades locais de nutrientes vegetais. As políticas económicas e reguladoras devem facilitar os mercados e apoiar a implementação de práticas agronómicas e educacionais adequadas para utilizar os nutrientes das plantas de forma eficiente e segura.

Com base nesses desafios locais e globais, há uma necessidade urgente de i) aumentar a conscientização e o conhecimento de como a nutrição vegetal e a nutrição humana estão interligadas e ii) desenvolver práticas ambientalmente corretas e economicamente sustentáveis para fornecer os nutrientes minerais necessários para apoiar a saúde humana. Aqui, descrevemos como a nutrição vegetal responsável pode contribuir para mitigar a fome crónica e oculta e alcançar o segundo Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU de "acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e a melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável".

A nutrição responsável de plantas (11) visa:

- Melhorar a rentabilidade, a produtividade, a eficiência dos nutrientes e a resiliência da agricultura.
- Melhorar a saúde humana por meio de uma agricultura sensível à nutrição.
- Melhorar e manter a saúde do solo.
- Aumentar a recuperação de nutrientes e a reciclagem de resíduos.
- Minimizar as emissões de gases de efeito estufa, a poluição por nutrientes e a perda de biodiversidade.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Os nutrientes vegetais salvaram mil milhões de pessoas da fome, mas a fome crónica continua generalizada

As populações sofrem de fome crónica quando não têm acesso regular a alimentos suficientes.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Embora a subnutrição tenha sido bastante reduzida nas últimas décadas por meio do aumento da produção de alimentos, a percentagem global de pessoas subnutridas aumentou cerca de 8% em 2019 para mais de 9% atualmente e é particularmente grande na África Subsaariana (Fig. 2). O número de pessoas afetadas pela fome crônica foi de entre 691 e 783 milhões em 2022, com um aumento de 122 milhões desde a pandemia da COVID-19 (4). Mais de um quarto de mil milhões de pessoas estão a enfrentar níveis agudos de fome.

O papel central que a nutrição das plantas desempenha na nutrição humana e no desenvolvimento económico é ilustrado pela estreita relação entre os ganhos de produtividade das culturas e o uso de fertilizantes (12). Os fertilizantes minerais, especialmente o azoto (N), o potássio (K) e o fósforo (P), aumentaram a produtividade das culturas em grande parte do mundo. Embora os nutrientes vegetais fornecidos pelos fertilizantes minerais agora alimentem cerca de metade da população mundial (13, 14), existem enormes diferenças regionais (11).

Particularmente preocupante é a situação em grande parte da África Subsaariana, onde a fome e a subnutrição crônicas persistem em grande parte porque o acesso e o uso de fertilizantes são severamente limitados (15). As taxas médias de uso de fertilizantes na África oriental, central e ocidental ainda estão, em sua maioria, abaixo de 20 kg NPK/ha, embora tendências encorajadoras de aumento tenham ocorrido nos últimos anos na Etiópia, Quênia, Tanzânia, Malawi, Zâmbia, Gana, Nigéria e Mali (16). Em toda a África, dados confiáveis sobre o uso regional de nutrientes estão disponíveis

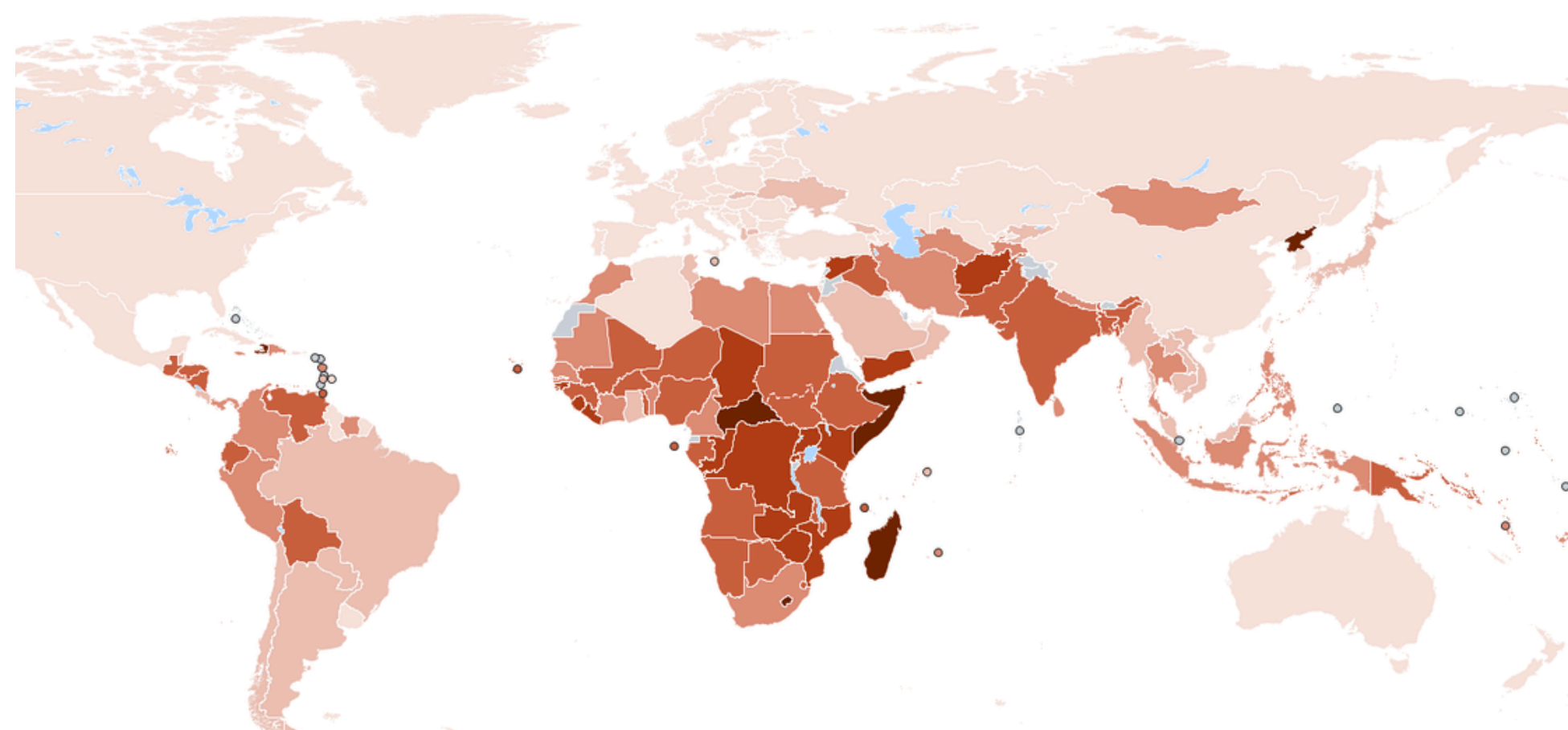
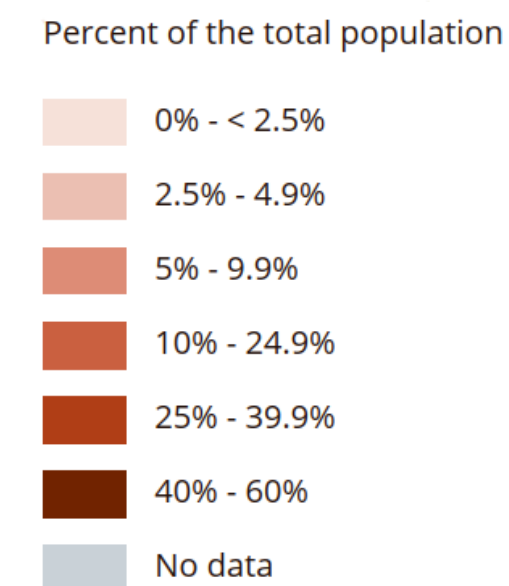


Figura 2. Prevalência de subnutrição. Média 2020-2022 (4).



apenas para N, P e K, com poucas informações sobre os demais nutrientes das plantas. O que se sabe, entretanto, é que as deficiências de micronutrientes nos solos, nas culturas e nos seres humanos são comuns em muitos países africanos (16-18).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Um suprimento inadequado de nutrientes para as plantas gera lacunas na produção, baixa produtividade e subnutrição (19). As deficiências de nutrientes para as plantas são consideradas algumas das restrições de rendimento mais críticas na África Subsaariana e em outras regiões com poucos recursos (20, 21). Calorias, proteínas e outros nutrientes são exportados dos solos agrícolas e das pastagens como produtos vegetais para alimentar humanos e animais. No entanto, quando os nutrientes exportados não são substituídos ou mantidos, a produtividade das lavouras e das pastagens e, portanto, a qualidade dos alimentos, inevitavelmente diminuem. Dessa forma, há mais de 30 anos, na África Subsaariana, são conhecidos balanços negativos de nutrientes generalizados, especialmente para N, P e K, nos quais as exportações de nutrientes excedem as entradas de nutrientes (22, 23). Uma análise mais recente dos balanços de azoto nas explorações em 52 países africanos demonstrou que houve pouco progresso (24). O impacto final de um balanço negativo persistente de nutrientes na produtividade varia de acordo com o ambiente, mas é mais crítico em terras agrícolas marginais com baixa fertilidade natural e poucos recursos para repor os nutrientes exportados com fertilizantes inorgânicos ou biológicos.

A crise alimentar de 2021 no Sri Lanka é um lembrete claro de como a nutrição responsável das plantas sustenta a segurança alimentar. Em maio de 2021, o governo do Sri Lanka proibiu a importação de fertilizantes inorgânicos e agroquímicos com o objetivo de tornar a agricultura do Sri Lanka estritamente biológica. A disponibilidade de fertilizantes orgânicos ao nível nacional era, no entanto, inadequada e não conseguiu substituir os nutrientes que não eram mais fornecidos pelos fertilizantes minerais. Imediatamente, a produção de alimentos básicos, como arroz, milho e legumes, caiu de 20 a 60%. Embora a proibição de fertilizantes tenha sido suspensa em novembro de 2021 e o uso de fertilizantes tenha aumentado gradualmente para os níveis anteriores à proibição, a previsão é que a produção de cereais em 2023 ainda seja 14% menor do que a média dos últimos cinco anos (25). Esses declínios não intencionais na produção agrícola do Sri Lanka devido à falta de provisão de nutrientes enfatizam - mais uma vez - que a produção de alimentos depende muito da entrada equilibrada de nutrientes nas plantas, independentemente do tipo de fertilizante aplicado.





SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

A fome oculta devido ao fornecimento insuficiente de micronutrientes minerais e vitaminas nos alimentos é um problema global

A fome oculta refere-se à deficiência dietética de vitaminas ou micronutrientes minerais que são essenciais para a saúde humana, incluindo o desenvolvimento físico, mental, da tiróide e as funções do sistema imunológico (Fig. 1).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

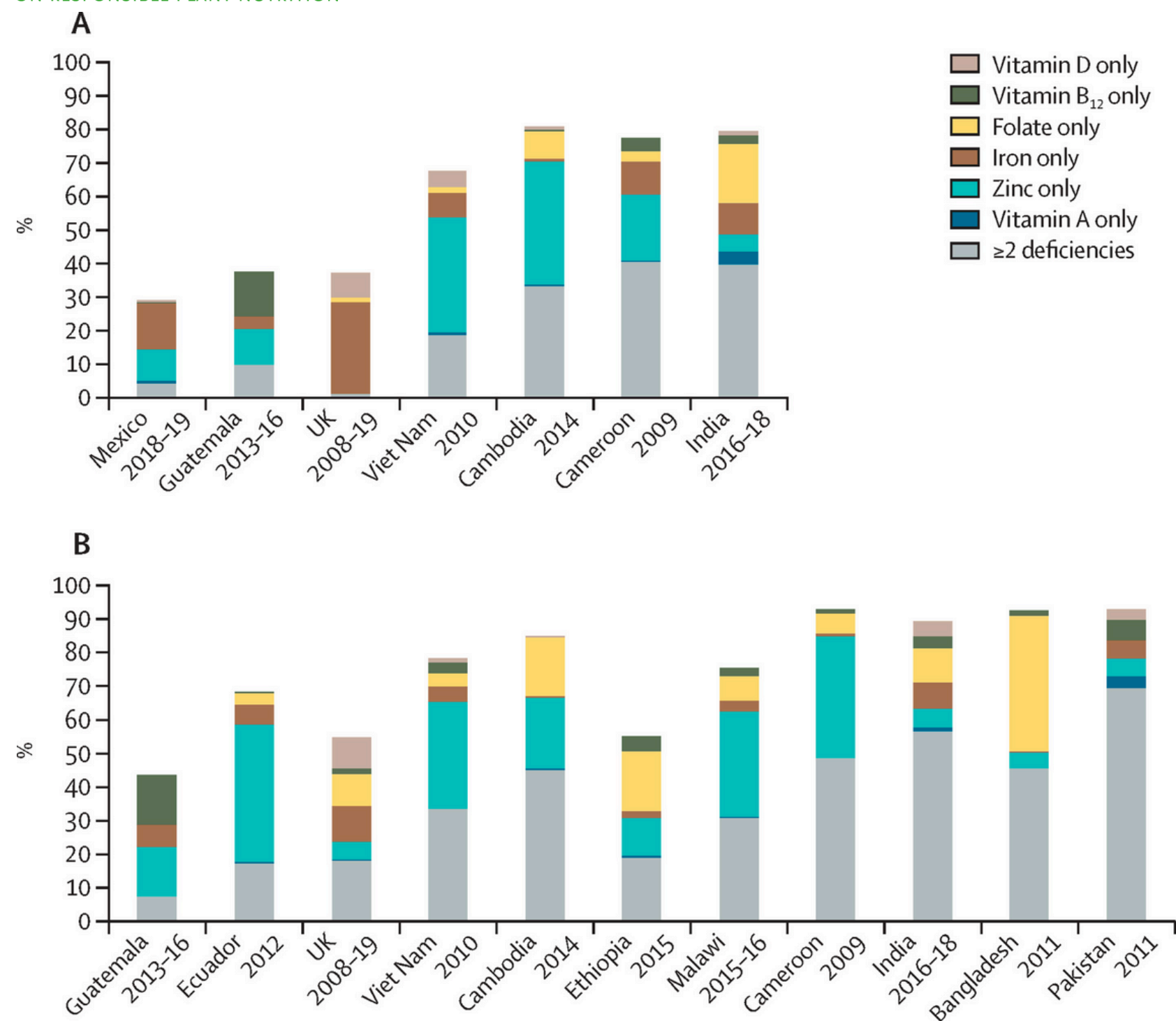


Figura 3. Prevalência de duas ou mais deficiências de micronutrientes em % em A) crianças em idade escolar de 5 a 59 meses e B) mulheres não grávidas de 15 a 49 anos (7).

Em muitos casos, a fome oculta ocorre como resultado do consumo de uma dieta rica em energia, mas pobre em nutrientes (26). Essas dietas levam à ingestão de quantidades suficientes de energia na forma de calorias, mas não dos nutrientes necessários. Mais de 2 mil milhões de pessoas em são afetadas por várias formas de fome oculta, principalmente em países de baixo e médio rendimento, onde as dietas carecem de diversidade e as opções são limitadas devido à pobreza (27). A fome oculta é mais prevalente no continente africano e no sul da Ásia, sendo as crianças e as mulheres em idade reprodutiva as mais vulneráveis (7, 28).

Sete nutrientes minerais - ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), cálcio (Ca), magnésio (Mg), selênio (Se) e iodo (I) - e várias vitaminas costumam faltar nas dietas humanas. As deficiências mais comuns são devidas à falta de Fe, Zn, vitamina A e vitamina B9 (folato) (29), que, individualmente ou combinadas, afetam 30% a 90% de todas as mulheres em idade pré-escolar ou não gestantes em todo o mundo (Fig. 3). No total, metade das crianças em idade pré-escolar e dois terços das mulheres não grávidas em idade reprodutiva em todo o mundo têm deficiências de micronutrientes de Fe, Zn ou I (7). A ocorrência generalizada de deficiência de Zn em populações humanas, especialmente no sul e sudeste da Ásia, também está associada a uma alta incidência e gravidade de doenças infecciosas infantis (28).

O desafio global da fome oculta é impressionante, mas não se restringe apenas aos países em desenvolvimento. As deficiências de micronutrientes também são um grande problema em países de alto rendimento, com 50% e 33% das mulheres do Reino Unido e dos EUA, respectivamente, a sofrer de pelo menos uma deficiência de micronutrientes (7). A baixa ingestão de vários micronutrientes, especialmente Fe, Zn e I, é cada vez mais relatada nas populações europeias (30, 31). As dietas comuns consumidas por idosos na Europa são pobres em micronutrientes, enquanto o alto consumo de álcool interfere na



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

absorção intestinal de micronutrientes, agravando assim as deficiências de micronutrientes. Os veganos e vegetarianos também correm um alto risco de reduzir a ingestão de nutrientes minerais (31).

Globalmente, o risco de desenvolver deficiências de Zn e vitamina A diminuiu nas últimas três décadas, enquanto o risco de desenvolver deficiência de Fe permaneceu a um nível relativamente alto (Fig. 4). Na Índia e na Turquia, a diminuição da prevalência da deficiência de Zn é, pelo menos parcialmente, atribuível ao aumento das intervenções de fertilização com Zn (32, 33).

Outro micronutriente essencial que às vezes não é fornecido em níveis adequados pela dieta é o selênio (Se), que tem papéis importantes na função da tireóide, no desenvolvimento cognitivo e como componente anti-inflamatório (35, 36). Até 0,5 a 1 mil milhão de pessoas em todo o mundo podem ter ingestão insuficiente de Se, incluindo populações na Europa Ocidental e do Norte, na Sibéria Oriental e Central, na Nova Zelândia e em partes da China (37, 38). A deficiência grave de Se causa doenças humanas endêmicas, como a doença de Keshan (uma cardiomiopatia) e a doença de Kaschin-Beck (uma osteoartropatia). Embora a doença de Keshan tenha sido eliminada pela suplementação com comprimidos de Se, a doença de Kaschin-Beck ainda ocorre em algumas áreas da região de Sichuan-Tibet, na China, e no sudeste da Sibéria (39). A deficiência humana de Se também foi relatada em vários países da África (40-42). A deficiência de Se devido à ingestão dietética inadequada é causada pelas baixas concentrações de Se disponível para as plantas em alguns solos agrícolas. Hurst et al (42) relataram uma ligação muito forte entre a disponibilidade de Se no solo e a ingestão diária de Se na dieta. A menor ingestão diária de Se na dieta foi encontrada em vilarejos onde os solos eram ácidos, enquanto a maior ingestão diária de Se estava ocorrendo em vilarejos com solos de pH alto. A disponibilidade química e a absorção de Se pelas raízes são

extremamente baixas em solos ácidos, enquanto são muito altas em solos com pH alto.

A deficiência dietética de I também é altamente prevalente, apesar do uso mundial de sal iodado. A deficiência de iodo afeta principalmente a função da tireóide e do cérebro e o desenvolvimento mental (43). Estima-se que cerca de 2 mil milhões de pessoas estejam em risco de deficiência de I, especialmente nos países ocidentais (44, 45). Também há cada vez mais evidências de um papel nutricional do I nas plantas (46).

