

Informações Agronômicas

Nutrição de Plantas

Número 18 | Junho 2023



CONTEÚDO

▶▶	Ponto de Vista	4
▶▶	Artigos Técnicos	
▶	Amônia verde: reduzindo a pegada de carbono de fertilizantes nitrogenados	5
	<i>Heitor Cantarella, Luiz Augusto Horta Nogueira, Letusa Momesso</i>	
▶	Saúde do solo: entendendo os conceitos, relevância e suas aplicações na agricultura e meio ambiente	15
	<i>Maurício Roberto Cherubin, Martha Lustosa Carvalho, Marcos Rodrigues</i>	
▶	Adubação nitrogenada com inibidor de urease de nova geração na cultura do trigo	24
	<i>Ezequiel Helbig Pasa et al.</i>	
▶▶	Divulgando a Pesquisa	28
▶	Acúmulo de biomassa e curva de crescimento em cana-de-açúcar fertirrigada com doses de nitrogênio	
	<i>Oriel Tiago Kölln et al.</i>	
▶▶	Painel Agrônomo	29
▶▶	Cursos e Eventos	30
▶▶	Publicações Recentes	33

ISSN 2311-5904

Publicação trimestral gratuita da
NPCT – Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia
O jornal publica artigos técnico-científicos elaborados pela
comunidade científica nacional e internacional visando
o manejo responsável dos nutrientes das plantas.

COMISSÃO EDITORIAL

Editor

Luís Ignácio Prochnow

Editora Assistente

Silvia Regina Stipp

Gerente de Distribuição

Evandro Luis Lavorenti

PATROCÍNIO

Os interessados em patrocinar o Jornal Informações Agronômicas podem
entrar em contato com:

ELavorenti@npct.com.br ou LProchnow@npct.com.br

NOTA DOS EDITORES

As opiniões e as conclusões expressas pelos autores nos artigos não
refletem necessariamente as mesmas dos editores deste jornal.

PATROCINADORES



Knowledge grows



Será, Realmente, o Fósforo um Nutriente de Menor Eficiência Agronômica Quando Comparado aos Outros Macronutrientes?

 Luís Ignácio Prochnow

Cada nutriente tem ciclos distintos de reação, transformação e interação com o sistema solo. Muito pode ser discutido sobre o assunto, existindo inúmeros livros e artigos sobre o tema. Diante do objetivo deste ponto de vista, vou me restringir a dizer que o fósforo (P) é, de certa forma, único, devido à desproporção, em solos agrícolas, entre elevadas concentrações na fase sólida, em diversos graus de disponibilidade, e baixas concentrações na fase solução.

Devido à transformação frequente, intensa e relativamente rápida do P solúvel no solo em formas indisponíveis, maiores quantidades do elemento precisam ser aplicadas em relação às quantidades exigidas pelas plantas. Isto é um fato amplamente conhecido. Um dos resultados deste fenômeno é que a eficiência de recuperação do P dos fertilizantes pelas plantas na primeira safra, em relação ao P aplicado, denominado de balanço parcial de P, é da ordem de apenas 20% a 30%. Diante disto, este nutriente é geralmente rotulado, de forma ampla, de baixa eficiência, em relação aos outros macronutrientes primários, nitrogênio (N) e potássio (K), os quais apresentam eficiências de recuperação normalmente mais elevadas na primeira safra (50% a 70%). Mas, será mesmo isto verdade, quando se pensa em sistemas de produção a longo prazo? Será mesmo que o P merece um título tão forte, como o de ineficiente?

Quando, anos atrás, ouvi o saudoso Dr. Djalma Martinhão Gomes de Sousa dizer que discordava desta colocação e que, na realidade, o P pode ser até mais eficiente do que o N e o K, confesso que fiquei surpreso. Todo o conhecimento que eu tinha na época fazia frente à colocação dele. Com

o tempo, entretanto, mudei de opinião. Afinal, “contra fatos não há argumentos”.

Ao longo dos anos, a pesquisa tem mostrado que o P aplicado ao solo, inicialmente convertido em grande parte em formas menos disponíveis às plantas, pode, com o tempo e o manejo adequado, se reverter em P disponível. Como dizia Dr. Sousa, “o N e o K aplicados podem ser perdidos irreversivelmente do sistema solo ao alcance das raízes das plantas, enquanto o P, muito embora em formas indisponíveis, permanece normalmente próximo ao local de aplicação, e o manejo adequado pode, com o tempo, reverter o processo, tornando este elemento novamente disponível às plantas”.

Atualmente, tenho me dedicado a uma revisão de literatura sobre o tema “P de reserva” (*Legacy P*, em inglês), que pode ser definido como a diferença entre o P aplicado como fertilizante e a exportação de P pelas culturas em determinada região e tempo. Atualmente, existe grande interesse neste assunto, principalmente no intuito de tentar reverter este P para uso agrônômico ou evitar que o mesmo cause danos ambientais, principalmente na eutrofização de mananciais. Tal revisão tem deixado ainda mais claro que, em se considerando o manejo adequado e os anos de cultivo, a eficiência de recuperação do P aplicado pode ser bem elevada, da ordem de até 80%.

Sendo assim, endosso a colocação do Dr. Sousa e convido a todos a considerarem, a partir de agora, o P como um nutriente realmente de baixa eficiência inicial de recuperação, mas que, ao longo do tempo, pode ser tão ou mais eficiente que o N e o K. O nosso discurso, portanto, precisa ser atualizado!



ARTIGO TÉCNICO 1

Amônia Verde: Reduzindo a Pegada de Carbono de Fertilizantes Nitrogenados



Heitor Cantarella¹, Luiz Augusto Horta Nogueira², Letusa Momesso Marques³

RESUMO

Fertilizantes nitrogenados são insumos essenciais para a moderna agricultura e, globalmente, lideram o consumo de adubos. Combinando o nitrogênio, amplamente disponível na atmosfera, com o hidrogênio (H_2), sob pressões elevadas e com catalisadores adequados, ocorre a síntese da amônia (NH_3), base para quase todos os fertilizantes nitrogenados, como ureia, sulfato de amônio e diversos nitratos. Em tempos recentes, as elevadas emissões de gases de efeito estufa (GEE) durante a fabricação e posterior uso dos fertilizantes no campo, passaram a preocupar. Em média, por cada quilograma de N aplicado na agricultura, são emitidos 10 kg de CO_{2e} . No contexto da atual transição para uma economia de baixo carbono, uma das opções, para a síntese de NH_3 , é a substituição da energia fóssil por energia renovável, permitindo produzir a amônia verde (NH_3 verde), que apresenta menor pegada de carbono. No

Brasil, há vários projetos para produzir NH_3 verde nos próximos anos. As moléculas de fertilizantes feitos com NH_3 verde não diferem daquelas produzidas com a NH_3 atual (marrom); portanto, a eficiência de uso dos fertilizantes não será alterada. Porém, mudanças no mercado ocorrerão. Na ausência da geração de CO_2 na síntese de NH_3 , a produção de ureia, atualmente o principal fertilizante nitrogenado no mundo, deixa de ser a melhor opção. Os fertilizantes candidatos mais prováveis para substituir a ureia são o nitrato de amônio e o nitrato amônio e cálcio (CAN). A entrada no mercado de fertilizantes feitos a partir de NH_3 verde provavelmente será lenta e gradual, ou seja, a ureia continuará a ter papel importante na agricultura por muito tempo. Mas, mudanças certamente virão. É importante que técnicos e agricultores conheçam as implicações envolvidas.

Abreviações: CAN = nitrato de amônio e cálcio; CCS = captura e estocagem de carbono; CCUS = captura, uso e estocagem de carbono; GEE = gases de efeito estufa; H_2 = hidrogênio; IPCC = Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas; N_2O = óxido nitroso; NH_3 = amônia; HNO_3 = ácido nítrico.

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr., Diretor do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agrônômico (IAC), Campinas, SP; email: heitor.cantarella@sp.gov.br

² Engenheiro Mecânico, Dr., Pesquisador do Centro de Hidrogênio Verde – CH2V, Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG; email: horta@unifei.edu.br

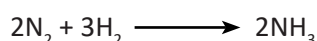
³ Engenheira Agrônoma, Dra., Pesquisadora do Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agrônômico (IAC), Campinas, SP; email: letusamomesso@gmail.com

1. AMÔNIA E FERTILIZANTES NITROGENADOS

Os fertilizantes nitrogenados têm papel crucial na produção agrícola devido ao papel-chave do nitrogênio (N) na nutrição das plantas. Globalmente, a indústria de fertilizantes produz aproximadamente três vezes mais fertilizantes nitrogenados do que potássicos ou fosfatados. Expressos em K_2O , P_2O_5 e N, para cada unidade de fertilizante potássico fabricado são fabricadas 1,3 unidades de fertilizante fosfatado e 2,9 unidades de fertilizante nitrogenado. Devido às particularidades da agricultura brasileira, a relação N: P_2O_5 : K_2O dos fertilizantes consumidos no Brasil é diferente, ou seja, 0,7:0,9:1,0 (IFA, 2019), mas isso não reduz a relevância dos fertilizantes nitrogenados no Brasil.

Aproximadamente 190 milhões de toneladas de amônia (NH_3) são produzidas industrialmente por ano, a maior parte para a fabricação de fertilizantes nitrogenados. Praticamente todos os fertilizantes nitrogenados sintéticos são feitos a partir de NH_3 .

O processo Haber-Bosch é o mais importante para a síntese industrial de NH_3 . A NH_3 é produzida com o N_2 retirado da atmosfera e com H_2 , geralmente de origem fóssil, como o gás natural e derivados leves de petróleo:



NH_3 e H_2 SÃO PROCESSOS INTERLIGADOS

O H_2 é um insumo importante para a economia mundial. A demanda global de H_2 em 2021 foi de 94 milhões de toneladas (94 Mt). Cerca de 36% do H_2 são utilizados para a produção de NH_3 , ou 190 Mt de NH_3 por ano (cerca de 156 Mt de N). São necessários 180 kg de H_2 para produzir uma tonelada de NH_3 . Aproximadamente 70% da NH_3 é empregada na síntese de fertilizantes nitrogenados (≈ 110 Mt de N fertilizante por ano) e 30% da NH_3 são utilizados para outros fins – explosivos, fibras sintéticas e outros produtos químicos (IEA, 2023).

Atualmente, quase todo o H_2 é produzido a partir de insumos fósseis, principalmente o gás natural (0,04% provém de outras fontes de energia), ou seja, a produção de H_2 implica em grandes emissões de CO_2 e outros gases de efeito estufa (GEE). Estima-se que as emissões de GEE para a produção de H_2 sejam da ordem de 10 a 13 kg CO_{2e} /kg de H_2 . Caso o carvão seja a fonte de energia, a pegada de carbono sobe para 22 a 26 kg CO_{2e} /t H_2 . A alta geração de GEE na síntese de H_2 é transferida para a NH_3 e, daí, para os fertilizantes nitrogenados (IEA, 2023).

Este processo foi desenvolvido no início dos anos 1900 na Alemanha e rendeu dois prêmios Nobel, um para Fritz Haber e outro para Carl Bosch (SMIL, 1999; ERISMAN et al., 2008). Em um artigo seminal publicado no Millennium Essay, da Revista Nature, Smil (1999) considerou a criação do processo Haber-Bosch a maior invenção do século XX, responsável pela existência, hoje, de metade da população mundial, graças à expansão da produção de alimentos que se tornou possível pelo advento dos fertilizantes nitrogenados. Polêmicas à parte devido ao uso dessas invenções em guerras, a NH_3 é uma das moléculas mais importantes para a indústria e a agricultura.

A síntese de amônia é um processo intensivo em energia. A maior parte desta é utilizada para produzir o H_2 e provém do gás natural (70%), mas, em alguns países, carvão ou outras fontes de energia fóssil também podem ser utilizadas.

O gasto médio de energia para produzir 1 tonelada de NH_3 é de 8 a 12 MWh, ou 29 a 43 GJ (giga joules ou 1 bilhão de joules), dependendo da fonte de energia. Esta energia equivale a aproximadamente 720 a 1.080 Nm^3 de gás natural (Nm^3 = volume de gás à pressão de 1 atm e temperatura de 0 °C), ou 700 a 1.000 litros de diesel por tonelada de amônia. Aproximadamente 2% da energia produzida no mundo é gasta na síntese de NH_3 (SUTTON et al., 2013), principalmente com o gás natural consumido no processo Haber Bosch. Este consumo energético é realmente expressivo; por exemplo, em média, na cultura da cana-de-açúcar, o consumo de fertilizantes nitrogenados é comparável ao consumo de diesel em todas as operações agrícolas e transporte da cana do campo à usina (MACEDO et al., 2008).

Além do alto gasto de energia, se a fonte de H_2 for fóssil, há grande emissão de GEE: 1,6 a 3,8 toneladas de CO_2 por tonelada de NH_3 , dependendo da fonte de energia (BROWN, 2017; VALENTINI, 2020; GUELF I et al., 2021). Além do CO_2 , quantidades variáveis de óxido nítrico (N_2O) são emitidas na oxidação de NH_3 a ácido nítrico (HNO_3) para a produção de fertilizantes contendo nitratos. Os fertilizantes nitrogenados são responsáveis por 2,5% das emissões globais de GEE, incluindo 1,5% proveniente do uso dos mesmos no solo (AUSFELDER et al., 2022).

As emissões de N_2O na fabricação de fertilizantes nitrogenados nítricos são bastante variáveis e dependem da tecnologia utilizada. Na Tabela 1, as emissões de GEE associadas à produção de nitrato de amônio são maiores do que para a produção de ureia ou de sulfato de amônio e refletem os valores médios de referência de uma das versões do banco de dados de emissões (Ecoinvent). Dados recentes dos fabricantes europeus indicam que as emissões para a fabricação de nitrato de amônio são menores do que o valor indicado na Tabela 1 (9,33 kg CO_{2e} /kg N). Nas fábricas mais modernas da Europa, o uso de filtros e a legislação mais restritiva permitiram reduzir bastante as emissões de N_2O durante a síntese de nitrato de amônio (3,29 kg CO_{2e} /t de N).

Tabela 1. Emissões de GEE associadas à produção e uso de alguns fertilizantes nitrogenados.

Via de emissão	Fertilizante		
	Ureia	Nitrato de amônio	Sulfato de amônio
	kg CO _{2e} /kg N		
Na fabricação do fertilizante	3,36	9,33	2,86
Emissões com o uso:			
N ₂ O no campo	5,15	3,71	4,67
N ₂ O via NH ₃	0,61	0,03	0,10
N ₂ O via lixiviação de NO ₃ ⁻	1,04	1,03	1,05
CO ₂ da calagem (acidificação pelo N)	0,78	0,79	2,38
Total (Produção + Uso)	10,95	14,89	11,05

Fontes: Adaptada de GUELFY et al. (2021). Dados de emissões da fabricação de N do Ecoinvent 3.1 foram obtidos de WERNET et al. (2016); os demais provêm de fontes diversas (FERTILIZERS EUROPE, 2011; BRENTROP et al., 2016; BRENTROP et al., 2018). A nova versão do Ecoinvent traz valores ligeiramente diferentes para as emissões, mas não alteram substancialmente os números desta tabela.

As fábricas da América do Norte têm valores intermediários (6,4 kg CO_{2e}/t de N) e as que utilizam carvão na China têm emissões elevadas (10,9 kg CO_{2e}/t N). Portanto, a pegada de C do fertilizante pode variar bastante conforme a origem do produto (HOXHA; CHRISTENSEN, 2019).

Somam-se a essas emissões de GEE, para a produção de NH₃ e a subsequente fabricação de fertilizantes, outras que ocorrem quando os fertilizantes nitrogenados são aplicados no solo para o cultivo de plantas. As emissões de GEE oriundas do uso dos fertilizantes no campo são bastante variáveis. A maior parte ocorre na forma de N₂O. O N₂O é emitido por processos naturais que ocorrem no solo durante o ciclo de transformações do nitrogênio e, portanto, são inevitáveis. Essas emissões resultam não só da aplicação de fertilizantes, mas também da mineralização da matéria orgânica. Assim, pequenas quantidades de N₂O são emitidas durante as reações de nitrificação e desnitrificação, mediadas por microrganismos do solo. Aproximadamente 1% do N aplicado como fertilizante pode ir para a atmosfera como N₂O – valor médio adotado como referência pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (IPCC, 2014). Embora as emissões de N₂O sejam relativamente pequenas e pouco afetem a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura, o N₂O é um potente gás de efeito estufa. Uma molécula de N₂O equivale a cerca de 300 moléculas de CO₂, para o cálculo do impacto no efeito estufa.

