




ARTIGO TÉCNICO 1

[Click here for English version](#)

Pegada de Carbono na Agricultura: Rumo à produção agrícola neutra e integrada com a indústria

 Vitor Vargas¹, Thais Coser², Thais Regina de Souza³, Frank Brenttrup⁴, Mohammad Hesan⁵, Cintia Neves⁶, Stephane Bungener⁷, Rafael Otto⁸, Maria da Conceição Santana Carvalho⁹, Douglas Guelfi¹⁰, Heitor Cantarella¹¹

1. INTRODUÇÃO: CONCEITO DE PEGADA DE CARBONO

A agricultura é responsável por 10% a 12% do total das emissões globais de gases de efeito de estufa – GEE (SMITH et al., 2007) e espera-se que este nível aumente no futuro devido à necessidade de expandir a produção agrícola para atender à crescente demanda por alimentos, ração animal, fibras e bioenergia. Estima-se que até 2050 teremos nove bilhões de pessoas na Terra.

No Brasil, a agricultura desempenha papel significativo na produção, representando 25% a 30% do produto interno bruto (PIB). O país se destaca como um importante produtor global, gerando alimentos suficientes para atender às necessidades internas e a uma parcela substancial da demanda internacional. O Brasil é o principal exportador de diversos produtos agrícolas, incluindo soja, açúcar, carne de frango, carne bovina, café, suco de laranja, tabaco, etanol, milho e fibra de algodão. Além disso, desempenha papel crucial

Abreviações: ACV = análise do ciclo de vida; BPM = boas práticas de manejo; C = carbono; CFT = *Cool Farm Tool*; CH₄ = metano; CO₂ = dióxido de carbono; DCD = dicianodiamida; DMPP = 3,4-dimetilpirazol fosfato; EUN = eficiência de uso de nitrogênio; GEE = gases de efeito estufa; IN = inibidor de nitrificação; K = potássio; MRV = medição de carbono, relatório e verificação; N = nitrogênio; NA = nitrato de amônio; NC = nitrato de cálcio; NDCs = contribuições nacionalmente determinadas; NH₃ = amônia; N₂O = óxido nitroso; P = fósforo; PGC = pegada de carbono; PIB = produto interno bruto; UAN = nitrato de amônio ureia; UE = União Europeia; WBCSD = Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável; WRI = Instituto de Recursos Mundiais.

¹ Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador BAC/ASK/YARD – Yara International, Dülmen, Alemanha; email: vitor.vargas@yara.com

² Engenheira Agrônoma, Dra., Pesquisadora BAC/ASK/YARD – Yara International, Dülmen, Alemanha; email: thais.coser@yara.com

³ Engenheira Agrônoma, Dra., Pesquisadora HVC/ASK/YARD – Yara International, Dülmen, Alemanha; email: thais.desouza@yara.com

⁴ Ph.D. Ciências Agrícolas, Pesquisador Líder R&D SSR/ASK/YARD – Yara International, Dülmen, Alemanha; email: frank.brenttrup@yara.com

⁵ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Carbon Footprint, Energy and Environment – Yara International, Porsgrunn, Noruega; email: mohammad.hesan@yara.com

⁶ Engenheira Agrônoma, MSc., Department of Sustainability, Yara Brasil, São Paulo, SP, Brasil; email: cintia.neves@yara.com

⁷ Ph.D. em Engenharia de Sistemas Energéticos, Diretor Energy & Environment - Yara International, Geneva, Suíça; email: stephane.bungener@yara.com

⁸ Engenheiro Agrônomo, Dr., Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, Brasil; email: rotto@usp.br

⁹ Engenheira Agrônoma, Dra., Pesquisadora e Secretária Executiva do Portfólio Nutrientes para a Agricultura, Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil; email: maria.carvalho@embrapa.br

¹⁰ Engenheiro Agrônomo, Dr., Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil; email: douglas.guelfi@ufla.br

¹¹ Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Diretor do Centro de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agronômico, Campinas, SP, Brasil; email: heitor.cantarella@sp.gov.br

nos mercados de carne suína, frutas tropicais e produtos florestais. Ademais, o Brasil é autossuficiente em diversos produtos, como feijão, cacau, mandioca, banana e hortaliças.

A agricultura, sem as emissões relacionadas ao desmatamento, é o segundo setor que mais contribui para as emissões de GEE, sendo responsável por mais de 9,8% das emissões brasileiras (1,35 bilhão de toneladas de CO₂eq), enquanto o país como um todo contribui com aproximadamente 3,3% das emissões globais de GEE. Segundo o Observatório do Clima do Brasil (ALENCAR et al., 2023), a fermentação entérica, processo digestivo natural que ocorre nos animais ruminantes (por exemplo, bovinos), é responsável por 63% das emissões brasileiras. Notavelmente, a produção pecuária possui enorme potencial para a transição da atual pegada de carbono da produção agrícola brasileira para um modelo de baixo carbono. Em relação a outros produtos agrícolas, o Brasil serve de modelo a ser seguido. A agricultura brasileira é caracterizada pela alta eficiência no uso da terra, particularmente na produção de soja, milho e algodão, majoritariamente cultivados em sistemas de duplo cultivo. A ampla adoção da tecnologia melhorou o uso eficiente da energia e, ao mesmo tempo, aumentou a produtividade.

Entre os insumos utilizados no setor agrícola, os fertilizantes e as sementes (através do melhoramento de plantas) são ferramentas cruciais para aumentar o rendimento das culturas. A utilização de fertilizantes minerais é imprescindível para fornecer nutrientes às plantas e dar suporte à produção de alimentos (DOBERMANN et al., 2022). No entanto, os fertilizantes também contribuem significativamente para a pegada de carbono (PGC) dos produtos agrícolas e, consequentemente, dos produtos alimentícios derivados da produção agrícola (HILLIER et al., 2009). O impacto dos fertilizantes, principalmente os nitrogenados, nas emissões de GEE torna-se evidente durante sua produção, transporte até a propriedade agrícola e após a sua aplicação (emissões de óxido nitroso – N₂O) (BRENTUP et al., 2018). Outros insumos agrícolas, como o consumo de combustíveis fósseis usado em operações de maquinário e energia/eletricidade em áreas irrigadas, são reconhecidos como importantes fontes de emissões de GEE na produção alimentar. Em algumas culturas de alto valor agregado, os defensivos agrícolas também adquirem relevância na pegada de C, mas no cultivo de grãos sua magnitude pode ser considerada insignificante.

Há muito tempo se discute a necessidade de um esforço coletivo significativo para reduzir as temperaturas globais, que impactam na produção de alimentos, na dinâmica da economia e na sobrevivência das espécies. O Acordo de Paris, assinado em 2015, foi um compromisso marcante nos esforços para limitar o aumento da temperatura global abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais. As alterações climáticas resultantes deste aumento podem causar graves impactos no ambiente e na sociedade, ameaçando a agricultura e a segurança alimentar. Foi neste contexto que os países assinaram as “Contribuições Nacionalmente

Determinadas (NDCs)” e as empresas multinacionais, em particular as empresas de alimentos, começaram a discutir e formalizar as suas metas de redução de emissões nas suas cadeias de produção.

A crescente demanda dos consumidores por produtos mais sustentáveis e o interesse dos acionistas têm feito com que as empresas de alimentos se conscientizem da necessidade de reduzir as emissões da sua cadeia produtiva e, também, as emissões no campo, reforçando a importância da implementação de práticas agrícolas sustentáveis, buscando maior eficiência. A necessidade de mitigar as mudanças climáticas levou muitas empresas de alimentos a publicar metas ambiciosas de redução de emissões na procura da neutralidade climática, investindo fortemente em iniciativas que as aproximem da concretização desses objetivos. As metas de cada empresa podem ser facilmente consultadas em seus relatórios de sustentabilidade. Por exemplo, a Nestlé comprometeu-se a reduzir as suas emissões em 50% até 2030 e a alcançar emissões líquidas zero até 2050 (NESTLÉ, 2022). A americana PepsiCo pretende reduzir 40% das emissões de GEE em toda a cadeia produtiva até 2030 (PEPSICO, 2022). Para monitorar o alcance de tais metas, as empresas precisam seguir determinados procedimentos e índices que são validados e revisados pela comunidade científica.

Desde a sua origem na análise energética, nas décadas de 1960 e 1970, a análise do ciclo de vida (ACV) tornou-se uma ferramenta abrangente, e é utilizada para explorar potenciais impactos numa série de métricas ambientais e uso de recursos, incluindo a pegada de carbono dos produtos. A ACV tem sido amplamente utilizada atualmente para orientar decisões desafiadoras e selecionar caminhos tecnológicos, impulsionados pela PGC (McMANUS; TAYLOR, 2015).

À medida que a sociedade busca maior compreensão e alternativas para a mitigação das emissões de GEE, o termo “pegada de carbono” ganha mais popularidade. Este termo tem sido amplamente pesquisado em países reconhecidos pelas suas capacidades na produção de alimentos. Isto mostra o quanto os setores estão comprometidos em encontrar soluções para melhorar a eficiência na utilização de energia e dos recursos. Para padronizar as comparações e demonstrar à sociedade o impacto real da produção de uma determinada quantidade de produto, a métrica da PGC é normalmente preferida. Porém, com isso, também podem ser observados muitos exemplos de usos indevidos, especialmente no setor primário. Nesse sentido, é fundamental padronizar o conhecimento e as metodologias de tais métricas. É crucial esclarecer o conceito, e os métodos, incluindo os limites, associados à pegada de carbono do produto para evitar mal-entendidos. Isto é particularmente importante na agricultura, onde o reconhecimento e a abordagem da PGC se tornaram um elemento-chave das práticas sustentáveis e podem diferenciar os produtos, criando um novo fator de competitividade no agronegócio. Em resumo, garantir uma compreensão clara do termo é vital para uma comunicação precisa e para a implementação eficaz de medidas de sustentabilidade.

O conceito de pegada de carbono segue a metodologia de avaliação do ciclo de vida, ou seja, contabiliza todas as emissões de GEE relacionadas a um produto ao longo do seu ciclo de vida. Os limites do ciclo de vida vão, idealmente, do início ao fim da jornada do produto agrícola (dentro e fora da porteira), o que significa desde a extração e fornecimento de quaisquer matérias-primas necessárias até a disposição final do produto avaliado, ou seja, após ele ter completado sua função e chegado ao fim da vida como descarte. Contudo, na prática, os limites de uma análise de ciclo de vida são definidos de forma mais estreita, por exemplo, “da produção dos insumos até a indústria/varejo” ou “da produção dos insumos até a saída da porteira”. Em uma análise de ciclo de vida, todas as emissões de GEE dentro dos limites definidos são recolhidas em um inventário, convertidas em uma unidade comum (equivalentes de CO_2) e, finalmente, expressas por unidade de produto avaliado, por exemplo, em $\text{kg CO}_2\text{eq t}^{-1}$ de grão de milho.

Normalmente, as análises de ciclo de vida de produtos agrícolas estão dentro de um limite da “produção dos insumos até a saída da porteira”. Isto fornece informações valiosas sobre o impacto climático dos produtos agrícolas e permite aos agricultores documentar melhorias ou classificar seus produtos de acordo com a pegada de carbono, oferecendo opções aos seus clientes. Os dados da ACV também são informações importantes para empresas de alimentos, que estão frequentemente comprometidas com metas de sustentabilidade, por exemplo, dentro da estrutura da SBTi (do inglês, Science-based Target Initiative). Na contabilidade corporativa das emissões de GEE das empresas de alimentos, as emissões provenientes da produção de matérias-primas agrícolas fazem parte das chamadas emissões de Escopo 3. Neste caso, os dados da ACV podem ser utilizados pela empresa de alimentos para quantificar e monitorar estas emissões nos seus inventários corporativos de GEE.

A nossa principal meta neste artigo é aprofundar o conceito de PGC associada às culturas agrícolas alimentícias e energéticas, elucidando os seus vários componentes. Nosso objetivo é esclarecer os principais contribuintes para as emissões neste contexto, com foco específico nos fertilizantes nitrogenados. Além disso, exploraremos os esforços feitos pela indústria de fertilizantes para mitigar as emissões durante o processo de produção. Ademais, nosso artigo destacará o papel dos agricultores na implementação de práticas que efetivamente reduzam as emissões, contribuindo para uma redução geral do impacto ambiental da agricultura no Brasil e com valor para a cadeia de produção de alimentos.

2. PEGADA DE CARBONO DE MATÉRIAS-PRIMAS, FERTILIZANTES E PROCESSOS NA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES

A indústria de fertilizantes desempenha papel crucial na agricultura global, fornecendo nutrientes para melhorar o crescimento e a produtividade das culturas. Os fertilizan-

tes são classificados com base nos nutrientes primários que contém, sendo as três classes principais: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Se um fertilizante contém esses três nutrientes primários ele é classificado como NPK.

O N não é encontrado em formas minerais como P ou K, ele é extraído do ar onde está na forma de N_2 , e é considerado um nutriente vital para o crescimento vegetativo, desenvolvimento das folhas e saúde geral das plantas. Os fertilizantes nitrogenados normalmente incluem N em uma ou mais das seguintes formas: nítrica, amoniacal ou amídica. Nitrato de amônio (NA), nitrato de amônio e cálcio (CAN), nitrato de cálcio (NC), ureia (UR) e nitrato de amônio ureia (UAN) são alguns dos fertilizantes nitrogenados produzidos quimicamente, e cada um tem suas próprias características e aplicações. A amônia (NH_3) é a molécula básica para a síntese da maioria dos fertilizantes nitrogenados. Parte das emissões de GEE dos fertilizantes nitrogenados deriva do gás natural, principal matéria-prima da qual o hidrogênio (H_2) é extraído para produzir amônia. O gás natural funciona também como fonte de energia à indústria. A PGC de um produto na saída da fábrica representa a quantidade de emissões de gases de efeito estufa geradas ou utilizadas ao longo de seu ciclo de vida parcial. A PGC contabiliza todas as emissões de GEE relacionadas às matérias-primas, fabricação e transporte de um produto.