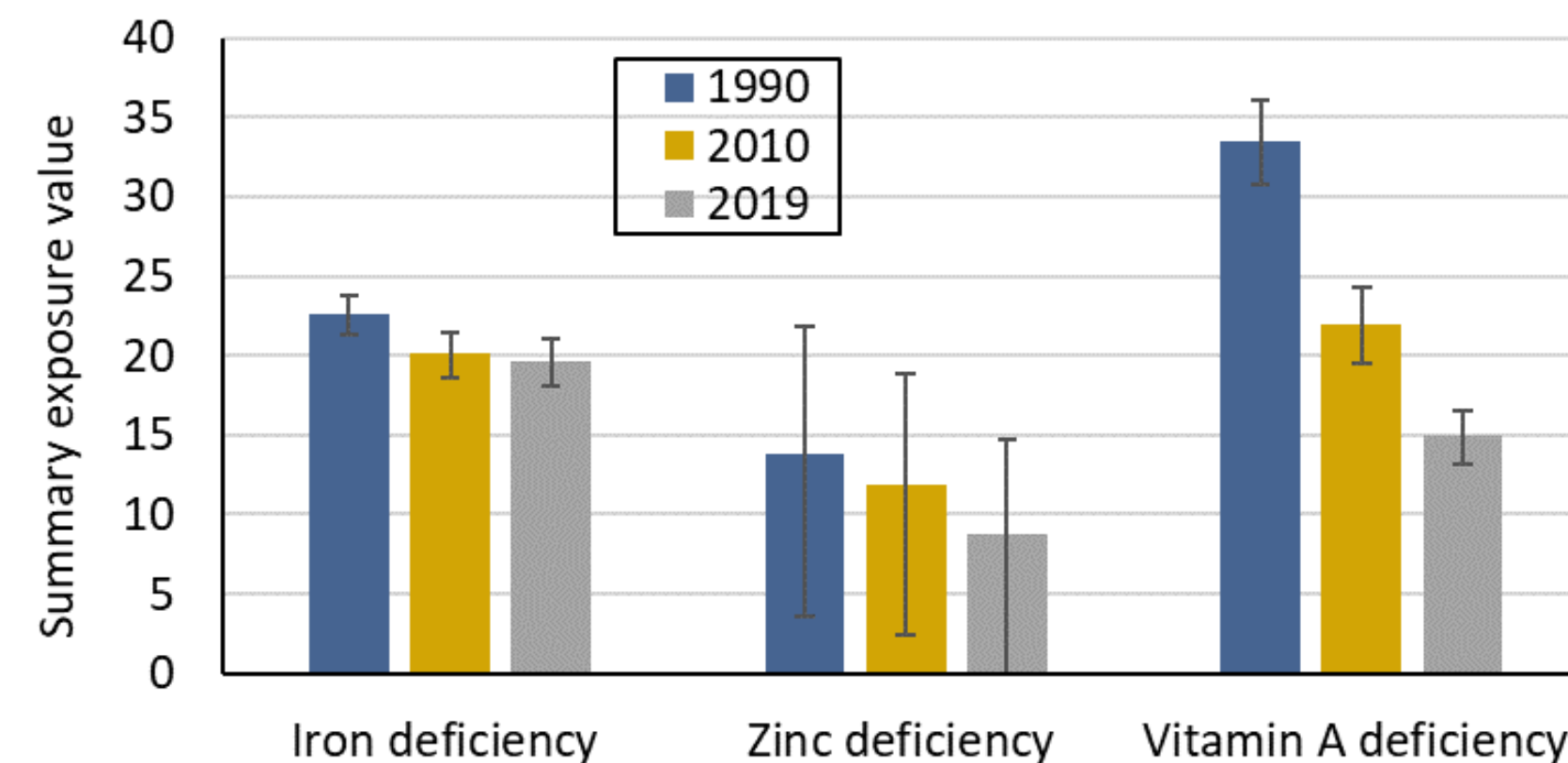


Figura 4. Valores globais de exposição resumida padronizados por idade (SEV) à deficiência de ferro, zinco e vitamina A em 1990, 2010 e 2019. As barras de erro representam intervalos de confiança de 95%. SEV = 100 quando toda a população está em risco máximo e é zero quando toda a população está em risco mínimo (34).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Os baixos níveis de nutrientes nas explorações agrícolas e a falta de diversidade nos sistemas alimentares são as principais causas da fome oculta

As plantas são as principais fontes de macro e micronutrientes na dieta humana.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

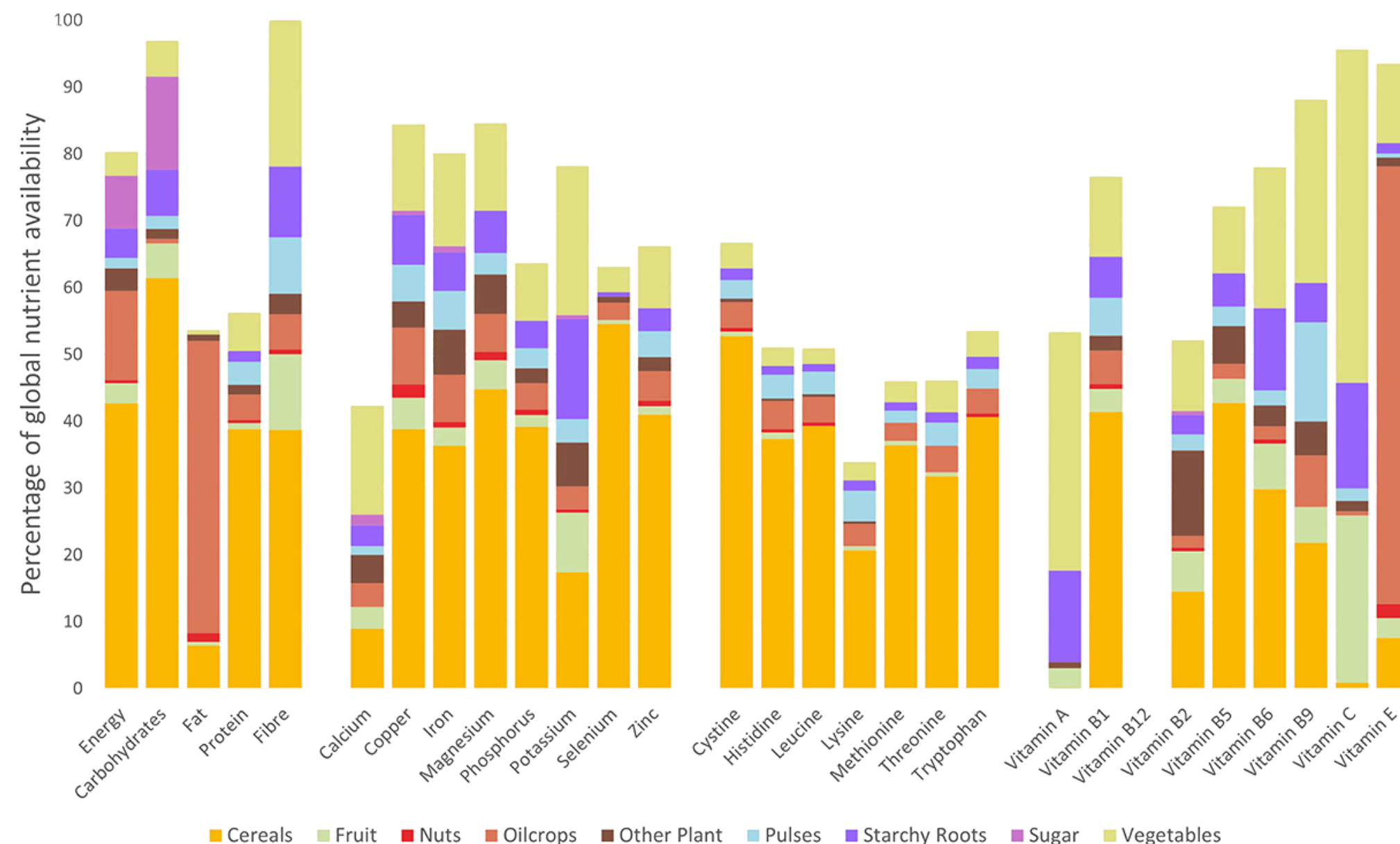


Figura 5. Contribuição dos alimentos vegetais para a energia, hidratos de carbono, gorduras, proteínas, fibras, nutrientes minerais, aminoácidos e vitaminas. Os valores foram calculados usando o DELTA Model® e ajustados para resíduos e porções não comestíveis. A biodisponibilidade/ digestibilidade foi corrigida para proteínas e aminoácidos, mas não para outras categorias. Quando as barras não representam 100% do fornecimento dietético, o restante é predominantemente fornecido por produtos de origem animal (47).

Conforme ilustrado na Figura 5, os alimentos de origem vegetal fornecem cerca de 80% das calorias, 56% das proteínas, 50 a 95% das vitaminas e 40 a 85% dos minerais para a população global (47). O restante das necessidades nutricionais humanas é fornecido por produtos de origem animal, que, por sua vez, dependem da produção vegetal. Entretanto, os valores da Figura 5 ocultam grandes variações entre os países e dentro deles. As contribuições relativas dos alimentos de origem vegetal são maiores nos países em desenvolvimento, onde o consumo de carne, peixe, ovos e laticínios é baixo. Os alimentos de origem animal têm maior biodisponibilidade de Fe e Zn; portanto, em regiões onde há consumo de alimentos de origem animal, as contribuições relativas dos alimentos de origem vegetal para o Fe e o Zn biodisponíveis são consideravelmente menores do que as mostradas na Figura 5. Pelo contrário, em regiões com pouco ou nenhum consumo de alimentos de origem animal, uma grande percentagem de Fe e Zn é fornecida por cereais com baixa densidade de nutrientes e biodisponibilidade. Uma dieta monótona baseada em cereais não fornece todos os nutrientes essenciais para atender às necessidades humanas básicas.

Plantas com baixo teor de nutrientes resultam em alimentos de baixo valor nutricional e diversidade limitada da dieta - as principais causas da fome oculta. Os cereais e os tubérculos são alimentos básicos para a maioria das populações dos países em desenvolvimento. Essas culturas, no entanto, têm concentrações relativamente baixas de Fe, Zn (Tabela 1) e vitaminas. Além disso, alguns cereais, como



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

arroz e trigo, são polidos ou moídos em arroz branco ou farinha branca antes do consumo, diminuindo ainda mais as concentrações de nutrientes minerais (Tabela 1). Em geral, o Fe e o Zn dos alimentos de origem vegetal também são menos biodisponíveis para absorção humana do que o Fe e o Zn dos alimentos de origem animal (48). Portanto, uma dieta baseada apenas em cereais, raízes e tubérculos não pode fornecer níveis suficientes de Fe, Zn e vitaminas. Em vez disso, a inclusão de vegetais, frutas, legumes e alguns produtos de origem animal aumenta a ingestão de nutrientes para atender às necessidades humanas (9). Frutas e verduras não são apenas fontes mais ricas de vitaminas e minerais do que cereais e tubérculos; contêm também ácido ascórbico (vitamina C) que aumenta a absorção de Fe no intestino humano.

Poucas dietas atendem às recomendações de ingestão saudável de nutrientes. Globalmente, o consumo de verduras, frutas e legumes é 40%, 60% e 74%, respectivamente, inferior ao recomendado (3). Por vários motivos, algumas culturas básicas de baixa densidade de nutrientes, incluindo milho, trigo e arroz, dominam as cadeias globais de alimentos e rações. Essas culturas básicas primárias até mesmo substituíram as culturas alimentares tradicionais com alta densidade de nutrientes em sistemas agrícolas anteriormente mais diversificados. Devido ao grande sucesso da Revolução Verde, a produção de cereais básicos mais do que duplicou desde meados da década de 1960, enquanto a produção de leguminosas ficou aquém do aumento. Como resultado, o preço relativo dos cereais básicos diminuiu, enquanto o das leguminosas, carne animal e peixe aumentou (9). Essas mudanças forçaram as populações com menor poder econômico a depender mais de alimentos básicos em detrimento de leguminosas e produtos de origem animal com alta densidade de nutrientes.