Computando-se os GEE liberados na fabricação e no uso dos fertilizantes, de modo geral, nota-se que as emissões são elevadas, trazendo implicações ambientais importantes. A pegada de carbono dos fertilizantes nitrogenados (Tabela 1) resulta das contribuições dos principais GEE emitidos na agricultura: CO₂, metano (CH₄) e N₂O liberados em

diferentes fases do ciclo de produção e uso de fertilizantes. Para cada tipo de GEE há um fator de multiplicação para o cálculo da pegada de C, expressa em equivalente CO₂ (CO_{2e}). Assim, as emissões de CH₄ são multiplicadas por 25 e as de N₂O por 300. Em valores aproximados, são gerados 10 kg de GEE, expressos em CO_{2e}, para cada quilograma de N empregado no campo. Utilizando-se os dados da Tabela 1, pode-se inferir que uma cultura que recebe 200 kg ha⁻¹ de N emite, direta ou indiretamente, aproximadamente 2.000 kg de CO_{2e}.

As emissões de GEE podem ser relevantes para alguns setores do país. Por exemplo, uma das razões para a produção de etanol no Brasil é substituir combustíveis fósseis e reduzir as emissões de GEE. Porém, os fertilizantes nitrogenados, mesmo quando usados com certa parcimônia em canaviais no Brasil, representam de 35% a 50% dos GEE emitidos em toda a cadeia de produção de etanol (CARVALHO et al., 2021).

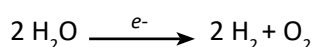
Ainda que as produtividades e retornos econômicos dos produtores rurais não sejam afetadas pelas emissões de GEE, tais emissões na agricultura são motivo de preocupação devido à crescente atenção que os assuntos ambientais têm recebido na sociedade. Para os agricultores, há o problema da preservação da imagem do setor agrícola, além do risco de medidas protecionistas e barreiras não tarifárias que possam ser levantadas em mercados importadores de produtos agrícolas brasileiros.

As questões ambientais têm sido a principal força motriz estimulando medidas para aumentar a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados na agricultura (SUTTON et al., 2013; OENEMA et al., 2015; REETZ JR., 2016). Inovações em formulações, uso de aditivos e inibidores e melhores

práticas de manejo têm sido algumas das estratégias adotadas (CHIEN et al., 2009; REETZ JR., 2016; CANTARELLA et al., 2018; GUELFI et al., 2021). Recentemente, as indústrias de fertilizantes passaram a considerar a produção de NH_3 verde como uma alternativa adicional para reduzir a pegada de C dos fertilizantes nitrogenados (YARA, 2020).

2. AMÔNIA VERDE (NH_3 verde)

A NH_3 produzida atualmente com o emprego de energia fóssil é chamada “amônia marrom” (ou amônia cinza). A amônia verde é produzida a partir de energia renovável, geralmente solar ou eólica, no lugar de insumos fósseis. Neste caso, o H_2 usado na redução química com o N_2 atmosférico provém da eletrólise da água por meio de energia elétrica gerada de forma renovável.



Este H_2 é denominado H_2 verde. Com isso, as emissões de CO_2 para produzir H_2 verde são praticamente nulas e representam um grande avanço na redução das emissões de GEE, quando comparado ao uso de gás natural que, como visto, gera de 10 a 13 kg CO_{2e} /kg H_2 .

Além das amônias marrom e verde, é possível produzir uma amônia com pegada de carbono intermediária, a “amônia azul” (Figura 1). Esta é gerada a partir de combustíveis fósseis, como a marrom, mas parte ou todo o CO_2 emitido no processo é capturado, usado e/ou estocado permanentemente em algum local, geralmente em formações geológicas que permitem armazenar o gás de forma que este não escape de volta para a atmosfera. O processo é chamado “captura, uso e estocagem de carbono”, CCS ou CCUS, nas siglas em inglês, e se encontra em desenvolvimento, na tentativa de reduzir custos muito altos.

As “cores” da amônia, na Figura 1, são as mais comuns, mas são uma simplificação do leque de opções para a produção de H_2 e NH_3 com diferentes fontes de energia ou mistura de fontes. Por exemplo, há amônia amarela e turquesa, mas

esses detalhes estão fora do escopo do presente texto. Vide Ausfelder et al. (2022) para informações adicionais.

A pegada de carbono da amônia azul depende do grau de captura de CO_2 . Para taxas de 75% de captura, as emissões da amônia azul são estimadas em 3,5 a 9,0 kg CO_{2e} /kg H_2 . As emissões podem ser reduzidas a aproximadamente 1,4 a 6,6 kg CO_{2e} /kg H_2 se mais de 90% do CO_2 forem capturados e estocados (IEA, 2023). Não há operação comercial para a produção de amônia azul atualmente.

Muitas empresas têm anunciado investimentos na produção de H_2 verde e de NH_3 verde no Brasil e no mundo (IEA, 2023). Se, atualmente, a maior parte da NH_3 gerada globalmente é matéria-prima para a fabricação de fertilizantes nitrogenados (vide “amônia e fertilizantes nitrogenados” no item 1), o interesse atual em NH_3 verde é parte das questões ligadas à transição energética. A produção de fertilizantes será contemplada, mas, provavelmente, terá que disputar

CCS E CCUS SÃO TECNOLOGIAS EM DESENVOLVIMENTO

Há muita pesquisa sobre CCS e CCUS no mundo, mas, atualmente, os casos de operações em funcionamento são relativamente escassos (IEA, 2023) e se resumem a campos de produção de petróleo. CCS e CCUS são opções para a produção de amônia azul, mas o principal interesse nessa tecnologia é tirar de circulação da atmosfera o CO_2 emitido em refino de petróleo, plantas para a geração de H_2 , usinas termoeletricas, fabricação de cimento e aço, entre outras, em que a geração de CO_2 é centralizada, o que facilita sua captura. O elevado custo de investimento e operação ainda é a principal barreira para a adoção desses processos.

AMÔNIA MARROM

NH_3 convencionalmente produzida no mundo. O H_2 utilizado para reduzir o N_2 atmosférico provém de fontes fósseis: gás natural, nafta, carvão etc. Grandes quantidades de energia são empregadas no processo e as emissões de GEE são elevadas.

AMÔNIA AZUL

As fontes de H_2 são fósseis, mas parte ou todo o CO_2 gerado no processo é tirado de circulação (não emitido para a atmosfera) por mecanismos de captura, uso e estocagem de carbono (CCS e CCUS).

AMÔNIA VERDE

O H_2 necessário para reduzir o N_2 a NH_3 provém de energias renováveis, geralmente eólica ou solar. O H_2 é produzido por eletrólise da H_2O e não há emissão direta de CO_2 .

Figura 1. Representação esquemática das formas de produzir amônia.

o mercado com outros segmentos que utilizam a NH_3 . Por exemplo, a NH_3 verde poderá ser comercializada como vetor de H_2 , que poderá ser separado em locais de uso, para evitar ou substituir o transporte de H_2 gasificado ou liquefeito. A NH_3 verde também é um potencial combustível marítimo e já há embarcações sendo testadas e adaptadas para funcionar com NH_3 (BROWN, 2017; YARA, 2020). Há expectativas de que o uso como combustível seja um dos principais mercados da NH_3 verde, competindo, em importância, com o de fertilizantes.

Atualmente, a produção de NH_3 verde e de H_2 verde, com energia renovável, é muito mais cara do que com o uso de insumos fósseis (AUSFELDER et al., 2022), mas espera-se que os custos caiam com o tempo. Os preços da energia fotovoltaica e solar vêm sendo reduzidos com os novos investimentos em todo o mundo.

3. H_2 VERDE, NH_3 VERDE E A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A NH_3 verde, na verdade, resulta da produção de H_2 verde. O H_2 é um vetor energético e insumo industrial importante, não só para a produção de NH_3 mas também para o refino de petróleo. Atualmente, a maior parte do H_2 é produzido em operações integradas com seu uso (petróleo e indústria). O H_2 verde é visto como o “combustível” do futuro, podendo vir a ser utilizado para descarbonizar muitas indústrias intensivas no uso de energia e no transporte em geral. Há veículos sendo testados e alguns já em uso no mundo que rodam com H_2 , empregando células de combustível e outras tecnologias.

A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que será necessário produzir 470 Mt/ano de H_2 em 2050 para atingir as ambiciosas metas de emissão zero de GEE (NetZero by 2050). O H_2 tem alta densidade energética, porém, é um gás com baixa densidade ($0,084 \text{ kg/Nm}^3$), o que implica em grandes volumes para uso como fonte de energia. O transporte do gás tem custo alto, riscos de segurança e exige equipamentos adequados (FERTILIZERS EUROPE, 2020). A liquefação também traz desafios, pelo alto gasto de energia (cerca de 40% da energia do H_2) e pelas condições especiais para o transporte. Uma alternativa é produzir NH_3 e usá-la como vetor energético ou “carregador” de H_2 . Embora o transporte de NH_3 também exija tanques e cuidados especiais, já existem equipamentos, gasodutos e navios para tal, uma vez que grandes volumes de NH_3 são comercializados globalmente. Desse modo, a transição energética com base em H_2 verde tem a NH_3 verde como um componente importante e pode ajudar o Brasil a cumprir suas metas nos acordos do clima.

4. INICIATIVAS PARA A PRODUÇÃO DE H_2 VERDE E DE NH_3 VERDE NO BRASIL

As empresas White Martins e Unigel anunciaram planos de produzir H_2 verde no nordeste brasileiro, aproveitando as excelentes condições para a produção de energia solar

e eólica nesta parte do país. A White Martins já produz e comercializa H_2 (marrom) para usos industriais em vários países. A empresa está entrando no mercado de H_2 renovável, no qual já opera na Europa. No final de 2022, a White Martins anunciou investimentos para a produção de 158 t H_2 verde/ano em Pernambuco utilizando 1,6 MW de energia solar para a eletrólise de água (WHITE MARTINS, 2022b). Há tratativas, com governos de outros estados, para a construção de novas instalações e um acordo com a Toyota para fornecimento de H_2 para o veículo Mirai, movido à célula de combustível (WHITE MARTINS, 2022a). A empresa não anunciou, até o momento, os planos para produzir NH_3 verde. Aparentemente, a White Martins pretende fornecer o gás para consumidores industriais ou transportá-lo para o mercado externo, especialmente Europa e América do Norte, dada a localização da planta no nordeste brasileiro (WHITE MARTINS, 2023).

A Unigel anunciou investimentos de US\$ 1,5 bilhão em janeiro de 2023 para a implantação da primeira planta de H_2 verde em escala industrial no país, em Camaçari, na Bahia. A empresa prevê a produção de 100 Mt H_2 /ano em 2027. Há tratativas com outros estados para instalações de novas plantas (UNIGEL, 2023). A Unigel produz NH_3 (mas não NH_3 verde) em suas fábricas de fertilizantes localizadas em Sergipe e na Bahia e tem capacidade instalada para utilizar o H_2 para produzir NH_3 verde. Portanto, este deve ser o destino de parte do H_2 verde a ser produzido pela empresa. A NH_3 verde poderá ser utilizada para a fabricação de fertilizantes, como combustível marítimo e ser exportada para outros mercados (UNIGEL, 2023).

Outra empresa com planos de produzir NH_3 verde no Brasil é a Atlas Agro. A empresa, com sede na Suíça, tem filiais nos EUA e no Brasil, onde planeja instalar fábricas de H_2 verde e de NH_3 verde para atender mercados de H_2 e de fertilizantes. Os dois primeiros projetos serão instalados nos EUA para aproveitar os incentivos fiscais para a redução de emissões de GEE do governo americano. A construção das fábricas nos EUA terá início em 2024 e o início da operação está previsto para 2027 (ATLAS AGRO, 2023). Segundo informações internas, a produção de H_2 e NH_3 verde da Atlas Agro seguirá um modelo diferente da de outras empresas. A geração de energia elétrica renovável (solar e eólica) para a eletrólise da água e produção de H_2 será feita onde as condições econômicas e ambientais forem mais favoráveis. A eletrólise da água e as fábricas de NH_3 verde serão instaladas próximas dos locais de consumo. Ao invés de transportar H_2 ou NH_3 , a Atlas Agro pretende otimizar a logística de suas operações e transportar a energia elétrica renovável usando o sistema interligado brasileiro. A planta industrial no Brasil deverá ser localizada em Uberaba, MG, próximo das regiões de maior consumo de fertilizantes na região Centro-Sul. O projeto de engenharia deve ter início ainda em 2023, a construção em 2024 e o início da produção está previsto para 2028.

Também voltada para a produção de fertilizantes com baixa pegada de carbono, mas em bases inovadoras, é a iniciativa da Yara Fertilizantes. A empresa, com sede na Noruega, tem planos ambiciosos para descarbonizar sua produção de fertilizantes e a NH_3 verde é parte importante da sua estratégia global. Uma unidade de NH_3 verde está prevista para começar a funcionar em 2023 na Europa (YARA, 2020; THODE, 2023). No Brasil, a Yara produz nitrato de amônio em sua planta de Cubatão, SP. A Yara anunciou planos de produzir NH_3 verde naquela fábrica, porém, usando biometano, o qual também se qualifica como insumo para tal, se proveniente de fontes renováveis. A Yara pretende utilizar biometano de biodigestores, principalmente usando o potencial do setor sucroenergético. As matérias-primas para os biodigestores são a vinhaça, a torta de filtro e, possivelmente, os resíduos de palha de cana. O potencial de biogás/biometano no Brasil, inclusive em São Paulo, é mais do que suficiente para suportar o projeto da Yara. O estado de São Paulo conta com aproximadamente 170 usinas que podem instalar biodigestores, 66 das quais a 20 km ou menos de um dos gasodutos que cortam o estado (ESTEVEZ, 2020). Com isso, a logística para transporte do biometano até Cubatão se torna bastante favorável.

A fábrica de Cubatão necessitará de 700 mil m^3 por dia de biometano⁴. A Yara anunciou um acordo com a Raízen para receber 20 mil m^3 por dia, com início provável das entregas de gás em 2023 (YARA BRASIL, 2021), porém, a Raízen tem planos de produzir biometano também em outras unidades sucroenergéticas (RAÍZEN, 2022). O biometano renovável pode ser gerado também a partir de resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, entre outros. Provavelmente, a Yara começará a produzir NH_3 verde em 2024 ainda utilizando biometano e gás natural, esta a fonte atual da fábrica de Cubatão. Com o aumento no fornecimento de biometano, a NH_3 produzida passará a ser “mais verde”.

As datas previstas para o funcionamento das várias unidades estão sujeitas às condições de mercado, custos e às limitações para a implantação da nova tecnologia. Porém, a movimentação de grandes empresas na direção da produção de NH_3 verde indica que em breve o mercado brasileiro, assim como o de outros países, poderá contar com esse produto. Os preços, pelo menos no início, provavelmente serão maiores do que os da NH_3 marrom convencional. Mercados que estejam dispostos a pagar mais por um produto com menor pegada de carbono, como as indústrias químicas, podem ser atendidos primeiro. Se a oferta de NH_3 verde for elevada e

houver a redução de custos esperada com o desenvolvimento tecnológico, o setor de fertilizantes será um dos importantes destinos do insumo. Deve-se levar em conta que a Unigel e a Yara já operam com fertilizantes, e a Atlas Agro também deve focar o mercado de fertilizantes, pela opção de colocar sua primeira planta em Uberaba, SP.

5. IMPLICAÇÕES PARA O MERCADO DE FERTILIZANTES

O H_2 verde, gerado a partir de energia solar ou eólica, pode ter emissão de CO_2 zero ou quase zero, dependendo dos cálculos da análise do ciclo de vida dos geradores de energia. Porém, a síntese de NH_3 a partir de N_2 e H_2 demanda outros gastos de energia; assim, a pegada de carbono da NH_3 verde será baixa, mas não zero. Além disso, as emissões de GEE

QUEM SE INTERESSARÁ POR UM FERTILIZANTE NITROGENADO COM BAIXA PEGADA DE C?

A composição química dos fertilizantes nitrogenados feitos com NH_3 verde não é alterada; assim, a resposta das culturas à adubação e a eficiência de uso de N serão semelhantes à dos produtos similares atualmente em uso.

Pelo menos em um primeiro momento, fertilizantes feitos com NH_3 verde deverão ter preço mais elevado. O agricultor pagará o prêmio? Quem pagará por isso?

A competitividade dos fertilizantes feitos a partir da NH_3 verde dependerá do diferencial de preços, mas alguns setores podem puxar a fila e dar preferência a fertilizantes com menor impacto ambiental. Um candidato é o setor sucroenergético. Os produtores de etanol de cana têm benefício monetário, por meio de créditos de carbono (CBIOS, do programa Renova-bio), se provarem que conseguem reduzir as emissões de GEE. O mesmo deve se aplicar aos produtores de etanol de milho. Setores exportadores (café, citros, algodão, milho, frutas, entre outros), sujeitos à exigência, por parte de países compradores, de produtos agrícolas com baixas emissões de GEE, também são potenciais interessados.