A quantificação da PGC da produção de fertilizantes nitrogenados envolve a avaliação das emissões de GEE associadas às várias fases do processo de produção dentro do seu limite. Para o cálculo da PGC até a saída da fábrica de produção de fertilizantes nitrogenados deve-se considerar as fontes primárias de emissões, tais como:

- Extração de matérias-primas: a extração e o processamento de matérias-primas utilizadas na produção de fertilizantes nitrogenados, como, por exemplo, gás natural (durante a perfuração e transporte), pode resultar em emissões de GEE.
- Hidrogênio para produção de amônia: aproximadamente 65% do gás natural utilizado no processo de produção de amônia é dedicado à produção de hidrogênio por meio da reforma a vapor do gás natural.
- Energia: Cerca de 35% do gás natural utilizado no processo de produção de amônia é dedicado à manutenção da alta temperatura necessária ao processo. Existem outros processos com alta demanda energética na cadeia de produção, como compressão, resfriamento e separação, que podem contribuir para as emissões.
- Ácido nítrico: o ácido nítrico é outro componente essencial dos fertilizantes nitrogenados. Sua produção envolve a oxidação da amônia, que pode liberar óxido nitroso (N_2O), cujo efeito de aquecimento global é 273 vezes maior que o do dióxido de carbono (CO_2) (SMITH et al., 2021).
- Transporte: O transporte de matérias-primas para a unidade de produção pode resultar em emissões elevadas.

A Figura 1 apresenta uma comparação da PGC do nitrato de amônio produzido em diferentes locais, em

solução aquosa ou não, conforme relatado pela Comissão Europeia no JRC EUR 31653 (VIDOVIC et al., 2023). Nota-se que a intensidade média das emissões GEE do nitrato de amônio produzido na Europa (UE27) é 54% menor que a média ponderada universal.

É fundamental balancear a necessidade de aumentar a produtividade das culturas com a adoção de práticas responsáveis e ecológicas no uso de fertilizantes à medida que a indústria evolui para satisfazer as exigências da agricultura e da conservação ambiental.

Projetos de abatimento de N_2O estão sendo desenvolvidos com sucesso em todo o mundo, utilizando tecnologias de redução secundária e terciária. Depois de reduzir as emissões de N_2O e melhorar a eficiência energética nas fábricas de fertilizantes, o foco principal deverá passar para a produção de amônia a partir de fontes alternativas, que não dependam do gás natural. A amônia azul e verde são duas formas emergentes de produção de amônia com ênfase na sustentabilidade e na redução do impacto ambiental.

A amônia azul é produzida pelo método tradicional (amônia cinza), e a principal diferença é que o CO_2 gerado nesse processo é capturado e armazenado, evitando que entre na atmosfera. Já a amônia verde é produzida a partir de fontes renováveis e sustentáveis de hidrogênio, muitas vezes obtidas através de processos como a eletrólise da água alimentada por fontes de energia renováveis, como a eólica ou a solar. A amônia produzida com biometano renovável também é considerada verde (Figura 2).

A Figura 3 mostra a produção da formulação NPK 15-15-15 com diferentes estratégias de redução da PGC. O fertilizante NPK 15-15-15 produzido a partir da amônia cinza e tecnologia

de redução de N_2O tem uma PGC 50% menor quando comparado a uma planta de produção padrão atual. Ao utilizar NPK produzido a partir de amônia verde, a PGC pode ser reduzida em até 80%. Isto cria uma oportunidade para os agricultores escolherem o produto (fertilizante) que lhes permite minimizar as emissões durante o seu processo de produção.

3. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

A pegada de carbono normalmente se refere às emissões de GEE associadas a um produto ou processo. As emissões não se restringem apenas a C ou CO_2 , mas, em estudos agrícolas, incluem também metano (CH_4) e N_2O . A pegada é expressa como equivalente de CO_2 (CO_2 eq), para o qual são aplicados fatores aos GEE que não o CO_2 , conforme mencionado anteriormente.

A PGC do produto pode ser avaliada de diferentes maneiras. As condições-limite dos cálculos podem ser definidas de acordo com a finalidade e o âmbito da avaliação. A PGC pode referir-se, por exemplo, a uma fase da produção, como a fabricação do fertilizante, as emissões de GEE em escala de campo ou outras condições pertinentes de comparação. O relato mais completo da PGC é feito por meio da análise do ciclo de vida (ACV), como mencionado na introdução, que contabiliza todo o ciclo de vida de um produto, desde a extração dos recursos, produção, uso e reciclagem, até o descarte dos resíduos remanescentes, conhecidos como *cradle to grave*, que, na tradução literal, significa "do berço ao túmulo", contabilizando, então, "dentro e fora da porteira" (EUROPEAN COMMISSION, 2010; IBICT, 2023).

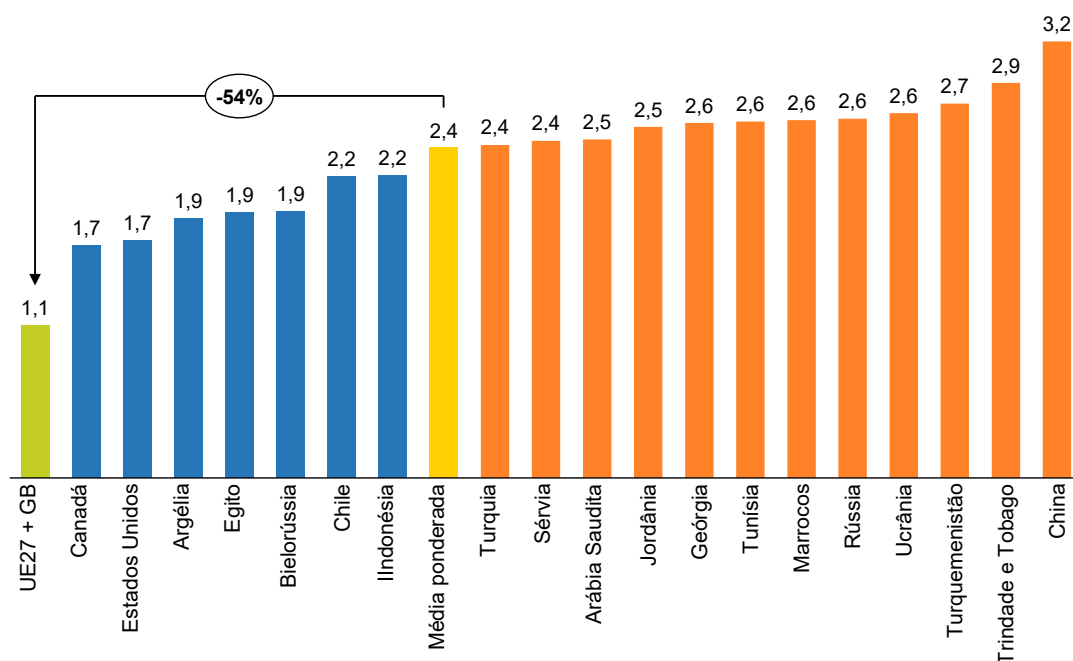


Figura 1. Pegada de carbono da produção de nitrato de amônio em diferentes locais.

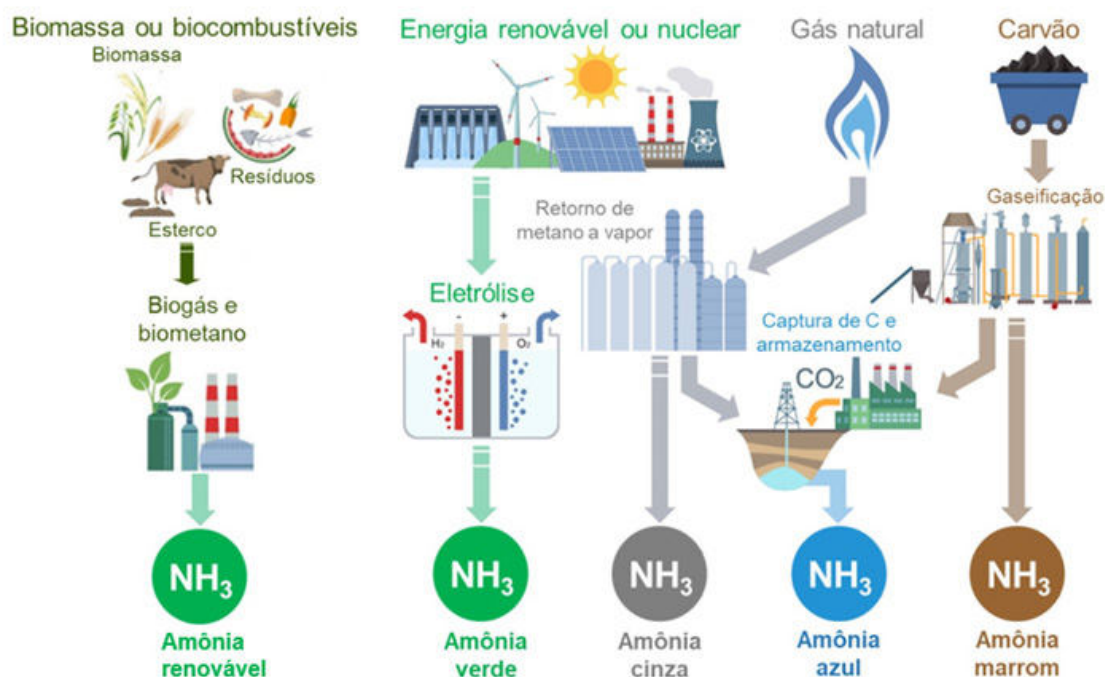


Figura 2. Rotas de produção de amônia (NH_3).

Amônia renovável: é o termo utilizado pela Yara Brasil para denominar a amônia produzida com H_2 proveniente do biometano da indústria sucro-energética.

Amônia verde: é produzida usando fontes de energia renováveis, como energia eólica ou solar, para gerar hidrogênio por meio de eletrólise. Este processo visa reduzir as emissões de carbono e o impacto ambiental em comparação com os métodos tradicionais.

Amônia cinza: é sinônimo de amônia produzida convencionalmente. É gerado através do processo Haber-Bosch, que depende de combustíveis fósseis como o gás natural e resulta em emissões substanciais de carbono.

Amônia azul: é produzida capturando e armazenando as emissões de carbono geradas durante o processo de produção de amônia. Combina o método convencional Haber-Bosch com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) para mitigar o impacto ambiental.

Amônia marrom: refere-se à amônia produzida através de métodos tradicionais e de uso intensivo de energia, muitas vezes envolvendo o uso de carvão. O processo de produção emite uma quantidade significativa de dióxido de carbono.

Fonte: Adaptada de BRASIL (2021).

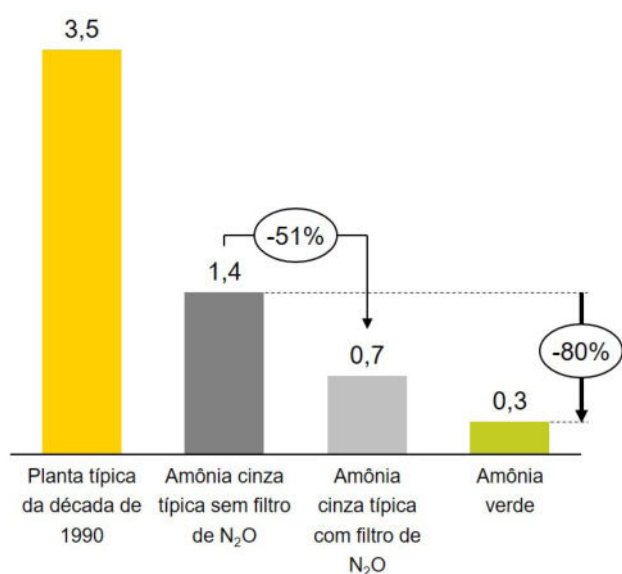


Figura 3. Pegada de carbono (t CO_2 eq t^{-1} do produto) do NPK 15-15-15 em plantas que utilizam diferentes estratégias de redução da pegada de carbono.

Para o cálculo da PGC foram desenvolvidas diferentes diretrizes e protocolos gerais a fim de garantir qualidade, consistência e comparabilidade das análises e resultados. A Organização Internacional de Padronização (ISO) publicou a ISO 14067 como uma norma internacional que especifica princípios, requisitos e diretrizes para a quantificação e preparo de relatórios de PGC de um produto, de maneira consistente com as normas internacionais sobre ACV (ISO 14040 e ISO 14044) (ISO, 2023). O Instituto de Recursos Mundiais (WRI) e o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável (WBCSD) desenvolveram um padrão internacional para quantificação e um relatório de GEE corporativo já no final da década de 1990. Atualmente, seu protocolo de GEE é amplamente utilizado e inclui um padrão para “Quantificação e Relatórios do Ciclo de Vida do Produto” (WRI, 2011). Outra norma PGC é a PAS 2050, desenvolvida pelo Instituto de Normalização do Reino Unido (do inglês, British Standards Institute – BSI). O PAS 2050 é amplamente utilizado e é considerado o primeiro padrão de PGC empregado internacionalmente (BSI, 2011).