O melhoramento de culturas aumentou com sucesso os rendimentos das principais culturas de cereais em todo o mundo. No entanto, as concentrações de nutrientes minerais dessas culturas de cereais diminuíram devido ao aumento da produtividade, resultando em diluição de nutrientes, genética de culturas mais restrita e/ou esgotamento dos nutrientes do solo (49, 50). Um ensaio de longo prazo em Rothamsted mostrou que as concentrações de Zn, Fe, Cu e Mn nos grãos de trigo diminuíram de 30 a 50% desde a introdução de cultivares

Tabela 1. Faixas comuns de ferro e zinco em cereais, tubérculos e sementes de leguminosas.

	Fe (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
Arroz integral	5 – 15	15 – 25
Arroz polido	3 – 10	5 – 15
Grãos inteiros	20 – 35	15 – 35
Farinha branca	5 – 15	4 – 10
Milho	20 – 30	15 – 30
Milheto de pérola	30 – 60	25 – 50
Feijão	30 – 70	20 – 50
Ervilha secas	30 – 70	30 – 60
Lentilha	40 – 70	30 – 50
Raiz de mandioca	5 – 10	4 – 10
Batata-doce	5 – 15	5 – 10
Batata irlandesa	3 – 5	3 – 5



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

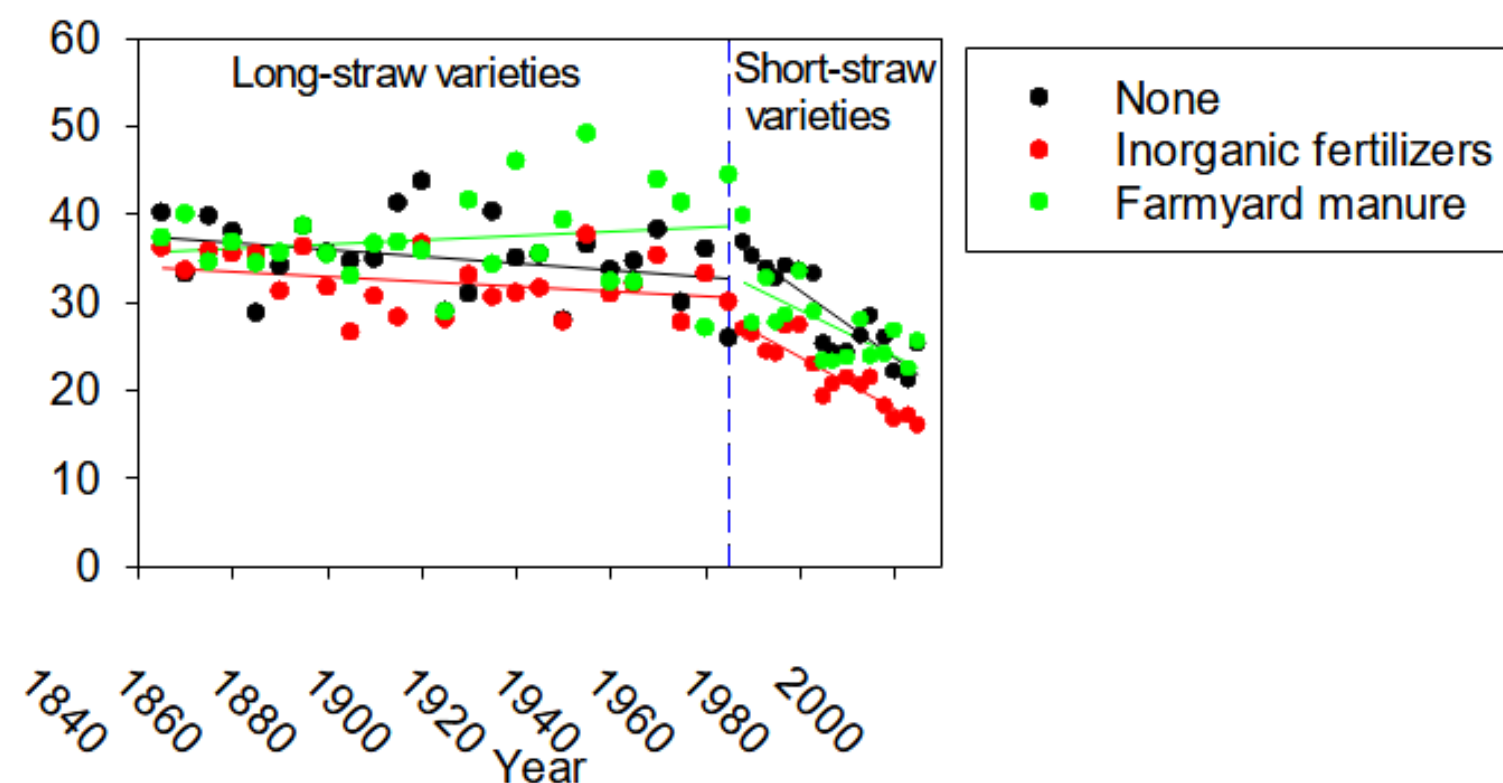


Figura 6. Diminuição da concentração de zinco no grão de trigo desde a introdução de variedades de trigo semi-anão de alto rendimento no experimento de longo prazo Rothamsted Broadbalk. Outros nutrientes minerais (Fe, Cu, Mn e Mg) apresentam tendências de redução semelhantes (49).

semi-anãs de alto rendimento em meados da década de 1960 (Fig. 6). Esse efeito ocorreu mesmo que os níveis desses micronutrientes no solo tenham permanecido estáveis. Em escala global, os benefícios do aumento da produtividade para fornecer mais alimentos para as populações em expansão têm, até o momento, contrabalançado esses efeitos de diluição de nutrientes (51). Entretanto, há um risco cada vez maior de que a diminuição das concentrações de micronutrientes nos grãos de cereais leve a uma menor ingestão desses nutrientes na dieta se os padrões alimentares permanecerem inalterados.

É provável que as alterações climáticas agravem o problema da deficiência de micronutrientes porque o aumento da concentração de CO₂ atmosférico tem um efeito negativo sobre a acumulação de micronutrientes (52-54). Estudos de campo mostraram que os teores de proteínas, Fe e Zn nas sementes de culturas como trigo, arroz, ervilhas e soja diminuíram de 5 a 10% sob CO₂ elevado. Outras culturas, como o milho e o sorgo, foram menos afetadas (52, 53). Os motivos dessas observações não são totalmente claros, mas podem incluir fatores como diluição de nutrientes devido ao aumento da produção, transpiração reduzida limitando o fluxo de massa e a translocação de nutrientes, absorção e assimilação de nutrientes perturbadas e/ou alterações na disponibilidade de nutrientes na rizosfera (53, 55). As concentrações atmosféricas elevadas de CO₂ podem causar a deficiência de Zn em mais 175 milhões de pessoas e a deficiência de proteína em mais 122 milhões de pessoas nos próximos 50 anos (54). Para 1,4 bilhão de mulheres em idade fértil e crianças menores de cinco anos que vivem em países com prevalência de anemia >20%, a mudança climática poderia reduzir ainda mais a disponibilidade de Fe na dieta.

Jones et al. (38) previram que as mudanças no clima e no conteúdo de matéria orgânica do solo podem levar à diminuição das concentrações de Se no solo em áreas agrícolas, o que poderia aumentar a prevalência de deficiência de Se em humanos. A combinação de concentrações elevadas de CO₂ atmosférico e stress por seca e calor pode limitar ainda mais a mobilidade do solo e a absorção de nutrientes minerais pelas raízes, levando à diminuição das concentrações de nutrientes nas partes comestíveis das culturas alimentares. Por fim, a humidade do solo afeta diretamente a difusão de nutrientes minerais em direção às superfícies das raízes para sua absorção pela planta, especialmente para nutrientes menos solúveis, como Zn e Fe (56). Portanto, não é de surpreender que a deficiência de Zn devido a baixas concentrações em culturas de cereais seja mais prevalente em regiões de baixa pluviosidade (32).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Soluções e ações necessárias

A introdução de dietas mais nutritivas e saudáveis exige uma profunda transformação do sistema alimentar com base numa aprendizagem contínua (57). Aqui, descrevemos as principais soluções para melhorar as deficiências de minerais na dieta. Concentramo-nos em estratégias que são acessíveis por meio da produção de culturas primárias, o principal ponto de entrada de nutrientes minerais no sistema alimentar global.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Aumentar a conscientização sobre o papel fundamental da nutrição vegetal responsável no alívio da fome crônica e oculta

A estreita relação entre a nutrição vegetal e a humana (Fig. 1) ainda é subestimada e, muitas vezes, é subestimada por opiniões públicas e decisões políticas. Enfatizar as consequências negativas da fertilização excessiva que ocorre em algumas partes do mundo muitas vezes ignora o enorme impacto negativo da má nutrição das plantas em mil milhões de pessoas, principalmente nos países em desenvolvimento.

A reposição responsável dos nutrientes removidos nos produtos colhidos ou perdidos devido à degradação do solo é essencial se quisermos aumentar a produtividade e a qualidade dos alimentos e, portanto, reduzir a fome humana. A nutrição responsável das plantas é um pré-requisito para atingir as metas de intensificação sustentável, agricultura regenerativa, nutrição e saúde humana e proteção dos ecossistemas. Nenhuma dessas iniciativas essenciais pode ser bem-sucedida sem antes abordar a necessidade de fornecer nutrientes adequados para apoiar o crescimento das plantas, o rendimento e a qualidade das colheitas (15, 59-61).

Dois desafios distintos relacionados ao uso de fertilizantes devem ser resolvidos nas próximas décadas (11, 59, 62, 63): Nas regiões em que o uso de fertilizantes é alto (por exemplo, América do Norte, Europa, Sul e Leste da Ásia, partes de outras regiões), o desafio é reduzir os excessos e as perdas excessivas de nutrientes dos fertilizantes e de outras fontes, mantendo ou aumentando o rendimento e a qualidade das colheitas. Em outras regiões, o desafio é superar a disponibilidade insuficiente de nutrientes, que causa a baixa produtividade das culturas e a baixa qualidade nutricional, o balanço negativo de nutrientes e a degradação do solo, que também são as principais causas da fome humana crônica e oculta. Nessas condições, o potencial de danos ambientais decorrentes do aumento do uso de fertilizantes é mínimo, enquanto os benefícios sociais seriam enormes.