Programas de pagamento por créditos de carbono, ainda pouco efetivos no Brasil, também poderão estimular o uso de fertilizantes com menores emissões de GEE. A pressão dos consumidores urbanos pode ser, igualmente, um fator.

Com o tempo, os fertilizantes feitos com NH_3 verde talvez passem a ser dominantes, ou o diferencial de preços desapareça, fazendo com que os novos fertilizantes se tornem “convencionais”.

⁴ Cantarella, H.; Della Nora, D.; Ferrari, R.; Neves, C. BIO-GÁS – Roteiro para estimular a produção de biometano no estado de São Paulo. Instituto Agrônomo, 17/3/2022. Relatório interno entregue à Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo.

que ocorrem no campo (Tabela 1) não dependem do tipo de matéria-prima empregada na fabricação do fertilizante, se NH_3 verde ou marrom. No entanto, a pegada de carbono de fertilizantes nitrogenados produzidos a partir da NH_3 verde certamente será muito menor do que a de fertilizantes produzidos com NH_3 marrom.

Se a eficiência de uso dos fertilizantes feitos com NH_3 verde e com NH_3 marrom não é diferente, uma mudança importante no setor de fertilizantes deverá ocorrer: a ureia, atualmente a fonte mais comum de adubo nitrogenado no âmbito mundial (cerca de 60% do mercado), deverá perder participação. Para o processo produtivo, a preferência da indústria pela fabricação de ureia advém da conveniência de ter as matérias-primas no mesmo local: a NH_3 , a molécula básica de todos os fertilizantes nitrogenados sintéticos, e o CO_2 , o subproduto da produção de H_2 . Como o H_2 verde não utiliza combustíveis fósseis, não haverá oferta de CO_2 abundante, barato e disponível no local de produção do fertilizante. Desse modo, sintetizar a ureia deixa de ser oportuno ou competitivo, a despeito de algumas qualidades importantes deste adubo, como alta concentração de N e menor custo de produção em relação a outros fertilizantes nitrogenados.

A NH_3 verde pode ser combinada com diferentes ácidos para produzir nitrato de amônio, sulfato de amônio, MAP e DAP, fertilizantes comuns no mercado. Portanto, pouca ou nenhuma adaptação do setor agrícola será necessária para substituir a ureia.

A NH_3 verde pode também ser comercializada como amônia anidra para aplicação direta ou como soluções amoniacais, tal como a aquamônia. A aplicação de N na forma de gás ou mesmo de soluções amoniacais requer equipamentos especiais para transporte e aplicação, exigindo investimentos e ajustes por parte de distribuidores e agricultores.

A molécula que provavelmente substituirá a ureia é o nitrato de amônio, fertilizante com 32% de N. A Atlas Agro já sinalizou que este será o fertilizante a ser produzido em Uberaba (ATLAS AGRO, 2023). Provavelmente, o nitrato de amônio será a opção da Yara. Deve-se notar que, usando biometano, a Yara terá CO_2 disponível e poderá sintetizar ureia. Porém, a Yara já produz nitrato de amônio em Cubatão e tem mostrado clara preferência por este fertilizante, embora seja, globalmente, grande fabricante de ureia.

O nitrato de amônio é o adubo preferido em alguns setores, como os de cana-de-açúcar, citros, entre outros, nos quais as aplicações superficiais de ureia, geralmente sobre palha ou resíduos de planta, predispõem a perdas por volatilização de NH_3 . Em média, cerca de 20% ou mais do N adicionado na superfície dos solos como ureia podem ser emitidos para a atmosfera como NH_3 (PAN et al., 2016;

CANTARELLA et al., 2018; OTTO et al., 2021). Em alguns países, legislações recentes restringem a aplicação de ureia sobre os solos. Estes são os casos de Alemanha e Dinamarca, onde a ureia deve ser incorporada ao solo ou tratada com um inibidor de urease (CANTARELLA et al., 2018; GUELFİ et al., 2021).

O nitrato de amônio, bem como outros adubos contendo N nítrico ou amoniacal, não estão sujeitos a perdas relevantes de N por volatilização de NH_3 em solos ácidos, predominantes no Brasil, o que lhes confere vantagens em comparação à ureia.

A substituição da ureia pelo nitrato de amônio não deve causar transtornos relevantes. O nitrato de amônio é a segunda fonte de N no mercado brasileiro (OTTO et al., 2021). Porém, o nitrato de amônio tem algumas limitações. Como este composto é usado na produção de explosivos, sua comercialização, transporte e estocagem são

controlados. Empresas como a Mosaic optaram por não comercializar nitrato de amônio, decisão em âmbito global. Alguns portos restringem o trânsito e estocagem deste fertilizante. Essas questões são restritivas, mas o nitrato de amônio, com os devidos cuidados, continua sendo um adubo relevante para a agricultura mundial.

Problemas como queima de folhas, com a aplicação a lanço de nitrato de amônio, estão geralmente associados a produtos com más qualidades físicas. Porém, não se espera que um adubo com qualidade inferior seja produzido com um insumo caro, como a NH_3 verde.

Uma alternativa para contornar o uso indesejado do nitrato de amônio como explosivo é produzir CAN, nitrato de amônio e cálcio, uma mistura de nitrato de amônio e calcário. Comparado à ureia, o CAN tem menor concentração de N, geralmente 26% a 28% de N, carrega pequenas quantidades de Ca e Mg (ou S, se o CAN for produzido por mistura com gesso agrícola) e tem melhores propriedades físicas do que a maioria dos nitratos de amônio no mercado. Por outro lado, o preço por unidade de N tende a ser maior do que o da ureia, além de maior custo com logística e aplicação.

A entrada de NH_3 verde e dos fertilizantes produzidos com ela no mercado será gradual e, provavelmente, lenta. Isso significa que a ureia continuará sendo uma fonte de N importante no mundo por muitos anos. Mas, de modo geral, se a ureia tiver que ser substituída, há várias opções que atendem às necessidades das culturas agrícolas em nitrogênio. Cantarella (2023) abordou esse assunto em artigo recente. O problema de perdas por volatilização de NH_3 pode ser reduzido, como vem sendo feito, com boas práticas de adubação (REETZ JR., 2016; GAO; CABRERA SERRENHO, 2023) e com o uso de inibidores de urease (CANTARELLA et al., 2018).

Com o advento da NH_3 verde, a principal mudança no mercado será a substituição da ureia como principal fertilizante nitrogenado, um processo que será gradual e, provavelmente, lento.

Concluindo, fertilizantes nitrogenados com menor pegada de carbono em breve farão parte da lista de opções dos agricultores brasileiros, atendendo à demanda e às pressões para tornar a agricultura mais sustentável. É importante que técnicos e agricultores estejam informados para tomar as melhores decisões.

REFERÊNCIAS

- ATLAS AGRO. **Atlas Agro lidera a transição do nitrogênio verde**. Canarana, 2023. Disponível em: <<https://www.atlasagro.ag/pt/atlas-agro-lidera-a-transicao-do-nitrogenio-verde/>>. Acesso em 5 maio 2023.
- AUSFELDER, F.; HERRMANN, E. O.; GONZÁLES, L. F. L. **Perspective Europe 2030: Technology options for CO₂-emission reduction of hydrogen feedstock in ammonia production**. Frankfurt am Main: DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., 2022. 43 p.
- BRENTROP, F.; PALLIÈRE, C. **Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European mineral fertilizer production and use**. Brussels: Fertilizers Europe, 2011. 23 p. Disponível em: <file:///C:/Users/user/Downloads/Energy_Efficiency_V9.pdf>. Acesso em 5 maio 2023.
- BRENTROP, F.; HOXHA, A.; CHRISTENSEN, B. Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. In: **Proceedings of the 10th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2016**. Dublin, 2016. p. 482–490.
- BRENTROP, F.; LAMMEL, J.; STEPHANI, T.; CHRISTENSEN, B. Updated carbon footprint values for mineral fertilizer from different world regions. In: **Proceedings of the 11th International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2018 (LCA Food)**. Bangkok, 2018. p. 19–22.
- BROWN, T. **Round-trip efficiency of ammonia as a renewable energy transportation media**. New York: Ammonia Energy Association, 2017. 5 p. Disponível em: <<https://www.ammoniaenergy.org/articles/round-trip-efficiency-of-ammonia-as-a-renewable-energy-transportation-media/>>. Acesso em 10 maio 2023.
- CANTARELLA, H. **Opções de fontes de nitrogênio para a agricultura brasileira**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2023. 30 p.
- CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19–27, 2018.
- CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; CANTARELLA, H.; CHAGAS, M. F.; GONZAGA, L. C.; LOURENÇO, K. S.; BORDONAL, R. O.; BONOMI, A. Implications of regional N₂O–N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, e111423, 2021.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, v. 102, p. 267–322, 2009.
- ERISMAN, J. W.; SUTTON, M. A.; GALLOWAY, J.; KLIMONT, Z.; WINIWARTER, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 636–639, 2008.
- ESTEVES, H. B. B. **Biogás no Brasil: Visão atual e futura**. In: VII Forum Biogás (online). Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020. 22 p.
- FERTILIZERS EUROPE. **Paving the way to green ammonia and low-carbon fertilizers**. Brussels, 2020. 8 p. Disponível em: <<https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2020/07/Paving-the-way-to-green-ammonia-and-low-carbon-fertilizers-digital.pdf>>. Acesso em 5 maio 2023.
- GAO, Y.; SERRENHO, A. C. Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions. **Nature Food**, v. 4, p. 170–178, 2023.
- GUELF, D. R.; SILVA, R. C.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Avanços nas pesquisas e tecnologias para fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 11, p. 101–159, 2021.
- HOXHA, A.; CHRISTENSEN, B. **The carbon footprint of fertiliser production: Regional reference values**. Prague: International Fertiliser Society, 2019. 20 p. (Proceedings n. 805). Disponível em: <https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2020/01/The-carbon-footprint-of-fertilizer-production_Regional-reference-values.pdf>. Acesso em 10 maio 2023.
- IEA. International Energy Agency. **Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity**. Paris: International Energy Agency, 2023. 87 p. Disponível em: <<https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen>>. Acesso em 10 maio 2023.
- IFA. International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer consumption in Brazil and world**. Paris, 2019. 2 p.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. CORE WRITING TEAM, PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (Ed.). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva, 2014. 151 p.
- MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 582–595, 2008.
- OENEMA, O. et al. **Nitrogen Use Efficiency (NUE) – an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems**. Alterra: Wageningen University, 2015. 47 p.
- OTTO, R.; CANTARELLA, H.; GUELF-SILVA, D. R.; CARVALHO, M. C. S. Nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 9, p. 30–50, 2021.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283–289, 2016.

RAÍZEN. **Raízen anuncia a construção de sua segunda planta de biogás à produção de gás natural renovável**. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/sala-de-imprensa/raizen-anuncia-a-construcao-da-sua-segunda-planta-de-biogas-a-primeira-dedicada-a-producao-de-gas-natural-renovavel>>. Acesso em 5 maio 2023.

REETZ JR., H. F. **Fertilizers and their efficient use**. Paris: International Fertilizer Industry Association – IFA, 2016. 110 p.

SMIL, V. Detonator of the population explosion. **Nature**, v. 400, p. 415, 1999.

SUTTON, M. A. et al. **Our nutrient world: The challenge to produce more food and energy with less pollution**. Edinburgh: Centre for Ecology and Hydrology, 2013. 128 p.

THODE, V. B. Der Schmierstoff der Zukunft. **Boyens Medien**, Brunsbüttel, 30 jan. 2023. Disponível em: <<https://www.boyens-medien.de/artikel/lokales/der-schmierstoff-der-zukunft-508310.html>>. Acesso em 5 maio 2023.

UNIGEL. **Com investimento total de US\$1,5 bilhão, Bahia terá o primeiro projeto de hidrogênio verde em escala industrial no Brasil**. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://www.unigel.com.br/com-investimento-total-de-us-15-bilhao-bahia-tera-primeiro-projeto-de-hidrogenio-verde-em-escala-industrial-no-brasil/>>. Acesso em 5 maio 2023.

VALENTINI, A. **Green shift to create 1 billion tonne “green ammonia” market?** London: Argus Media, 2020. 6 p.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1218–1230, 2026.

WHITE MARTINS. **O hidrogênio e o futuro da energia**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.whitemartins.com.br/gases/buy-compressed-hydrogen-gas-or-liquid-hydrogen>>. Acesso em 10 maio 2023.

WHITE MARTINS. **White Martins e Toyota firmam parceria em hidrogênio**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.whitemartins.com.br/news/2022/white-martins-e-toyota-firmam-parceria-em-hidrog%C3%AAnio>>. Acesso em 10 maio 2023.

WHITE MARTINS. **White Martins produz o primeiro hidrogênio verde certificado do Brasil**. Rio de Janeiro, 2022b. Disponível em: <<https://www.whitemartins.com.br/news/2022/white-martins-produz-o-primeiro-hidrog%C3%AAnio-verde-certificado-do-brasil>>. Acesso em 10 maio 2023.

YARA. **Orsted and Yara seek to develop groundbreaking green ammonia project in the Netherlands**. Oslo, 2020. Disponível em: <<https://www.yara.com/corporate-releases/orsted-and-yara-seek-to-develop-groundbreaking-green-ammonia-project-in-the-netherlands/>>. Acesso em 10 maio 2023.

YARA BRASIL. **Yara anuncia aquisição de biometano e dá primeiro passo para a produção de amônia verde no Brasil**. Porto Alegre, 2021. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/noticias-e-eventos/press-releases/biometano/>>. Acesso em 10 maio 2023.

CURSO ON-LINE SOBRE NUTRIÇÃO E ADUBAÇÃO DAS PRINCIPAIS CULTURAS COMERCIAIS DO BRASIL

**NPCT.COM.BR
/VIDEOS**



Em até 12x pelo
PagSeguro



Emissão de
Certificado



Renomados
Especialistas



Aulas disponíveis
por 12 meses

CURSO COMPLETO

Dezoito palestras, contendo mais de 30 horas de aula.

MÓDULO APLICADO

Sete palestras, contendo mais de 12 horas de aula.

MÓDULO BÁSICO

Onze palestras, contendo mais de 19 horas de aula.

AULAS INDIVIDUAIS

Adquira aulas específicas dos temas e palestrantes de interesse.



PATROCÍNIO



NPCT

Lançamento Oficial do Novo Livro da NPCT

em Cuiabá/MT



21 A 24
AGOSTO 2023
CUIABÁ-MT

- Autores confirmados
- Vendas durante o congresso
- Valor especial para congressistas

MANEJO DE NEMATÓIDES EM GRANDES CULTURAS

Claudia Regina Dias-Arieira
Fernando Godinho de Araújo
Andressa Cristina Zamboni Machado
- Coordenadores -

 loja.npct.com.br

Conheça todos os livros da NPCT



ARTIGO TÉCNICO 2

Saúde do Solo: Entendendo os Conceitos, Relevância e suas Aplicações na Agricultura e Meio Ambiente

 Maurício Roberto Cherubin¹, Martha Lustosa Carvalho², Marcos Rodrigues³

1. O SOLO É UM RECURSO INSUBSTITUÍVEL E FINITO

Os solos são corpos naturais tridimensionais complexos que recobrem a maior parte dos continentes do planeta Terra. São dinâmicos e constituídos por sólidos, líquidos e gases, de natureza mineral ou orgânica. Todos os solos contêm, necessariamente, organismos vivos. Esses organismos ocupam o espaço poroso dos solos ou crescem sobre ele, como a vegetação. Os solos se estendem por ecossistemas naturais, normalmente vegetados, e também por ecossistemas modificados pela ação antrópica. Os solos têm um papel central na regulação de processos de escala planetária, que mantém os ecossistemas da Terra em funcionamento e possibilitam a vida (Figura 1).

Os solos são formados por processos de intemperismo de rochas, os quais dão origem à porção mineral e liberam elementos essenciais para o crescimento da vegetação e da biota que habitam o solo e que farão parte de seu componente biológico. Esses organismos são responsáveis pela maior parte dos processos que ocorrem no solo e que interagem com os outros compartimentos, como, por exemplo, a ciclagem de elementos (nutrientes ou até compostos tóxicos) – que é necessária à perpetuação da vida e à manutenção da qualidade da água – e o equilíbrio de trocas gasosas com a atmosfera – que controla o clima do planeta. Isso ocorre porque o carbono e outros elementos vitais à vida e ao equilíbrio dos ecossistemas do planeta estão intimamente relacionados à vegetação e aos organismos do solo. Os solos são o segundo maior reservatório de

Abreviações: CA4SH = Coalizão de Ações para Saúde do Solo; FAO = Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura; Lisam = Solos Vivos das Américas; ONU = Organização das Nações Unidas.