Além dos padrões gerais, também existem ferramentas de cálculo estabelecidas que permitem a análise concreta da PGC de forma consistente. Um exemplo é a ferramenta *Cool Farm Tool* (CFT), que permite o cálculo da PGC de produtos agrícolas e animais. A CFT foi desenvolvida há mais de 10 anos por um pequeno grupo de empresas de alimentos em colaboração com a Universidade de Aberdeen, na Escócia. Hoje, a companhia Cool Farm Alliance, que possui e desenvolve a ferramenta CFT, é composta por cerca de 160 membros representantes do ramo alimentício, ONGs, universidades e agricultores. A CFT é amplamente utilizada em toda a cadeia de produção de alimentos, por exemplo, para quantificar e monitorar as emissões de GEE para efeitos de elaboração de relatórios e outros fins. Vários parceiros e membros acadêmicos garantem o respaldo científico e a robustez da ferramenta (COOL FARM ALLIANCE, 2023).

Os valores de referência para as emissões de carbono (ou GEE) associadas a produtos ou processos intermediários utilizados para o cálculo da ACV estão disponíveis em bases de dados de inventários de ciclo de vida, como o Ecoinvent. Esse banco de dados é atualizado frequentemente e está agora na versão 3.9.1 (ECOINVENT, 2023).

Conforme comentado anteriormente, a pegada de carbono de uma cultura pode estar restrita a uma fase específica (ou seja, operações agrícolas) ou a todo o ciclo. Os limites da avaliação devem ser definidos, por exemplo, até a saída da porteira da fazenda (ACV “do berço à porteira”), que compreende as fases de produção dos insumos, incluindo extração, até a produção do produto agrícola, ou até ao consumidor final, considerando o descarte final dos resíduos do produto (ACV “do berço ao túmulo”), que seria dentro e fora da porteira. O importante é que os limites sejam bem definidos e claros. Neste último, a ACV inclui os GEE emitidos pela fabricação de máquinas agrícolas, seu funcionamento (consumo de combustível), todos os insumos agrícolas (sementes, fertilizantes, defensivos), irrigação, colheita e transporte para o mercado. Cada vez mais, as empresas de alimentos estão investigando a emissão de GEE total na cadeia de produção.

A PGC, em versões mais curtas ou mais amplas, é cada vez mais utilizada para avaliar a sustentabilidade e também para ajudar os consumidores na tomada de decisões sobre qual produto comprar. Existem muitos exemplos de avaliações da pegada de carbono de produtos agrícolas. Por exemplo, a PGC da produção de fertilizantes em diferentes regiões do mundo foi calculada por Hoxha e Christensen (2019). A Fertilizers Europe desenvolveu uma calculadora online da pegada de carbono dos fertilizantes (FERTILIZERS EUROPE, 2023).

Nos supermercados é comum encontrar o valor do PGC estampado em certos produtos, o que pode ajudar os consumidores, preocupados com o meio ambiente, na compra dos produtos. Por exemplo, uma ACV “do berço

à porteira” de suco de laranja para os Estados Unidos foi encomendada pela indústria do suco para detectar onde, na cadeia de produção, ocorreram as maiores emissões de GEE (MARTIN, 2009). Neste caso, a maior contribuição foi a dos fertilizantes nitrogenados. Outro exemplo foi o estudo da pegada de carbono e hídrica na produção de laranjas e morangos realizado por Mordini et al. (2009). Nesses casos, a ACV incluiu todas as emissões até o produto chegar às gôndolas do supermercado.

Um exemplo de ACV “do berço à porteira” é o programa Renovabio no Brasil. Todas as emissões de GEE para a produção de biocombustíveis são calculadas e os valores são auditados por empresas certificadoras. O Renovabio recompensa os produtores de biocombustíveis com certificados de descarbonização (CBIOs) quando comprovam uma redução das emissões de GEE em comparação com os seus correspondentes fósseis (gasolina, diesel) (BRASIL, 2020).

4. PEGADA DE CARBONO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

Com base na metodologia de cálculo da PGC, e utilizando dados de estudos de médio e longo prazo e estratégias de fertilização nitrogenada, estimamos a PGC para os seguintes produtos: grãos de milho, grãos de café, algodão em caroço e colmos de cana-de-açúcar, desde a produção do fertilizante na fábrica até a produção dos mencionados produtos antes de serem distribuídos ao mercado consumidor, utilizando a ferramenta CFT. Estudos de médio e longo prazo são importantes quando se considera o efeito residual dos fertilizantes, visto que normalmente se observa pouca diferença na produtividade nos primeiros ciclos de cultivo. Os dados das culturas selecionadas apresentadas neste estudo foram obtidos pelos autores em estudos anteriores e utilizados nesta publicação para exemplificar o impacto da adubação nitrogenada na PGC das culturas.

4.1. Milho

Em diferentes países, a adubação, principalmente a nitrogenada, desempenha papel fundamental na PGC da cultura do milho. De acordo com dados obtidos em diversas publicações (ADVIENTO-BORBE et al., 2007; BARBER et al., 2011; GRASSINI e CASSMAN, 2012; MA et al., 2012; MIDDELAAR et al., 2013; WANG et al., 2015; BEER et al., 2005; QI et al., 2018; USUBHARATANA e PHUNGGRASSAMI, 2016; STAPPEN et al., 2018; XU et al., 2018; ZHANG et al., 2016), em média, a produção de fertilizantes contribui com 32% das emissões no campo (dentro da porteira) considerando todos os fertilizantes (Figura 4), e com 27% se apenas os fertilizantes nitrogenados forem considerados (Figura 4A). Além da produção de fertilizantes, as emissões de N_2O no campo relacionadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados no cultivo de milho podem contribuir com 11% a 56%, equivalentes, em média, a 38%. Portanto, a composição da PGC do milho relacionada à fertilização com N é de até 65%.

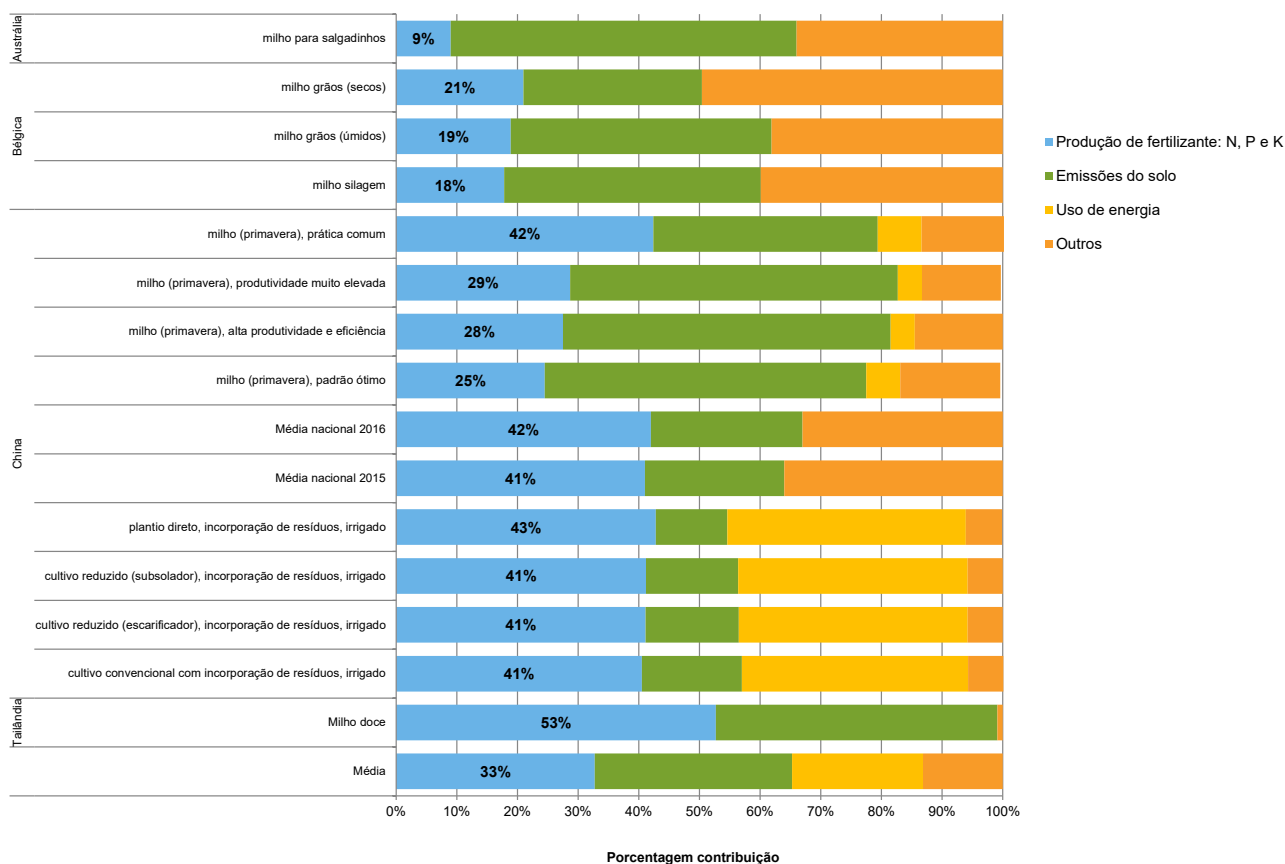
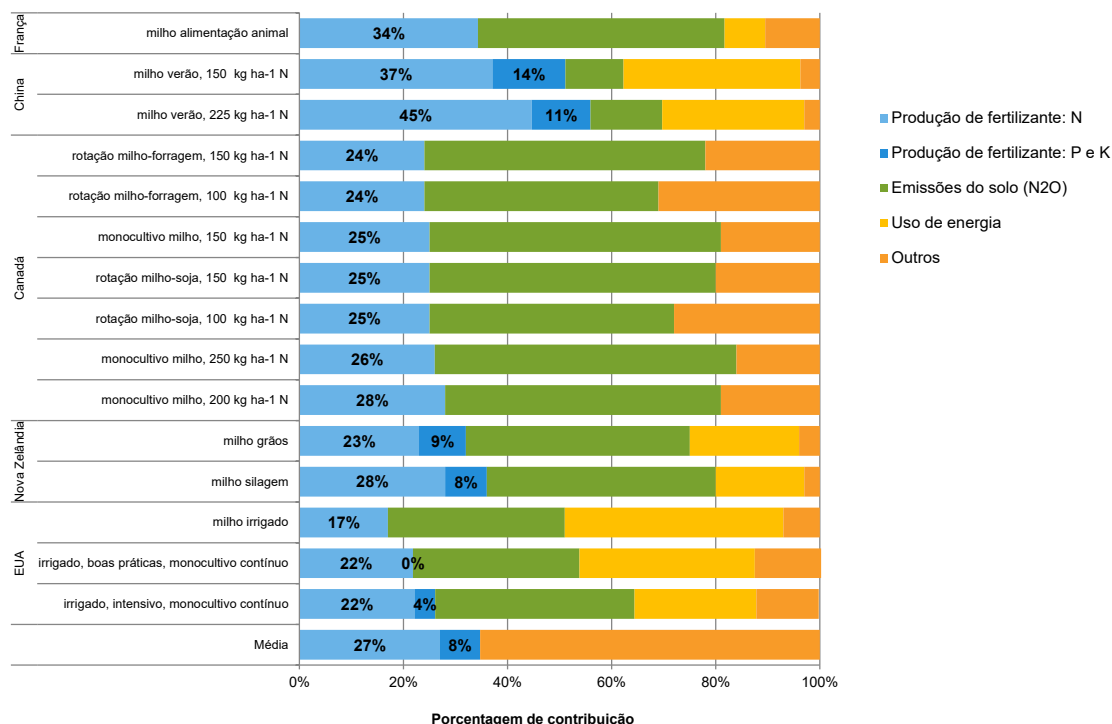


Figura 4. Contribuição para a pegada de carbono da cultura do milho (vários usos) em relação à produção de fertilizantes (N, P e K), emissões de N₂O do solo e uso de energia. Na Figura 4A, o impacto causado pela produção do fertilizante nitrogenado foi avaliado separadamente dos impactos causados pela produção dos adubos fosfatado e potássico, enquanto em (B) eles foram avaliados conjuntamente.

Fontes: (A) Adviento-Borbe et al. (2007), Barber et al. (2011), Grassini e Cassman (2012), Ma et al. (2012); Middelaa et al. (2013), Wan et al. (2015). (B) Beer et al. (2005), Qi et al. (2018), Usabharatana e Phungrassami (2016), Stappen et al. (2018), Xu et al. (2018), Zhang et al. (2016).

A fertilização nitrogenada está bem documentada como o principal fator das emissões de CO_2 na produção de milho de sequeiro. O uso de energia também pode contribuir significativamente, especialmente em sistemas irrigados (até 42%), porém, a irrigação na produção de milho não é uma prática comum no Brasil. É importante enfatizar que a fase de cultivo no campo é muito significativa na avaliação da PGC de todo o ciclo (dentro e fora da porteira). Em um estudo na Tailândia, com a produção de milho doce enlatado (até a fase de processamento), a fase de cultivo foi responsável por 35% das emissões, enquanto em outro estudo na Austrália, avaliando a produção de flocos de milho (até o varejo), a fase de cultivo foi responsável por 42% das emissões. Uma importante demanda comercial do milho produzido no território brasileiro é a produção de etanol. Contudo, há pouca informação disponível sobre a PGC do etanol de milho. De acordo com Mekonnen et al. (2018), cerca de 30% da PGC do etanol de milho estão relacionados à produção de fertilizantes, emissões do solo e agricultura, enquanto 62% estão associados ao transporte e processamento. Um estudo realizado nas condições brasileiras apontou que o cultivo e o transporte são responsáveis por 78% da PGC do etanol de milho (MOREIRA et al., 2020). Este mesmo estudo mostrou que a PGC do etanol de milho brasileiro é menor que a do etanol produzido nos Estados Unidos devido à fonte de energia utilizada no processamento (queima de lenha de eucalipto, em vez de gás natural) e ao uso de milho de segunda safra, que geralmente requer menos fertilizante nitrogenado que o milho de safra única. A Diretiva Europeia de Energia Renovável adota uma fração de 47% das emissões durante a fase de cultivo.