É essencial reconhecer e enfatizar esses dois desafios para o uso de nutrientes nas plantas. Todos os países devem desenvolver um roteiro nacional de nutrientes que considere as suas necessidades específicas, estabeleça metas claras para o uso de nutrientes de diferentes fontes, inclusive fertilizantes, e forneça uma base cientificamente sólida para o avanço do uso responsável de nutrientes por meio de tecnologias, políticas e investimentos associados.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Esses roteiros de nutrientes também devem incluir as contribuições específicas que a nutrição das plantas pode fazer para resolver os problemas da fome oculta. O uso de nutrientes vegetais e fertilizantes na agricultura tem sido limitado pela definição historicamente restrita de nutrientes vegetais (64), que não leva em conta as metas nutricionais humanas. Foi desenvolvida uma nova definição de nutriente para plantas que afirma que "um nutriente mineral para plantas é um elemento necessário para o crescimento e o desenvolvimento da planta ou para os atributos de qualidade do produto colhido" (1). Isso amplia o número de elementos considerados nutrientes para plantas, incluindo alguns que são de importância crucial para a nutrição humana (por exemplo, Se, I). Os países devem adotar essa nova definição nos seus sistemas regulatórios de fertilizantes, o que permitiria que mais elementos minerais críticos fossem fornecidos por meio de fertilizantes.

Melhorar o direcionamento do fornecimento de nutrientes específicos para as culturas

A criação de soluções duradouras para superar a fome crônica e oculta por meio de intervenções baseadas em culturas requer um bom direcionamento, ou seja, conhecer as condições específicas do solo, as necessidades das culturas e as necessidades humanas. Muitos solos carecem de nutrientes específicos, desempenhando assim um papel central na fome crônica e oculta. Especialmente em regiões com dietas pobres e baixo consumo de nutrientes, os solos deficientes em nutrientes afetam diretamente a nutrição das plantas e a nutrição humana. Por exemplo, na ASS, foram encontradas relações estatisticamente significativas entre os nutrientes do solo e a mortalidade infantil, o atraso no crescimento, a perda de peso e o baixo peso (65). Portanto, qualquer solução, para ser bem-sucedida, deve começar com o conhecimento das condições locais do solo.

Para tal, os testes no solo e no material vegetal têm servido como a base das recomendações de fertilizantes. No entanto, com frequência são dispendiosos, amplamente indisponíveis e difíceis de interpretar - portanto, impossíveis de gerir em escalas muito pequenas e em locais remotos, onde muitos dos produtores agrícolas mais necessitados se encontram.

Na ausência de testes locais de solo e material vegetal, são necessárias estratégias alternativas para recomendar e direcionar o fornecimento de nutrientes para as plantas. Numa escala regional, a impraticabilidade das estratégias tradicionais de testes de solo e plantas pode ser parcialmente resolvida com o desenvolvimento de estruturas robustas e práticas de apoio à decisão. Com base em tecnologias digitais, novas tecnologias analíticas, modelação e inteligência artificial podem ajudar a mapear, prever e direcionar as deficiências de nutrientes para as plantas e para os seres humanos. A espectroscopia simples e barata para análise do solo, por exemplo, permitiu a avaliação das condições do solo em uma escala muito mais ampla e com uma resolução maior do que aquela que poderia ser obtida por meio da análise laboratorial do solo (66). Também houve progresso na criação de uma biblioteca global de calibração espectral do solo e de um serviço de estimativa (67). O mapa digital do solo com resolução de 30 m desenvolvido para a África (68) é um excelente exemplo de uso integrado de novas tecnologias digitais. Ele fornece um ponto de entrada sólido para aplicativos de orientação e consultoria agronômica e de nutrição de plantas, como o Virtual Agronomist que está a ser desenvolvido pela ISDA. As informações sobre a disponibilidade de nutrientes para as plantas em escala local também podem ser obtidas por meio do mapeamento do conteúdo de nutrientes dos grãos, juntamente com as propriedades do solo e as covariáveis ambientais e agronômicas (69).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Essas e outras informações podem orientar o desenvolvimento de misturas de fertilizantes regionais ou locais, incluindo de micronutrientes, que atendam à produtividade das culturas e às necessidades de nutrição humana. O impacto desses produtos nas culturas e na nutrição humana deve ser avaliado com cuidado, e sistemas de controle de qualidade devem ser desenvolvidos para garantir que o produto que o usuário final está a receber contenha os nutrientes nas quantidades e nos níveis de pureza necessários.

Desenvolver estratégias sustentáveis para o fornecimento de nutrientes por meio da agrobiofortificação

Em regiões com deficiências de nutrientes no solo, os fertilizantes representam uma estratégia sustentável. Ao aplicar fertilizantes de micronutrientes, os agricultores podem aumentar a produtividade das culturas, o rendimento, o teor de micronutrientes no solo e, por fim, a saúde humana. A biofortificação agronômica é um meio de otimizar a produtividade das culturas, os ganhos econômicos, e fornecer alimentos ricos em nutrientes a uma população crescente, o que é especialmente importante em ambientes rurais com poucos recursos (70). A viabilidade da biofortificação agronômica no combate à fome oculta depende de fatores como acesso a fertilizantes, tipo de cultura, genótipo da cultura, práticas agronômicas, clima e solo (70). Muitos estudos demonstraram o impacto positivo da biofortificação baseada em fertilizantes com Se, Zn ou I no conteúdo desses elementos no grão, principalmente em culturas de cereais essenciais. A Turquia, Paquistão, Índia e Finlândia são exemplos ilustrativos de países que implementaram programas de biofortificação agronômica bem-sucedidos.

Na década de 1990, descobriu-se que as deficiências de Zn nos solos e nos cereais estavam relacionadas à deficiência humana de Zn na Turquia (71). Desde então, a fertilização com Zn aumentou a produção de cereais e as concentrações de Zn nos grãos (72). Em alguns locais da Anatólia Central, o teor de Zn no solo era tão baixo que as plantas de trigo responderam à fertilização com Zn com aumentos espetaculares de 5 vezes na produção de grãos e de 2 vezes nos níveis de Zn nos grãos. Após essas





SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

descobertas, o uso de fertilizantes NP e NPK contendo Zn na Turquia aumentou de zero em 1993 para mais de 600.000 toneladas em 2020 (Toros Agri; resultados não publicados), melhorando os lucros dos agricultores e a nutrição humana com Zn.

Da mesma forma, nas províncias de Punjab e Sindh, no Paquistão, a fertilização com Zn aumentou a produção de trigo em uma média de 8% e 14%, foi altamente lucrativa para os agricultores e aumentou o fornecimento de Zn na dieta em 16% e reduziu quase para metade a prevalência de deficiências de Zn nas populações desses dois estados (73). Na Índia, o governo começou a investir no aumento dos teores de Zn das culturas porque os custos das estratégias de biofortificação foram considerados menores do que os custos humanos e económicos associados à fome oculta (74). O governo indiano e os governos estaduais subsidiaram fertilizantes que continham Zn para incentivar sua aplicação. Por exemplo, em 2015, o governo de Andhra Pradesh iniciou um programa que forneceu um subsídio de 50% para micronutrientes. Os dados do solo foram usados para identificar áreas criticamente deficientes em micronutrientes e os agricultores das áreas deficientes podiam comprar zinco, gesso e boro nos pontos de venda do departamento agrícola estadual a preços reduzidos. Em 2017-18, o subsídio foi aumentado para tornar os micronutrientes disponíveis gratuitamente para os agricultores qualificados (33). No geral, o uso de ZnSO_4 como fertilizante em toda a Índia aumentou 65% de 2004/2005 a 2020/2021.

O programa finlandês de biofortificação com Se é um excelente exemplo da eficácia da biofortificação agronómica e da importância da monitorização contínua para ajustar essas intervenções (75). Em 1984, a incorporação de Se em

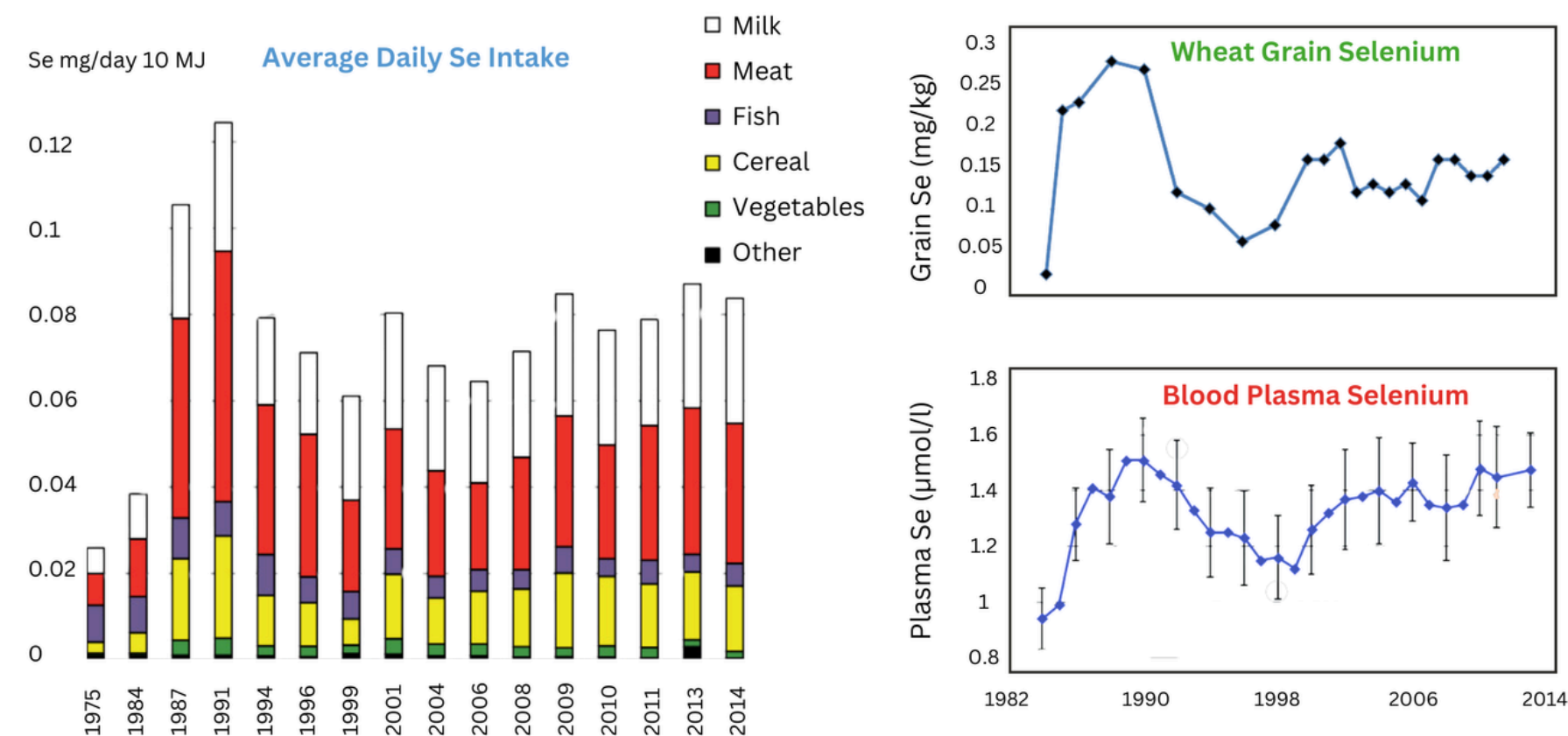


Figura 7. O enriquecimento de fertilizantes com selênio melhorou a nutrição com Se na dieta dos finlandeses. Esquerda: Ingestão média de selênio da população finlandesa de diferentes fontes dietéticas em resposta à agrobiofortificação de Se em fertilizantes compostos. À direita: Mudança no grão de trigo e no soro plasmático de Se após a fortificação de fertilizantes com Se. Retirado de Alfthan et al. (75) e Eurola et al. (76).