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP, Piracicaba, SP; email: cherubin@usp.br

² Engenheira Agrônoma, Ms., Doutoranda do PPG em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

³ Engenheiro Agrônomo, Dr., Gerente de Pesquisa da Mosaic Fertilizantes, São Paulo, SP.

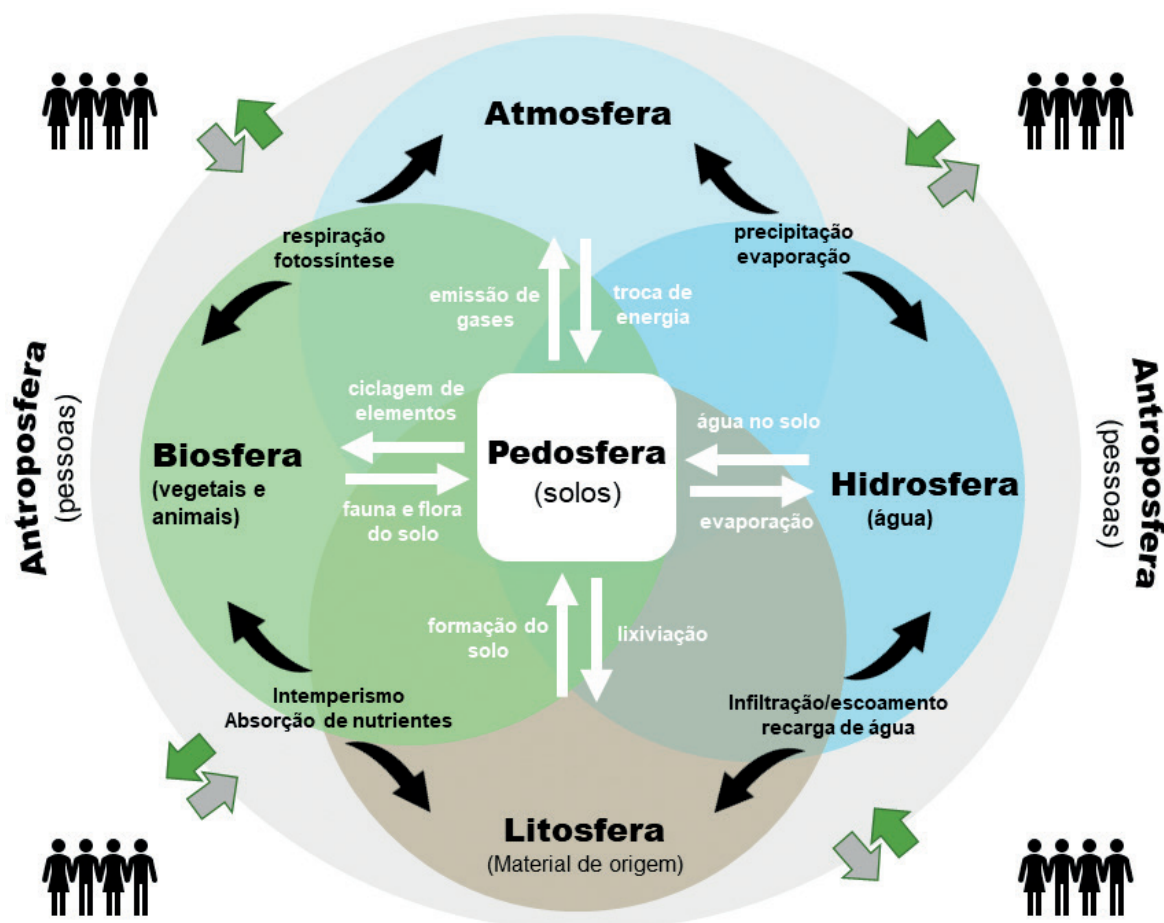


Figura 1. O solo é o mediador dos processos planetários interativos que sustentam o equilíbrio ecológico e possibilitam a manutenção da vida. Os seres humanos (antroposfera – círculo cinza) são modificadores e modificados nesses processos.

Fonte: Adaptada de Fortuna (2012).

carbono no planeta, atrás apenas dos oceanos. O principal mecanismo de regulação da concentração de carbono na atmosfera é o equilíbrio entre respiração e fotossíntese, mediado principalmente pelos vegetais terrestres, os quais dependem do solo como meio de apoio para o crescimento e fonte de nutrientes e água. A permanência do carbono no solo depende dos organismos que realizam a decomposição da matéria orgânica e a transformação desse material em formas mais estabilizadas, ligadas à fração mineral do solo. Uma vez nessa forma, o carbono desempenha um papel importante na manutenção da estabilidade estrutural do solo, que é fundamental para a conservação da qualidade da água no planeta. Esses processos são base para diversos outros, que, em última análise, sustentam a saúde de todos os seres vivos, e, em especial, a saúde das pessoas.

Devido ao papel central na regulação dos processos que sustentam a vida no planeta Terra, o solo é cada vez mais compreendido e considerado imprescindível nas agendas importantes, tanto no escopo técnico-científico quanto no político, para a resolução de grandes problemáticas globais, como segurança alimentar e energética, restauração de ecossistemas, combate à desertificação e mitigação das mudanças climáticas.

Embora o solo seja reconhecido como o grande alicerce da vida por culturas de todo o mundo, desde a Antiguidade são relatadas as consequências negativas da degradação do solo devido à exploração agrícola inadequada. Já se sabia, então, que a civilização depende de solos conservados, para que seja possível praticar a atividade que sustenta a espécie humana – a agricultura. A degradação sistemática desse recurso finito por más práticas agrícolas leva, em última instância, à fome e ao colapso civilizacional. Atualmente, cerca de um terço dos solos do planeta encontram-se em algum estágio de degradação, segundo estudo realizado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO (MONTANARELLA et al., 2015). A agricultura moderna trouxe incrementos muito significativos de produtividade, que ajudam a alimentar o mundo. Isso é inquestionável! Porém, também é importante reconhecer as ameaças à saúde do solo causadas pelo avanço da agricultura, tais como:

- Compactação do solo, resultado do tráfego de máquinas agrícolas ou pisoteio de rebanho;
- Aumento da erosão e selamento, possivelmente devido à desagregação e pulverização do solo pelo repetido revolvimento;

- Aceleração da acidificação e salinização do solo, que ocorrem pela adição constante de altas doses de fertilizantes químicos, extração das bases e irrigação inadequada;

- Desbalanço de nutrientes, resultado de inadequado diagnóstico da fertilidade do solo e necessidades das culturas. Por exemplo, o solo pode ser degradado tanto pelo uso excessivo de fertilizantes quanto pela ausência ou insuficiência de adubação;

- Perda de carbono e de biodiversidade, devido à remoção da vegetação nativa e simplificação (menor quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos) dos sistemas produtivos, preparo convencional de solo, erosão e manejo inadequado (por exemplo, sobrepastejo);

- Poluição do solo, pela adição contínua e, por vezes, indiscriminada de defensivos, fertilizantes (minerais e orgânicos), descarte inadequado de resíduos agroindustriais, efluentes industriais e águas residuárias.

Neste contexto, para que os solos continuem a intermediar os processos que sustentam os ecossistemas do planeta, precisamos impedir o avanço da degradação, por meio da adoção de práticas de conservação do solo, mas também restaurar a saúde dos solos que já se encontram em algum estágio de degradação.

2. SAÚDE DO SOLO – CONCEITOS BÁSICOS E HISTÓRICO

O conceito de saúde do solo é bastante amplo, complexo e emergente, exigindo uma visão integrada do solo para compreendê-lo e aplicá-lo. Saúde do solo refere-se à capacidade contínua do solo, como um ecossistema vivo, de desempenhar suas múltiplas funções, tais como suporte à produção de alimentos, fibras e biocombustíveis, ciclagem de nutrientes, estocagem de carbono, habitat para a biodiversidade, regulação do fluxo de água, matéria-prima para a indústria farmacêutica, cosmética e construção civil, além de ser um patrimônio e herança cultural. Tais funções são vitais para sustentar a produção de plantas e animais e a nossa própria vida na Terra. Solo saudável é o principal pilar da necessária transição para uma agricultura mais sustentável (e/ou regenerativa), permitindo, assim, o avanço na resolução de grandes problemas globais, como a insegurança alimentar e as mudanças climáticas.

Por se tratar de uma temática atual e de interesse global, a geração de conhecimento técnico-científico sobre os conceitos, métricas (indicadores) e aplicações e manejo da saúde do solo tem evoluído em ritmo muito acelerado, particularmente na última década. A saúde do solo foi

recentemente considerada como a área da fronteira do conhecimento da Ciência do Solo (SHEN; TENG, 2022). Este interesse na área de saúde do solo se reflete no aumento exponencial do número de artigos científicos publicados relacionando os termos “saúde do solo” e “qualidade do solo”. De acordo com a Scopus, a maior base de dados bibliográficos do mundo, já foram publicados 23.439 artigos científicos ou revisões de literatura mencionando estes termos entre 1947 e 2022, e deste total, 73% das publicações ocorreram na última década (2013-2022), e 49% nos últimos 5 anos (2018-2022) (Figura 2A). Estes números são bastante impressionantes e refletem o engajamento crescente de pesquisadores na área de saúde do solo.

O Brasil é o quarto país com maior número de publicações na área de saúde do solo, estando atrás apenas da China, Estados Unidos e Índia. No Brasil, a evolução da produção científica segue a mesma tendência global, onde foram publicados 1.541 artigos científicos ou revisões de literatura entre 1988 e 2022, e destes, 75% das publicações ocorreram na última década (2013-2022), e

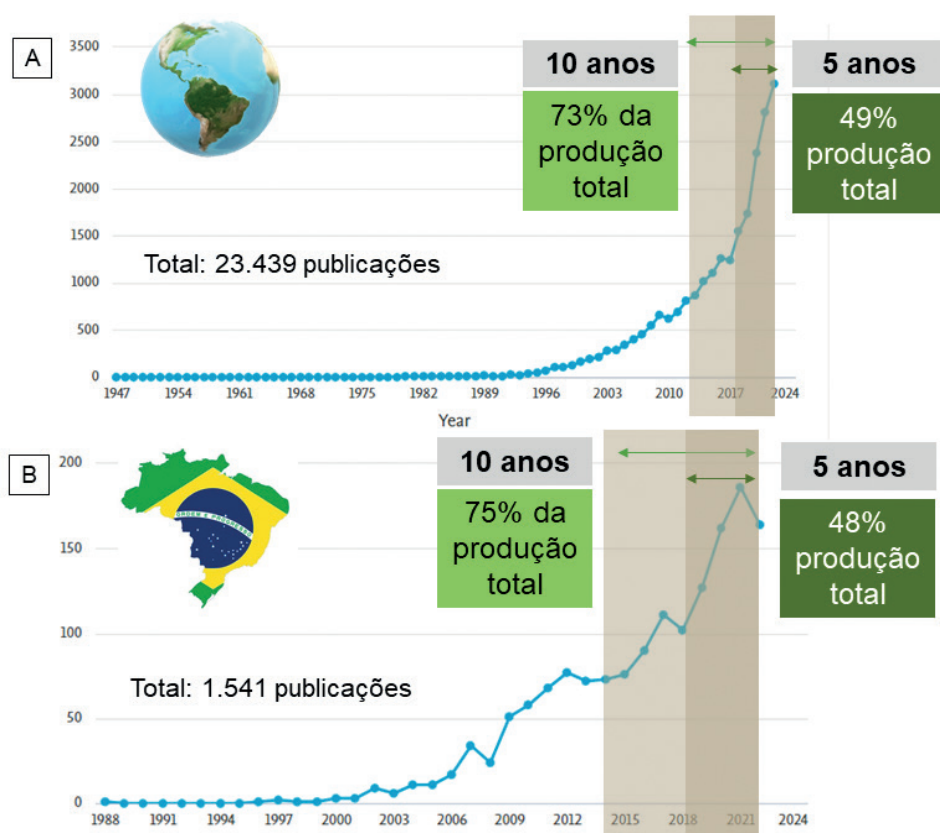


Figura 2. Evolução no número de publicações científicas relacionando os termos “saúde do solo” ou “qualidade do solo” no mundo (A) e no Brasil (B).

Fonte: Base de dados Scopus (busca realizada em 01/03/2023).

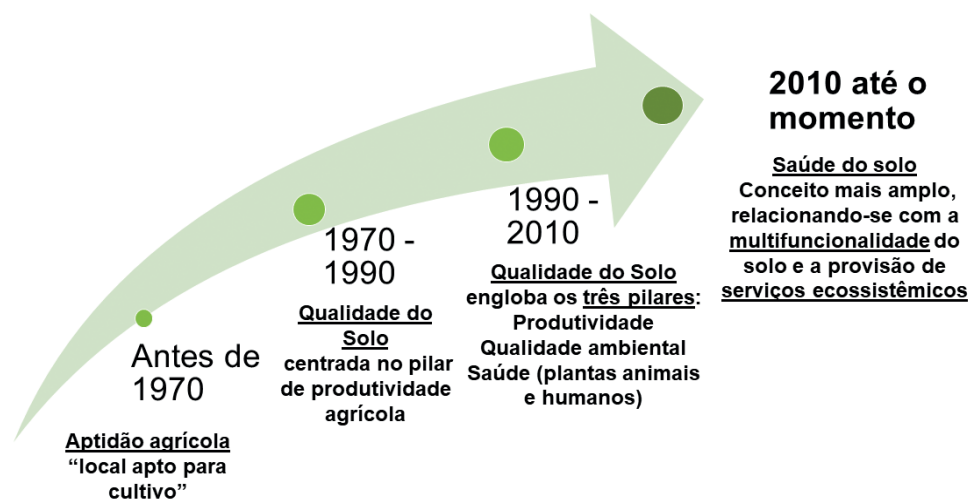


Figura 3. Evolução conceitual de solo saudável.

48% nos últimos 5 anos (2018-2022) (Figura 2B). Ou seja, o Brasil tem um papel importante no direcionamento dessa agenda científica de saúde do solo, e a geração de conhecimento científico no país tem acompanhado a taxa de crescimento global. Apesar disso, é importante mencionar que a maioria destas publicações menciona o termo saúde do solo em um contexto genérico, mas não exploram o conceito de saúde do solo de forma plena, como recentemente revelado em revisão de literatura conduzida por Simon et al. (2022).

Ao longo das últimas cinco décadas ocorreu uma evolução conceitual importante na Ciência do Solo, culminando no conceito de saúde do solo, o qual tem sido difundido de forma mais intensa na última década (Figura 3). Neste processo, houve uma transição gradativa do conceito de qualidade do solo para saúde do solo. No início dos anos 1970, o conceito de qualidade do solo estava atrelado basicamente ao conceito de aptidão agrícola, no qual, com base nas informações do meio físico (tipo de solo, relevo e condições climáticas) se estabelece a aptidão (potencial) da área para usos agrícolas. Nesta década, o termo "qualidade do solo" surge na literatura por Mausel (1971), que a definiu como a capacidade de um solo suportar altas produtividades de grãos sob condições de alto nível tecnológico de manejo. Assim, nas décadas seguintes, com o avanço da Revolução Verde e consequente uso de insumos sintéticos (fertilizantes e defensivos agrícolas), o foco da qualidade do solo ficou centrado exclusivamente no pilar de produtividade das culturas.

A década de 1990 foi marcada por avanços importantes no entendimento dos conceitos e métricas de qualidade do solo (NRC, 1993; DORAN et al., 1994; DORAN; JONES, 1996), incorporando também os pilares ambiental e de saúde humana ao conceito de qualidade do solo. Desta forma, qualidade do solo passa a ser definida como a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade biológica (planta e animais), manter a qualidade

ambiental (ar e água) e promover a saúde humana e habitação (KARLEN et al., 1997). Este conceito tornou-se o mais difundido do mundo, e permanece útil e utilizado até os dias atuais.

Todavia, na última década, os avanços teóricos e tecnológicos (como as técnicas de biologia molecular) permitiram entender melhor o papel do componente biológico do solo. Atualmente, sabe-se que a grande maioria dos processos que ocorrem no solo é mediada de forma direta ou indireta pela biota do solo. Assim, ao compreender o solo como um ecossistema vivo, que abriga 25% da biodiversidade do planeta,

iniciou-se uma transição do termo qualidade para saúde do solo. Com isso, o solo, como uma entidade viva multifuncional que sustenta a vida, passa a ter direitos de ter sua saúde protegida e restaurada (LAL, 2019). Embora qualidade do solo e saúde do solo sejam termos muitas vezes utilizados como sinônimos, Lehmann et al. (2020) argumentam que o escopo da saúde do solo se estende além da saúde humana, para metas de sustentabilidade mais amplas, que incluem a saúde do planeta (por exemplo, perda de biodiversidade, contaminação de solo e água, mudanças climáticas, dentre outras), enquanto o escopo da qualidade do solo geralmente se concentra no ecossistema e em serviços referentes ao ser humano. Finalmente, saúde do solo é um conceito que facilita a comunicação e a conscientização da sociedade sobre a relevância dos solos saudáveis para a obtenção de plantas, animais, pessoas e ecossistemas mais saudáveis, gerando um planeta saudável.