As emissões de N_2O do solo normalmente representam o principal contribuinte à PGC da produção de milho, visto que o cereal responde à fertilização nitrogenada, e doses de aproximadamente 100 kg ha^{-1} de N têm sido praticadas no Brasil (variam de 50 a 220 kg ha^{-1} de N). Embora a emissão de N_2O não represente um problema agrônomo para a produção de milho no Brasil ou no mundo, uma vez que as emissões em relação à quantidade de N aplicada são muito menores quando comparadas com o N perdido por volatilização de NH_3 e com o escoamento de N, o conceito dos 4C's (aplicar a fonte certa, na dose certa, na época certa e no lugar certo) se ajusta adequadamente às reduções na PGC do milho.

Em um estudo de longo prazo realizado na região do Cerrado (Santo Antônio de Goiás, GO), o desempenho da produção de grãos de milho foi avaliado e três fertilizantes nitrogenados foram comparados como alternativas para complementar o N necessário para o milho no estágio de crescimento V4. As fontes testadas incluíram nitrato de amônio e cálcio (CAN), ureia comum e sulfato de amônio. Os resultados parciais deste estudo foram apresentados em edição anterior do Jornal Informações Agronômicas, em 2021 (OTTO et al., 2021). Os resultados indicam uma resposta da cultura do milho às doses de N e um claro efeito da fonte de N utilizada, que foi observado somente após quatro anos.

Este efeito retardado da aplicação de diferentes fontes está relacionado aos efeitos distintos de cada fonte e ao tipo de solo onde o experimento está localizado, que é argiloso e com alto teor de matéria orgânica, que atua como um tampão, proporcionando ao solo capacidade de fornecer N para a cultura. Após dez anos de estudo, observou-se que a dose de máxima eficiência agrônômica para o milho foi de 138 kg ha^{-1} com o uso de CAN e de 226 kg ha^{-1} com o uso de ureia (dose 63% maior), o que significa que menos fertilizante na forma de CAN foi necessário para chegar à máxima eficiência agrônômica, comparado ao uso de ureia. No experimento não foi avaliada a resposta do milho a doses de N como sulfato de amônio. Comparando as fontes, na dose considerada usual pelo produtor, o rendimento do milho aumentou 7,2% com o uso do CAN em relação à ureia ou ao sulfato de amônio. Isto reflete as menores perdas de N por volatilização de NH_3 com o uso deste fertilizante bem como a menor acidificação do solo. Estas foram, provavelmente, as principais razões para explicar os menores rendimentos alcançados nas parcelas com ureia e sulfato de amônio, respectivamente. Tanto as perdas por volatilização de amônia quanto a acidificação do solo alteram a dinâmica de suprimento de N às plantas, limitando o crescimento das plantas de milho e, consequentemente, restringindo a obtenção de maiores produtividades.

Ao analisar a pegada de carbono dos grãos de milho (Figura 5) calculada pela ferramenta Cool Farm®, levamos em consideração a demanda por N na máxima eficiência econômica, entendendo que o produtor almeja alcançar alta produtividade respeitando as margens estabelecidas para garantir a eficiência do seu negócio. Considerando os preços do milho (US\$ 15,00 saca^{-1}) e dos fertilizantes na época (CAN = US\$ 539 ton^{-1} e ureia = US\$ 567 ton^{-1}), a máxima eficiência econômica foi encontrada para CAN e ureia nas doses de 102 e 145 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Assim, com o CAN foi necessário utilizar menos N do que com a ureia para atingir a máxima eficiência econômica. É crucial comparar diferentes doses, uma vez que os resultados demonstram diferentes eficiências entre as duas fontes de N, bem como respostas distintas da cultura ao uso dos fertilizantes. Vários estudos realizados em condições tropicais destacaram a questão relacionada à volatilização de NH_3 pela aplicação de ureia na superfície do solo, que variam regularmente entre 20% e 30% do N aplicado. Em longo prazo, tal volatilização pode acelerar o processo de esgotamento do N do solo, especialmente se o agricultor não considerar a reposição dessa perda de N. Neste estudo, a volatilização de NH_3 da ureia na cultura do milho foi, na média de 10 anos, equivalente a 17% (dados não apresentados). Além disso, comparando-se diferentes doses de N, estamos considerando a necessidade de diferentes quantidades de fertilizantes sendo produzidas e transportadas.

Os resultados da PGC da produção de milho com base na dose de máxima eficiência econômica de N para ureia e CAN são exibidos na Figura 5 e mostram diferenças entre fertilizantes e a contribuição de cada origem, o que demons-

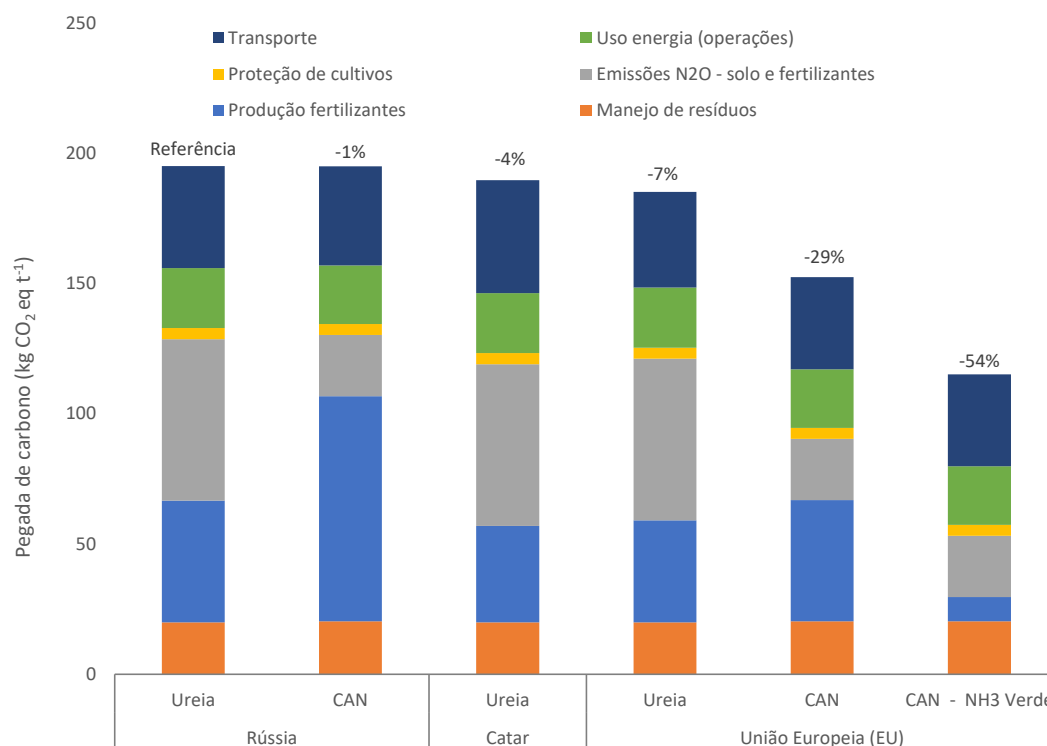


Figura 5. Pegada de carbono do milho (grãos) cultivado com doses ótimas de duas fontes de N (ureia e nitrato de amônio e cálcio – CAN) aplicadas em cobertura, em condições tropicais no Brasil. As estimativas também consideram a origem da fonte de N e uma redução adicional baseada no aumento da produção de fertilizantes com o processamento de amônia verde.

Fonte: Dados de pesquisa realizada pela EMBRAPA no estado de Goiás (OTTO et al., 2021).

tra as principais fontes de energia no local das indústrias de fertilizantes. Há uma redução de 29% na pegada de C do milho quando se substitui o CAN da Rússia pelo CAN da União Europeia (UE). Por outro lado, tal redução não é observada para a ureia, uma vez que a diminuição na PGC com a substituição de ureia produzida na UE representa apenas 6,5% e 3,1% em comparação com a ureia proveniente da Rússia e do Catar, respectivamente. Ao comparar a PGC do milho cultivado com a adubação de cobertura com ureia ou CAN é importante destacar a ausência de efeito caso os fertilizantes sejam oriundos da Rússia, no entanto, para fertilizantes produzidos com tecnologia de abatimento de N₂O na indústria europeia há uma redução significativa nas emissões de CO₂ com CAN, de 24,2%, comparado à ureia. Quando as indústrias produzem o CAN com NH₃ verde essa redução chega a 50,5%.

De acordo com Snyder et al. (2009), a PGC da produção de milho nos EUA variou de 120-220 kg CO₂ eq t⁻¹ de grãos em sistemas de plantio direto e de 140 a 250 kg CO₂ eq t⁻¹ de grãos em cultivo convencional, enquanto a contribuição dos fertilizantes nitrogenados representou 67%-75% no sistema conservacionista e 45%-60% no sistema convencional. Na China, a PGC reportada por Yan et al. (2015), com base em um grande levantamento, foi de 330 kg CO₂ eq t⁻¹ de grãos, com contribuição da fertilização nitrogenada em torno de 75%. Os números do presente estudo estão dentro da faixa de variação observada nos EUA e inferiores aos obtidos na China, o que está associado às maiores doses de N adotadas no país asiático.

No estudo conduzido durante dez anos pela Embrapa Arroz e Feijão (OTTO et al., 2021), a adubação com CAN aumentou a produção de biomassa da parte aérea em aproximadamente 6,5%, equivalente a um aumento de 1,1 t ha⁻¹. Houve também aumento de 12,5% no teor de N acumulado na parte aérea (dados não apresentados). Considerando-se que, com a decomposição dos resíduos, parte do N acumulado é transformado em N₂O, estima-se que a adubação com CAN apresente maior proporção de CO₂eq derivado dos resíduos em comparação com a ureia. A PGC do milho relacionada à decomposição de resíduos varia de 13% a 29% do total.

No que diz respeito à produção de fertilizantes, o maior impacto é atribuído à fonte de energia, com exceção do tratamento com amônia verde. Neste estudo, a contribuição da produção de fertilizantes na PGC foi equivalente a 37%. Por outro lado, ao considerar as emissões do uso de fertilizantes, a ureia apresenta uma PGC maior, devido à liberação de CO₂ consumido durante a sua produção. Neste caso, os processos associados à transformação da ureia representaram mais de 40% da PGC total do milho, enquanto para o CAN esta proporção foi de 24%. Dada a maior produtividade observada nas áreas tratadas com CAN, é também esperada maior contribuição dos processos associados à colheita, em contraste com a ureia. Esses processos acarretam maior consumo de combustível e também maior demanda por lenha para secagem de grãos.

É fundamental destacar que a PGC para o milho varia regionalmente, pois depende de uma série de fatores, como potencial de rendimento e consumo de insumos que, por sua vez, dependem da qualidade do solo e da disponibilidade de insumos para o agricultor.

4.2. Algodão

O algodão fornece aproximadamente um quarto das fibras têxteis globais (ZHANG et al., 2023). O Brasil é um dos principais exportadores e produtores mundiais de algodão e as projeções indicam uma taxa de crescimento da produção de 2,8% ao ano até 2032/2033 (MAPA, 2023). Em 2022/2023, o Brasil plantou aproximadamente 1,7 milhão de hectares de algodão e produziu 4,5 milhões de toneladas de fibras e sementes, das quais cerca de 71% vieram do Centro-Oeste, no Estado de Mato Grosso (CONAB, 2023). A maior parte da produção em Mato Grosso é de sequeiro de segunda safra, semeada de janeiro ao início de fevereiro e após a colheita da soja.

Um ensaio de média duração localizado em Mato Grosso (Diamantino, 14°04'57,7"S, 57°27'42,5"O e altitude de 270 m), com algodão semeado após a soja, foi estabelecido em 2016 e continuou até 2019 (quatro safras de algodão). O objetivo do ensaio foi avaliar o efeito de diferentes doses de N (0, 48, 96, 144 e 192 kg ha⁻¹ de N) e duas fontes (ureia e CAN) na produtividade e na qualidade da fibra do algodão (OTTO et al., 2021; OTTO et al., 2023). A produção acumulada nas quatro safras foi afetada pelo N aplicado e a

dose de 192 kg ha⁻¹ de N aumentou em 50% a produtividade de algodão em relação ao tratamento sem N. Diferenças estatísticas na produtividade do algodoeiro com o uso de ureia e CAN foram observadas apenas no quarto ciclo fenológico. No entanto, quando considerada a média das quatro safras de algodão (de 2016 a 2019), a fonte CAN resultou em maior produtividade por unidade de N em comparação com a ureia, e as doses de N calculadas para a eficiência econômica ótima foram de 171 kg ha⁻¹ para o CAN e 189 kg ha⁻¹ para a ureia.