fertilizantes granulares tornou-se obrigatória, com a quantidade de Se adicionada inicialmente fixada em 16 mg/kg de fertilizante (1984-1990). Graças a essa regulamentação, a ingestão de Se na dieta quadruplicou, enquanto as concentrações de Se no plasma/soro dos adultos dobraram (Fig. 7). Os ajustes subsequentes na fortificação para 6 mg/kg de fertilizante (1990-1998), 10 mg/kg de fertilizante (1998-2007) e 15 mg/kg de fertilizante (desde 2007) estabilizaram as



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

concentrações de Se no plasma/soro dos adultos finlandeses em um nível ideal (Fig. 7). Notavelmente, além de enriquecer o Se no grão de trigo para consumo humano direto, a estratégia de biofortificação em todo o país também aumentou os teores de Se na ração animal, o que beneficiou a saúde animal e aumentou os teores de Se no leite e na carne para consumo humano (76).

O enriquecimento de culturas alimentares básicas com Se por meio de fertilizantes também foi demonstrado em outros países e culturas alimentares, incluindo a soja no Brasil (77) ou o milho no Malawi (78, 79). A pulverização foliar de Se, por exemplo, na forma de Na-selenato, foi altamente eficaz para aumentar as concentrações de Se no trigo e no arroz (80, 81). Como o Se tem um papel fundamental nos mecanismos de defesa antioxidante, as culturas biofortificadas com Se também podem apresentar melhor tolerância às condições de stress ambiental (82).

Estudos recentes demonstram que a pulverização foliar de fertilizantes com Se também pode resultar em aumentos impressionantes nas concentrações de Se em trigo e arroz (80, 83), maçãs (84), vegetais e outras culturas (40, 85). Com a fertilização conjunta de I com Zn e Se, é possível tratar várias deficiências de maneira eficaz.

Novas tecnologias, como os nanofertilizantes, podem oferecer um enorme potencial para o fornecimento direcionado de elementos minerais essenciais às culturas, especialmente micronutrientes importantes para a fome oculta, como o Zn ou o Fe (86, 87). As nanopartículas que transportam esses nutrientes podem translocar-se das folhas expostas para o tecido não exposto, o que pode permitir o desenvolvimento de produtos de fertilização foliar mais eficientes para nutrientes que são menos móveis no solo ou na

planta (86). No entanto, todas as novas soluções devem ser avaliadas minuciosamente com relação à compreensão dos mecanismos subjacentes, ao desempenho real da nutrição da cultura no campo e aos possíveis riscos ambientais.

No entanto, o principal desafio para as soluções de biofortificação agronômica é ampliá-las rapidamente nas regiões onde são mais necessárias e podem ser mais eficazes. Nos casos em que a fortificação com fertilizantes beneficia tanto o rendimento da cultura como a nutrição humana, a adoção pode ser impulsionada principalmente pela economia ao nível da exploração agrícola, pelo agronegócio, pelo acesso ao fertilizante certo e por uma boa consultoria agronômica. No entanto, quando a fortificação com fertilizantes melhora principalmente a nutrição humana sem aumentar claramente a produtividade da cultura ou um aumento do preço pela produção de alimentos enriquecidos, há menos incentivo para um produtor investir nessa prática. Nessas circunstâncias, são necessárias políticas governamentais ou apoio não governamental para cobrir os custos dessas intervenções e garantir que os micronutrientes essenciais sejam fornecidos aos necessitados.

No entanto, embora o apoio do governo ou de ONGs possa ser necessário inicialmente em circunstâncias em que as forças de mercado são insuficientes, a distribuição sustentada de fertilizantes subsidiados com micronutrientes pode ser um desafio fiscal para os governos e também pode afastar o investimento comercial. É necessário desenvolver soluções orientadas para o mercado que integrem os micronutrientes de importância humana aos padrões de produção sustentável de alimentos, incluindo estratégias comerciais de nutrição vegetal para isso. Isso também exigirá a incorporação de aspectos de nutrição humana na consultoria e extensão agrícola pública e privada (88).



Diversificar os sistemas de cultivo e enriquecer geneticamente as variedades de culturas

As dietas que incluem legumes, verduras e frutas, além das culturas básicas, fornecem mais micronutrientes e vitaminas. Portanto, ampliar a diversidade dos sistemas de cultivo por meio de culturas mais nutritivas é geralmente desejável, mas requer condições ambientais e mercados adequados (89). Sempre que possível, deve-se dar mais atenção à melhoria e ao cultivo das chamadas culturas negligenciadas ou subutilizadas. Muitas delas são ricas em nutrientes ou podem servir como fontes genéticas importantes para melhorar a diversidade nutricional de culturas básicas cultivadas em locais mais favoráveis (90, 91). Por exemplo, o milheto e as culturas ricas em nutrientes, como a quinoa, a chia ou o teff, contêm fontes mais ricas de fibra alimentar e maior qualidade de proteína com aminoácidos essenciais mais enriquecidos em comparação com as variedades modernas de arroz e trigo (90). Entretanto, a baixa produtividade dessas espécies limita o seu impacto potencial. Mesmo que essas culturas ricas em nutrientes fossem usadas mais amplamente, ainda são necessárias estratégias eficientes para melhorar nutricionalmente as culturas alimentares básicas do mundo e substituir os nutrientes vegetais exportados na cultura colhida (92).

Grandes impactos na nutrição global poderiam ser obtidos com um maior investimento para aumentar o valor nutritivo dos cereais básicos e das raízes e tubérculos, já que essas duas categorias de culturas são responsáveis por uma grande parte da nutrição humana (Fig. 5). Entretanto, para colher os benefícios potenciais do melhoramento genético, as abordagens agronômicas e de biofortificação genética devem ser integradas. Por exemplo, aplicações no solo ou foliares de Zn são necessárias em solos deficientes em Zn para realizar o potencial de biofortificação das variedades de culturas com alto teor de Zn (93). Da mesma forma, como as concentrações de Fe e Zn no grão dos cereais estão correlacionadas com o teor de proteína, o aumento da dose de fertilizante de N em uma determinada faixa geralmente também leva ao aumento das concentrações de Fe e Zn no grão (94).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

A biofortificação genética tem sido usada com sucesso para aumentar o teor de Fe e Zn nos grãos de cereais e leguminosas. O programa HarvestPlus, por exemplo, conseguiu criar convencionalmente as variedades "Iron bean" e "Iron pearl millet" com concentrações de Fe 60 a 90% mais altas nas sementes em comparação com as variedades não biofortificadas. Quando consumidas regularmente, elas podem fornecer até 80% das necessidades diárias de Fe e melhorar significativamente o status de Fe e o desempenho cognitivo de mulheres e adolescentes em idade escolar, conforme demonstrado no Ruanda e na Índia (95, 96). Da mesma forma, variedades de trigo, arroz e milho biofortificados com Zn e mandioca, milho e batata-doce laranja biofortificados com provitamina A foram criados e introduzidas em muitos países. Cerca de 8,5 milhões de famílias de agricultores em 40 países da África, Ásia e América Latina estão a cultivar essas culturas biofortificadas. Estima-se que essas culturas biofortificadas possam fornecer 25%, 35% e >85% a mais da necessidade média estimada de Zn, Fe e provitamina A, respectivamente (29).

Quando o cultivo convencional não consegue atingir as metas de biofortificação devido à ausência de uma via metabólica adequada ou à variação genética natural limitada, a engenharia genética pode ser usada para aumentar o conteúdo de micronutrientes da cultura. Um excelente exemplo é o Golden Rice, que foi desenvolvido para conter vários genes para a biossíntese de β -caroteno (provitamina A) no endosperma do arroz que, de outra forma, não tem essa capacidade (97). A substituição do arroz convencional pelo Golden Rice poderia fornecer 89-113% e 57-99% das necessidades recomendadas de vitamina A para crianças em idade pré-escolar em Bangladesh e nas Filipinas, respectivamente (98). O Golden Rice teve um bom desempenho no campo (99), também em termos de rendimento, e foi recentemente aprovado para cultivo nas Filipinas. Graças às abordagens transgênicas, as culturas de alimentos básicos podem ser biofortificadas

com sucesso por meio da manipulação da absorção, translocação, armazenamento e biodisponibilidade de Fe e Zn (29, 100, 101). As abordagens transgênicas também podem permitir uma melhor compreensão dos processos biológicos subjacentes, o que poderia ajudar a explorar as fontes naturais de variações genéticas por meio do melhoramento convencional (102).

A edição de genes é outra tecnologia poderosa que pode ser usada para enriquecer as culturas com micronutrientes e vitaminas (103). Por exemplo, a maioria dos alimentos contém níveis baixos de vitamina D, pois as plantas são fontes muito pobres dessa vitamina essencial. A edição de genes permitiu a modificação de um único gene em tomates para produzir mais provitamina D, que os seres humanos podem então converter em vitamina D (104). Ao combinar a edição de genes, a engenharia genética e o cultivo convencional, permite enriquecer vários micronutrientes e vitaminas na mesma cultura. Essas inovações tecnológicas são consideradas altamente econômicas para combater a fome oculta, mas exigirão uma aceitação mais ampla por parte da sociedade (29).

A biofortificação, seja por meio de melhoramento, fertilização ou técnicas moleculares, não é, entretanto, uma solução milagrosa para os problemas da fome oculta no mundo. Ela só poderá ser bem-sucedida se não houver nenhuma penalidade de rendimento ou rendimento e se for incorporada em estratégias mais holísticas para melhorar as dietas e a nutrição (105). Para motivar e incentivar os agricultores a melhorar a densidade de nutrientes nas plantações e, ao mesmo tempo, manter um alto rendimento, devem ser implementadas soluções e políticas baseadas em incentivos. Novas métricas, como o "rendimento de nutrientes dos grãos", poderiam ser consideradas e adaptadas no comércio e nos mercados globais e locais de colheitas (106) como uma inovação eficiente para lidar com os problemas ocultos da fome.



