

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE GOIÁS – UNIGOIÁS
SUPERVISÃO DA ÁREA DE PESQUISA CIENTÍFICA – SAPC
CURSO DE AGRONOMIA

**PROPONDO O CONCEITO DE PRODUTO FÍSICO MARGINAL NA MELHORA
DO USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA CULTURA DO MILHO**

NOME DO DISCENTE: GABRIEL PEREIRA DO CARMO
ORIENTADOR(A)/PROFESSOR(A): CRISTIANE REGINA BUENO AGUIRRE RAMOS

GOIÂNIA – GOIÁS
JUNHO/2026

GABRIEL PEREIRA DO CARMO

**PROPONDO O CONCEITO DE PRODUTO FÍSICO MARGINAL NA MELHORA
DO USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA CULTURA DO MILHO**

Monografia apresentada ao curso de Agronomia do Centro
Universitário Goiás - UNIGOIÁS como pré-requisito para
obtenção do título de bacharel em agronomia.

Orientadora: Cristiane Regina Bueno Aguirre Ramos

GOIÂNIA – GOIÁS
JUNHO/2026

RESUMO: Esta revisão bibliográfica teve como objetivo analisar a aplicação do conceito de Produto Físico Marginal (PFM) na otimização da adubação nitrogenada na cultura do milho, relacionando aspectos econômicos, agrônômicos e ambientais. O estudo foi desenvolvido por meio da análise de artigos científicos, publicações institucionais, manuais técnicos e demais fontes especializadas sobre o tema. A revisão abordou a Lei dos Rendimentos Marginais Decrescentes, a determinação da dose economicamente ótima de nitrogênio, a eficiência do uso do nutriente, os impactos ambientais decorrentes da adubação nitrogenada e as recomendações técnicas adotadas no contexto brasileiro. Os resultados evidenciaram que o PFM constitui importante ferramenta para definição da dose economicamente ótima de nitrogênio, permitindo maximizar a rentabilidade da produção sem comprometer significativamente a produtividade. Além disso, a adoção de doses próximas ao ótimo econômico contribui para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio e reduzir perdas ambientais associadas à volatilização, lixiviação e emissão de gases de efeito estufa. No Brasil, observam-se avanços relevantes no desenvolvimento de tecnologias voltadas à eficiência nitrogenada, com destaque para o uso de bioinsumos e fertilizantes de eficiência aumentada. Conclui-se que a aplicação do conceito de Produto Físico Marginal representa uma estratégia eficaz para conciliar produtividade, rentabilidade econômica e sustentabilidade ambiental na cultura do milho.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada, Dose economicamente ótima, Eficiência do uso de nitrogênio, Milho.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	6
1 REVISÃO DE LITERATURA	8
1.1 CONCEITO DE PRODUTO FÍSICO MARGINAL (PFM) E SUA DERIVAÇÃO ECONÔMICA	8
1.2 DETERMINAÇÃO DA DOSE ECONOMICAMENTE ÓTIMA DE NITROGÊNIO	10
1.3 EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO (NUE) E RELAÇÃO COM PFM	12
1.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E A OTIMIZAÇÃO MARGINAL	14
1.5 RECOMENDAÇÕES OFICIAIS E ABORDAGENS ECONÔMICAS NO CONTEXTO BRASILEIRO	15
1.6 LEI DOS RENDIMENTOS MARGINAIS DECRESCENTES E A FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DO MILHO	19
CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS	21
USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	24

INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays L.*) ocupa posição estratégica no cenário agrícola brasileiro, constituindo importante base para a segurança alimentar, a produção de biocombustíveis e a geração de divisas para o agronegócio nacional. O expressivo aumento da produtividade observado nas últimas décadas está associado aos avanços tecnológicos dos sistemas de produção, especialmente à adoção de cultivares de elevado potencial genético, à utilização de práticas conservacionistas de manejo e ao uso de fertilizantes nitrogenados (SORATTO *et al.*, 2022).

O nitrogênio (N) é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do milho, participando diretamente da formação de proteínas, clorofila e ácidos nucleicos, processos fundamentais para o crescimento vegetal e a formação dos componentes de rendimento. Entretanto, a adubação nitrogenada apresenta dinâmica complexa no sistema solo-planta-atmosfera, estando sujeita a perdas por volatilização de amônia (NH_3), desnitrificação e lixiviação, fatores que reduzem a eficiência do fertilizante e podem gerar impactos ambientais significativos.

Nesse contexto, a busca por estratégias capazes de conciliar elevada produtividade com maior eficiência no uso dos insumos tem ganhado relevância crescente, sobretudo diante da volatilidade dos preços dos fertilizantes e das exigências relacionadas à sustentabilidade ambiental. Estima-se que apenas 35% do nitrogênio aplicado às culturas seja efetivamente aproveitado pelas plantas, enquanto o restante é perdido para o ambiente (RICHIE, 2021 apud BORNMAN, 2022). Dessa forma, a eficiência do uso de nitrogênio (NUE – Nitrogen Use Efficiency) tornou-se um importante indicador do desempenho agronômico, econômico e ambiental dos sistemas produtivos.

A otimização do uso do nitrogênio, contudo, não depende exclusivamente de aspectos agronômicos. A tomada de decisão quanto à dose de fertilizante a ser aplicada também envolve fundamentos econômicos relacionados aos custos de produção e ao valor do produto obtido. Nesse cenário, destaca-se o conceito de Produto Físico Marginal (PFM), oriundo da teoria econômica da produção, que fornece base analítica para a determinação de doses economicamente eficientes de fertilizantes.

O PFM é definido como a variação da produção total decorrente da aplicação de uma unidade adicional de determinado insumo, mantendo-se constantes os demais fatores de produção. No caso da adubação nitrogenada, representa a quantidade adicional de grãos produzida em resposta à aplicação de mais uma unidade de nitrogênio. Esse conceito permite compreender o comportamento da produtividade marginal ao longo da função de produção da cultura, evidenciando o fenômeno conhecido como Lei dos Rendimentos Marginais Decrescentes (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990).

A análise econômica baseada no Produto Físico Marginal estabelece que o ponto de otimização ocorre quando o retorno proporcionado pela última unidade de fertilizante aplicada se iguala ao seu custo. Assim, diferentemente da dose agronômica máxima, que busca exclusivamente a maior produtividade física possível, a dose economicamente ótima considera simultaneamente

produtividade e rentabilidade, reconhecendo que aplicações adicionais de nitrogênio podem deixar de ser economicamente justificáveis mesmo quando ainda promovem pequenos incrementos produtivos (BORNMAN, 2022).

Estudos conduzidos em diferentes regiões do mundo demonstram que a utilização do PFM como critério para definição das doses de nitrogênio pode proporcionar ganhos econômicos e ambientais expressivos. Na Etiópia, verificou-se ampla variação nas doses ótimas de nitrogênio em função das condições locais de produção (ASSEFA *et al.*, 2020). Na África do Sul, a adequação das doses ao nível economicamente ótimo promoveu aumento da eficiência de uso do nitrogênio e redução dos custos com fertilizantes, com pequena redução na produtividade, compensada pelo maior retorno econômico (BORNMAN, 2022). Esses resultados indicam que a aplicação do conceito de PFM contribui não apenas para a maximização do lucro, mas também para a redução das perdas de nitrogênio e dos impactos ambientais associados.