Apesar de bastante útil e difundido, o conceito de saúde do solo ainda está em debate e, com isso, mantém-se em constante evolução (POWLSON, 2020; JANZEN et al., 2021; HARRIS et al., 2022).

3. SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS AGRÍCOLAS

Em sistemas agrícolas, a saúde do solo pode ser definida como a "capacidade contínua de um solo de manter-se equilibrado sob o ponto de vista químico, físico e biológico, sustentando processos e funções que proporcionem um ambiente favorável para que as plantas expressem seu máximo potencial genético" (CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). Solos saudáveis apresentam maior teor de carbono e biodiversidade, favorecendo processos de retenção, ciclagem e mineralização de nutrientes, infiltração, condutividade hidráulica e retenção de água, aeração, agregação, supressão de pragas e doenças, os quais favorecem o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

Portanto, plantas cultivadas em solos saudáveis tornam-se mais resistentes e resilientes a estresses bióticos e abióticos (ambientais), resultando em maior produtividade e estabilidade da produção ao longo do tempo (Figura 4). Desta forma, espera-se que haja um incremento de produtividade em solos saudáveis, comparados aos não saudáveis, tanto em anos que apresentam condições climáticas favoráveis quanto desfavoráveis (por exemplo, com ocorrência de estiagem). Todavia, as diferenças de produtividade são amplificadas nos anos com condições desfavoráveis, onde solos saudáveis sustentam condições mais favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas, tais como: maior teor de matéria orgânica, maior retenção de água e nutrientes, maior atividade biológica e estrutura que permite maior crescimento radicular (Figura 4).

Essa teoria tem sido provada em diferentes culturas agrícolas e condições edafoclimáticas. Por exemplo, na safra de soja 2019/2020 ocorreram perdas importantes de produtividade no Rio Grande do Sul devido a uma estiagem prolongada. Para avaliar a resposta da soja à estiagem, Fiorin et al. (2020) avaliaram a diferença de produtividade da cultura em talhões com alta e baixa qualidade do sistema plantio direto em dezenas de propriedades rurais. Os autores concluíram que os talhões que apresentavam alta qualidade do plantio direto (adoção de rotação de culturas, plantas de cobertura, semeadura em contorno e correção do solo) e, conseqüentemente, solos mais saudáveis, produziram, em média, 13,7 sacas ha^{-1} a mais do que os talhões com baixa qualidade do sistema.

Cherubin et al. (2021) avaliaram 12 experimentos na Região Centro-Sul do Brasil, verificando que a remoção excessiva da palhada para a produção de bioenergia reduziu a saúde do solo e, por consequência, comprometeu a produtividade da cultura da cana. Em outro estudo realizado na China, Qiao et al. (2022) concluíram que solos de alta qualidade aumentaram a resistência das culturas (trigo, milho e arroz) à variabilidade climática, resultando em pro-

ductividade média mais alta ($10,3 \pm 6,7\%$) e maior estabilidade da produção (diminuindo a variabilidade em $15,6 \pm 14,4\%$). Portanto, fica evidente nos vários estudos que a saúde do solo é um pilar fundamental para sustentar as produtividades em anos adversos e proporcionar altas produtividades em anos favoráveis.

A saúde do solo é dinâmica, sendo influenciada pelo uso da terra e pelos sistemas agrícolas, principalmente pelo manejo. Em um ecossistema natural, tende a manter-se estável, alterando-se raramente, apenas como resultado de eventos extremos (como queimadas e deslizamentos). Com a remoção da vegetação natural para fins agrícolas, o equilíbrio do ecossistema é severamente alterado, e a saúde do solo flutuará conforme o novo uso for alterando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Por isso, a saúde do solo em sistemas agrícolas está relacionada com uma avaliação integrada de atributos (indicadores) químicos, físicos e biológicos, que sejam dinâmicos e sensíveis às alterações de manejo na camada superficial do solo (aproximadamente 0–30 cm).

A saúde do solo difere de outros conceitos, como o antigo conceito de qualidade do solo, relacionado apenas à produtividade das culturas, ou ainda ao conceito de ambiente de produção. A saúde do solo é relativa e relaciona-se aos atributos de cada solo individualmente. Propriedades intrínsecas ligadas aos cinco fatores de formação do solo (clima, organismos, relevo, material de origem e tempo) regem as tendências nos valores dos indicadores utilizados (KARLEN et al., 2001). Portanto, solos com características intrínsecas muito distintas apresentam tendências numéricas divergentes que não refletem uma comparação do estado de saúde atual do solo, mas sim da qualidade permanente do solo (Figura 5).

Cherubin et al. (2021) encontraram índices de saúde do solo consistentemente mais baixos em solos arenosos, comparados aos solos argilosos (Figura 6). Todavia, a diferença na comparação entre os tipos de solo não refletiu a mudança

de manejo, mas os fatores intrínsecos dos solos. Para os indicadores selecionados nos estudos, solos arenosos tendem a ter valores que serão transformados em notas mais baixas. Por exemplo, solos arenosos têm densidade maior que a de solos argilosos, devido à menor porosidade intrapartículas e, conseqüentemente, maior densidade de partículas. Por esse motivo, a densidade dos solos argilosos varia de 0,9 a 1,3 g cm^{-3} e a de solos arenosos de 1,3 a 1,8 g cm^{-3} .

No cálculo do índice geral, os valores de densidade serão transformados utilizando-se uma curva de interpretação conhecida como “menos é melhor”, que atribui notas mais altas aos menores valores

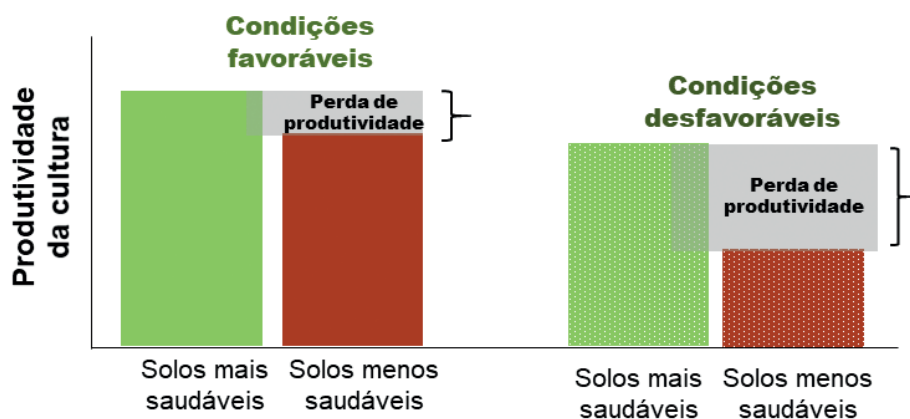


Figura 4. Representação esquemática do impacto da saúde do solo na produtividade das culturas.

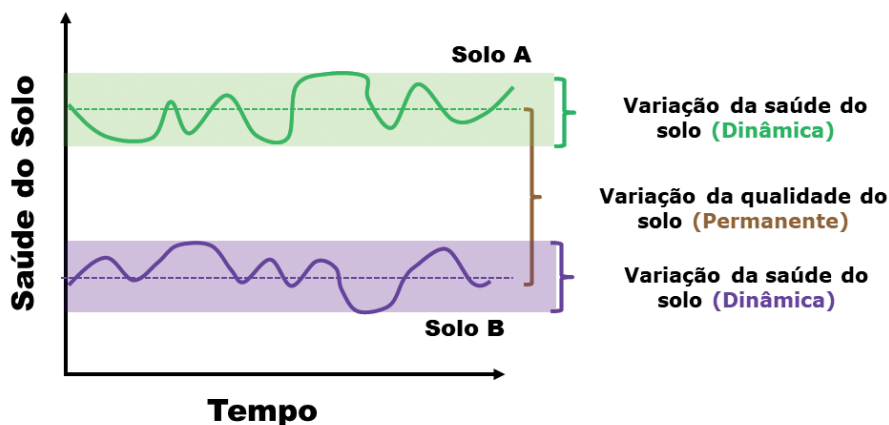


Figura 5. A variação na qualidade permanente dos solos é estática, resultante dos fatores de formação, enquanto a saúde do solo é dinâmica e resultante do uso e manejo.

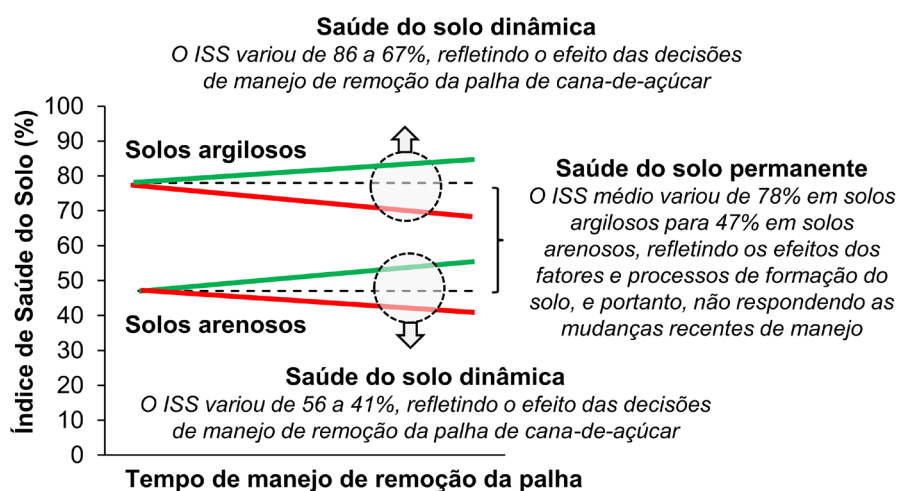


Figura 6. Variações de saúde do solo devido à remoção da palha da cana-de-açúcar, para solos argilosos e arenosos.

Fonte: Adaptada de Cherubin et al. (2021).

medidos. Nesse caso, os solos arenosos receberão notas mais baixas, porque os valores de densidade mais altos serão considerados “piores” que os dos solos argilosos, mais baixos. Somados aos outros indicadores utilizados (pH, P, K e carbono orgânico do solo), para três dos quais os solos arenosos também tendem a apresentar notas menores, as notas de densidade contribuirão para diminuir o valor do índice. Essa comparação é útil para demonstrar que solos arenosos são, no geral, mais vulneráveis, e devem ser manejados de forma apropriada, levando-se em conta suas propriedades intrínsecas. Todavia, quando se deseja avaliar isoladamente o efeito do manejo sobre a saúde do solo, a comparação mais adequada é entre solos com características semelhantes quanto a granulometria, espessura, clima e relevo. Dessa forma, é possível detectar a mudança na saúde, que é dinâmica, em vez dos efeitos dos fatores de formação, que são permanentes (CHERUBIN et al., 2021).

4. COMPONENTES DA SAÚDE DO SOLO – DO LOCAL AO GLOBAL

As variações de saúde do solo causadas por alterações do uso da terra e pelo manejo ocorrem devido a alterações simultâneas sobre os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos (KARLEN et al., 2001; CHERUBIN; SCHIEBELBEIN, 2022). A definição de saúde do solo leva em conta que as propriedades do solo são, em sua maioria, inter-relacionadas. A porosidade do solo, por exemplo, é um aspecto físico que regula o comportamento hídrico do solo, mas também é habitat para os organismos responsáveis pela ciclagem de matéria orgânica e nutrientes (KRAVCHENKO; GUBER, 2017). Os bioporos formados por membros da macrofauna, como as minhocas, são importantes para a percolação de água no solo e para o crescimento de raízes em camadas mais profundas, aumentando a quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas (TOMLIN et al., 1995; ATHMANN et al., 2013). O processo de formação de agregados envolve a aproximação física das partículas minerais do solo e depende da presença de elementos flocculantes, como o cálcio, mas também de minerais, como os óxidos de ferro e alumínio, e do componente biológico do solo – matéria orgânica, microrganismos e raízes das plantas – para cimentação e manutenção de agregados estáveis (WUDDIVIRA; CAMPS-ROACH, 2007). Da mesma forma, as funções do solo são compostas por processos integrados que dependem simultaneamente das interações das propriedades físicas, químicas

e biológicas do solo (Figura 7). Portanto, o equilíbrio das propriedades físicas, químicas e biológicas sustenta a multifuncionalidade do solo.

As múltiplas funções do solo refletem seu status de ecossistema vivo, e, em um solo saudável, suas diferentes funções, embora estejam ocorrendo dinamicamente, devem refletir simultaneamente seu status relativo à saúde do solo. Um solo equilibrado é capaz de prover múltiplos serviços ecossistêmicos, definidos como benefícios que os ecossistemas fornecem aos seres humanos, de forma direta ou indireta (FISHER et al., 2009). De forma geral, os serviços ecossistêmicos são classificados como serviços de suporte, regulação, provisão e culturais (PEREIRA et al., 2018). Os solos são provedores de alimento, fibras, energia e matéria-prima para todos os ramos da atividade humana, desde a siderurgia até a medicina. Também dão suporte à maioria das atividades culturais humanas, além de preservarem

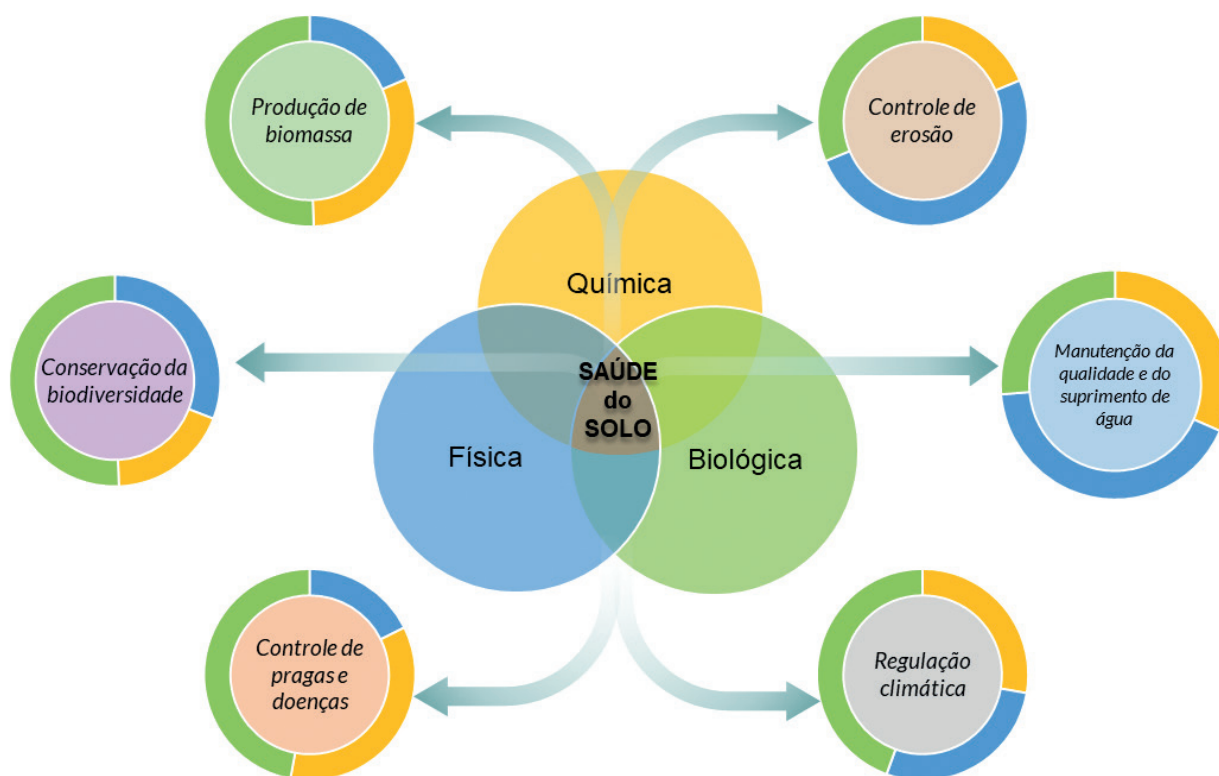


Figura 7. A saúde do solo reflete a capacidade do solo de exercer continuamente suas funções, e depende do equilíbrio entre suas propriedades físicas e químicas e da diversidade e abundância de organismos vivos.

o patrimônio geológico e arqueológico, conservando o passado do planeta e da humanidade (ADHIKARI; HARTEMINK, 2016). E, por fim, os solos são essenciais para a regulação de processos que sustentam a vida das pessoas, e de todos os seres vivos, desde a escala microscópica até a planetária (BANWART et al., 2019). Como reservatório de biodiversidade e de carbono, os solos da Terra são responsáveis pela regulação de ciclos biológicos com atribuições tão distintas como controle da população de patógenos e regulação climática.