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Quem precisa fazer o quê?

Educadores, jornalistas, comunicadores e influenciadores:

Aumentar a conscientização sobre a importância da nutrição vegetal para a nutrição humana, os problemas mundiais de fome crônica e oculta e a necessidade de fornecer nutrientes vegetais de forma segura e eficaz para apoiar a produtividade das plantas e a qualidade dos alimentos para a saúde humana.

Formuladores de políticas:

Monitorizar e avaliar o estado nutricional da população, implementar estratégias económicas para tratar de fomes crónicas e ocultas e facilitar o desenvolvimento de políticas de nutrição vegetal. Alterar as regulamentações de fertilizantes para incluir todos os nutrientes que são importantes para a nutrição humana e das culturas.

Setor de fertilizantes:

Desenvolva, produza e distribua fertilizantes com boa relação custo-benefício para aumentar a produtividade e combater a fome crônica e oculta.

Indústria alimentar:

Criar mais demanda por alimentos enriquecidos com nutrientes e recompensar os agricultores por produzi-los.

Agricultores, extensionistas, consultores agrícolas e prestadores de serviços:

Educar e treinar os agricultores sobre a necessidade e os benefícios dos nutrientes das plantas para aumentar a produtividade das culturas e a qualidade dos alimentos. Desenvolver mecanismos para fornecer nutrientes às plantas de forma sustentável, sem causar danos ao meio ambiente. Adaptar tecnologias para melhorar a produtividade e a nutrição das culturas, reduzir as perdas de nutrientes e aumentar a lucratividade. Incorporar a nutrição humana aos sistemas de extensão e consultoria agrícola (88).



SCIENTIFIC PANEL
ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Quem precisa fazer o quê?

Consumidores:

Diversificar as dietas para obter uma nutrição melhor e mais equilibrada e reduzir o desperdício de alimentos. Exigir mais alimentos enriquecidos com nutrientes.

Investidores:

Investir no desenvolvimento de mercados de fertilizantes sensíveis à nutrição por meio de cadeias inovadoras de marketing e distribuição, desenvolvimento de sistemas inovadores de fornecimento de informações e fornecimento de sistemas de crédito e seguro.

Cientistas:

Desenvolvam métodos mais económicos e escaláveis para avaliar o status dos nutrientes das plantas e do solo. Desenvolver e ampliar práticas sólidas de gestão de nutrientes que melhorem a eficiência do uso de nutrientes. Produzir variedades de culturas que produzam colheitas enriquecidas com micronutrientes e vitaminas.

Organizações da sociedade civil:

Reconhecer o papel fundamental que os nutrientes das plantas desempenham na nutrição humana. Apoiar o desenvolvimento e a distribuição adequados e ambientalmente corretos de fertilizantes. Educar a população sobre o papel fundamental da nutrição vegetal no alívio da fome crónica e oculta. Adotar tecnologias modernas de melhoramento genético com base científica, incluindo engenharia genética e edição de genes.



Como seria o sucesso?

1

A fome crónica é reduzida significativamente com o aumento da produtividade das culturas por meio da maior disponibilidade e do uso otimizado dos nutrientes das plantas, especialmente em África.

2

A fome oculta é aliviada por meio de métodos agronómicos e biofortificação de micronutrientes, diversificação de dietas que incluem culturas mais densas em nutrientes e desenvolvimento de variedades de culturas enriquecidas com vitaminas e micronutrientes.

3

Maior reconhecimento social do papel fundamental da nutrição vegetal para reduzir a fome e a desnutrição e melhorar os resultados da saúde humana em todo o mundo.



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

1. P. H. Brown, F.-J. Zhao, A. Dobermann, What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant Soil*. 476, 11–23 (2022).
2. E. A. Kirkby, Introduction, definition, and classification of nutrients. in Marschner's mineral nutrition of plants, 4th edn, Z. Rengel, I. Cakmak, P. J. White, Eds. (Academic Press, San Diego, CA, USA, 2023), pp. 3–9.
3. Global Nutrition Report, 2022 Global Nutrition Report (Development Initiatives, Bristol, UK, 2022).
4. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum (FAO, Rome, 2023).
5. Y. Bai, R. Alemu, S. A. Block, D. Headey, W. A. Masters, Cost and affordability of nutritious diets at retail prices: Evidence from 177 countries. *Food Policy*. 99, 101983 (2021).
6. D. Byerlee, J. Fanzo, The SDG of zero hunger 75 years on: Turning full circle on agriculture and nutrition. *Global Food Security*. 21, 52–59 (2019).
7. G. A. Stevens, T. Beal, M. N. N. Mbuya, H. Luo, L. M. Neufeld, Micronutrient deficiencies among preschool-aged children and women of reproductive age worldwide: a pooled analysis of individual-level data from population-representative surveys. *The Lancet Global Health*. 10, e1590–e1599 (2022).
8. T. W. Bruulsema, P. Heffer, M. R. Welch, I. Cakmak, K. Moran, Fertilizing crops to improve human health: a scientific review (International Fertilizer Industry Association (IFA), Paris, 2012).
9. R. M. Welch, R. D. Graham, I. Cakmak, Linking agricultural production practices to improving human nutrition and health. Expert paper written for ICN2 Second International Conference on Nutrition Preparatory Technical Meeting, 13–15 November, Rome, Italy (2013).
10. W. Willett et al., Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*. 393, 447–492 (2019).
11. A. Dobermann et al., Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*. 33, 100636 (2022).
12. J. W. McArthur, G. C. McCord, Fertilizing growth: Agricultural inputs and their effects in economic development. *J. Dev. Econ*. 127, 133–152 (2017).
13. J. W. Erisman, M. A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, W. Winiwarter, How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geosci*. 1, 636–639 (2008).
14. W. M. Stewart, D. W. Dobb, A. E. Johnston, T. J. Smyth, The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.* 97, 1–6 (2005).
15. B. Vanlauwe, A. Dobermann, Sustainable intensification of agriculture in sub-Saharan Africa: first things first! *Front. Agr. Sci. Eng.* 7, 376–382 (2020).
16. B. Vanlauwe et al., Fertilizer and soil health in Africa: The role of fertilizer in building soil health to sustain farming and address climate change (2023).
17. J. Kihara, P. Bolo, M. Kinyua, J. Rurinda, K. Piikki, Micronutrient deficiencies in African soils and the human nutritional nexus: opportunities with staple crops. *Environ Geochem Health*. 42, 3015–3033 (2020).
18. D. Gashu et al., The nutritional quality of cereals varies geospatially in Ethiopia and Malawi. *Nature*. 594, 71–76 (2021).
19. P. Tittonell, K. E. Giller, When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Res*. 143, 76–90 (2013).
20. N. D. Mueller et al., Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*. 490, 254–257 (2012).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

21. M. K. van Ittersum et al., Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 14964–14969 (2016).
22. J. J. Stoorvogel, E. M. A. Smaling, B. H. Janssen, Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 1. Supra-national scale. *Fert. Res.* 35, 227–235 (1993).
23. E. M. A. Smaling, J. J. Stoorvogel, P. N. Windmeijer, Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. 2. District scale. *Fert. Res.* 35, 237–250 (1993).
24. A. S. Elrys, M. K. Abdel-Fattah, S. Raza, Z. Chen, J. Zhou, Spatial trends in the nitrogen budget of the African agro-food system over the past five decades. *Environ. Res. Lett.* 14, 124091 (2019).
25. FAO, Special Report – FAO/WFP Crop and Food Security Assessment Mission (CFSAM) to the Democratic Socialist Republic of Sri Lanka (2023).
26. N. M. Lowe, The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. *The Proceedings of the Nutrition Society.* 80, 283–289 (2021).
27. K. von Grebmer et al., 2022 Global Hunger Index: Food systems transformation and local governance (2022).
28. K. L. Harding, V. M. Aguayo, P. Webb, Hidden hunger in South Asia: a review of recent trends and persistent challenges. *Public health nutrition.* 21, 785–795 (2018).
29. D. van der Straeten et al., Multiplying the efficiency and impact of biofortification through metabolic engineering. *Nat Commun.* 11, 5203 (2020).
30. The Krakow Declaration on iodine: Tasks and responsibilities for prevention programs targeting iodine deficiency disorders. *European thyroid journal.* 7, 201–204 (2018).
31. A. G. L. Assunção et al., Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *J Exp Bot.* 73, 1789–1799 (2022).
32. I. Cakmak, Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? *Plant Soil.* 302, 1–17 (2008).
33. S. Gupta, A. Kishore, M. F. Alvi, V. Singh, Designing better input support programs: Lessons from zinc subsidies in Andhra Pradesh, India. *PLOS ONE.* 15, e0242161 (2020).
34. C. J. L. Murray et al., Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet.* 396, 1223–1249 (2020).
35. S. J. Fairweather-Tait et al., Selenium in human health and disease. Antioxidants & redox signaling. 14, 1337–1383 (2011).
36. D. Gashu, B. J. Stoecker, Selenium and cognition: mechanism and evidence. in *Handbook of Famine, Starvation, and Nutrient Deprivation* (Springer, Cham, 2017), pp. 1–17.
37. G. F. Combs, Selenium in global food systems. *The British journal of nutrition.* 85, 517–547 (2001).
38. G. D. Jones et al., Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 114, 2848–2853 (2017).
39. R. Stone, A medical mystery in middle China. *Science* (New York, N.Y.). 324, 1378–1381 (2009).
40. G. Lyons, Biofortification of cereals with foliar selenium and iodine could reduce hypothyroidism. *Front. Plant Sci.* 9, 730 (2018).
41. I. S. Ligowe et al., Selenium deficiency risks in sub-Saharan African food systems and their geospatial linkages. *The Proceedings of the Nutrition Society,* 1–11 (2020).
42. R. Hurst et al., Soil-type influences human selenium status and underlies widespread selenium deficiency risks in Malawi. *Sci Rep.* 3, 1425 (2013).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