No Brasil, embora a adubação nitrogenada do milho seja amplamente estudada sob a perspectiva agrônoma, a incorporação sistemática de critérios econômicos fundamentados no PFM ainda é limitada nas recomendações técnicas e nas decisões de manejo adotadas pelos produtores. De modo geral, os sistemas de recomendação utilizados no país baseiam-se em curvas de resposta obtidas em condições experimentais e em expectativas de produtividade, nem sempre considerando as variações dos preços relativos entre fertilizantes e grãos que influenciam diretamente a rentabilidade da atividade agrícola (SORATTO *et al.*, 2022).

Diante desse panorama, esta revisão bibliográfica tem como objetivo analisar a aplicação do conceito de PFM na otimização da adubação nitrogenada na cultura do milho, considerando seus efeitos sobre a rentabilidade econômica, a eficiência do uso do nitrogênio e a sustentabilidade ambiental.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1 CONCEITO DE PRODUTO FÍSICO MARGINAL (PFM) E SUA DERIVAÇÃO ECONÔMICA

O PFM é definido como a variação da produção total decorrente da aplicação de uma unidade adicional de determinado insumo, mantendo-se constantes os demais fatores de produção (SALLES; GONÇALVES, 1980). No caso da adubação nitrogenada, representa a quantidade adicional de grãos produzida em resposta à aplicação de mais uma unidade de nitrogênio. Esse conceito permite compreender o comportamento da produtividade marginal ao longo da função de produção da cultura, evidenciando o fenômeno conhecido como Lei dos Rendimentos Marginais Decrescentes (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990).

Matematicamente, o Produto Físico Marginal é expresso por:

$$PFM = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}$$

Onde:

- Y = produtividade de grãos (kg ha^{-1})
- X = dose de nitrogênio aplicada (kg ha^{-1})

A condição de otimização econômica, por sua vez, estabelece que o ponto de maximização do lucro ocorre quando o valor do produto marginal se iguala ao custo do insumo marginal, conforme a seguinte relação:

$$PFM \times P_{\text{grão}} = P_{\text{fertilizante}} \Rightarrow PFM = P_{\text{grão}} / PN$$

Onde $P_{\text{grão}}$ representa o preço de venda do milho e $P_{\text{fertilizante}}$ (ou PN) o custo de aquisição da unidade de nitrogênio (BORNMAN, 2022; SORATTO et al., 2022).

Na cultura do milho, o PFM expressa a quantidade adicional de grãos produzida por unidade de nitrogênio aplicada. Em funções quadráticas de produção, o comportamento do PFM evidencia retornos marginais decrescentes à medida que ocorre aumento das doses de nitrogênio, indicando redução gradual da eficiência produtiva do insumo (BORNMAN, 2022).

A utilização econômica dos fertilizantes nitrogenados baseia-se no princípio da maximização do lucro. Nesse contexto, a dose ótima de nitrogênio é alcançada quando o valor do produto marginal se iguala ao custo do insumo aplicado. Assim, a aplicação adicional de nitrogênio somente é economicamente viável enquanto a receita gerada pelo incremento produtivo superar o custo da adubação (SORATTO et al., 2022; BORNMAN, 2022).

A relação entre o preço do fertilizante e o preço do grão exerce influência direta sobre a definição da dose economicamente ótima. Quando o fertilizante apresenta custo elevado em relação ao

milho produzido, torna-se necessário maior retorno produtivo para justificar novas aplicações, reduzindo a dose economicamente recomendada. Em situações de valorização do grão, entretanto, a tendência é de aumento da dose ótima de nitrogênio (BORNMAN, 2023; KITCHEN *et al.*, 2022).

Estudos conduzidos por Berry, Dicks e Ortmann (1990) demonstraram que alterações nos preços relativos podem modificar substancialmente as doses economicamente ótimas entre diferentes safras. Dessa forma, a recomendação de nitrogênio deve ser considerada dinâmica, variando conforme condições de mercado, potencial produtivo da cultura e características do ambiente de produção.

A dose agrônômica máxima corresponde ao ponto de máxima produtividade física, no qual o PFM se iguala a zero. Já a dose economicamente ótima ocorre antes desse ponto, uma vez que a maximização do lucro não coincide necessariamente com a máxima produção. Assim, doses superiores ao ótimo econômico tendem a reduzir a eficiência de utilização do nitrogênio e aumentar perdas do sistema produtivo (BORNMAN, 2022).

Kitchen *et al.* (2022) observaram que, em aplicações próximas ao ponto ótimo, a eficiência incremental do nitrogênio apresentou valores reduzidos, indicando menor retorno produtivo das doses adicionais. De forma semelhante, Bornman (2023) verificou que, em cenários de fertilizante mais caro, a redução moderada das doses de N promoveu aumento da eficiência de uso do nutriente, com pequena redução da produtividade e maior rentabilidade econômica.

A definição da dose ótima também depende da função utilizada para representar a resposta produtiva da cultura. Enquanto modelos quadráticos assumem redução linear do PFM e possibilidade de máxima produção física, funções do tipo Mitscherlich-Baule descrevem resposta assintótica, na qual os incrementos produtivos tornam-se progressivamente menores sem que o PFM assuma valores negativos (CSEA AFRICA, 2022).

Além disso, abordagens recentes têm utilizado indicadores como a eficiência incremental do uso do nitrogênio (iNUE) para identificar o ponto em que os ganhos produtivos deixam de justificar economicamente novas aplicações. Essa metodologia permite análises mais flexíveis e menos dependentes de modelos matemáticos específicos (KITCHEN *et al.*, 2022).

Com os avanços da agricultura de precisão, o conceito de PFM passou a ser aplicado de forma regionalizada dentro das áreas de cultivo. A integração entre sensoriamento remoto, análise de solo e funções de produção específicas possibilita a definição de taxas variáveis de nitrogênio em diferentes zonas de manejo, aumentando a eficiência econômica e ambiental da adubação nitrogenada.

1.2 DETERMINAÇÃO DA DOSE ECONOMICAMENTE ÓTIMA DE NITROGÊNIO

A dose economicamente ótima de nitrogênio (EONR – *Economic Optimum Nitrogen Rate*) corresponde à quantidade de fertilizante capaz de maximizar o retorno econômico do produtor, considerando simultaneamente o custo do insumo e o valor comercial do grão produzido. Esse conceito fundamenta-se na igualdade entre o valor do produto físico marginal e o custo da unidade adicional do insumo aplicado (FERGUSON *et al.*, 2025; VOLKE-HALLER *et al.*, 2024).