Sobre as múltiplas funções do solo saudável está apoiada a sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos que, por sua vez, são vitais para a sobrevivência e prosperidade da humanidade. Devido ao status do solo como ecossistema fundamental para a existência da humanidade, cresce sua importância nas agendas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS das Nações Unidas (2015-2030) (Figura 8). Além disso, a manutenção de solos saudáveis e a restauração de solos degradados são reconhecidos como objetivos fundamentais para grandes iniciativas, como Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas (2021-2030), Solos Vivos das Américas, Coalizão de Ação para a Saúde dos Solos (CA4SH), entre outras. Assim, os agricultores, como zeladores e guardiões de centenas de milhões de hectares de solo, devem ocupar um papel de protagonistas nesse desafio de resgate e preservação da saúde dos solos produtivos do planeta.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Saúde do solo é a capacidade do solo de desempenhar suas funções, as quais são vitais para nossa sobrevivência na Terra. Desta forma, definir e implementar estratégias de preservação e restauração da saúde do solo é uma das agendas prioritárias para o século XXI. Saúde do solo é o principal pilar para produzirmos mais e de forma mais estável e sustentável ao longo dos anos. Portanto, o conceito de saúde do solo está diretamente relacionado aos novos modelos de agricultura, denominados de agricultura sustentável, agricultura de baixo carbono e/ou agricultura regenerativa. Desta forma, solos saudáveis são a peça-chave para o combate de grandes problemas globais, como insegurança alimentar e mudanças climáticas.

Na última década, a saúde do solo tem sido uma das áreas mais pesquisadas e discutidas dentro da Ciência do Solo. No Brasil, tem-se gerado avanços importantes nesta área, apesar do número ainda reduzido de grupos de pesquisas dedicados à temática. Portanto, trata-se de uma área muito promissora, tanto do ponto de vista de pesquisa, desenvolvimento e inovação, quanto da aplicação prática/comercial pelos produtores, consultores e empresas do agro-negócio. Ainda há uma série de desafios a serem superados, como, por exemplo, o estabelecimento de protocolos de quantificação e monitoramento da saúde do solo no campo, incluindo amostragem de solo, indicadores e análises laboratoriais e ferramentas para interpretação dos resultados.



Figura 8. Saúde do solo e as interconexões entre funções do solo, provisão de serviços ecossistêmicos e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas.

Fonte: Adaptada de Smith et al. (2021).

Todavia, o conhecimento científico deve continuar pavimentando o caminho da inovação para que tenhamos soluções no mercado que contribuam efetivamente para melhoria da saúde do solo e, com isso, uma agricultura mais produtiva, resiliente e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services—A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 2016.
- ATHMANN, M.; KAUTZ, T.; PUDE, R.; KÖPKE, U. Root growth in biopores – evaluation with in situ endoscopy. **Plant and Soil**, v. 371, p. 179–190, 2013.
- BANWART, S. A.; NIKOLAIDIS, N. P.; ZHU, Y. G.; PEACOCK, C. L.; SPARKS, D. L. Soil functions: connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p. 333–359, 2019.
- CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. **Saúde do solo: Múltiplas perspectivas e percepções**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. v. 1. 126 p.
- CHERUBIN, M. R. et al. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 163, e113315, 2021.
- DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. 77 p.
- DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. 410 p.
- FIORIN, J.; WYZYKOWSKI, T.; FERNANDES, A.; CORASSA, G. Construindo Sistema Resilientes: a chave para o enfrentamento da estiagem. **ECR Soja RS 2019/2020. Ensaio de Cultivares em Rede**, n. 2, p. 48–50, 2020.
- FISHER, B.; TURNER, K. R.; MORLING, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. **Ecological Economics**, v. 68, n. 3, p. 643–653, 2009.
- FORTUNA, A. The soil biota. **Nature Education Knowledge**, v. 3, n. 10, p. 1, 2012.
- HARRIS, J.; EVANS, D. L.; MOONEY, S. J. A new theory for soil health. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 4, e13292, 2022.
- JANZEN, H. H.; JANZEN, D. W.; GREGORICH, E. G. The 'soil health' metaphor: Illuminating or illusory? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 159, e108167, 2021.
- KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; DORAN, J. W. Soil quality: current concepts and applications. **Advances in Agronomy**, v. 74, p. 1–40, 2001.
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 4–10, 1997.

KRAVCHENKO, A. N.; GUBER, A. K. Soil pores and their contributions to soil carbon processes. **Geoderma**, v. 287, p. 31–39, 2017.

LAL, R. Rights-of-soil. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 74, n. 4, p. 81A-86A, 2019. doi:10.2489/jswc.74.4.81A

LEHMANN, J.; BOSSIO, D. A.; KÖGEL-KNABNER, I.; RILLIG, M. C. The concept and future prospects of soil health. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 10, p. 544–553, 2020.

MAUSEL, P. W. Soil quality in Illinois — an example of a soils geography resource analysis. **The Professional Geographer**, v. 23, n. 2, p. 127–136, 1971.

MONTANARELLA, L. et al. **Status of the world's soil resources** – Main Report. Rome: FAO, 2015. 607 p.

NRC. National Research Council. **Soil and water quality: An agenda for agriculture**. Washington, DC: National Academies Press; 1993. 542 p.

PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M.; BREVIK, E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 5, p. 7–13, 2018.

POWLSON, D. S. Soil health — Useful terminology for communication or meaningless concept? Or both? **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 7, n. 3, p. 246–250, 2020.

QIAO, L. et al. Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 6, p. 574–580, 2022.

SHEN, R. F.; TENG, Y. The frontier of soil science: Soil health. **Pedosphere**, v. 33, n. 1, p. 6–7, 2023.

SIMON, C. D. P. et al. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0210103, 2022.

SMITH, P. et al. Soil derived Nature's Contributions to People and their contribution to the UN Sustainable Development Goals. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 376, e20200185, 2021.

TOMLIN, A. D.; SHIPITALO, M. J.; EDWARDS, W. M.; PROTZ, R. Earthworms and their influence on soil structure and infiltration. **Earthworm Ecology and Biogeography in North America**, v. 33, p. 159–183, 1995.

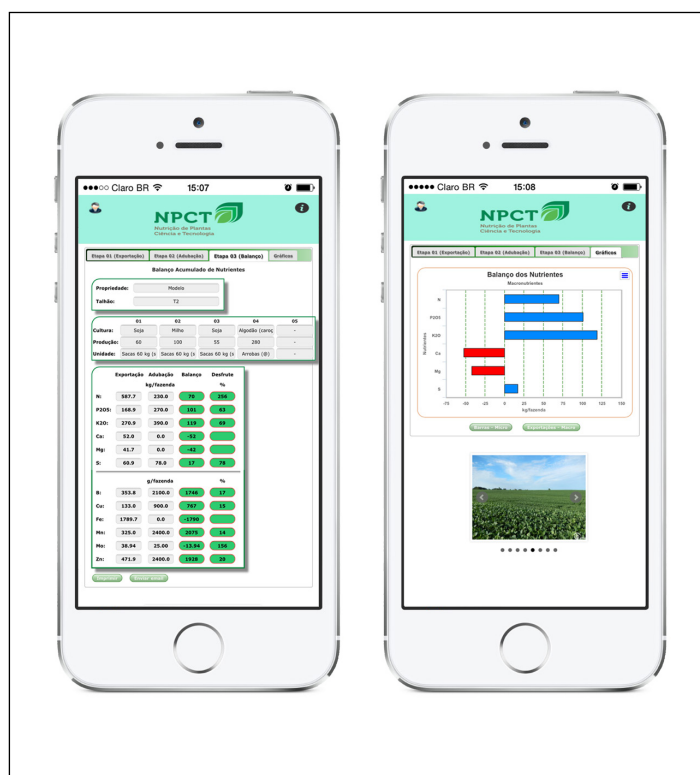
WUDDIVIRA, M. N.; CAMPS-ROACH, G. Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. **European Journal of Soil Science**, v. 58, n. 3, p. 722–727, 2007.

BALANÇO DE NUTRIENTES

(Cortesia temporária da NPCT)

O balanço de nutrientes nas culturas (BNC) é uma das ferramentas para avaliação do uso de fertilizantes na agricultura e representa a diferença entre a saída de nutrientes pela colheita (exportação) e sua entrada no sistema (adubação). Saldos negativos, nos quais a exportação excede a adubação, levam à diminuição da fertilidade do solo e, eventualmente, à redução da produtividade, uma vez que a disponibilidade de nutrientes cai abaixo dos níveis críticos. Saldos positivos geralmente estão associados ao aumento da fertilidade do solo e podem, eventualmente, representar um elevado risco de perda de nutrientes para o ambiente.

A NPCT, acreditando que a principal função do manejo nutricional é facilitar o equilíbrio entre exportações e adições de nutrientes em níveis que suportem o crescimento ideal das culturas e a mínima perda de nutrientes, desenvolveu esta ferramenta visando facilitar o acesso de agrônomos, consultores, produtores e técnicos às informações de exportação e balanço de nutrientes em 18 culturas cultivadas no Brasil.





ARTIGO TÉCNICO 3

Adubação Nitrogenada com Inibidor de Urease de Nova Geração na Cultura do Trigo



Ezequiel Helbig Pasa¹, Verônica Lemos Vargas¹, Robson Bosa dos Reis², Pablo Abelaira³, Ruan Borges Silveira², Filipe Selau Carlos⁴

1. INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um cereal de múltiplos propósitos e é cultivado em uma extensa área em todo o mundo, ocupando a maior área de plantio, entre todos os cereais (USDA, 2023). A produção de trigo no Brasil é predominantemente realizada nos estados da região Sul do país, abrangendo uma área cultivada de aproximadamente 3,3 milhões de hectares e uma produção estimada em cerca de 9,5 milhões de toneladas na safra 2022/23. No entanto, a demanda interna por trigo supera a produção nacional, o que resulta na importação de aproximadamente 5,6 milhões de toneladas do cereal anualmente (CONAB, 2023).

Com a utilização de cultivares modernas geneticamente aprimoradas, a cultura do trigo demonstra um grande potencial de produção. Esse potencial está diretamente relacionado à utilização de adubação nitrogenada, a qual desem-

penha um papel fundamental na obtenção do rendimento máximo (BAZZO et al., 2020). O nitrogênio (N) é um elemento fundamental para as culturas agrícolas, especialmente em gramíneas, devido ao fato de ser um componente estrutural essencial das biomoléculas. O N desempenha funções vitais no metabolismo das plantas e na síntese de proteínas, que são essenciais para a sobrevivência, crescimento e desenvolvimento adequado das plantas (HARPER, 1994).

O adequado suprimento de N às plantas é fundamental, visto que a escassez do elemento restringe tanto a qualidade quanto a produtividade dos grãos. Por outro lado, doses excessivas podem levar ao acamamento, resultando em diminuição da produtividade e acarretando prejuízos financeiros desnecessários ao agricultor, além de ter potencial para causar impactos ambientais negativos, como a lixiviação de nitrato para os lençóis de água (BRZEZINSKI et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2010).

Abreviações: Al = alumínio; Ca = cálcio; CTC = capacidade de troca de cátions; H = hidrogênio; K = potássio; Mg = magnésio; MO = matéria orgânica; N = nitrogênio; NBPT = N-(n-butil) tiofosfórico triamida; P = fósforo.

¹ Engenheiro Agrônomo, estudante de Pós-Graduação, PPG MACSA, Universidade Federal de Pelotas – UFPel, Pelotas, RS; email: ezequelpasa@gmail.com

² Estudante de Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

³ Estudante de Graduação em Gestão Ambiental, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

⁴ Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS; email: filipeselaucarlos@hotmail.com

No solo, o N está sujeito a importantes processos de perdas, como lixiviação, desnitrificação e volatilização de NH_3 . Cada processo de perda apresenta diferentes intensidades, que variam de acordo com as peculiaridades dos diversos sistemas de produção, com o clima, com o manejo da adubação e com outros fatores. O fertilizante nitrogenado mais amplamente utilizado é a ureia, em razão do alto teor de N e do menor custo. Contudo, a ureia sofre perdas significativas por volatilização de NH_3 , podendo variar entre 16% e 78% do N aplicado (CANTARELLA et al., 2008). Esse processo de perda ocorre após a aplicação do fertilizante na superfície do solo, que resulta na hidrólise da ureia e ocasiona o aumento de pH no entorno do grânulo, que, por sua vez, dependendo das condições ambientais, acarreta em perdas mais ou menos intensas de N-NH_3 (SCIVITTARO et al., 2010; VIERO et al., 2015).

Nesse cenário, fertilizantes que contenham inibidores de urease podem ser uma opção viável para reduzir as perdas decorrentes da volatilização de NH_3 , aumentar o teor de nitrogênio mineral no solo e garantir a nutrição adequada das plantas. Existem diversos aditivos químicos, mas o N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) se destaca entre os demais inibidores de urease disponíveis no mercado. Ao compará-lo com inibidores como benzimidazol e benzoil-tiourea, o NBPT demonstrou ser superior, tanto na redução da quantidade de NH_3 perdida quanto no atraso do pico de volatilização após a aplicação dos insumos (BARBERENA et al., 2019). Apesar de sua eficiência, o NBPT apresenta debilidades associadas à degradação do princípio ativo pela temperatura e pH do solo, o que reduz os efeitos benéficos da molécula, limitando a melhoria da eficiência do uso de N em 5% a 12% (CANTARELLA et al., 2018).

Atualmente, uma nova tecnologia disponível no mercado combina duas moléculas, Duromide e NBPT, demonstrando maior eficácia do produto em relação à utilização isolada de NBPT (CASSIMIRO et al., 2023). A tecnologia Duromide consiste em uma nova molécula, com uma estrutura química diferente do NBPT, projetada para apresentar maior estabilidade aos mais variados tipos de solo e condições climáticas. Diversos trabalhos têm reportado os benefícios da utilização de ureia + NBPT em culturas de sequeiro, como milho (ABALOS et al., 2014) e trigo (PRANDO et al., 2012; ESPINDULA et al., 2014; GALINDO et al., 2017). Em milho, a utilização associada de Duromide reduziu as perdas de N em 33% em relação à utilização somente de NBPT (CASSIM et al., 2021).

Diante destes fatos, nota-se que há uma grande lacuna nas informações sobre o fornecimento de N para a cultura do trigo utilizando-se fertilizantes nitrogenados associados ao inibidor de urease Duromide e sua influência na produção e qualidade dos grãos da cultura na metade sul do Rio Grande do Sul. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi avaliar a produtividade e o teor de proteína bruta de grãos de trigo utilizando-se fertilização nitrogenada com ureia convencional e ureia + NBPT + Duromide (doravante mencionada apenas como “ureia + Duromide”) no Sul do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro Agropecuário da Palma, Fazenda Experimental da Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, RS, coordenadas 31°48'07,9" S e 52°30'17,9" L e altitude de 45 m ao nível do mar, no ano agrícola de 2021/2022. O solo da área é classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico típico (STRECK et al., 2018). A semeadura foi realizada na primeira quinzena de junho. Foi utilizada a cultivar TBIO Ponteiro, com espaçamento de 17 cm entre linhas, na densidade de semeadura de 100 kg ha⁻¹. A adubação de base foi realizada na linha de semeadura, sendo de 10 kg ha⁻¹, 40 kg ha⁻¹ e 40 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. O experimento foi realizado utilizando-se um fatorial duplo, em que o fator 1 correspondeu à fonte de N e o fator 2 à dose de N aplicada. As fontes utilizadas foram: (1) ureia convencional (46-00-00) e (2) ureia + Duromide (46-00-00). As doses foram de 0, 40 kg ha⁻¹, 80 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com 4 repetições, e a unidade experimental consistiu de parcelas compostas por nove linhas de quatro metros, totalizando 6,12 m². As características químicas do solo, na profundidade de 0–20 cm, foram obtidas pela análise de solo antes da implantação do experimento: MO = 1,5%; pH (H₂O) = 6,5; P (Mehlich-1) = 11,5 mg dm⁻³; H+Al = 1,4 cmol_c dm⁻³; K = 90 mg dm⁻³; Ca = 2,3 cmol_c dm⁻³; Mg = 1,0 cmol_c dm⁻³; CTC = 4,9 cmol_c dm⁻³. Os tratos culturais foram conduzidos de acordo com as recomendações de manejo da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (CASTRO et al., 2018). A adubação nitrogenada foi parcelada em duas aplicações de cobertura, sendo uma no estágio vegetativo V3 e a outra no final do período vegetativo.