Analizando-se a PGC por tonelada de algodão em caroço nas doses de máxima eficiência econômica das duas fontes (Figura 6) verificou-se que os fatores que mais contribuíram com as emissões foram a produção de fertilizantes nitrogenados na indústria (6% a 30% da PGC) e sua aplicação no solo (32% a 50% do PGC). A maior PGC foi observada com o uso de CAN produzido na Rússia, seguido pela ureia produzida na Rússia, ureia produzida na Europa, CAN produzido na Europa e, finalmente, CAN produzido na Europa utilizando a amônia verde. Os dados revelam a possibilidade de se reduzir em 27% a PGC quando o CAN é produzido com amônia verde, comparado ao CAN produzido na Rússia. O principal fator que aumenta a PGC do CAN produzido na Rússia é o processo de produção do fertilizante (307 CO₂ eq t⁻¹ de algodão em caroço) em comparação com o CAN produzido com amônia verde (42 CO₂ eq t⁻¹ de algodão em caroço). Considerando-se que 32%-50% da PGC são decorrentes do uso de N na fase de produção do algodão, novas estratégias para melhorar a eficiência de uso do N e reduzir as perdas de N durante o

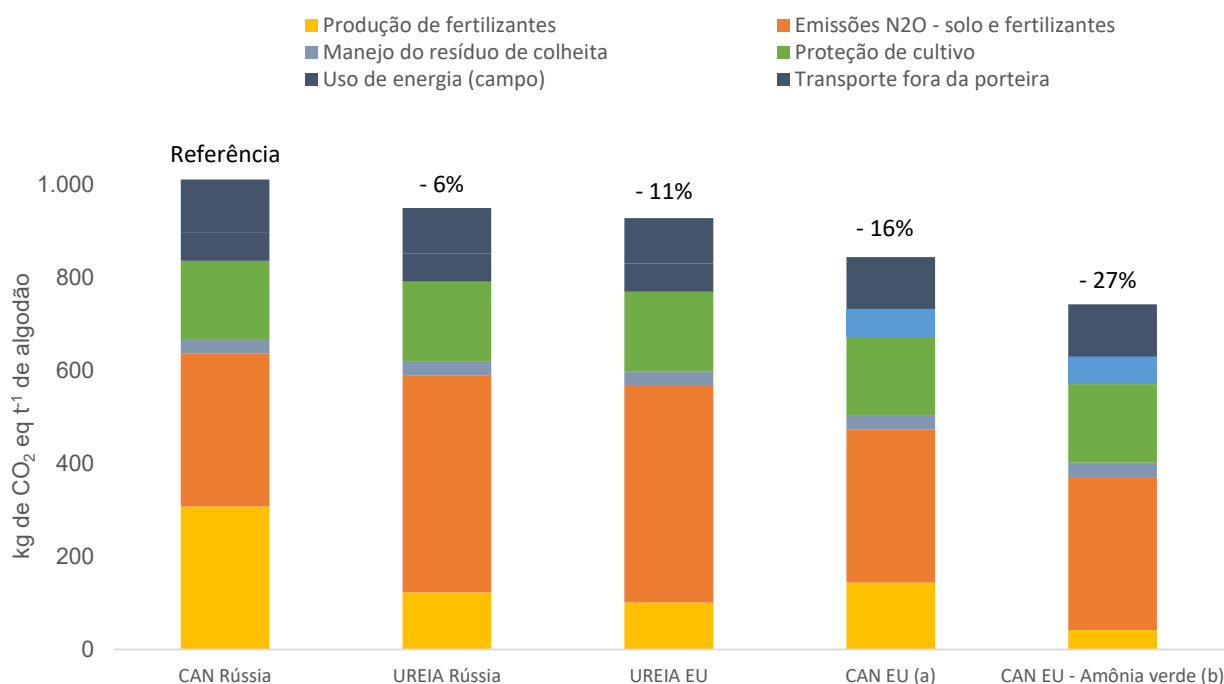


Figura 6. Pegada de carbono (PGC) da produção de algodão em caroço (kg CO₂ eq t⁻¹) em um ensaio utilizando doses de N para máxima eficiência econômica de duas fontes (CAN = nitrato de amônio e cálcio e ureia) provenientes da Europa e da Rússia e com utilização da tecnologia de amônia verde. (a) CAN da Europa; (b) CAN da Europa produzido com amônia verde.

Fonte: Dados de pesquisa realizada no estado de Mato Grosso (OTTO et al., 2023).

cultivo do algodão surgem como alternativas para diminuir a PGC, reduzindo as chances de substituição do algodão por outras fibras alternativas no futuro (ZHANG et al., 2023).

4.3. Café

A indústria alimentícia vem passando por importantes transformações e assumindo compromissos para reduzir as emissões de GEE em todo o processo produtivo. Este é o caso da Nestlé e da Illy (ILLY, 2022), grandes empresas que atuam no mercado cafeeiro. A Nestlé, por exemplo, vem acelerando suas iniciativas para enfrentar as mudanças climáticas e compromete-se a zerar as emissões líquidas até 2050 (NESTLÉ, 2022). Para atingir este objetivo, uma das ações da empresa consiste em incentivar os agricultores a adotar práticas sustentáveis, que reduzam as emissões de GEE e aumentem o sequestro de carbono no solo.

O uso eficiente de fertilizantes, especialmente de N, contribuirá significativamente para o sucesso das metas estabelecidas. Para tal, será necessário implementar um conjunto de boas práticas que aumentem a eficiência do uso de nutrientes e restaurem a saúde do solo. Fertilizantes com baixa PGC e manejo eficiente, que proporcione menores perdas de N, serão peças-chaves nesse processo. Estima-se que as emissões de GEE relacionadas à fertilização nitrogenada podem representar até 70% do total de GEE emitidos na cadeia produtiva do café.

Com o objetivo de avaliar o uso de fontes de N na produtividade e nas emissões de GEE da cultura do café Arábica, um estudo de longo prazo foi realizado pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) na Fazenda NKG, em Santo Antônio

do Amparo, sul de Minas Gerais, para estimar a PGC do cafeeiro (Figura 7). Com o apoio da ferramenta Cool Farm®, foram considerados neste estudo os seguintes fatores: duas fontes de N (ureia e NA), dose adequada de N para café segundo a análise foliar e a expectativa de produtividade (400 kg ha⁻¹), produtividade média do café em oito anos (plantas de 4 a 11 anos) e origem dos fertilizantes (Rússia e Europa).

Considerando os oito anos de desenvolvimento do ensaio (2016 a 2023), a dose de 400 kg ha⁻¹ proporcionou produtividade média de café de 2,93 t ha⁻¹ para NA e 2,66 t ha⁻¹ para ureia. A PGC para a produção de café foi 16% menor quando a fonte de N aplicada foi NA produzido na Europa, em comparação com a UR produzida na Rússia. Este número foi ainda menor com o NA produzido na Europa através da tecnologia de amônia verde (31%). É interessante notar que a origem dos fertilizantes, a tecnologia de produção, a produtividade, a fonte e a dose de N, são fatores importantes que determinam a PGC dos produtos (Figura 7).

O manejo sustentável da cafeicultura é importante, pois o café é considerado uma cultura com baixa eficiência no uso de nutrientes e que requer altas doses de N. Práticas de manejo de fertilizantes que melhorem a qualidade do café e reduzam as emissões de GEE são estratégias fundamentais para agregar valor à cadeia produtiva do café.

4.4. Cana-de-açúcar

A escolha do fertilizante nitrogenado pode afetar as emissões de N₂O dos solos e, portanto, alterar a PGC da produção de cana-de-açúcar. Um ensaio de campo de longa duração com cana-de-açúcar, variedade IAC-5000,

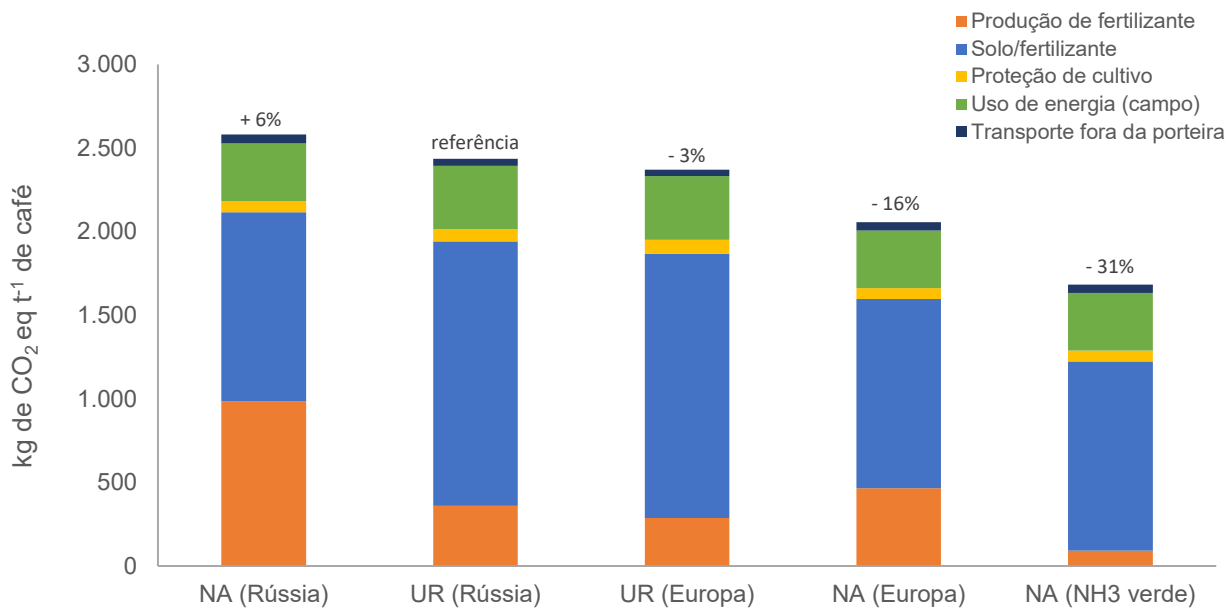


Figura 7. Estimativa da pegada de carbono do cafeeiro considerando a dose de nitrogênio de 400 kg ha⁻¹, as fontes nitrato de amônio (NA) e ureia (UR) de diferentes origens e tecnologias de produção.

Fonte: Dados da pesquisa realizada pela Universidade Federal de Lavras no sul de Minas Gerais (SARKIS et al., 2023; SOUZA et al., 2023).

foi realizado em Piracicaba, SP, em um Latossolo Vermelho Argiloso álico, para estudar o efeito das fontes de N (CAN e ureia) na produtividade, volatilização de NH_3 , emissões de N_2O e PGC da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Considerando todo o ciclo de avaliação, da cana planta até a 7ª soca, a produtividade média de colmos de cana-de-açúcar com o uso de ureia e de CAN foi de $85,0 \text{ t ha}^{-1}$. Nenhuma diferença no rendimento foi observada entre as fontes de N. As perdas de NH_3 pela ureia, expressas em percentual do N aplicado, variaram de 2,8% a 16,0%. Para o CAN, as perdas de NH_3 foram significativamente menores, variando de 0,4% a 0,7% do N aplicado em todos os ciclos avaliados. A emissão de N_2O da ureia foi significativamente superior à do CAN; o fator de emissão de N_2O foi em média 0,90% para UR e 0,47% para CAN durante todo o período de avaliação (CANTARELLA et al., 2022; DEGASPARI et al., 2020).

Com base nos dados da ferramenta Fertilizers Europe 2011 (Ecoivent 2.0), e considerando o rendimento de colmos de cana-de-açúcar, a acidificação do solo e as emissões reais de NH_3 e de N_2O do ensaio de campo, observou-se que a PGC para a produção de cana-de-açúcar foi, respectivamente, 30% e 68% menor, respectivamente, quando o CAN e o CAN amônia verde foram as fontes de N, em comparação com a ureia (Figura 8). O total de CO_2 emitido por tonelada de cana foi, em média, 14 kg para CAN verde, 31 kg para CAN e 44 kg para UR. O CO_2 emitido pela calagem para neutralizar a acidificação do solo causada pelos fertilizantes também foi considerado no cálculo do PGC como uma emissão indireta.

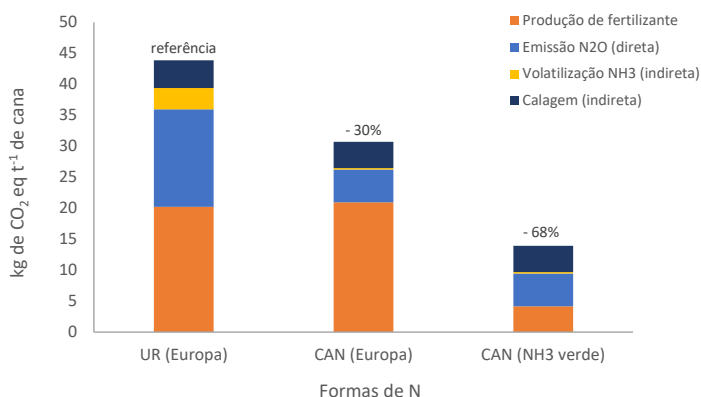


Figura 8. Estimativa da pegada de carbono da cana-de-açúcar considerando os fertilizantes nitrato de amônio e cálcio (CAN), CAN verde, e ureia (UR).

Fontes: Dados da pesquisa realizada pelo Instituto Agrônomo no estado de São Paulo (DEGASPARI et al., 2020; CANTARELLA et al., 2022).

A ureia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na cultura da cana-de-açúcar e está sujeita a altas perdas de N por meio da volatilização de NH_3 quando aplicada superficialmente no solo, principalmente quando aplicada no ciclo da soca, em que uma espessa camada de resíduos vegetais per-

manece na superfície do solo. Estudos recentes mostram que as emissões de N_2O nos canaviais ocorrem principalmente devido ao processo de nitrificação e, em menor proporção, na desnitrificação (LOURENÇO et al., 2018). Normalmente, a cana-de-açúcar é plantada em solos bem drenados, como Latossolos e Argissolos, e, por esta razão, as fontes de N amídica e amoniacal podem apresentar emissões de N_2O maiores do que aquelas contendo nitrato.

As emissões de GEE, especialmente N_2O , podem representar de 30% a 50% do total de GEE emitidos na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar (BORDONAL et al., 2013). Com a nova legislação brasileira (Renovabio), a produção de etanol está sendo recompensada pela redução das emissões de GEE por meio de créditos de carbono. Como resultado, o uso eficiente de fertilizantes nitrogenados e a redução das emissões de GEE começam a agregar valor financeiro aos agricultores.