Nos Estados Unidos, a Universidade de Nebraska-Lincoln utiliza esse princípio para estabelecer recomendações de adubação nitrogenada, demonstrando que a EONR contribui para reduzir impactos ambientais quando comparada a aplicações acima do necessário (FERGUSON *et al.*, 2025). Em estudo conduzido no México com 140 experimentos realizados entre 2010 e 2019, verificou-se que tanto a EONR quanto a eficiência de uso do nitrogênio aumentaram em função da produtividade potencial da cultura (VOLKE-HALLER *et al.*, 2024).

A determinação da EONR normalmente é realizada por meio do ajuste de funções de resposta da produtividade às doses de nitrogênio, permitindo identificar o ponto de máxima rentabilidade econômica. Em Minnesota, estudos com doses variando de 0 a 224 kg ha⁻¹ mostraram que a produtividade máxima agrônômica ocorreu em doses superiores às aquelas economicamente ótimas, evidenciando que o maior rendimento físico nem sempre representa o maior retorno financeiro (MOHAMMED *et al.*, 2022).

Modelos de simulação agrícola, como DSSAT e APEX, também têm sido empregados na estimativa da EONR. Quando calibrados automaticamente, esses modelos apresentaram elevada capacidade de simular a resposta do milho à adubação nitrogenada em diferentes ambientes, permitindo recomendações mais robustas e adaptadas às condições locais (ZHEN *et al.*, 2026). Na Alemanha, a integração do modelo DSSAT-CERES-Maize com ferramentas de otimização resultou em doses cerca de 25% inferiores às aplicações uniformes, aumentando a eficiência econômica do sistema produtivo (MEMIC *et al.*, 2024).

Além dos modelos matemáticos, ferramentas de monitoramento em tempo real vêm sendo utilizadas para auxiliar no ajuste das doses de nitrogênio. Estudos realizados na Argentina demonstraram que o uso de clorofilômetros apresentou elevada correlação com o estado nutricional da cultura, permitindo ajustes mais precisos da EONR ao longo do ciclo produtivo (SAINZ ROZAS *et al.*, 2024).

A EONR apresenta relação inversa com a razão entre o preço do fertilizante e o valor do grão. Dessa forma, aumentos no custo relativo do nitrogênio tendem a reduzir a dose economicamente recomendada, elevando a eficiência do uso do nutriente e diminuindo perdas ambientais sem comprometer significativamente a rentabilidade da produção (VOLKE-HALLER *et al.*, 2024; MOHAMMED *et al.*, 2022).

Em experimentos de longa duração conduzidos no Meio-Oeste dos Estados Unidos, observou-se aumento gradual da EONR ao longo das últimas décadas, associado à maior resposta produtiva do milho à adubação nitrogenada (SPANGENBERG *et al.*, 2025). Os autores também verificaram que sistemas de sucessão milho-soja demandam menores quantidades de nitrogênio em comparação ao cultivo contínuo de milho, embora essa diferença venha diminuindo ao longo do tempo.

A disponibilidade hídrica representa outro fator determinante na definição da dose ótima. Nas Filipinas, verificaram-se diferenças expressivas entre as doses recomendadas para períodos secos e

chuvosos. Em solos com baixo teor de nitrogênio, a dose recomendada para a estação seca foi de 180 kg N ha⁻¹, enquanto para a estação chuvosa foi de 90 kg N ha⁻¹, evidenciando forte interação entre água e nitrogênio no desempenho produtivo da cultura (PHILIPPINE NUCLEAR RESEARCH INSTITUTE, 2015). Além disso, a variabilidade climática aumenta a incerteza na definição prévia da EONR, dificultando recomendações fixas antes do início da safra (FERGUSON *et al.*, 2025).

O nitrogênio residual presente no solo também influencia diretamente a necessidade de fertilização. Estudos realizados na Austrália demonstraram ampla variação nos estoques de nitrogênio residual em função das estratégias de manejo adotadas em safras anteriores, alterando significativamente a demanda por fertilizantes nitrogenados (HUNT *et al.*, 2025).

A literatura especializada estabelece distinções importantes entre os diferentes conceitos de dose ótima de nitrogênio. A dose agrônômica máxima (AONR – *Agronomic Optimum Nitrogen Rate*) corresponde à quantidade necessária para maximizar a produtividade física da cultura, independentemente dos custos envolvidos. Já a dose economicamente ótima (EONR) considera a rentabilidade do sistema produtivo, sendo normalmente inferior à AONR devido ao custo do fertilizante (SPANGENBERG *et al.*, 2025).

Mais recentemente, tem ganhado destaque o conceito de dose ambientalmente ótima (EnvONR – *Environmental Optimum Nitrogen Rate*), que incorpora ao cálculo econômico os custos ambientais associados às perdas de nitrogênio. Essa abordagem considera impactos relacionados à eutrofização, contaminação ambiental e emissões de óxido nitroso (N₂O), resultando em recomendações inferiores às doses voltadas exclusivamente à maximização produtiva (SPANGENBERG *et al.*, 2025).

Análises temporais indicam que, embora os diferentes tipos de dose ótima tenham aumentado ao longo das últimas décadas, a diferença entre a EONR e a EnvONR também vem se ampliando. Segundo Spangenberg *et al.* (2025), a adoção de doses ambientalmente ótimas poderia reduzir moderadamente a produtividade do milho, mas contribuiria para menor perda de nitrogênio ao ambiente.

Nos Estados Unidos, o conceito MRTN (*Maximum Return to Nitrogen*) é amplamente utilizado para gerar recomendações baseadas em séries históricas de experimentos. Entretanto, estudos recentes apontam que esse método pode subestimar as necessidades reais de nitrogênio em determinadas condições produtivas, especialmente porque se baseia em médias regionais que não capturam a variabilidade espacial da fertilidade do solo nem as oscilações climáticas entre safras (MOHAMMED *et al.*, 2022). Ademais, o MRTN não considera o nitrogênio residual do solo proveniente de cultivos anteriores, fator que pode ser determinante para ajustes finos da adubação, sobretudo em regiões de clima seco.

Outro aspecto crítico é a ausência de diferenciação entre talhões com diferentes históricos de manejo e composição edáfica, o que compromete a precisão da recomendação em nível de campo (FERGUSON *et al.*, 2025). Em contrapartida, estratégias que utilizam parcelamento da adubação e

sensores de monitoramento da cultura têm apresentado maior precisão na definição da EONR, pois permitem ajustes dinâmicos às condições efetivas de cada safra e de cada gleba (FERGUSON *et al.*, 2025).

Na Austrália, o projeto GRDC RiskWiSe propõe abordagem baseada no manejo do nitrogênio ao longo de múltiplas safras, priorizando o equilíbrio do balanço parcial de nitrogênio no sistema produtivo. Nesse contexto, margens econômicas mais favoráveis são obtidas quando o balanço entre nitrogênio aplicado e removido permanece próximo da neutralidade (HUNT *et al.*, 2025).

De modo geral, a determinação precisa da EONR contribui para reduzir perdas de nitrogênio, aumentar a eficiência de uso do nutriente e minimizar impactos ambientais. Estudos demonstram que aplicações acima do ponto ótimo apresentam baixa eficiência incremental, indicando que doses excessivas resultam em retornos produtivos cada vez menores (KITCHEN *et al.*, 2022). Assim, a EONR representa importante ferramenta para conciliar produtividade, rentabilidade e sustentabilidade na cultura do milho.

