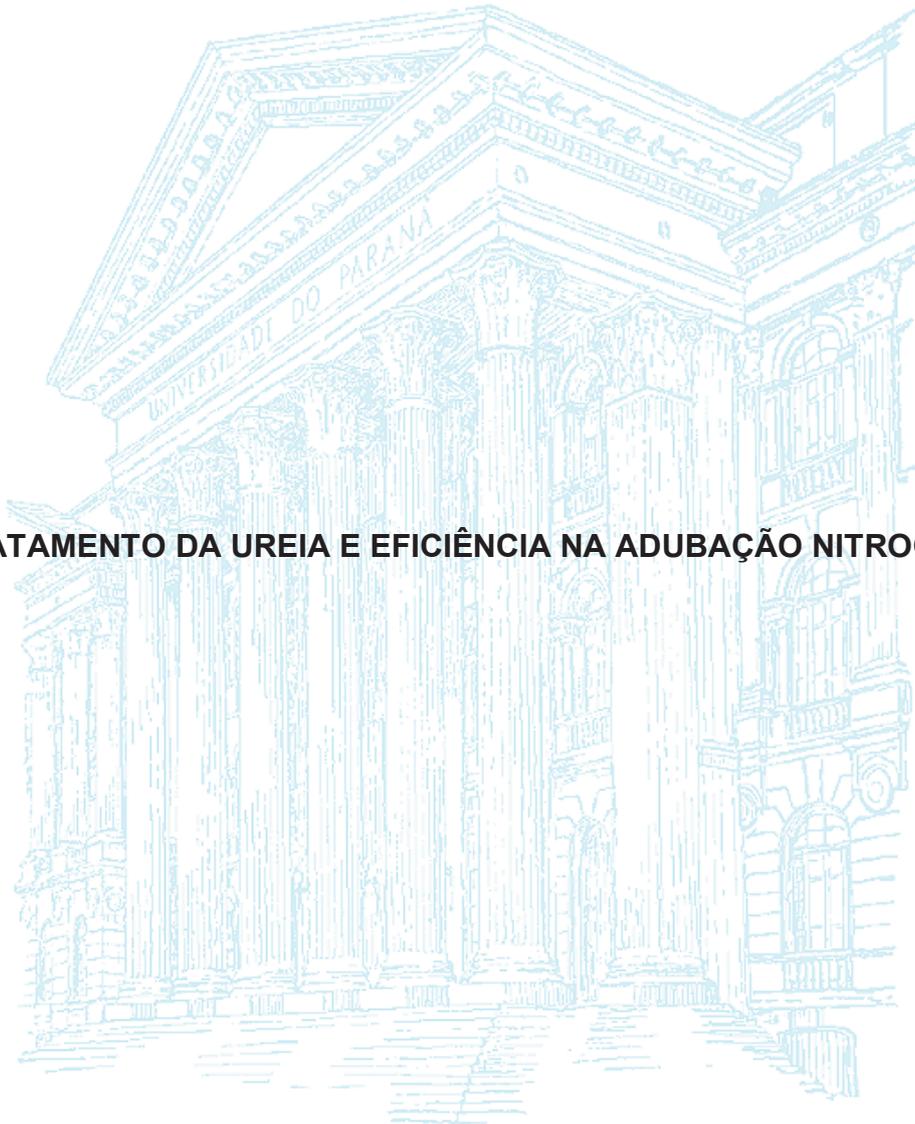


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO HENRIQUE MALUCELLI MARIOTTO

TRATAMENTO DA UREIA E EFICIÊNCIA NA ADUBAÇÃO NITROGENADA



CURITIBA

2020

PEDRO HENRIQUE MALUCELLI MARIOTTO

TRATAMENTO DA UREIA E EFICIÊNCIA NA ADUBAÇÃO NITROGENADA

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista, Curso de Especialização em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti.
Co-orientadora: Prof. Msc. Bruna Ramalho.

CURITIBA

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda equipe do PECCA em especial ao prof. Dr. Jair Dionísio que acreditaram no meu potencial e me deram a oportunidade de cursar esse excelente curso de Especialização *latu sensu* como bolsista. Eu não teria chegado até aqui sem o apoio e confiança de vocês;

Aos meus pais José e Fátima pela força, incentivo e cooperação principalmente nas horas mais difíceis e tumultuadas;

Ao prof. Dr. Volnei Pauletti e à prof^a. Msc. Bruna Ramalho pela excelente orientação, paciência e disponibilidade em ajudar com o desenvolvimento do trabalho independentemente do dia ou horário;

Às minhas amigas Rafaela e Alana pelo incentivo, carinho e preocupação durante todo andamento do curso;

Ao meu amigo Andrew Melendrez Zerwekh, pela análise e correção do *abstract* em inglês;

À Alexandra Elbakyan, fundadora do portal Sci-Hub o qual visa disponibilizar conhecimento científico de forma gratuita e global.