5. FATORES DE EMISSÃO DE N_2O REGIONAIS

Uma incerteza considerável perdura nos inventários nacionais sobre a emissão de N_2O agrícola em todo o mundo, afetando, consequentemente, a estimativa precisa da PGC dos principais produtos agrícolas. Para a maioria das culturas, a PGC associada às emissões diretas e indiretas resultantes do cultivo está relacionada à fertilização com N e pode representar 30% a 50% da PGC total calculada. Desta forma, é importante que sejam calculados os fatores de emissão de N_2O regionais *in situ*, uma vez que as condições edafoclimáticas e as novas tecnologias de gestão podem diminuir as emissões. A suposição predominante em muitos estudos, inclusive neste artigo, é que as estimativas da PGC deveriam considerar o fator de emissão estipulado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), convencionalmente estabelecido em 1% do N aplicado. Porém, as emissões diretas de N_2O são substanciais, considerando sua magnitude e repercussões ambientais, devido ao potencial de aquecimento global da molécula de N_2O e, portanto, quanto mais precisa for a sua indicação, mais precisa será a estimativa da PGC.

Nos últimos anos, vários estudos realizados em diversos países, incluindo o Brasil, mediram detalhadamente o impacto da fertilização nitrogenada nas emissões de N_2O em solos cultivados com diferentes culturas. Esses estudos visam fomentar os relatórios de inventário regional, levando à melhor compreensão dos processos e fatores que governam as emissões. No contexto brasileiro, culturas como cana-de-açúcar, milho e arroz têm sido submetidas a intensas avaliações, principalmente devido à extensão de suas áreas de cultivo e às suas altas demandas de N (BAYER et al., 2015; MARTINS et al., 2015; SIGNOR et al., 2015; SOARES et al., 2015; ZSCHORNAC et al., 2018; DEGASPARI et al., 2020; MASCARENHAS et al., 2020).

Dada a influência das condições ambientais nas emissões de N_2O , com ênfase acentuada na umidade e no teor

de matéria orgânica do solo, estas emissões podem divergir significativamente mesmo entre áreas agrícolas que tenham culturas e potenciais produtivos semelhantes. Isto acentua a preocupação crítica de que a confiança na metodologia proposta pelo IPCC para determinar a PGC pode não ser adequada, gerando potencialmente uma penalidade superestimada para os sistemas de cultivo brasileiros. Consequentemente, o monitoramento das emissões de N_2O tem sido de suma importância. Vários estudos recentes em condições de campo no Brasil mostraram que a maioria dos fatores de emissão de N_2O (proporção de entrada de N emitida como N_2O) são inferiores ao valor padrão do IPCC (BESEN et al., 2021; GALDOS et al., 2023; MONTEIRO et al., 2023; MONTEIRO et al., 2023; SARKIS et al., 2023). Em estudo recente de Carvalho et al. (2021), os autores mostram que o fator de emissão de N_2O para fertilizantes nitrogenados utilizados na soqueira da cana-de-açúcar no Brasil foi de 0,6% do N aplicado. O uso das emissões regionais de N_2O na avaliação do ciclo de vida foi responsável pela redução da contribuição da fertilização nitrogenada para a PGC geral do etanol no Brasil entre 17% e 22%, em comparação com o valor padrão do IPCC. Além das condições edafoclimáticas, as práticas de manejo afetam o padrão das emissões de N_2O , permitindo adequar os fatores de emissão, conforme observado por Sarkis et al. (2023) para café e por Degaspari et al. (2020) para cana-de-açúcar, cujos estudos forneceram fatores de emissão específicos para fontes de N.

6. FUTUROS PASSOS RUMO À OBTENÇÃO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS NEUTROS OU DE BAIXO CARBONO

Numerosas nações estabeleceram ambiciosas metas para atingir a neutralidade de carbono até 2050. Dado que a produção de alimentos contribui significativamente para a PGC, correspondendo a 34% das emissões globais de GEE (CRIPPA et al., 2021), é necessário identificar práticas capazes de mitigar as emissões, reduzindo, assim, o impacto ambiental da produção de alimentos, para enfrentar os desafios relacionados às mudanças climáticas. As potenciais melhorias envolvem o aumento da produtividade e do sequestro de carbono, ou a diminuição das fontes de carbono. Consequentemente, há uma pressão crescente para otimizar as estratégias de produção e reduzir as emissões.

Uma abordagem fundamental para satisfazer o aumento previsto na demanda por alimentos é aumentar a produção agrícola nas áreas existentes, aumentando o rendimento por unidade de área. Os avanços no rendimento das culturas decorrem principalmente de melhorias genéticas, adequada utilização de insumos e melhores práticas de manejo no campo.

O melhoramento de plantas tem significado particular no contexto das alterações climáticas, com o provável aumento de estresses abióticos, como o calor e a seca, que

afetam negativamente diversas culturas. A adaptação das culturas às alterações climáticas iminentes exige pesquisas e desenvolvimentos aprofundados para compreender como as culturas respondem às mudanças climáticas. É fundamental ajustar a fenologia das culturas à disponibilidade de umidade e investir em variedades com fases de crescimento distintas para mitigar ou evitar ocorrências de estresses previsíveis em períodos críticos. Investimentos significativos por parte de instituições de melhoramento, empregando processos de melhoramento transgênicos e convencionais, têm sido direcionados para aumentar a resiliência das culturas.

As práticas agronômicas oferecem espaço substancial para melhorias. Estas práticas abrangem a otimização da densidade (estande) das plantas, a garantia de distribuição uniforme de sementes e emergência de plantas e a gestão de populações de plantas, especialmente para culturas de grãos. Hou et al. (2020) demonstraram um aumento potencial de 5,6% na produção de milho em toda a China sem a necessidade de aumentar a quantidade de N. Os avanços nos sistemas de semeadura para melhorar a distribuição ganharam força; no entanto, esses sistemas estão menos disponíveis para os pequenos agricultores. O momento da semeadura das culturas alinhado com o zoneamento agrícola é crítico. Isto é de particular importância para as culturas de safrinha, uma vez que existe relação direta com o ciclo da 1ª safra. Nos últimos anos, foram oferecidos aos agricultores mais variedades de soja de época precoce, permitindo que maior proporção da área de milho fosse colocada dentro do período de semeadura ideal (IMEA, 2022). Combinar híbridos de milho com arquitetura superior, reduzir as suas exigências hídricas, melhorar a interceptação de luz e alcançar maior densidade sem depender de fatores de produção adicionais, para além das sementes, são alternativas viáveis para reduzir a pegada de carbono.

Nos últimos anos, a Embrapa tem realizado pesquisas exaustivas sobre o uso de bactérias promotoras de crescimento de plantas para aumentar a eficiência de uso de nitrogênio (EUN). Entre os microrganismos estudados, o *Azospirillum brasiliense* demonstrou aumentar a EUN ao estimular o crescimento radicular (BARBOSA et al., 2022), e tem sido utilizado em culturas como soja (coinoculação) e cereais. Segundo Hungria et al. (2022), a adoção da inoculação pode potencialmente reduzir 25% da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho e mitigar até 236 kg CO_2 eq ha^{-1} . É importante ressaltar que tais reduções foram observadas principalmente em campos com baixas produtividades. De qualquer forma, a combinação de promotores de crescimento com programas nutricionais de culturas é uma nova fronteira para a agricultura adaptativa, uma vez que contribui para a resiliência das culturas e aumenta a eficiência na utilização de recursos.

Antes de fazer recomendações, é fundamental compreender as condições específicas do local em que as culturas serão cultivadas. O monitoramento contínuo do campo

permite uma melhor tomada de decisão pelos agricultores. Além disso, a evolução das técnicas de agricultura de precisão, facilitada pelos avanços tecnológicos, capacita os agricultores a gerenciarem grandes volumes de dados. A agricultura de precisão permite a aplicação de taxas variáveis para vários insumos, como sementes, água e fertilizantes, contribuindo para o ajuste fino do uso de recursos.

A adoção das práticas 4Rs e a otimização de nutrientes também são fundamentais para aumentar a EUN. Entre os 4Rs, a dose certa, especialmente de N, desempenha papel central na diminuição das emissões de N_2O e, consequentemente, na diminuição da PGC dos produtos agrícolas. Por essa razão, é fundamental monitorar a disponibilidade de nutrientes e, com base na análise do solo e na resposta local das culturas, os agricultores devem adaptar os programas nutricionais das culturas de maneira adequada, a fim de otimizar a dose de N. Os outros 3R's (local certo, fonte certa e época certa) também são importantes porque afetam o desempenho da cultura, e o agricultor deve seguir as recomendações de acordo com a cultura, condições ambientais e disponibilidade do produto.

Muitas vezes, os produtores de alimentos definem as boas práticas com base apenas nas suas atividades agrícolas. No entanto, como a agricultura depende do fornecimento de insumos, melhorias nos processos industriais da produção de insumos, como fertilizantes, são aspectos importantes para a descarbonização. Ao apoiar processos comprometidos com a redução de emissões, surgem oportunidades significativas para uma redução substancial nas emissões de CO_2 equivalente. Vale ressaltar que a fabricação de fertilizantes contribui com 30% a 40% para a pegada de carbono das principais culturas no Brasil. A substituição de fontes de energia e de matéria prima na produção de nitrogênio, passando do gás natural para fontes renováveis, como água (eletricidade como fonte de energia e eletrólise como fonte de hidrogênio), permite a produção de amônia verde, pavimentando uma redução de 90% nas emissões (AUSFELDER et al., 2022; CANTARELLA et al., 2023). Embora este processo ainda seja limitado e tenha custos elevados, algumas empresas estão profundamente empenhadas nesta transição energética que terá impacto nas pegadas de carbono das matérias-primas agrícolas. A adoção de fertilizantes com baixas pegadas de carbono permitirá aos agricultores melhorar as suas métricas de sustentabilidade.

O revestimento de fertilizantes com inibidores de nitrificação (IN) pode potencialmente diminuir as emissões de N_2O . Os INs atuam na primeira etapa da nitrificação, dificultando a conversão do amônio em nitrito. A redução da emissão de N_2O , segundo Carvalho et al. (2022), varia de 45% a 100%, sendo uma opção de gestão promissora para mitigar as emissões de N_2O e, portanto, diminuir a PGC das principais culturas no Brasil. Entre os INs, o DMPP (3,4-dimetilpirazol fosfato) tem se mostrado mais promissor que o DCD (dicianodiamida).

É importante dissociar as aplicações de fertilizantes nitrogenados da deposição de esterco ou dejetos. As plantações de milho para silagem e cana-de-açúcar costumam fazer uso de esterco, dejetos ou vinhaça. Lourenço et al. (2018) mostraram que antecipar ou adiar a aplicação de vinhaça em relação à fertilização com N pode reduzir as emissões de N_2O em 50%, enquanto a aplicação de vinhaça e fertilizantes ao mesmo tempo aumenta as emissões de N_2O acima dos valores de referência do IPCC, o que aumenta significativamente a PGC dos produtos. Os dejetos contêm água e C orgânico solúvel, e ambos podem causar esgotamento do oxigênio no solo, desencadeando emissões de N_2O . Mais do que dissociar a aplicação de ambos os fertilizantes (mineral e orgânico), é importante que os agricultores evitem a fertilização excessiva e definam os programas de nutrição das culturas combinando ambos os fertilizantes. Em algumas situações, os dejetos orgânicos podem suprir toda a demanda de P e K (JATE; LAMMEL, 2022). Diversas regiões do Brasil já possuem recomendações de resíduos orgânicos (IAC, 2022).

Alguns estudos mostram aumento nas emissões de carbono por tonelada ou hectare na agricultura irrigada em comparação com a agricultura de sequeiro (DACCACHE et al., 2014; ESMAELZADEH et al., 2019; ZHENG et al., 2019). No entanto, outros estudos sugerem que o efeito depende da unidade de medida da PGC (ZHANG et al., 2018) e da localização geográfica das culturas (GRASSINI; CASSMAN, 2012). No que diz respeito à eficiência de uso da água e à eficiência energética, existem diferenças significativas entre os sistemas de irrigação (sulco, aspersão, pivô, gotejo e outros). Por outro lado, a irrigação/fertirrigação tornou-se uma ferramenta importante tendo em conta as alterações climáticas, principalmente em regiões com períodos de seca frequentes, que podem ocorrer durante fases específicas do desenvolvimento das culturas e comprometer a produtividade.

Outro aspecto importante é a segurança alimentar. Segundo a FAO (2023), a agricultura irrigada representa 20% do total de terras cultivadas, mas contribui com mais de 40% do total de alimentos produzidos em todo o mundo. Um dos principais benefícios da fertirrigação é o aumento da produtividade, quando comparada à adubação sólida ou às áreas que são apenas irrigadas. Dependendo da cultura e da localização, os ganhos em produtividade podem duplicar. Nas áreas fertirrigadas, o uso de tratores é reduzido, o que evita a compactação do solo e diminui o uso de diesel. A fertirrigação também permite a aplicação frequente de nutrientes de acordo com a demanda da cultura, o que reduz as perdas e aumenta a eficiência. Estudos realizados na cultura de citros mostraram que a EUN aumentou cerca de 25% nas áreas fertirrigadas (QUAGGIO et al., 2019) e as emissões de N_2O foram significativamente inferiores (0,2% do N aplicado), comparado ao fator de referência do IPCC (MARTINS et al., 2014), possibilitando menor PGC da cultura nessas condições.

Boas práticas de manejo (BPM) podem ajudar os agricultores a reduzir a PGC pelo incremento no sequestro de C em solos agrícolas. O aumento do sequestro biológico de C no solo é uma abordagem bem conhecida para a remoção e armazenamento de CO_2 , principalmente em terras agrícolas e pastagens. No entanto, para que o C armazenado na matéria orgânica do solo seja contabilizado na PGC é necessário um tempo mínimo de permanência desse C no solo.