1.3 EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO (NUE) E RELAÇÃO COM PFM

A eficiência do uso de nitrogênio (NUE – *Nitrogen Use Efficiency*) constitui um dos principais indicadores do desempenho agrônomo, econômico e ambiental dos sistemas de produção de milho, expressando a relação entre o nitrogênio absorvido pela cultura e a quantidade total disponibilizada no sistema (BORNMAN, 2022). Estima-se que, em escala global, apenas parte do nitrogênio aplicado seja efetivamente aproveitada pelas plantas, enquanto o restante é perdido por processos como volatilização, lixiviação e imobilização no solo (RICHIE, 2021 apud BORNMAN, 2022).

A NUE pode ser avaliada por diferentes indicadores complementares. A produtividade parcial do fator (PPF) relaciona a produtividade obtida com a quantidade de nitrogênio aplicada, refletindo a eficiência geral do sistema. O balanço parcial de nitrogênio (PNB) expressa a proporção do nutriente removido nos grãos em relação ao total aplicado, enquanto a eficiência agrônoma (AE) representa o incremento de produtividade proporcionado pela adubação em comparação ao nitrogênio naturalmente disponível no solo (BORNMAN, 2023; ASSEFA *et al.*, 2020).

Embora relacionadas, a eficiência agrônoma e o PFM representam conceitos distintos. A AE corresponde à eficiência média do fertilizante ao longo da faixa de doses aplicada, enquanto o PFM expressa o retorno incremental proporcionado pela última unidade de nitrogênio adicionada. Em razão da LRMD, o PFM tende a diminuir à medida que as doses aumentam, permanecendo inferior à eficiência média nas maiores doses de aplicação (SORATTO *et al.*, 2022; Assefa *et al.*, 2020).

Estudos conduzidos na Etiópia confirmaram essa relação entre AE e PFM, demonstrando que a resposta produtiva da cultura pode ser adequadamente representada por funções quadráticas de produção (ASSEFA *et al.*, 2020). De forma geral, a NUE apresenta comportamento inversamente proporcional à dose de nitrogênio: aplicações elevadas tendem a aumentar a produtividade física,

porém reduzem a eficiência de aproveitamento do nutriente (BORNMAN, 2023).

Na África do Sul, Bornman (2023) comparou a recomendação tradicional de nitrogênio com a dose economicamente ótima em cultivos de milho com produtividade média de 7 t ha⁻¹. Os resultados mostraram que a redução moderada da dose nitrogenada promoveu aumento expressivo na produtividade parcial do fator e no balanço parcial de nitrogênio, com pequena redução na produtividade final e maior retorno econômico ao produtor.

Kitchen *et al.* (2022) introduziram o conceito de eficiência incremental do uso de nitrogênio (iNUE), utilizado para avaliar o retorno das doses adicionais aplicadas próximas ao ponto economicamente ótimo. Em experimentos conduzidos na América do Norte, os autores observaram que as últimas unidades de nitrogênio adicionadas apresentaram baixa eficiência de recuperação, indicando que grande parte do nutriente aplicado em doses elevadas tende a ser perdida ou permanecer indisponível às plantas.

Os resultados demonstram que pequenas reduções na dose de nitrogênio podem aumentar significativamente a eficiência média de uso do nutriente sem comprometer de forma relevante a rentabilidade da produção. Apesar disso, a maximização isolada da NUE nem sempre corresponde ao maior retorno econômico, assim como a busca exclusiva pela máxima produtividade tende a elevar perdas ambientais e reduzir a eficiência do sistema (BORNMAN, 2023).

Nesse contexto, o Produto Físico Marginal surge como importante ferramenta analítica para equilibrar objetivos econômicos e ambientais. A condição de otimização marginal permite identificar o ponto em que o retorno proporcionado pela última unidade de nitrogênio aplicada se iguala ao custo do insumo, resultando em níveis de NUE superiores aos observados em doses voltadas exclusivamente à máxima produtividade física (BORNMAN, 2022).

A relação entre PFM e NUE também é influenciada por fatores edafoclimáticos e de manejo. O teor de nitrogênio mineral no solo e a mineralização da matéria orgânica reduzem a resposta das primeiras doses aplicadas, alterando o comportamento do PFM e a necessidade total de fertilização (ASSEFA *et al.*, 2020). Da mesma forma, a disponibilidade hídrica exerce forte influência sobre a eficiência do nitrogênio, uma vez que restrições de água limitam o aproveitamento do nutriente pela cultura (CSEA AFRICA, 2022).

O avanço do melhoramento genético também contribuiu para elevar a eficiência do uso de nitrogênio em cultivares modernas de milho. Híbridos mais recentes apresentam maior capacidade de aproveitamento das doses iniciais e mantêm respostas produtivas positivas por períodos mais prolongados, favorecendo maior eficiência do sistema produtivo (ZHANG *et al.*, 2015 apud BORNMAN, 2023).

A interpretação isolada da NUE pode gerar conclusões inadequadas quando desconsidera o contexto econômico e produtivo da cultura. Nesse sentido, o PFM complementa a análise ao fornecer o fundamento econômico necessário para definição da dose ótima de nitrogênio. Enquanto a NUE

expressa a eficiência do sistema em determinado nível de aplicação, o PFM indica o ponto em que o retorno marginal da adubação deixa de compensar economicamente o custo adicional do fertilizante (BORNMAN, 2022).

A integração entre os conceitos de PFM e NUE está diretamente relacionada aos princípios da agricultura sustentável e da produção de baixa emissão de carbono. A redução das doses de nitrogênio para níveis economicamente ótimos tende a elevar a eficiência de uso do nutriente, reduzir custos de produção e minimizar perdas ambientais associadas à emissão de óxido nitroso e à contaminação de recursos hídricos (BORNMAN, 2022).

Dessa forma, a utilização do PFM como base para o manejo da adubação nitrogenada representa estratégia importante para conciliar produtividade, rentabilidade econômica e sustentabilidade ambiental na cultura do milho.

1.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E A OTIMIZAÇÃO MARGINAL

A adubação nitrogenada constitui um dos principais fatores responsáveis pelo aumento da produtividade agrícola moderna, especialmente na cultura do milho. Entretanto, o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados também representa importante fonte de impactos ambientais. Estima-se que apenas parte do nitrogênio aplicado seja efetivamente absorvida pelas culturas, enquanto grande parcela é perdida para o ambiente por diferentes processos físicos, químicos e biológicos (RICHIE, 2021 apud BORNMAN, 2022).

Simulações globais realizadas com a cultura do milho demonstram que as perdas de nitrogênio estão associadas principalmente às emissões de óxido nitroso (N_2O) e à lixiviação de nitrato, contribuindo para problemas ambientais em escala regional e global (SMERALD *et al.*, 2022). O N_2O possui elevado potencial de aquecimento global e participa ativamente da degradação da camada de ozônio estratosférico, sendo considerado um dos principais gases relacionados às emissões da agricultura intensiva (TAN, 2007).