A produtividade de grãos foi calculada por meio da colheita de 2 metros lineares das 7 linhas centrais, desprezando-se as bordaduras, e totalizando uma área útil de 2,38 m². Após a colheita, as amostras foram devidamente identificadas e submetidas à trilha para a remoção de impurezas, bem como para a determinação do peso e umidade. Esses dados foram utilizados para o cálculo da produtividade com base em um teor de umidade de 13%.

O teor de proteína foi determinado por meio da moagem de uma amostra de grãos de cada unidade experimental, seguida de digestão ácida a alta temperatura. O extrato resultante da digestão foi destilado utilizando-se o método de Kjeldahl. Em seguida, o teor de N foi multiplicado por 6,25 para a conversão em proteína (HASTENPFLUG et al., 2011).

Para verificar a normalidade da distribuição dos dados, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk. Quando os pressupostos de normalidade foram atendidos, os dados foram submetidos à análise de variância. Nos casos em que houve significância estatística ($p < 0,05$), utilizou-se o teste de médias de LSD a 10%. Todas as análises estatísticas foram conduzidas utilizando-se o software estatístico R® (R CORE TEAM, 2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade de trigo foi estatisticamente superior com a utilização de ureia + Duromide, em relação à utilização de ureia convencional, na média das dosagens de N (Figura 1).

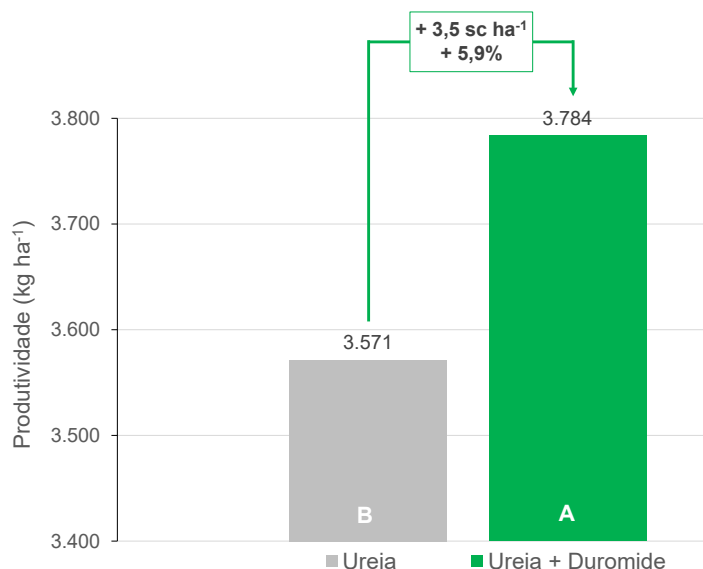


Figura 1. Produtividades de trigo, cultivar TBIO Ponteiro, obtidas com a aplicação de ureia e ureia + Duromide, na média de três doses de N (40 kg ha⁻¹, 80 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹), aplicadas 50% em V3 e 50% no final do ciclo vegetativo. Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística ($p < 0,10$).

Este incremento é decorrente da melhor eficiência de uso do N, visto que os inibidores de urease reduzem as perdas de NH₃ por volatilização, contribuindo para melhor suplementação de N para a cultura. Em relação ao teor de proteína bruta (Figura 2), o tratamento com Duromide foi estatisticamente superior ao da ureia convencional, promovendo um incremento de 9,1% no teor de proteína. O aumento do teor de proteína nos grãos está relacionado à melhor eficiência da adubação nitrogenada, resultando em suplementação de N mais adequada durante todo o ciclo da cultura.

A ureia convencional sofre maiores perdas de NH₃ por volatilização porque, após a sua aplicação na superfície do solo, ocorre aumento do pH no entorno dos grânulos do fertilizante em valores de 8,5 a 8,8, contribuindo para a formação de NH₃ (VIERO et al., 2015). Já a ureia estabilizada com inibidores de urease apresenta diminuição e atraso no pico de volatilização, o que proporciona maior chance de o fertilizante ser incorporado ao solo por meio de chuva ou irrigação. Isso ocorre porque os inibidores ocupam o sítio ativo da urease, o que reduz a hidrólise da ureia aplicada na superfície do solo. Essa redução no processo de volatilização resulta em maior eficiência da adubação nitrogenada (WATSON et al., 2008).

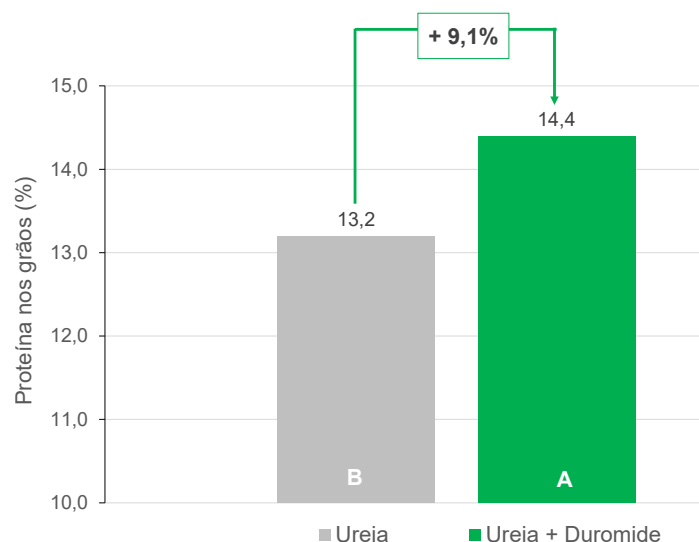


Figura 2. Teores de proteína nos grãos de trigo, cultivar TBIO Ponteiro, com a utilização de ureia e ureia + Duromide, na média de três doses de N (40 kg ha⁻¹, 80 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹), aplicadas 50% em V3 e 50% no estágio final vegetativo. Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística ($p < 0,10$).

O NBPT, inibidor de urease mais conhecido, apresenta algumas limitações, como curta duração de inibição efetiva e vida útil limitada, especialmente em solos ácidos e climas quentes, como os das regiões tropicais, que intensificam sua degradação. No Brasil, onde as culturas são cultivadas em solos ácidos, em condições de umidade e alta temperatura, a reação de hidrólise da ureia pode ocorrer dentro de 2 a 4 dias (SOARES et al., 2012), enquanto em regiões de clima temperado, devido os solos serem mais frios, pode levar de 10 a 15 dias (WATSON et al., 2008). Nesse contexto, a indústria agrícola tem enfrentado o desafio de melhorar os inibidores de urease existentes e desenvolver novas moléculas ou combinações para reduzir a perda de N (CANTARELLA et al., 2018). Assim, o Duromide foi desenvolvido com o objetivo de fornecer maior estabilidade à ureia, ampliando a proteção contra perdas por volatilização. Com isso, os resultados de desempenho do Duromide são positivos, pois a maior eficácia desse inibidor e sua associação ao NBPT permitem ampliar a capacidade de inibir a urease por um período mais prolongado, maximizando o suprimento de nitrogênio disponível no solo para as plantas.

4. CONCLUSÕES

O uso de ureia aditivada com Duromide – 50% da dose no estágio V3 e 50% no final do período vegetativo – aumentou a produtividade e o teor de proteína do trigo em 5,9% e 9,1%, respectivamente, em relação ao uso da ureia convencional.

Dessa forma, em lavouras de trigo, é promissora a utilização do Duromide como inibidor da urease, por impactar de forma positiva na melhoria da qualidade e produtividade dos grãos de trigo.

REFERÊNCIAS

- 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. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 189, p. 136–144, 2014.
- BARBERENA, I. M.; ESPINDULA, M. C.; ARAÚJO, L. F. B.; MARCOLAN, A. L. Use of urease inhibitors to reduce ammonia volatilization in Amazonian soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 54, e00253, 2019.
- BAZZO, J. H. B.; GARCIA, E. B.; CARDOSO, C. P.; ZUCARELI, C. Qualidade fisiológica de sementes de trigo em resposta a diferentes doses de nitrogênio via solo e foliar. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 36, n. 70, p. 145–156, 2020.
- BRZEZINSKI, C. R.; ZUCARELI, C.; HENNING, F. A.; ABATI, J.; PRANDO, A. M.; HENNING, A. A. Nitrogênio e inoculação com *Azospirillum* na qualidade fisiológica e sanitária de sementes de trigo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 3, p. 257–265, 2014.
- CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19–27, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>>. Acesso em: 19 maio 2023.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 397–401, 2008.
- CASSIM, B. M. A. R.; KACHINSKI, W. D.; BESEN, M. R.; CONEGLIAN, C. F.; MACON, C. R.; PASCHOETO, G. F.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Duromide increase NBPT efficiency in reducing ammonia volatilization loss from urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210017, 2021.
- CASSIMIRO, J. B.; OLIVEIRA, C. L. B.; BONI, A. S.; DONATO, N. L.; MEIRELLES, G. C.; SILVA, J. F.; RIBEIRO, I. V.; HEINRICHS, R. Ammonia volatilisation and marandu grass production in response to enhanced-efficiency nitrogen fertilizers. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 837–852, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4395/13/3/837>>. Acesso em: 30 maio 2023.
- CASTRO, R. L. et al. (Ed.). **Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2019**. Brasília, DF: Embrapa Trigo, 2018. 240 p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Brasília, DF, v. 10 – Safra 2022/23, n. 8 – Oitavo levantamento, p. 1–106, maio 2023. Disponível em: <file:///C:/Users/user/Downloads/E-book_BoletimZdeZSafasZ-Z8oZlevantamento_1.pdf>. Acesso em: 25 maio 2023.
- ESPINDULA, M. C.; ROCHA, V. S.; SOUZA, M. A.; CAMPANHARO, M.; PIMENTEL, A. J. B. Urease inhibitor (NBPT) and efficiency of single or split application of urea in wheat crop. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n. 2, p. 273–270, 2014.
- GALINDO, F. S.; FILHO, M. C. M. T.; BUZETTI, S.; SANTINI, J. M. K.; ALVES, C. J.; LUDKIEWICZ, M. G. Z. Wheat yield in the Cerrado as affected by nitrogen fertilization and inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 9, p. 794–805, 2017.
- HARPER, J. E. Nitrogen metabolism. In: BOOTE, K. J. et al. (Ed.). **Physiology and determination of crop yield**. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1994. Cap. 11A, p. 285–302.
- HASTENPFLUG, M.; BRAIDA, J. A.; MARTIN, T. N.; ZIECH, M. F.; SIMIONATTO, C. C.; CASTAGNINO, D. S. Cultivares de trigo duplo propósito submetidos ao manejo nitrogenado e a regimes de corte. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 63, n. 1, p. 196–202, 2011.
- PRANDO, A. M.; ZUCARELI, C.; FRONZA, V.; OLIVEIRA, E. A. P.; PANOFF, B. Formas de ureia e doses de nitrogênio em cobertura na qualidade fisiológica de sementes de trigo. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, DF, v. 34, n. 2, p. 272–279, 2012.
- TEIXEIRA, M. C. M. F.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; BENETT, C. G. S. Doses, fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo irrigado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 8, p. 797–804, 2010.
- R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: <<http://www.scirp.org>>. Acesso em: 25 abr. 2023.
- USDA. United States Department of Agriculture. Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>. Acesso em: 24 maio 2023.
- SCIVITTARO, W. B.; GONÇALVES, D. R. N.; DO VALE, M. L. C.; RICORDI, V. G. Nitrogen losses by ammonia volatilization and lowland rice response to NBPT urease inhibitor-treated urea. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1283–1289, 2010.
- SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M. L. C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 52, p. 82–89, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.019>>. Acesso em: 25 maio 2023.
- STRECK, E. V.; FLORES, C. A.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. 3. ed., rev. e ampl. Porto Alegre: Emater-RS/Ascar, 2018. 252 p.
- VIERO, F.; BAYER, C.; COSTA BEBER VIEIRA, R.; CARNIEL, E. Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1737–1743, 2015.
- WATSON, C. J.; AKHONZADA, N. A.; HAMILTON, J. T. G.; MATTHEWS, D. I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Use and Management**, Belfast, v. 24, p. 246–253, 2008.



DIVULGANDO A PESQUISA

Acúmulo de Biomassa e Curva de Crescimento em Cana-de-açúcar Fertirrigada com Doses de Nitrogênio¹

Oriel Tiago Kölln², Glauber José de Castro Gava³, Eduardo Mariano⁴, Heitor Cantarella³, Luiz Eduardo Panutti⁶, Raul Martinez Uribe⁷, Adolfo Bergamo Arlanch⁶, Alexandre Paludetto², Catarinie Diniz Pereira, Paulo Cesar Ocheuze Trivelin⁴

Este trabalho teve como objetivo avaliar a curva de crescimento e o acúmulo de N e de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar em função de doses de nitrogênio aplicadas por gotejamento subsuperficial durante o ciclo de crescimento da cultura. O experimento foi desenvolvido em condições de campo na cidade de Jaú, SP. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de nitrogênio – 50 kg ha⁻¹, 100 kg ha⁻¹, 150 kg ha⁻¹ e 200 kg ha⁻¹ de N – na forma de ureia, além de um tratamento testemunha (sem N), em blocos casualizados e quatro repetições. As doses de N foram aplicadas gradativamente por gotejamento subsuperficial, distribuídas ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar. Os parâmetros biométricos e fisiológicos e o acúmulo de biomassa foram avaliados em cinco épocas de amostragem. As respostas lineares e quadráticas desses parâmetros foram obtidas em função da aplicação de N.

RESULTADOS

- A elevação da dose de N de 100 para 200 kg ha⁻¹ aumentou o acúmulo de biomassa e de N na parte aérea da cana-de-açúcar em 20 Mg ha⁻¹ e 95 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 1).
- A adubação nitrogenada aliada à irrigação por gotejamento subsuperficial aumentou o acúmulo de biomassa e de nitrogênio na parte aérea da cana-de-açúcar, pois o principal mecanismo de movimentação do N no solo é por fluxo de massa, processo que requer água e, consequentemente, maior disponibilidade hídrica, maior absorção de nutrientes e maior acúmulo de biomassa.
- A aplicação de N por gotejamento subsuperficial aumentou todos os parâmetros biométricos, fisiológicos e produtivos da cultura da cana-de-açúcar. Um dos grandes benefícios do manejo fertirrigado é que o N é aplicado gradualmente em pequenas doses durante o ciclo, ocorrendo absorção de N e acúmulo de biomassa ao longo do período. Assim, a demanda do nutriente pela cultura pode ser atendida de forma mais eficiente.

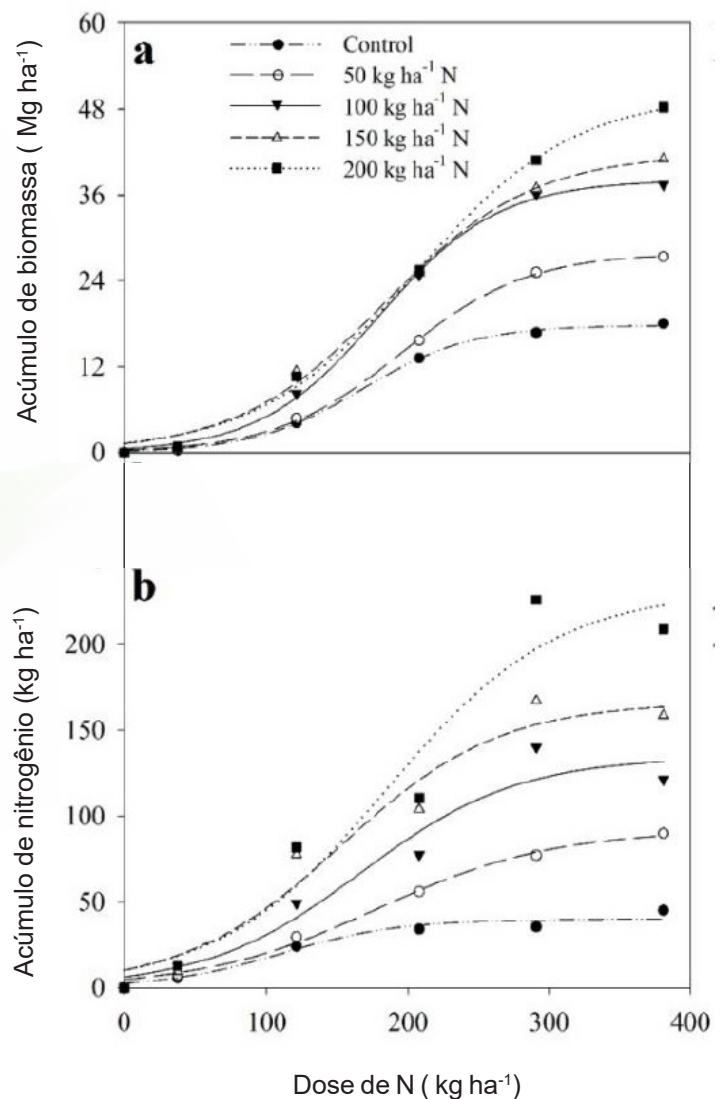


Figura 1. (a) Acúmulo de biomassa (Mg ha⁻¹) e (b) acúmulo de nitrogênio (kg ha⁻¹) em função de doses crescentes de nitrogênio aplicadas por gotejamento subsuperficial na cultura da cana-soca.