Sistemas de manejo conservacionista contribuem para a redução da PGC, acumulando C no perfil do solo ou aumentando a ciclagem de nutrientes e, portanto, dando suporte para reduzir a utilização de fertilizantes e defensivos. Benefícios adicionais derivam do aumento da infiltração e armazenamento de água, diminuindo a dependência da irrigação. De acordo com Snyder et al. (2009), a PGC da produção de milho nos EUA foi reduzida em 12%-15% com a adoção do sistema conservacionista, que incluiu menor uso de combustível, uma vez que as práticas mecânicas para o plantio direto são menos demandantes. O sistema conservacionista baseia-se no revolvimento mínimo do solo (menor consumo de energia e esgotamento mínimo da matéria orgânica do solo), na rotação de culturas e na manutenção de resíduos de culturas na superfície do solo. A adoção de leguminosas na rotação de culturas diminui a dependência do N externo e, consequentemente, diminui a PGC. Em um estudo de longo prazo realizado nos EUA, Ma et al. (2012) compararam o monocultivo contínuo de milho com a sucessão de leguminosas forrageiras (alfafa) e grãos (soja) e estimaram maiores emissões de GEE nos sistemas com leguminosas; no entanto, a pegada foi diminuída em todas as doses de N testadas devido à maior produtividade. O sistema de produção de milho com dose média de N ($100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), seguido de uma leguminosa forrageira, resultou em redução de 17% da PGC do milho, comparado com o sistema de monocultura de milho. Na rotação com soja, a redução foi equivalente a 8%. Contabilizando a contribuição de N dos resíduos de leguminosas e comparando 200 kg de N aplicados à monocultura com 100 kg de N aplicados ao milho em rotação com leguminosas, a PGC foi reduzida em 42% a 46% no sistema de rotação. Ao mesmo tempo, as práticas de manejo conservacionistas contribuem para o sequestro do C no solo, sendo altamente benéficas do ponto de vista da saúde e fertilidade do solo (PAUSTIAN et al., 2019).

O Brasil tem um dos exemplos mais bem sucedidos de consórcio de leguminosas em sistemas de sucessão com soja como cultura de 1ª época, antes do milho e do algodão. A eficiência da utilização do N nestes sistemas de cultivo é elevada, especialmente quando o milho sucede a soja. Novos sistemas de cultivo, combinando duas ou mais culturas, são alternativas para aumentar a produção de alimentos/madeira/energia por hectare. Exemplos muito bem estabelecidos são os sistemas agroflorestais com culturas perenes, como café, cacau e árvores frutíferas, e os sistemas de cultivo e pecuária, incluindo ou não a silvicultura. Para culturas de grãos, a consorciação com gramíneas ou leguminosas é uma

forma importante de promover a agricultura sustentável. Gramíneas como a *Brachiaria* sp. podem aumentar o acúmulo de C no solo, reduzir as perdas de N pela exploração mais profunda do solo, permitindo a ciclagem mais eficiente de nutrientes, enquanto as leguminosas podem reduzir a dependência da fertilização externa de N através da fixação biológica de N. Faltam estudos que avaliem a contribuição das culturas não comerciais para as emissões globais de N_2O e devem ser incentivados para compreender o efeito real de tais práticas na PGC das culturas.

7. IMPORTÂNCIA DA PEGADA DE CARBONO DO PRODUTO NAS POLÍTICAS PÚBLICAS E INTEGRAÇÃO DA CADEIA DE VALOR

A pesquisa científica assume papel fundamental na resposta às mudanças climáticas e na mitigação do impacto ambiental na agricultura. Fornece informações indispensáveis, facilitando a tomada de decisão com precisão por empresas e entidades governamentais. As pesquisas direcionadas ao estudo das emissões de GEE melhoram a compreensão das cadeias produtivas, identificando os setores e os insumos que apresentam maior impacto. Isto, por sua vez, permite a formulação de estratégias de mitigação mais precisas.

O setor agrícola brasileiro não foge a esse paradigma. À medida que a pesquisa avança, a aquisição de práticas de produção sustentáveis contribui não só para o discurso ecológico, mas também sustenta o estabelecimento de objetivos, garantindo o cumprimento da legislação ambiental. Consequentemente, isto está alinhado com o objetivo de redução das emissões globais. Dados de campo precisos ajudam empresas e governos na elaboração de políticas, incentivos direcionados e no acesso a subsídios baseados em soluções ambientais.

Uma proporção significativa da PGC dos produtos agrícolas provém da utilização de fertilizantes nitrogenados. Portanto, a adoção de fontes derivadas de processos mais eficientes, como catalisadores ou produção de fertilizantes verdes, tem o potencial de reduzir substancialmente as emissões. Isto não só ajuda a atingir as metas estabelecidas pelo governo mas também contribui para a redução das emissões das empresas de alimentos. É crucial reconhecer o papel fundamental que os fertilizantes nitrogenados desempenham na agricultura, principalmente no aumento da produtividade das culturas. Além disso, os fertilizantes com baixa PGC podem aumentar a rentabilidade dos produtores, adicionando valor comercial aos produtos agrícolas e garantindo acesso aos mercados internacionais. A escolha de fertilizantes nitrogenados provenientes de fábricas que combatem as emissões de N_2O nos locais de produção é uma estratégia disponível, embora a produção de fertilizantes verdes ainda não ocorra em grande escala. Processos rigorosos de homologação e rastreabilidade são fundamentais para garantir a mitigação de emissões em

toda a cadeia produtiva, especialmente considerando os mercados futuros que exigem medição de carbono, relatório e verificação (MRV).

Os resultados elucidados neste artigo lançam luz sobre aspectos críticos da agricultura brasileira. Isto inclui conhecimentos sobre a produção inovadora de tecnologias de fertilizantes que reduzem as emissões nos locais de produção e uma compreensão dos impactos de várias fontes de N na produtividade das culturas e na eficiência de uso dos recursos, levando à redução na PGC das culturas. Depender apenas da produção inovadora de fertilizantes verdes nitrogenados pode resultar em reduções da PGC que variam de 27% a 68% para culturas como algodão, café, cana-de-açúcar e milho no Brasil. Quando combinadas com outras práticas de manejo conservacionistas e de baixas emissões, essas estratégias impulsionam a agricultura brasileira em direção à neutralidade de carbono. Alinhamentos estratégicos e modelos de negócios que promovam parcerias para a produção de baixo carbono são essenciais para o avanço da agricultura brasileira no cenário global, reforçando a posição do Brasil como uma potência agroambiental.

É fundamental enfatizar a importância de índices confiáveis e específicos da região, como fatores de emissão e acúmulo de carbono locais. A pesquisa de longo prazo auxilia na compreensão da dinâmica dos solos tropicais, oferecendo exemplos e correções para calculadoras de PGC. Tal como observado com o N_2O , um valor padrão constante pode não ser universalmente aplicável, necessitando de fatores de emissão adaptados com base em circunstâncias específicas.

A colaboração entre o governo e as entidades de pesquisa é fundamental na orientação de programas, como o Plano Nacional de Fertilizantes. O conhecimento oriundo da pesquisa, alinhado aos pontos fortes ambientais do setor agrícola, orienta os investimentos em fontes mais eficientes, descarbonizando simultaneamente as cadeias de produção e aumentando a produção de alimentos.

A ascensão do termo “pegada de carbono” e sua relevância para os agricultores brasileiros é impulsionada por uma combinação de preocupações ambientais globais, pressões regulatórias, demandas do mercado por sustentabilidade e a busca por práticas agrícolas inovadoras e eficientes. Conhecer suas métricas e gerenciar ativamente a PGC está se tornando parte integrante da sustentabilidade e competitividade de longo prazo do setor agrícola, tanto no Brasil quanto no mundo.

A jornada que temos pela frente é substancial, exigindo esforços coordenados entre os setores públicos e privados para enfrentar as mudanças climáticas e descarbonizar as cadeias de produção de alimentos, e assim garantir a segurança alimentar.

REFERÊNCIAS

ADVIENTO-BORBE, M. A. A.; HADDIX, M. L.; BINDER, D. L.; WALTERS, D. T.; DOBERMANN, A. Soil greenhouse gas fluxes and global war-

ming potential in four high-yielding maize systems. **Global Change Biology**, v. 13, p. 1972–1988, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01421.x>

ALENCAR, A.; ZIMBRES, B.; SOUZA, E.; TSAI, D.; SILVA, F. B.; QUINTANA, G. de O.; GRACES, I.; COLUNA, I.; SHIMBO, J. Z.; CARVALHO, K.; POTENZA, R. F. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa dos sistemas alimentares no Brasil**. SEEG, 2023. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/10/SEEG_alimentares.pdf>. Acesso em: 10 nov. 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.

BARBER, A.; PELLOW, G.; BARBER, M. **Carbon footprint of New Zealand arable production – Wheat, maize silage, maize grain and ryegrass seed**. Kumeu: AgriLINK New Zealand Ltd., 2011. (MAF Technical Paper No: 2011/97). Disponível em: <Carbon Footprint of New Zealand Arable Production – Wheat, Maize Silage, Maize Grain and Ryegrass Seed (mpi.govt.nz)>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BARBOSA, J. Z.; ROBERTO, LL. A.; HUNGRIA, M.; CORRÊA, R. S.; MAGRI, E.; CORREIA, T. D. Meta-analysis of maize responses to *Azospirillum brasilense* inoculation in Brazil: Benefits and lessons to improve inoculation efficiency. **Applied Soil Ecology**, v. 170, 104276, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104276>

BAYER, C.; GOMES, J.; ZANATTA, J. A.; VIEIRA, F. C. B.; PICCOLO, M. de C.; DIECKOW, J.; SIX, J. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 213–222, 2015. doi:10.1016/j.still.2014.10.011

BEER, T.; MEYER, M.; GRANT, T.; RUSSELL, K.; KIRKBY, C.; CHEN, D.; EDIS, R.; LAWSON, S.; WEEKS, I.; GALBALLY, I.; FATTORE, A.; SMITH, D.; LI, Y.; WANG, G.; PARK, K.; TURNER, D.; THACKER, J. **Life-cycle assessment of greenhouse gas emissions from agriculture in relation to marketing and regional development – Irrigated maize: From maize field to grocery store**. Canberra: CSIRO, 2005. (Report HQ06A/6/F3.5.)

BESSEN, M. R.; RIBEIRO, R. H.; MINATO, E. A.; BATISTA, M. A.; BAYER, C.; PIVA, J. T. Modelling of N_2O emissions from a maize crop after the application of enhanced-efficiency nitrogen fertilisers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, p. 1645–1656, 2021. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1892724>

BORDONAL, R. O.; FIGUEIREDO, E. B.; AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; LA SCALA, N. Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 195–207, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.040>

BORDONAL, R. O.; FIGUEIREDO, E. B.; AGUIAR, D. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; LA SCALA, N. Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 195–207, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.040>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio**. Brasília, DF: MME, 2021. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes-Arquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20\(2\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes-Arquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf)>. Acesso em: 9 dez. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Resolução nº 8, de 18 de agosto de 2020, do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 de setembro de 2020. Edição 174, Seção 1, p. 2.

BRENTROP, F.; LAMMEL, J.; STEPHANI, T.; CHRISTENSEN, B. Updated carbon footprint values for mineral fertilizer from different world regions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ASSESSMENT OF FOOD (LCA Food 2018), 11., 2018, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok, 2018. 4 p.

BSI. British Standards Institution. **The Guide to PAS 2050:2011**: How to carbon footprint your products, identify hotspots and reduce emissions in your supply chain. London, 2011. Disponível em: <<https://www.bsigroup.com/globalassets/localfiles/en-th/carbon-footprint/pas-2050-2011-guide.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

CANTARELLA, H.; HORTA NOGUEIRA, L. A.; MOMESSO, L. Amônia verde: reduzindo a pegada de carbono de fertilizantes nitrogenados. **Informações Agrônomicas**, n. 18, p. 5–9, 2023.

CANTARELLA, H.; DEGASPARI, I. A. M.; ROSSETO, R.; SOUZA, T. R. Quantification of NH₃ and N₂O emissions and carbon footprint of N fertilizers in sugarcane. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 19., 2022, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** São Paulo, 2022.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS Jr., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. (Ed.). **Boletim 100**: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. 489 p.

CARVALHO, A.; M.; OLIVEIRA, A. D.; COSER, T. R.; SOUSA, T. R.; LIMA, C. A.; RAMOS, M. L. G.; MALAQUIAS, J. V.; GONÇALVES, A. D. A.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q. N₂O emissions from sugarcane fields under contrasting watering regimes in the Brazilian savannah. **Environmental Technology & Innovation**, v. 22, 101470, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101470>

COOL FARM ALLIANCE. **The cool farm tool**. Grantham, 2023. Disponível em: <<https://coolfarm.org/the-tool>>. Acesso em: 9 dez. 2023.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira – Grãos**: Primeiro levantamento – safra 2023/24. v. 11, n. 1, p. 1–117, 2023. Brasília, DF: CONAB, 2023.

CRIPPA, M.; SOLAZZO, E.; GUIZZARDI, D.; MONFORTI-FERRARIO, F.; TUBIELLO, F. N.; LEIP, A. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature Food**, v. 2, n. 3, p. 198–209 2021. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>

DACCACHE, A.; CIURANA, J. S.; RODRIGUEZ DIAZ, J. A.; KNOX, J. W. Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, 124014, 2014. DOI 10.1088/1748-9326/9/12/124014

DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N₂O and NH₃ in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, p. 329–344, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w>

DOBERMANN, A.; BRUULSEMA, T.; CAKMAK, I.; GERARD, B.; MAJUMDAR, K.; McLAUGHLIN, M.; REIDSMA, P.; VANLAUWE, B.; WOLLENBERG, L.; ZHANG, F.; ZHANG, X. Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. **Global Food Security**, v. 33, 100636, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100636>

ECOINVENT. Ecoinvent database. Zurich, 2023. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 9 dez. 2023.