A dinâmica do nitrogênio no solo envolve uma série de transformações bioquímicas que determinam tanto o aproveitamento do nutriente pelas plantas quanto suas perdas ambientais. Entre os principais mecanismos de perda destacam-se a volatilização de amônia (NH_3), a lixiviação de nitrato (NO_3^-) e a desnitrificação microbiana. A volatilização tende a ser mais intensa quando a ureia é aplicada superficialmente sem incorporação ao solo, enquanto a lixiviação ocorre principalmente em solos arenosos ou sob elevada disponibilidade hídrica (IGLESIAS *et al.*, 2025).

Pesquisas recentes demonstram que fertilizantes de eficiência aumentada podem reduzir significativamente essas perdas. Na Argentina, o uso de ureia associada a inibidores de urease promoveu forte redução da volatilização de amônia em comparação à ureia convencional (IGLESIAS *et al.*, 2025). No Brasil, pesquisadores da Universidade de São Paulo desenvolveram fertilizantes contendo estabilizadores e micronutrientes voltados à redução das perdas nitrogenadas e ao aumento

da eficiência agronômica da adubação (SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2025). Os pesquisadores concluíram que a tecnologia tem potencial para reduzir emissões gasosas e aumentar a disponibilidade de nutrientes, embora algumas interações físico-químicas ainda precisem ser melhor compreendidas antes da comercialização.

A relação entre dose de nitrogênio e impacto ambiental não ocorre de forma linear. Estudos globais indicam que, até determinado limite produtivo, é possível elevar a produtividade sem aumento proporcional das perdas de nitrogênio. Entretanto, quando as doses se aproximam ou ultrapassam a capacidade de absorção da cultura, ocorre crescimento acelerado das perdas ambientais, reduzindo a eficiência do sistema produtivo (FRONTIERS IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS, 2022).

Na Planície Norte da China, experimentos de campo demonstraram diferenças expressivas entre as doses agronômica, econômica e ecologicamente ótimas de nitrogênio (WANG *et al.*, 2014). Enquanto a dose agronômica máxima priorizou exclusivamente a produtividade física, a dose economicamente ótima promoveu redução significativa no uso de fertilizante, mantendo elevada produtividade e diminuindo os custos ambientais associados às perdas de nitrogênio.

A dose ecologicamente ótima apresentou redução ainda maior na aplicação de nitrogênio, proporcionando diminuição substancial das emissões de N_2O , da lixiviação de nitrato e da volatilização de amônia, sem comprometer de forma relevante a produtividade da cultura. Esses resultados evidenciam que pequenas reduções nas doses tradicionalmente utilizadas podem gerar benefícios ambientais expressivos sem perdas econômicas significativas (WANG *et al.*, 2014).

O ponto de maximização econômica do uso do nitrogênio situa-se, normalmente, entre a dose agronômica máxima e a dose ecologicamente ótima. Essa condição possui importantes implicações para políticas públicas voltadas à sustentabilidade agrícola. Na Argentina, estratégias como parcelamento da adubação nitrogenada e escolha adequada da fonte fertilizante reduziram perdas gasosas e custos ambientais sem comprometer o rendimento do milho (IGLESIAS *et al.*, 2025).

Além das estratégias de manejo, novas alternativas para produção de fertilizantes de menor impacto ambiental vêm sendo desenvolvidas. No Brasil, projetos relacionados ao hidrogênio verde (H_2V) têm buscado viabilizar a produção de amônia e ureia de baixa emissão de carbono, reduzindo a dependência de fontes fósseis na cadeia de fertilizantes nitrogenados (EXPOINTER, 2025).

A diferença observada entre a dose economicamente ótima e a dose ecologicamente ótima demonstra a existência de externalidades ambientais negativas associadas ao uso do nitrogênio. Na prática, o produtor tende a tomar decisões com base no retorno econômico privado, sem considerar integralmente os custos ambientais das perdas nitrogenadas. Esse cenário justifica a adoção de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos ambientais da agricultura intensiva, incluindo incentivos à adoção de tecnologias de baixa emissão e mecanismos de pagamento por serviços ambientais (TAN, 2007).

Nesse contexto, a otimização baseada no PFM representa importante ferramenta para redução

das externalidades negativas da adubação nitrogenada. Embora a dose economicamente ótima não incorpore totalmente os custos ambientais, ela normalmente é inferior à dose voltada exclusivamente à máxima produtividade física, contribuindo para redução das perdas de nitrogênio por volatilização, lixiviação e emissão de N₂O.

A adoção de doses ecologicamente ótimas, associada ao uso de fertilizantes de eficiência aumentada, parcelamento da adubação e sistemas de suporte à decisão, representa avanço importante em direção à sustentabilidade da produção agrícola. Dessa forma, a aplicação do conceito de PFM permite conciliar produtividade, rentabilidade econômica e conservação ambiental na cultura do milho.

1.5 RECOMENDAÇÕES OFICIAIS E ABORDAGENS ECONÔMICAS NO CONTEXTO BRASILEIRO

O Brasil figura entre os quatro maiores consumidores de fertilizantes nitrogenados do mundo, ocupando a 4ª posição no ranking global, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. O país apresenta elevada dependência de importações para suprimento interno, com mais de 85% dos fertilizantes consumidos sendo provenientes do mercado externo. Nesse contexto, a eficiência do uso do nitrogênio assume caráter estratégico não apenas para a produtividade agrícola, mas também para a segurança alimentar, competitividade econômica e sustentabilidade ambiental do país (EMBRAPA, 2021).

A cultura do milho destaca-se como uma das principais consumidoras de fertilizantes nitrogenados. Entretanto, parte significativa do nitrogênio aplicado não é aproveitada pelas plantas, principalmente em razão das perdas associadas à volatilização da ureia, fonte predominante no mercado brasileiro. Essas perdas resultam em prejuízos econômicos ao produtor e contribuem para emissões de gases de efeito estufa e contaminação de recursos hídricos (EMBRAPA, 2021; SARKIS, 2017).

Nas últimas décadas, a pesquisa brasileira avançou significativamente no desenvolvimento de tecnologias voltadas à otimização da adubação nitrogenada. Entre os principais avanços destaca-se a inoculação de sementes de milho com *Azospirillum brasilense*. Estudos conduzidos pela Embrapa Soja demonstraram que a utilização das estirpes Ab-V5 e Ab-V6 possibilitou reduzir em aproximadamente 25% a adubação nitrogenada de cobertura sem prejuízos ao rendimento de grãos (EMBRAPA, 2022).

Além da redução no consumo de fertilizantes, a inoculação proporcionou ganhos econômicos e ambientais relevantes, associados tanto à fixação biológica de nitrogênio quanto ao estímulo ao crescimento radicular promovido pelos fitormônios sintetizados pelas bactérias (Embrapa, 2022). Esses resultados evidenciam o potencial dos bioinsumos para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio nos sistemas produtivos brasileiros.