¹ Fonte: Australian Journal of Crop Science, v. 17, n. 3, p. 244-253, 2023.

² Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes, PR.

³ Engenheiro Agrônomo, Instituto Agronômico de Campinas – IAC, Campinas, SP.

⁴ Engenheiro Agrônomo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Laboratório de Isótopos Estáveis – CENA, Piracicaba, SP.

⁵ Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Botucatu, SP.

⁶ Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Tupã, SP.



MERCADO DE FERTILIZANTES ESPECIAIS CRESCER 33,2% EM 2022

O mercado de fertilizantes especiais teve mais um período de crescimento em 2022, e encerrou o ano com um crescimento médio de 33,2%, com faturamento R\$ 22,193 bilhões. O dado integra o relatório de inteligência de mercado, publicado na 9ª edição do Anuário da Associação Brasileira de Tecnologia em Nutrição Vegetal (Abisolo).

Fatores como a expansão da adoção dos produtos da indústria pelos agricultores em função do aumento da percepção de valor, o crescimento da área plantada de culturas de grande importância econômica e o valor agregado aos produtos, decorrente dos ganhos tecnológicos incorporados, favoreceram os resultados positivos. O maior investimento em tecnologia, considerando a atratividade dos preços das *commodities* agrícolas, também influenciou o desempenho do setor.

Outro ponto destacado no capítulo de inteligência de mercado do Anuário da Abisolo é o crescimento dos negócios em todas as categorias de produtos, com destaque para os fertilizantes minerais especiais, com o crescimento de 37%, seguidos pelos fertilizantes orgânicos (25,5%) e pelos organominerais (22,7%).

Quando analisado o desempenho dos produtos, considerando o seu modo de aplicação, o maior destaque foi para os produtos para aplicação via solo, que tiveram crescimento de 66,2% em relação ao ano anterior, seguidos pelos de aplicação via folha (22,6%), os para aplicação via sementes (17,9%) e o para aplicação via fertirrigação e hidroponia (3,8%). (ABISOLO)

PRODUÇÃO DE ETANOL DE MILHO AMPLIA COMPETITIVIDADE NO BRASIL

A produção de etanol de milho no Centro-Sul saltou de 37 milhões de litros para 4,4 bilhões de litros em pouco mais de dez anos. A expansão da produção do biocombustível a partir do grão deverá ser ainda maior no atual ciclo, representando 17% do volume total de etanol contra 15% na safra 2022/2023. Dados da Unica (União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia) mostram que Mato Grosso (75%), Mato Grosso do Sul (16%) e Goiás (9%) ampliaram a competitividade do etanol onde antes o cenário era impensável.

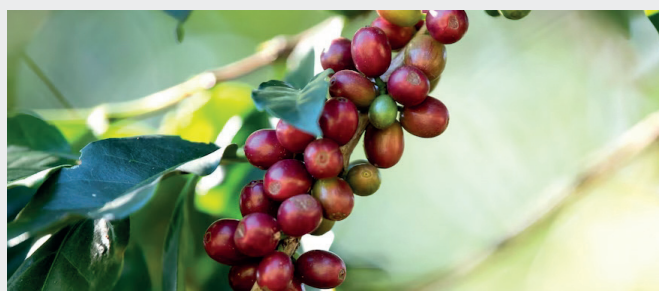
O Brasil é o terceiro produtor de milho no mundo, com mais de 150 milhões de toneladas, e a produção do etanol de milho se diferencia dos demais países pela utilização do milho de segunda safra. (UNICA)

IMPORTÂNCIA DO BORO E DO ZINCO PARA O CAFEIRO

O cuidado com o cafezal envolve os mínimos detalhes: o manejo nutricional do solo reflete na manutenção da produção, mantém o vigor das safras e ajuda a reduzir a bienalidade da cultura. A engenheira agrônoma Thamiris Bandoni Pereira, da Cooperativa dos Cafeicultores da Zona de Três Pontas (Cocatrel), elaborou um pequeno relatório sobre a aplicação e a atuação dos elementos boro e zinco nas plantas de café.

O boro está relacionado à reprodução das plantas e à germinação do pólen, além de estar envolvido na translocação de açúcares, atuando no transporte do elemento das folhas para os outros órgãos da planta. O boro ainda atua na divisão, maturação e na diferenciação celular, além da síntese de celulose e lignina, conferindo maior tolerância do cafeeiro às pragas e doenças. O elemento ainda está diretamente envolvido no metabolismo do cálcio, atuando na formação da parede celular. A deficiência de boro resulta na morte da gema apical, provocando superbrotamento. “A aplicação do boro via solo é a mais eficiente e duradoura, mantendo, normalmente, níveis foliares adequados por 18 meses”, informa o relatório. A dose indicada em cafezais adultos, é de 2 a 6 kg de boro por hectare, de fontes usuais como ácido bórico, bórax e ulexita, com doses menores em solos mais leves.

O zinco, por sua vez, atua como catalisador na formação do triptofano, precursor do ácido indol acético, hormônio responsável pelo crescimento meristemático, influenciando, portanto, no crescimento da parte aérea do cafeeiro. A deficiência de zinco encurta os internódios na extremidade dos ramos, que acabam morrendo. As plantas vão ficando cinturadas, as conhecidas plantas de pescoço pelado. A falta do nutriente também provoca a redução no tamanho dos frutos. As folhas de plantas carentes em zinco ficam pequenas e afiladas. A pulverização foliar é a forma eficiente para suprir a necessidade de zinco, mas a aplicação via solo, na dosagem de até 6 kg por hectare, por ano, também é muito utilizada. (CaféPoint)





CURSOS, SIMPÓSIOS E OUTROS EVENTOS

1. II ENCONTRO DE DIFUSÃO TECNOLÓGICA E SUSTENTABILIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA DA REGIÃO CENTRO-OESTE

Local: Centro de Eventos da Universidade Federal de Goiás, Campus Samambaia, Avenida Esperança, s/n, Goiânia, GO

Data: 20 e 21/JULHO/2023

Informações: José Alves Júnior – UFG
Email: josealvesufg@yahoo.com.br
Website: <https://inovagri.org.br/difusao-goias/>

2. V SIMPÓSIO DO CERRADO: DESAFIOS DA FERTILIDADE DOS SOLOS NA REGIÃO DO CERRADO

Local: Presencial/online – Centro de Convenções, Rua 4, 1400, St. Central Goiânia, GO

Data: 26 e 27/JULHO/2023

Informações: GAPE
E-mail: gape@usp.br
Telefone: (19) 3447-8839
Website: <https://gape-esalq.com.br/simposiocerrado/>

3. XXIII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO (CLACS) XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO (CBCS) – SOLOS FLORIPA 2023

Local: Costão do Santinho Resort, Florianópolis, SC

Data: 30/JULHO a 4/AGOSTO/2023

Informações: Comissão Organizadora
Email: clacscbcs2023.secretaria@gmail.com
Website: <https://www.solosfloripa2023.com.br/>

4. X ENCONTRO NACIONAL DA SOJA

Local: Presencial/online – Rua Euclides Figueiredo, Parque Industrial José Belinati, Londrina, PR

Data: 3 e 4/AGOSTO/2023

Informações: FEALQ
Email: fealq@fealq.org.br
Website: <https://fealq.org.br/eventos/x-encontro-nacional-da-soja/>

5. 5º ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA

Local: Centro de Eventos Ribeirão Shopping, Ribeirão Preto, SP

Data: 7 e 8/AGOSTO/2023

Informações: Embrapa Florestas
Email: expoforest@malinovski.com.br
Website: <https://expoforest.com.br/5o-encontro-brasileiro-de-silvicultura/>

6. II SIMPÓSIO: MANEJO SUSTENTÁVEL DE SOLOS TROPICAIS

Local: Presencial/online – Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Avenida Limeira, 901, Piracicaba, SP

Data: 23 e 24/AGOSTO/2023

Informações: FEALQ
Email: fealq@fealq.org.br
Website: <https://fealq.org.br/eventos/ii-simposio-manejo-sustentavel-de-solos-tropicais/>

7. XV ENCONTRO TÉCNICO ALGODÃO

Local: Presencial/online – Hotel Gran Odara, Avenida Miguel Sutil, n. 8344, Cuiabá, MT

Data: 28 a 30/AGOSTO/2023

Informações: Fundação MT
Telefone: (66) 3439-4100
Email: contato@fundacaomt.com.br
Website: <https://www.fundacaomt.com.br/eventos/xv-encontro-tecnico-algodao-095a>

8. I FÓRUM DE FERTILIZANTES DE MATRIZ ORGÂNICA

Local: PECEGE, Rua Alexandre Herculano, 120 – T6, Vila Monteiro, Piracicaba, SP

Data: 8 e 9/NOVEMBRO/2023

Informações: ABISOLO
Telefone: 19) 3116-1007
Email: contato@abisolo.com.br
Website: <https://matrizorganica.abisolo.com.br/>



GRATUITO

3º SIMPÓSIO ONLINE
SOBRE FLORESTAS DE

22 A 24 DE AGOSTO DE 2023

EUCALIPTO

NPCT.COM.BR/EUCALIPTO

**Transformando a Produção de Eucalipto
com Inovação e Sustentabilidade!**

MÓDULO 1

Produção de Mudas e Melhoramento Genético

MÓDULO 2

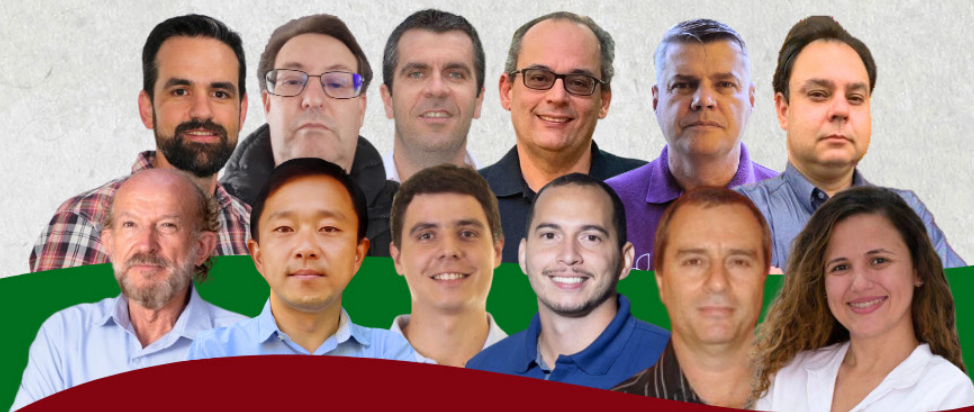
Solos e Fertilização

MÓDULO 3

Manejo, Herbicidas e Qualidade Operacional

 npct.com.br/eucalipto

Renomados Especialistas da Silvicultura Brasileira!



Organização e Realização



Ouro



Prata



Bronze

Híbrido

Online e Presencial em Piracicaba (SP)



19º Curso de Produção de Mudas de Eucalipto

Aprenda as melhores técnicas e práticas para produção de mudas de eucalipto no 19º Curso de Produção de Mudas de Eucalipto. Este renomado curso, coordenado pela RR Agroflorestal e Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia (NPCT), contará com os grandes nomes do setor florestal Allan Camatta Mônico, Ronaldo Luiz Vaz de Arruda Silveira e Cláudio Roberto Ribeiro da Silva.



De 19 a 22 de setembro de 2023



Presencial: Hotel Ibis Styles – Rua Saldanha Marinho, 1515, Piracicaba (SP)
Online: Ao vivo e acesso por 30 dias



Certificação exclusiva



Visita técnica ao Viveiro da Eucatex

Capacite-se com os melhores especialistas e esteja preparado para o sucesso no mercado da produção de mudas de eucalipto.

Inscreva-se agora e garanta sua vaga!



rragroflorestal.com.br



(19) 9 9866-4820

Professores



Allan Camatta
Mônico



Ronaldo Luiz Vaz
de Arruda Silveira



Cláudio Roberto
Ribeiro da Silva



PUBLICAÇÕES RECENTES

ENTENDENDO A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM AMBIENTES TROPICAL E SUBTROPICAL

Editores: Wagner Bettiol et al.; 2023.

Conteúdo: Esta obra foi concebida tendo os seguintes princípios: estabelecer os conceitos que respaldam o estudo da matéria orgânica do solo, demonstrar como eles estão sendo aplicados na prática e dar exemplos de como novas tecnologias podem ser geradas a partir da base conceitual que há disponível no Brasil e em outros países. Inovação, transferência de tecnologias e extensão inovadora são vetores que orientaram os autores deste livro na concepção e estruturação dos capítulos. A base conceitual associada à matéria orgânica é ampla, aborda vários temas e pode impulsionar diferentes setores, notadamente os de tratamentos de resíduos, água, esgoto, o setor de fertilizantes e de condicionadores do solo, o uso de matrizes novas, como insumos para a agricultura, geração de bioinsumos, inoculantes e filtros ambientais.

Preço: gratuito, disponível para *download*

Número de páginas: 788

Editora: Embrapa Meio Ambiente

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1153147>

RELAÇÕES SOLO-PLANTA: BASES PARA A NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO VEGETAL

Autores: Herminia Emilia Prieto Martinez et al.; 2022.

Conteúdo: O livro é composto de 11 capítulos. O primeiro aborda as principais propriedades dos solos e substratos, locais onde ocorre a interação entre planta e meio de crescimento. Na sequência estão os fundamentos da nutrição mineral das plantas, metabolismo do nitrogênio e do enxofre, seguidos por fixação biológica do nitrogênio e associações micorrízicas. Os capítulos seguintes, de modo geral, têm caráter aplicado e abordam o diagnóstico do estado nutricional, respostas e mecanismos de adaptação das plantas a estresses abióticos, fertilizantes inorgânicos, fertilização biológica e o uso de quelatos e complexos na agricultura.

Preço: R\$ 121,00

Número de páginas: 30

Editora: Universidade Federal de Viçosa – UFV

Website: <https://www.editoraufv.com.br>

AGRICULTURA 5.0

Organizadores: Rildo Araújo Leite et al.; 2023.

Conteúdo: Esta obra fornece uma visão geral interdisciplinar e integrativa dos mais recentes desenvolvimentos no domínio da agricultura inteligente. Mostra como práticas agrícolas tradicionais estão sendo aprimoradas e modificadas e reduzem os riscos, aumentam a sustentabilidade e fornecem decisões preditivas ao produtor, a fim de tornar a agricultura mais produtiva.

Preço: R\$ 99,00

Número de páginas: 306

Venda: Livraria Universidade Federal de Viçosa – UFV

Website: <https://www.editoraufv.com.br>

SOJA: DO PLANTIO À COLHEITA – 2ª edição

Autores: Felipe Silva et al.; 2022.

Conteúdo: A obra aborda toda a cadeia produtiva desse grão, como preparo do solo e plantio, época de semeadura e população de plantas, adubação, rotação e sucessão, irrigação e colheita. O livro explica os métodos para o manejo de pragas, doenças e plantas daninhas e trata da comercialização de *commodities* agrícolas e da gestão de riscos.

Preço: R\$ 149,00

Número de páginas: 312

Editora: Oficina de Textos

Website: <https://www.ofitexto.com.br/>

AMINOÁCIDOS, EXTRATOS DE ALGAS, EXTRATOS VEGETAIS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS COMO BIOFERTILIZANTES

Organizadores: Átila F. Mógor e Gilda Mógor; 2022.

Conteúdo: Com a contribuição de 22 pesquisadores de importantes instituições de pesquisa, esta obra consolida o conhecimento adquirido até hoje sobre os biofertilizantes e demonstra que a sua utilização impacta positivamente nos resultados da produção agropecuária. As normativas que regulam a produção destes insumos também estão contempladas.

Preço: R\$ 143,34

Número de páginas: 187

Venda: ABISOLO

Website: <https://www.abisolo.com.br/>

PATROCINADORES



Knowledge grows



@NPCTBRASIL



NUTRIÇÃO DE PLANTAS CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rua Ataulfo Alves, 352, Sala 1 - CEP 13424-370 - Piracicaba (SP) - Brasil

Celular/Whatsapp: (19) 98181-3446

LUÍS IGNÁCIO PROCHNOW

Diretor Geral, Eng^o Agr^o, Doutor em Agronomia

E-mail: LProchnow@npct.com.br

EVANDRO LUIS LAVORENTI

Diretor de TI, Analista de Sistemas

E-mail: ELavorenti@npct.com.br