ESMAEILZADEH, S.; ASGHARIPOUR, M. R.; BAZRGAR, A. B.; SOUFIZADEH, S.; KARANDISH, F. Assessing the carbon footprint of irrigated and dryland wheat with a life cycle approach in bojnourd. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 38, n. 4, e13134, 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.13134>

EUROPEAN COMMISSION. Joint Research Centre. **General guide for life cycle assessment**: Detailed guidance. 1st edition. Luxembourg: Ed. Publication Office of the European Union, 2010.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Water**. Roma, 2023. Disponível em: <<https://www.fao.org/water/en/>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FERTILIZERS EUROPE. **Carbon footprinting in fertilizer production**. Brussels: Fertilizers Europe, 2023. Disponível em: <<https://www.fertilizerseurope.com/initiatives/carbon-footprint-calculator/>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FERTILIZERS EUROPE. **Carbon footprint reference values**: Energy efficiency and greenhouse gas emissions in European mineral fertilizer production and use. Brussels: Fertilizers Europe, 2011.

GALDOS, M. V.; SOARES, J. R.; LOURENÇO, K. S.; HARRIS, P.; ZERI, M.; CUNHA-ZERI, G.; VARGAS, V.; DEGASPARI, I. A. M.; CANTARELLA, H. Multi-experiment assessment of soil nitrous oxide emissions in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 127, p. 375–392, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10321-w>

GRASSINI, P.; CASSMAN, K. High-yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. **PNAS**, v. 109, n. 4, p. 1074–1079, 2012. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116364109>

HILLIER, J.; HAWES, C.; SQUIRE, G.; HILTON, A.; WALE, S.; SMITH, P. The carbon footprints of food crop production. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 7, n. 2, p. 107–118, 2009. doi:10.3763/ijas.2009.0419

HOU, P.; LIU, Y.; LIU, W. et al. How to increase maize production without extra nitrogen input. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, 104913, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104913>

HOXHA, A.; CHRISTENSEN, B. The carbon footprint of fertiliser production: Regional reference values. In: International Fertiliser Society Conference, 2018. **Proceedings...** Prague: International Fertiliser Society, 2019. 21 p.

- HUNGRIA, M.; BARBOSA, J. Z.; RONDINA, A. B. L.; NOGUEIRA, M. A. Improving maize sustainability with partial replacement of N fertilizers by inoculation with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy Journal**, p. 1–12, 2022. <https://doi.org/10.1002/agj.2.21150>
- IBICT. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **O que é avaliação do ciclo de vida?** Disponível em: <<https://acv.ibict.br/acv/o-que-e-o-acv/>>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- ILLY. **Impact Report 2022**. Trieste, 2022. Disponível em: <<https://www.illy.com/en-ww/who-we-are/illy-mission-values?lang=en>>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- IMEA. Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Milho**. Cuiabá, 2023. Disponível em: <<https://www.imea.com.br/imea-site/indicador-milho>>. Acesso em: 20 out. 2023.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14067:2018**: Greenhouse gases: – Carbon footprint of products. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/71206.html>>. Acesso em: 2 out. 2023.
- JATE, M.; LAMMEL, J. Effect of balanced and integrated crop nutrition on sustainable crop production in a classical long-term trial. In: **Sustainable crop production** – Recent advances. London: IntechOpen, 2022. 25 p. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.102682>
- LOURENÇO, K. S.; DIMITROY, M. R.; PIJL, A.; SOARES, J. R.; CARMO, J. B.; VEEN, J. A. van; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Dominance of bacterial ammonium oxidizers and fungal denitrifiers in the complex nitrogen cycle pathways related to nitrous oxide emission. **GCB Bioenergy**, v. 10, p. 645–660, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12519>
- MA, B. L.; LIANG, B. C.; BISWAS, D. K.; MORRISON, M. J.; McLAUGHLIN, N. B. The carbon footprint of maize production as affected by nitrogen fertilizer and maize-legume rotations. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 94, p. 15–31, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9522-0>
- MAPA. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33**, Projeções a longo prazo. Brasília, DF, 2023.
- MARTIN, A. How green is my orange? **The New York Times**, New York, 22 jan. 2009. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2009/01/22/business/worldbusiness/22iht-22pepsi.19583527.html>>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- MARTINS, A. A. **Fluxos de N₂O, CH₄ e CO₂ em citros adubado via fertirrigação**. 2014. 103 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2014.
- MARTINS, M. R.; JANTALIA, C. P.; POLIDORO, J. C.; BATISTA, J. N.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. **Soil & Tillage Research**, v. 151, p. 75–81, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.004>
- MASCARENHAS, Y. S.; SILVA, M. A. S. da; CORRECHEL, V.; SANTOS, A. B. dos; CARVALHO, M. T. de M.; MADARI, B. E.; COELHO, A. S.; GONÇALVES, G. M. de O.; CAETANO, P. H. P. Emission of nitrous oxide in flooded rice cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01497, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01497>
- McMANUS, M.; TAYLOR, C. The changing nature of life cycle assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 82, p. 13–26, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.024>
- MEKONNEN, M. M.; ROMANELLI, T. L.; RAY, C.; HOESKTRA, A. Y.; LISKA, A. J.; NEALE, C. M. U. Water, energy and carbon footprint of bioethanol from the U.S. and Brazil. **Environmental Science & Technology**, v. 52, p. 14508–14518, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03359>
- MIDDELAAR, C. E. van; CEDERBERG, C.; VELLINGA, T. V.; VAN DER WERF, H. M. G.; BOER, I. J. M. Exploring variability in methods and data sensitivity in carbon footprints of feed ingredients. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 768–782, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0521-9>
- MONTEIRO, R. C.; FRANHINI, J. C.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Soil nitrous oxide emissions from a soybean-wheat succession under different tillage systems in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, e0220135, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220135>
- MORDINI, M.; NEMECEK, T.; GAILLARD, G. **Carbon & water footprint of oranges and strawberries: A literature review**. Zurich: Federal Department of Economic Affairs, 2009. 76 p. Disponível em: <<https://saipatform.org/uploads/Library/WG%20Fruit%20%20ART%20Final%20Report.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2023.
- MOREIRA, M. M. R.; SEABRA, J. E. A.; LYND, L. R.; ARANTES, S. M.; CUNHA, M. P.; GUILHOTO, J. J. M. Socio-environmental and land-use impacts of double-cropped maize ethanol in Brazil. **Nature Sustainability**, v. 3, p. 209–216, 2020. doi:10.1038/s41893-019-0456-2
- NESTLÉ. **Relatório de criação de valor compartilhado e sustentabilidade de 2022**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.nestle.com.br/sites/g/files/pydnoa436/files/2023-05/Nestle_RCVCS2022_Conext_v3.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- OTTO, R.; CANTARELLA, H.; GUELF, D.; CARVALHO, M. C. C. Nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Informações Agronômicas**, n. 9, p. 30–50, março 2021.
- OTTO, R.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; SOARES, J. R.; CARNEIRO, P. V.; COSER, T. R.; HOROWITZ, N.; SOARES, L. C.; NOVAES, G. B.; VARGAS, V. P.; HOLZSCHUH, M. J. Nitrogen fertilizer management on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield and quality in two tropical soils. **European Journal of Agronomy**, v. 142, 126672, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126672>
- PAUSTIAN, K.; LARSON, E.; KENT, J.; MARX, E.; SWAN, A. Soil C sequestration as biological negative emission strategy. **Frontiers in Climate**, v. 1, article 8, 2019. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- PEPSICO. **2022 ESG Summary overview: A high-level overview of our digital 2022 ESG Summary**. New York, 2022. Disponível em: <<https://www.pepsico.com/our-impact/sustainability/report-downloads>>. Acesso em: 28 nov. 2023.
- QI, J.; YANG, S.; XUE, J.; LIU, C.; DU, T.; HAO, J.; CUI, F. Response of carbon footprint of spring maize production to cultivation patterns in the Loess Plateau, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 525–536, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.184>

- QUAGGIO, J. A.; SOUZA, T. R.; ZAMBROSI, F. C. B.; MATTOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; SILVA, G. Citrus fruit yield response to nitrogen and potassium fertilization depends on nutrient-water management system. **Scientia Horticulturae**, v. 249, p. 329–333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.001>
- SARKIS, L. F.; DUTRA, M. P.; SANTOS, C. A.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; GUELF, D. Nitrogen fertilizers technologies as a smart strategy to mitigate nitrous oxide emission and preserve carbon and nitrogen soil stocks in a coffee crop system. **Atmospheric Environment: X**, v. 20, 100224, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100224>
- SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa - Observatório do Clima. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa dos sistemas alimentares no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/10/SEEG_alimentares.pdf>. Acesso em 20 nov. 2023.
- SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; CONANT, R. N₂O emissions due to nitrogen fertilizer application in two regions of sugarcane cultivation in Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 8, 015013, 2015.
- SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; McCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, O.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIRONTEKO, O. Agriculture. In: In: METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. (Ed.). **Climate Change 2007: Mitigation of climate change**. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- SMITH, C.; NICHOLLS, Z. R. J.; ARMOUR, K.; COLLINS, W.; FORSTER, P.; MEINSHAUSEN, M.; PALMER, M. D.; WATANABE, M. The earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity supplementary material. In: MASSON-DELMOTTE, V., P. et al. (Ed.). **Climate change 2021: The physical science basis**. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf>.
- SNYDER, C. S.; BRUULSEMA, T. W.; JENSEN, T. L.; FIXEN, P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 133, n. 3/4, p. 247–266, 2009.
- SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; CARMO, J. C.; MARTINS, A. A.; SOUSA, R. M.; ANDRADE, C. A. 2015. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, p. 423–430, 2015. doi:10.2134/jeq2014.02.0096
- SOUZA, T. L.; OLIVEIRA, D. P.; SANTOS, C. F.; REIS, T. E. P.; CABRAL, J. P. C.; RESENDE, E. R. S.; FERNANDES, T. J.; SOUZA, T. R.; BUILES, V. R.; GUELF, D. Nitrogen fertilizer technologies: opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 345, 108317, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108317>
- STAPPEN, F. van; MATHOT, M.; LORIER, A.; DELCOUR, A.; STILLMANT, D.; PLANCHON, V.; BODSON, B.; LÉONARD, A.; GOFFART, J. Sensitive parameters in local agricultural life cycle assessments: the illustrative case of cereal production in Wallonia, Belgium. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 225–250, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1325-8>
- UUSUBHARATANA, P.; PHUNGGRASSAMI, H. Ecological footprint analysis of canned sweet corn. **Journal of Ecological Engineering**, v. 17, p. 22–29, 2016. <https://doi.org/10.12911/22998993/63320>
- VIDOVIC, D.; MARMIER, A.; ZORE, L.; MOYA, J. A. **Greenhouse gas emission intensities of the steel, fertilisers, aluminium and cement industries in the EU and its main trading partners**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2023. doi:10.2760/359533, JRC134682.
- WANG, Z.; WEN, X.; ZHANG, H.; LU, X.; CHEN, F. Net energy yield and carbon footprint of summer corn under different N fertilizer rates in the North China Plain. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 8, p. 1534–1541, 2015. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61042-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61042-5)
- WRI. World Resources Institute. **Product life cycle accounting and reporting standard**. Washington DC, 2011. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf>
- XU, Z.; LIU, G.; XU, W.; DAI, Y. Evaluation of greenhouse gas emissions from maize production in China. **Chemical Engineering Transactions**, v. 70, p. 1309–1314, 2018. <https://doi.org/10.3303/CET1870219>
- YAN, M.; CHENG, K.; LUO, T.; YAN, Y.; PAN, G.; REES, R. M. Carbon footprint of grain crop production in China – based on farm survey data. **Journal of Cleaner Production**, v. 104, p. 130–138, 2015.
- ZHANG, D.; SHEN, J.; ZHANG, F.; LI, Y. E.; ZHANG, W. Carbon footprint of grain production in China. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–11, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04182-x>
- ZHANG, W.; HE, X.; ZHANG, Z.; GONG, S.; ZHANG, Q.; ZHANG, W.; CHEN, X. Carbon footprint assessment for irrigated and rainfed maize (*Zea mays* L.) production on the Loess Plateau of China. **Biosystems Engineering**, v. 167, p. 75–86, 2018.
- ZHANG, X.; PU, C.; ZHAO, X.; XUE, J.; ZHANG, R.; NIE, Z.; CHEN, F.; LAL, R.; ZHANG, H. Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat-summer maize cropping system of the North China Plain. **Ecological Indicators**, v. 67, p. 821–829, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.046>
- ZHANG, Z.; HUANG, J.; YAO, Y.; PETERS, G.; MACDONALD, B.; LA ROSA, A. D.; WANG, Z.; SCHERER, L. Environmental impacts of cotton and opportunities for improvement. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 4, p. 703–715, 2023.
- ZHENG, H.; YING, H.; YIN, Y.; WANG, Y.; HE, G.; BIAN, Q.; YANG, Q. Irrigation leads to greater maize yield at higher water productivity and lower environmental costs: A global meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 273, p. 62–69, 2019.
- ZSCHORNACK, T.; ROSA, C. M.; REIS, C. E. S.; PEDROSO, G. M.; CAMARGO, E. S.; SANTOS, D. C.; BOENI, M.; BAYER, C. Soil CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southern Brazil as affected by crop management levels: a threeyear field study. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170306, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170306>