A pesquisa nacional também tem avançado na avaliação de fertilizantes de eficiência aumentada, especialmente aqueles associados a inibidores de urease e nitrificação. Em estudos conduzidos no Rio de Janeiro, a utilização combinada de NBPT e nitrapirina reduziu perdas por

volatilização e aumentou a recuperação do nitrogênio fertilizante pela cultura do milho (SARKIS, 2017). Resultados semelhantes foram observados em diferentes regiões do país, incluindo o Semiárido nordestino e áreas da Amazônia, demonstrando o potencial dessas tecnologias em distintos ambientes de produção (MODESTO *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2013).

Pesquisas realizadas no Pará evidenciaram que a resposta do milho à adubação nitrogenada varia conforme o histórico de manejo e o tempo de adoção do sistema plantio direto. Em determinados ciclos produtivos, observou-se elevada resposta às doses de nitrogênio, enquanto em outros a influência da adubação foi reduzida em razão da imobilização do nutriente no solo (VIEIRA *et al.*, 2013). Esses resultados reforçam que a função de resposta do milho ao nitrogênio não é estática, devendo considerar as características edafoclimáticas e o histórico da área.

No âmbito ambiental, o projeto FertBrasil utilizou metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para comparar diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura na cultura do milho. Os resultados indicaram diferenças expressivas entre as fontes avaliadas, demonstrando que o impacto ambiental depende não apenas da composição do fertilizante, mas também da produtividade obtida e da quantidade aplicada (GOMES *et al.*, 2014).

Outras pesquisas nacionais também têm investigado os efeitos da adubação nitrogenada sobre a qualidade do produto agrícola. Estudos da Embrapa Agrobiologia identificaram alterações em propriedades nutricionais, físicas e sensoriais de farinhas de milho produzidas sob diferentes estratégias de fertilização nitrogenada (JANTALIA *et al.*, 2019).

Projetos de longa duração conduzidos pela Embrapa Arroz e Feijão vêm avaliando, desde a safra 2013/14, os impactos agronômicos, econômicos e ambientais da adubação nitrogenada em sistemas de produção no Cerrado. Essas pesquisas incluem análises de produtividade, emissões de N₂O, perdas por volatilização, qualidade do solo e rentabilidade econômica, permitindo compreender os efeitos acumulados do manejo do nitrogênio ao longo do tempo (EMBRAPA, 2021).

Apesar dos avanços obtidos pela pesquisa brasileira, as recomendações oficiais de adubação ainda se baseiam predominantemente em curvas de resposta associadas à produtividade esperada e aos teores de matéria orgânica do solo. A incorporação sistemática da análise econômica marginal, fundamentada na relação entre o custo do fertilizante e o valor do grão produzido, ainda permanece limitada nos manuais técnicos utilizados no país.

Nesse contexto, tecnologias como a inoculação com *Azospirillum brasilense* representam importante avanço por integrarem benefícios agronômicos, econômicos e ambientais, aproximando-se dos princípios da análise marginal aplicada ao manejo do nitrogênio (EMBRAPA, 2022).

Os resultados obtidos em diferentes regiões brasileiras demonstram ainda a necessidade de recomendações regionalizadas. No Semiárido nordestino, por exemplo, as doses associadas à maior produtividade foram substancialmente inferiores às tradicionalmente utilizadas nas regiões Sul e Centro-Oeste, evidenciando a forte influência das condições climáticas e edáficas sobre a eficiência do

uso do nitrogênio (MODESTO *et al.*, 2017).

Da mesma forma, pesquisas conduzidas na Amazônia e no Cerrado vêm gerando informações importantes para o desenvolvimento de recomendações mais adaptadas às condições locais de solo, clima e manejo (SANTOS *et al.*, 2013; VIEIRA *et al.*, 2013).

Embora o Brasil tenha avançado significativamente no desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aumento da eficiência nitrogenada, a integração entre esses avanços agronômicos e a análise econômica baseada no PFM ainda representa desafio importante para as recomendações oficiais de adubação.

Projetos experimentais de longa duração possuem papel fundamental nesse processo, pois permitem gerar bases de dados regionalizadas capazes de subsidiar funções de produção mais precisas e determinar doses economicamente ótimas adaptadas às diferentes condições edafoclimáticas brasileiras. Dessa forma, a integração entre pesquisa agronômica, análise econômica e sustentabilidade ambiental pode contribuir para sistemas de produção de milho mais eficientes, rentáveis e sustentáveis.

1.6 LEI DOS RENDIMENTOS MARGINAIS DECRESCENTES E A FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DO MILHO

A LRMD estabelece que, mantendo-se constante um fator de produção fixo, como a área cultivada, a adição sucessiva de um insumo variável resulta inicialmente em aumentos crescentes da produção. Entretanto, a partir de determinado ponto, os incrementos produtivos passam a ser progressivamente menores, podendo tornar-se nulos ou negativos (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990; SORATTO *et al.*, 2022).

Na cultura do milho (*Zea mays L.*), essa relação é particularmente evidente na resposta à adubação nitrogenada, uma vez que o nitrogênio representa o nutriente mais exigido pela cultura (BORNMAN, 2022). Estudos experimentais demonstram que a produtividade marginal do nitrogênio diminui à medida que as doses aplicadas aumentam, evidenciando o comportamento previsto pela LRMD (CSEA AFRICA, 2022).

A relação entre produtividade e dose de nitrogênio pode ser representada por diferentes funções de produção. Entre os modelos mais utilizados destacam-se a função quadrática e a função de Mitscherlich-Baule. A função quadrática descreve adequadamente situações em que o incremento produtivo diminui progressivamente até atingir um ponto máximo, refletindo o comportamento dos rendimentos marginais decrescentes (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990).

Nesse modelo, o PFM reduz-se gradualmente com o aumento das doses de nitrogênio, indicando que cada unidade adicional aplicada gera incrementos produtivos cada vez menores (SORATTO *et al.*, 2022). Estudos realizados na África do Sul demonstraram elevada capacidade desse modelo em representar a resposta produtiva do milho à adubação nitrogenada (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990).

Por outro lado, a função de Mitscherlich-Baule apresenta comportamento assintótico,

aproximando-se de um limite máximo de produtividade sem prever reduções produtivas em doses elevadas. Em estudos conduzidos na Tanzânia, esse modelo apresentou melhor ajuste aos dados experimentais, sendo considerado mais consistente do ponto de vista biofísico para determinadas condições de cultivo (CSEA AFRICA, 2022).

Além da produtividade física, pesquisas recentes têm buscado avaliar a eficiência das doses adicionais de nitrogênio aplicadas próximas ao ponto economicamente ótimo. Kitchen *et al.* (2022), em estudo realizado com 189 experimentos na América do Norte, introduziram o conceito de eficiência incremental do uso de nitrogênio (iNUE). Os resultados demonstraram que as últimas unidades de nitrogênio aplicadas apresentaram baixa eficiência de recuperação, indicando que grande parte do nutriente fornecido em doses elevadas tende a ser perdida ou imobilizada no sistema.