43. E. N. Pearce, M. Andersson, M. B. Zimmermann, Global iodine nutrition: Where do we stand in 2013? *Thyroid : official journal of the American Thyroid Association*. 23, 523–528 (2013).
44. M. B. Zimmermann, M. Andersson, Update on iodine status worldwide. *Current opinion in endocrinology, diabetes, and obesity*. 19, 382–387 (2012).
45. A. Hatch-McChesney, H. R. Lieberman, Iodine and iodine deficiency: a comprehensive review of a re-emerging issue. *Nutrients*. 14, 3474 (2022).
46. C. Kiferle et al., Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Front. Plant Sci*. 12, 616868 (2021).
47. N. W. Smith, A. J. Fletcher, P. Millard, J. P. Hill, W. C. McNabb, Estimating cropland requirements for global food system scenario modeling. *Front. Sustain. Food Syst*. 6 (2022).
48. M. G. Ferruzzi, J. Kruger, Z. Mohamedshah, H. Debelo, J. R. Taylor, Insights from in vitro exploration of factors influencing iron, zinc and provitamin A carotenoid bioaccessibility and intestinal absorption from cereals. *Journal of Cereal Science*. 96, 103126 (2020).
49. M.-S. Fan et al., Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 22, 315–324 (2008).
50. P. R. Shewry, T. K. Pellny, A. Lovegrove, Is modern wheat bad for health? *Nature Plants*. 2, 16097 (2016).
51. R. J. Marles, Mineral nutrient composition of vegetables, fruits and grains: The context of reports of apparent historical declines. *Journal of Food Composition and Analysis*. 56, 93–103 (2017).
52. S. S. Myers et al., Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*. 510, 139–142 (2014).
53. J. C. Soares, C. S. Santos, S. M. P. Carvalho, M. M. Pintado, M. W. Vasconcelos, Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: importance and strategies. *Plant Soil*. 443, 1–26 (2019).
54. M. R. Smith, S. S. Myers, Impact of anthropogenic CO₂ emissions on global human nutrition. *Nat. Clim. Chang*. 8, 834–839 (2018).
55. A. Gojon, O. Cassan, L. Bach, L. Lejay, A. Martin, The decline of plant mineral nutrition under rising CO₂: physiological and molecular aspects of a bad deal. *Trends in plant science*. 28, 185–198 (2023).
56. H. Marschner, Zinc uptake from soils. in Zinc in soils and plants, A. D. Robson, Ed. (Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1993), pp. 59–77.
57. S. Biesbroek et al., Toward healthy and sustainable diets for the 21st century: Importance of sociocultural and economic considerations. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*. 120, e2219272120 (2023).
58. T. Beal, F. Ortenzi, J. Fanzo, Estimated micronutrient shortfalls of the EAT-Lancet planetary health diet. *The Lancet Planetary Health*. 7, e233–e237 (2023).
59. P. S. Bindraban, C. O. Dimkpa, S. Angle, R. Rabbinge, Unlocking the multiple public good services from balanced fertilizers. *Food Sec*. 10, 273–285 (2018).
60. J. Nyamangara, J. Kodzwa, E. N. Masvaya, G. Soropa, The role of synthetic fertilizers in enhancing ecosystem services in crop production systems in developing countries. in The role of ecosystem services in sustainable food systems, L. Rusinamhodzi, Ed. (Academic Press, 2020), pp. 95–117.
61. K. E. Giller, R. Hijbeek, J. A. Andersson, J. Sumberg, Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook Agric*, 003072702199806 (2021).
62. S. Snapp et al., Spatially differentiated nitrogen supply is key in a global food-fertilizer price crisis. *Nat Sustain* (2023).
63. L. F. Schulte-Uebbing, A. H. W. Beusen, A. F. Bouwman, W. de Vries, From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature*. 610, 507–512 (2022).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

64. D. I. Arnon, P. R. Stout, The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiol.* 14, 371–375 (1939).
65. E. D. Berkhout, M. Malan, T. Kram, Better soils for healthier lives? An econometric assessment of the link between soil nutrients and malnutrition in Sub-Saharan Africa. *PLoS ONE*. 14, e0210642 (2019).
66. M. Nocita et al., Soil spectroscopy: an opportunity to be seized. *Global Change Biol.* 21, 10–11 (2015).
67. K. D. Shepherd et al., A global soil spectral calibration library and estimation service. *Soil Security*. 7, 100061 (2022).
68. T. Hengl et al., African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Sci. Rep.* 11, 6130 (2021).
69. L. Botoman et al., Soil and landscape factors influence geospatial variation in maize grain zinc concentration in Malawi. *Sci Rep.* 12, 7986 (2022).
70. D. Teklu, D. Gashu, Joy, Edward J. M., T. Amede, M. R. Broadley, Effectiveness of agronomic biofortification strategy in fighting against hidden hunger. *Agronomy*. 13 (2023).
71. I. Cakmak et al., Zinc deficiency as a practical problem in plant and human nutrition in Turkey: A NATO-science for stability project. *Field Crops Res.* 60, 175–188 (1999).
72. I. Cakmak et al., Zinc deficiency as a critical problem in wheat production in Central Anatolia. *Plant Soil*. 180, 165–172 (1996).
73. Joy, Edward J. M. et al., Valuing increased zinc (Zn) fertiliser use in Pakistan. *Plant Soil*. 411, 139–150 (2017).
74. A. J. Stein, M. Qaim, The human and economic cost of hidden hunger. *Food and nutrition bulletin*. 28, 125–134 (2007).
75. G. Alfthan 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. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 31, 142–147 (2015).
76. M. Eurola et al., "Seleenityöryhmän raportti 2016" 978-952-326-253-9. (Luonnonvarakeskus; Helsinki; FI, 2016).
77. M. A. Silva et al., Selenium biofortification of soybean genotypes in a tropical soil via Se-enriched phosphate fertilizers. *Front. Plant Sci.* 13, 988140 (2022).
78. A. D. Chilimba et al., Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field Crops Res.* 125, 118–128 (2012).
79. E. J. M. Joy et al., Biofortified maize improves selenium status of women and children in a rural community in Malawi: results of the addressing hidden hunger with agronomy randomized controlled trial. *Front. Nutr.* 8, 788096 (2021).
80. C. Zou et al., Simultaneous biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 67, 8096–8106 (2019).
81. C. Prom-u-thai et al., Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. *Front. Plant Sci.* 11, 589835 (2020).
82. M. Schiavon, S. Nardi, F. Dalla Vecchia, A. Ertani, Selenium biofortification in the 21st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant Soil*, 1–26 (2020).
83. I. Cakmak et al., Fate and bioaccessibility of iodine in food prepared from agronomically biofortified wheat and rice and impact of cofertilization with zinc and selenium. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 68, 1525–1535 (2020).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

84. P. Wójcik, M. Wójcik, Preharvest iodine sprays at high rates are more effective in biofortification of apples than soil application. *Plant Soil*. 465, 317–334 (2021).
85. S. Gonzali, C. Kiferle, P. Perata, Iodine biofortification of crops: agronomic biofortification, metabolic engineering and iodine bioavailability. *Current Opinion in Biotechnology*. 44, 16–26 (2017).
86. S. Husted et al., What is missing to advance foliar fertilization using nanotechnology? *Trends in plant science*. 28, 90–105 (2023).
87. C. O. Dimkpa, P. S. Bindraban, Nanofertilizers: new products for the industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 66, 6462–6473 (2018).
88. J. C. Fanzo et al., Educating and training a workforce for nutrition in a post-2015 world. *Advances in Nutrition*. 6, 639–647 (2015).
89. D. Hunter et al., The potential of neglected and underutilized species for improving diets and nutrition. *Planta*. 250, 709–729 (2019).
90. K. H. M. Siddique, X. Li, K. Gruber, Rediscovering Asia's forgotten crops to fight chronic and hidden hunger. *Nat. Plants*. 7, 116–122 (2021).
91. R. K. Singh, N. Sreenivasulu, M. Prasad, Potential of underutilized crops to introduce the nutritional diversity and achieve zero hunger. *Funct Integr Genomics*. 22, 1459–1465 (2022).
92. A. Henry, N. F. Chaves, P. J. Kleinman, J. P. Lynch, Will nutrient-efficient genotypes mine the soil? Effects of genetic differences in root architecture in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) on soil phosphorus depletion in a low-input agro-ecosystem in Central America. *Field Crops Res*. 115, 67–78 (2010).
93. M. H. Zia et al., Site-specific factors influence the field performance of a Zn-biofortified wheat variety. *Front. Sustain. Food Syst*. 4, 135 (2020).
94. U. B. Kutman, B. Yildiz, I. Cakmak, Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil*. 342, 149–164 (2011).
95. S. P. Scott et al., Cognitive performance in Indian school-going adolescents is positively affected by consumption of iron-biofortified pearl millet: A 6-month randomized controlled efficacy trial. *The Journal of nutrition*. 148, 1462–1471 (2018).
96. L. E. Murray-Kolb et al., Consumption of iron-biofortified beans positively affects cognitive Performance in 18- to 27-year-old Rwandan female college students in an 18-week randomized controlled efficacy trial. *The Journal of nutrition*. 147, 2109–2117 (2017).
97. J. A. Paine et al., Improving the nutritional value of Golden Rice through increased pro-vitamin A content. *Nature Biotechnology*. 23, 482–487 (2005).
98. Mallikarjuna Swamy, B. P. et al., Compositional analysis of genetically engineered GR2E "Golden Rice" in comparison to that of conventional rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 67, 7986–7994 (2019).
99. B. P. Mallikarjuna Swamy et al., Development and characterization of GR2E Golden rice introgression lines. *Sci. Rep*. 11, 2496 (2021).
99. J. M. Connorton, J. Balk, Iron biofortification of staple crops: lessons and challenges in plant genetics. *Plant and Cell Physiology*. 60, 1447–1456 (2019).
101. K. R. Trijatmiko et al., Biofortified indica rice attains iron and zinc nutrition dietary targets in the field. *Sci Rep*. 6, 19792 (2016).
102. J. Balk et al., Improving wheat as a source of iron and zinc for global nutrition. *Nutr Bull*. 44, 53–59 (2019).
103. J. M. Matres et al., Genome editing in cereal crops: an overview. *Transgenic Research*. 30, 461–498 (2021).



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

Referências

104. J. Li et al., Biofortified tomatoes provide a new route to vitamin D sufficiency. *Nat. Plants*. 8, 611–616 (2022).
105. M. van Ginkel, J. Cherfas, What is wrong with biofortification. *Global Food Security*. 37, 100689 (2023).
106. R. DeFries et al., Metrics for land-scarce agriculture: nutrient content must be better integrated into planning. *Science*. 349, 238–240 (2015).

Autores, citação e contato

Autores: Membros da Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition.

Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Fang-jie Zhao (Nanjing Agricultural University, China), Ismail Cakmak (Sabanci University, Turkey), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Bruno Gerard (UM6P, Morocco), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Kaushik Majumdar (African Plant Nutrition Institute, Morocco), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Xin Zhang (University of Maryland, USA).

Citação: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2023. Plant nutrients are essential for the alleviation of chronic and hidden hunger. Issue Brief 05. Available at <https://sprpn.org>.

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