A disponibilidade hídrica constitui outro fator fundamental na definição da resposta produtiva do milho ao nitrogênio. Estudos demonstram que a produtividade marginal do nutriente tende a ser maior em condições adequadas de água, enquanto situações de restrição hídrica reduzem o aproveitamento do fertilizante e aumentam a limitação produtiva da cultura (BERRY; DICKS; ORTMANN, 1990; CSEA AFRICA, 2022).

A textura do solo também influencia a dinâmica do nitrogênio e a eficiência do sistema produtivo. Solos de textura média tendem a apresentar redução mais acentuada da eficiência incremental do nitrogênio em comparação a solos mais argilosos, devido às diferenças nos processos de retenção, lixiviação e desnitrificação (KITCHEN *et al.*, 2022).

Além disso, avanços no melhoramento genético têm contribuído para aumentar a eficiência do uso de nitrogênio em cultivares modernas de milho. Estudos com híbridos de alta densidade populacional demonstraram que reduções moderadas nas doses de nitrogênio podem manter a produtividade em níveis semelhantes aos obtidos com aplicações mais elevadas, promovendo aumento da eficiência de uso do nutriente (SHI *et al.*, 2016).

O entendimento da LRMD e dos fatores que influenciam a função de produção do milho é essencial para a aplicação do conceito de PFM na otimização da adubação nitrogenada. A baixa eficiência observada nas doses mais elevadas reforça que a busca exclusiva pela máxima produtividade física tende a aumentar perdas econômicas e ambientais.

Nesse contexto, a determinação da dose economicamente ótima representa a aplicação prática dos princípios da análise marginal, permitindo conciliar produtividade, rentabilidade econômica e sustentabilidade ambiental no manejo do nitrogênio (SORATTO *et al.*, 2022; BORNMAN, 2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão bibliográfica permitiu aprofundar o entendimento sobre a aplicação do conceito de Produto Físico Marginal (PFM) na otimização do uso de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho, integrando aspectos econômicos, agrônomicos e ambientais. Evidenciou-se que o PFM constitui importante ferramenta para a definição da dose economicamente ótima de nitrogênio (EONR), permitindo equilibrar produtividade, rentabilidade e sustentabilidade.

Compreende-se que a maximização do lucro ocorre quando o valor do produto marginal se iguala ao custo do insumo, sendo a EONR influenciada por fatores como preços relativos, potencial produtivo e condições ambientais. Verificou-se, ainda, que a adoção da EONR contribui para aumentar a eficiência do uso de nitrogênio (NUE) e reduzir perdas ambientais, como volatilização de amônia, lixiviação de nitratos e emissões de óxido nitroso (N_2O).

No contexto brasileiro, reconhecem-se tecnologias desenvolvidas pela Embrapa, como a inoculação com *Azospirillum brasilense*, que favorecem maior eficiência da adubação nitrogenada e permitem redução de até 25% na dose de nitrogênio em cobertura, sem prejuízo à produtividade. Entretanto, entende-se que a incorporação sistemática da análise econômica marginal nas recomendações técnicas oficiais ainda representa um desafio, uma vez que os manuais estaduais de adubação baseiam-se predominantemente em curvas de resposta regionais, sem considerar as variações dos preços relativos entre fertilizantes e grãos.

Diante do exposto, considera-se que a aplicação do PFM contribui para o uso mais racional do nitrogênio na cultura do milho, promovendo ganhos econômicos e redução dos impactos ambientais. Propõe-se, para futuras pesquisas, a ampliação da regionalização das funções de produção, considerando as especificidades edafoclimáticas do território brasileiro, bem como o aprofundamento da avaliação dos custos ambientais associados ao manejo nitrogenado, com vistas à definição de doses que integrem critérios agrônomicos, econômicos e ecológicos.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA CORA CORALINA DE NOTÍCIAS. Caiado conhece projeto japonês para produção de fertilizante ecológico em Goiás. **Agência Cora Coralina de Notícias**, Goiânia, 15 jul. 2025. Disponível em: <https://agenciakoradenoticias.go.gov.br/160901-caiado-conhece-projeto-japones-para-producao-de-fertilizante-ecologico-em-goias>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- ASSEFA, B. A. *et al.* Maize yield response to fertiliser and fertiliser profitability. In: **Global Academic Press**, 2020. p. 64-76. Disponível em: https://www.globalacademicpress.com/ebooks/banchayehu_assefa/files/basic-html/page64.html. Acesso em: 22 mar. 2026.
- BERRY, C. G.; DICKS, H. M.; ORTMANN, G. F. Derivation of appropriate functions for the economic analysis of maize yield responses to fertilizer and rainfall variations at Dundee. **Agrekon**, Pretória, v. 29, n. 2, p. 85-92, 1990. Disponível em: <https://ageconsearch.umn.edu/record/267259>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- BORNMAN, J. J. Fertilization principles for grain production. In: FERTASA POST SYMPOSIUM WORKSHOP, 2022, Pretória. **Anais...** Pretória: FERTASA, 2022. Disponível em: <https://www.fertasa.co.za/wp-content/uploads/2022/10/Fertasa-workshop-presentation-Principles-Fertilization-JJ-Bornman.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- BORNMAN, J. J. Optimise N application rates for higher profits. **SA Grain**, Pretória, 1 mar. 2023. Disponível em: <https://sagrainmag.co.za/2023/03/01/optimise-n-application-rates-for-higher-profits/>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- CID BIO-SCIENCE. Light interception and nitrogen fertilization to increase maize yield. **CID Bio-Science**, 2021. Disponível em: <https://cid-inc.com/blog/light-interception-and-nitrogen-fertilization-to-increase-maize-yield/>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 2020. 400 p.
- CSEA AFRICA. Optimizing agronomic-nitrogen use efficiency of maize production in Tanzania. **CSEA Africa**, 2022. Disponível em: <https://cseaafrica.org/index.php/postdetails/optimizing-agronomic-nitrogen-use-efficiency-of-maize-production-in-tanzania?page=13>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- EMBRAPA. Impacto agrônomo, econômico e ambiental de fertilizantes nitrogenados em milho e feijão no Cerrado. **Portal Embrapa**, Brasília, 2021. Disponível em: <https://portaldxp-h.sede.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/220245/impacto-agronomico-economico-e-ambiental-de-fertilizantes-nitrogenados-em-milho-e-feijao-no-cerrado>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- EMBRAPA. Bioinsumo pode reduzir em 25% o nitrogênio usado na adubação de cobertura do milho. **Portal Embrapa**, Brasília, 22 nov. 2022. Disponível em: <https://portaldxp-h.sede.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/76531079/bioinsumo-pode-reduzir-em-25-o-nitrogenio-usado-na-adubacao-de-cobertura-do-milho>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- EXPOINTER. Potencial do hidrogênio verde para setor de fertilizantes é destaque em painel na Expointer. **Expointer**, Esteio, 4 set. 2025. Disponível em: <https://www.expointer.rs.gov.br/potencial-do-hidrogenio-verde-para-setor-de-fertilizantes-e-destaque-em-painel-na-expointer>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- FERGUSON, R. *et al.* Nitrogen for corn: EONR – does it exist? **CropWatch**, University of Nebraska-

Lincoln, 25 set. 2025. Disponível em: <https://cropwatch.unl.edu/nitrogen-corn-eonr-does-it-exist/>. Acesso em: 22 mar. 2026.

FRONTIERS IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS. Yield gap closure and environmental nitrogen losses in maize cultivation: a global simulation study. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 6, artigo 736394, 2022. DOI: 10.3389/fsufs.2022.736394. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2022.736394/full>. Acesso em: 22 mar. 2026.

GOMES, R. T. *et al.* Avaliação de ciclo de vida de fertilizantes: fase de uso. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2014, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. 7 p.

HUNT, J. *et al.* Improving nitrogen fertiliser decision making in northern NSW. In: **GRDC Update Papers**, mar. 2026. Disponível em: <https://grdc.com.au/resources-and-publications/grdc-update-papers/tab-content/grdc-update-papers/2026/03/improving-nitrogen-fertiliser-decision-making-in-northern-nsw>. Acesso em: 22 mar. 2026.

IGLESIAS, M. P. *et al.* Balancing yield and environmental impact: the role of split nitrogen application and fertilizer type in corn production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 376, artigo 109756, 2025. DOI: 10.1016/j.agee.2025.109756. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109756>. Acesso em: 22 mar. 2026.

JANTALIA, C. P. *et al.* **Caracterização nutricional, física e sensorial de farinhas de milho produzidas sob adubação com diferentes fertilizantes nitrogenados a base de ureia**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2019. 24 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 312).

KITCHEN, N. R. *et al.* A new perspective when examining maize fertilizer nitrogen use efficiency, incrementally. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 17, n. 5, e0267215, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0267215. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0267215>. Acesso em: 22 mar. 2026.

MEMIC, E. *et al.* Evaluation of crop model-based simplified marginal net return maximising nitrogen application rates on site-specific level in maize. **Precision Agriculture**, v. 25, p. 2721-2739, 2024. DOI: 10.1007/s11119-024-10126-z. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-024-10126-z>. Acesso em: 22 mar. 2026.

MODESTO, V. C. *et al.* Nitrogen fertilization regarding maize crop in a semi-arid region. **Científica**, Jaboticabal, v. 45, n. 4, p. 443-452, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1080393/1/ArtigoHenriqueCientificaNov2017.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.

MOHAMMED, Y. A. *et al.* Agronomic and economic evaluations of N fertilization in maize under recent market dynamics. **Nitrogen**, Basel, v. 3, n. 3, p. 514-527, 2022. DOI: 10.3390/nitrogen3030033. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3129/3/3/33>. Acesso em: 22 mar. 2026.

PHILIPPINE NUCLEAR RESEARCH INSTITUTE. Refining soil test calibration and nitrogen recommendation in corn through ¹⁵N isotope tracer technique. In: PHILIPPINE NUCLEAR CONGRESS, 3., 2015, Manila. **Anais...** Manila: PNRI, 2015. Disponível em: <https://inis.iaea.org/records/9cs6s-6yb12>. Acesso em: 22 mar. 2026.

RICHIE, H. Nearly two thirds of applied nitrogen is not used by crops. **Our World in Data**, 2021. Disponível em: <https://ourworldindata.org/excess-fertilizer>. Acesso em: 22 mar. 2026.

SAINZ ROZAS, H.; REUSSI CALVO, N. I.; BARBIERI, P. A. Use of greenness index to determine the optimal economic rate of nitrogen in maize. **Agrociencia**, Montevideo, v. 58, n. 2, 2024.

- Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/records/67598440c7a957febdfa2b61>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- SANTOS, D. G. dos *et al.* Eficiência de fertilizantes nitrogenados de liberação lenta em sistema de produção de milho durante dois ciclos agrícolas na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.
- SARKIS, L. F. Uso de inibidores de urease e nitrificação e aumento da recuperação de 15N-fertilizante pelo milho. **Anais da Semana Científica Johanna Döbereiner**, Seropédica, 2017. Disponível em: <http://ojs.cnpab.embrapa.br/index.php/scjd/article/view/3108>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- SECRETARIA DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Pesquisadores da USP desenvolvem fertilizante para aumentar a produtividade no campo. **Governo do Estado de São Paulo**, São Paulo, 24 fev. 2025. Disponível em: <https://agricultura.sp.gov.br/noticias-1/pesquisadores-da-usp-desenvolvem-fertilizante-para-aumentar-a-produtividade-no-campo>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- SHI, D. *et al.* Increased plant density and reduced N rate lead to more grain yield and higher resource utilization in summer maize. **Journal of Integrative Agriculture**, Beijing, v. 15, n. 11, p. 2515-2528, 2016. DOI: 10.1016/S2095-3119(16)61355-2.
- SORATTO, R. P. *et al.* Adubação nitrogenada no milho: eficiência agrônômica e impactos econômicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, p. e0220012, 2022. DOI: 10.36783/18069657rbcs20220012.
- SPANGENBERG, T. *et al.* The optimum nitrogen fertilizer rate for maize in the US Midwest is increasing. **Nature Communications**, London, v. 16, artigo 404, 2025. DOI: 10.1038/s41467-024-55314-7. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-55314-7>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- TAN, I. **Computational and experimental approaches related to nitrous oxide emissions and economic analysis of private and social returns from maize fertilization**. 2007. 200 f. Tese (Doutorado) – Cornell University, Ithaca, 2007. Disponível em: <https://ecommons.cornell.edu/items/81018d9a-ff8b-46d9-976a-e5678a910779>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- VIEIRA, M. E. *et al.* Doses e épocas de aplicação da adubação nitrogenada em quatro ciclos agrícolas de grãos sob sistema plantio direto na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.
- VOLKE-HALLER, V. H. *et al.* Generating nitrogen recommendations for maize: economic considerations. **Agrociencia**, Montevideo, v. 58, n. 2, p. 229-243, 2024. DOI: 10.47163/agrociencia.v58i2.2935. Disponível em: <https://repository.cimmyt.org/entities/publication/214eab6e-5fd5-4b6a-8a85-4ad27a165baf>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- WANG, X. *et al.* Determining the optimal nitrogen rate for summer maize in China by integrating agronomic, economic, and environmental aspects. **Biogeosciences**, Göttingen, v. 11, n. 11, p. 3031-3041, 2014. DOI: 10.5194/bg-11-3031-2014. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/11/3031/2014/>. Acesso em: 22 mar. 2026.
- ZHANG, X. *et al.* Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**, London, v. 528, p. 51-59, 2015. DOI: 10.1038/nature15743.
- ZHEN, X. *et al.* Automatic calibration of DSSAT and APEX models for maize yield simulation and economic optimum nitrogen rate determination. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 172, artigo 127870, jan. 2026. DOI: 10.1016/j.eja.2025.127870. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030125003154>. Acesso em: 22 mar. 2026.