RESUMO

Adbos nitrogenados estão entre os mais utilizados em todo o mundo, com mais de 110 bilhões de kg usados anualmente. Apesar das fontes de N serem relativamente baratas – principalmente a ureia – o custo se torna alto quando se considera as elevadas doses que se utiliza em lavouras de alta produção. Ademais, a adubação nitrogenada está sujeita a perdas, principalmente por lixiviação de nitrato e por volatilização de amônia. Para minimizar estas perdas foram associadas aos adubos nitrogenados, substâncias que visam melhorar a sua eficiência seja pela liberação mais lenta (protetores) ou inibindo o processo de volatilização (inibidores). Essas substâncias são anunciadas por empresas de fertilizantes, porém muito está incerto sobre sua eficiência, especialmente quanto a aumentar a produtividade e lucratividade do agricultor. A maior parte dos trabalhos pesquisados comprovam que a mistura de inibidores, especialmente o N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT), diminui a volatilização do nitrogênio da ureia na forma de N-NH₃. Considerando os estudos consultados, concluiu-se que essa substância reduz as perdas de volatilização da ureia entre 0 e 91%, com média de 67%. Esta redução depende de fatores como pluviosidade, tipo de solo, temperaturas médias, umidade relativa do ar, entre outros. Por outro lado, quando se associa essa redução na volatilização com a produtividade os resultados além de heterogêneos são bem mais modestos, variando entre redução de 15% até aumento de 25%. Em média, considerando todas as culturas e condições edafoclimáticas consultadas, o ganho de produtividade propiciado pelos aditivos foi inferior à 5%. A recomendação de uma fonte protegida ou inibida pode ser correta, em algumas condições específicas de cultivo de arroz irrigado, de frutíferas no semiárido e adubação de cobertura no milho. Por outro lado, em condição típica de produção de demais grãos as evidências coletadas sugerem que se pode fazer o uso de adubo convencional sem prejuízos reais à produtividade, salvo casos excepcionais. Conclui-se que os aditivos aplicados à ureia são eficientes em reduzir as perdas por volatilização de N-NH₃, porém os benefícios na produtividade das culturas são pequenos e restritos a condições específicas de cultivo.

Palavras-chave: inibidores da urease, protetores da ureia, volatilização de amônia, perda de nitrogênio.

ABSTRACT

Nitrogen fertilizers are among the most used worldwide, with more than 110 billion kg used annually. Although the sources of N, mainly urea, are relatively cheap, the cost becomes high when considering the high doses used in high production crops. In addition, nitrogen fertilization is subject to losses, mainly due to nitrate leaching and ammonia volatilization. To minimize these losses, nitrogen fertilizers have been associated with substances that aim to improve their efficiency, either by slower release (protectors) or by inhibiting the volatilization process (inhibitors). These substances are advertised by fertilizer companies, but much is uncertain about their efficiency, especially in terms of increasing farmer productivity and profitability. Most of the published papers show that the usage of inhibitors, especially N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT), reduces the volatilization of urea nitrogen in the form of N-NH₃. Considering those studies, it has been concluded that this substance reduces the losses of urea through volatilization between 0 and 91%, with an average of 67%. This reduction depends on factors such as rainfall, soil type, average temperatures, relative humidity, among others. On the other hand, when this reduction in volatility is associated with yield, the results although being heterogeneous, are much more modest. They range from a 15% yield reduction to an increase of 25%. On average, considering all crops and edaphoclimatic conditions that were researched, the productivity gain provided by the additives was less than 5%. The recommendation of a protected or inhibited N source may be correct, in some specific conditions for the cultivation of irrigated rice, fruticulture in the semi-arid and top dressing in corn. On the other hand, in a typical condition of production of other grains, the evidence collected suggests that it is possible to use conventional fertilizer without yield reduction, except in special cases. It has been concluded that the additives applied to urea are efficient in reducing N-NH₃ volatilization losses. However, the yield improvement is small and restricted to specific cultivation conditions.

Keywords: urease inhibitors, urea protectors, ammonia volatilization, nitrogen loss.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS	9
1.2	HIPÓTESE	9
2	MATERIAIS E MÉTODOS	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	NITROGÊNIO NA PLANTA	12
3.1.1	Absorção de nitrogênio pelas plantas	12
3.1.1.1	O processo de assimilação.....	12
3.2	NITROGÊNIO NO SOLO.....	13
3.2.1	Volatilização	13
3.2.2	Nitrificação.....	14
3.2.3	Desnitrificação	15
3.2.4	Mineralização e Imobilização.....	15
3.2.5	Lixiviação.....	16
3.3	PRINCIPAIS ADUBOS NITROGENADOS UTILIZADOS COM PROTETORES OU INIBIDORES	17
3.3.1	Ureia.....	17
3.3.1.1	A volatilização do N da ureia	18
3.3.2	Uran	19
3.4	USO DE PROTETORES DE UREIA.....	20
3.4.1	Uso de protetores no mundo	20
3.4.1.1	NBPT.....	20
3.4.1.2	Polímeros	23
3.4.1.3	Tiosulfato de amônio (TSA)	24
3.4.2	Uso de protetores no Brasil	24
3.4.2.1	NBPT.....	24

3.4.2.2	Polímeros	25
3.5	TABULAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DE PERDAS POR VOLATILIZAÇÃO DE N-NH ₃ COM A ADIÇÃO DE INIBIDORES E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS	25
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) tem um papel fundamental para a formação das proteínas e crescimento das plantas (LEGHARI et al., 2016). Como o N é naturalmente limitante na maioria das condições de cultivos, precisa ser fornecido através de adubos nitrogenados. Dessa forma, a adubação nitrogenada constitui uma grande parcela do custo total das culturas, principalmente em gramíneas como milho e trigo, que não possuem fixação biológica de nitrogênio (FBN). Outra barreira conhecida é o fato do N ser um elemento instável no solo, sofrendo principalmente perdas por lixiviação e volatilização.

Dados de 2013 mostram que a demanda anual mundial por fertilizantes nitrogenados compreende em aproximadamente 110 Tg de N sendo crescente ano a ano (HEFFER; PRUD'HOMME, 2016). Dentre as principais fontes utilizadas, destaca-se a ureia que possui em sua constituição cerca de 45% de N. Embora, sua ampla utilização à campo, esse adubo está especialmente sujeito a sofrer volatilização em forma de amônia ($N-NH_3$) (LEGHARI et al., 2016). Com o intuito de contornar essas problemáticas, substâncias químicas podem ser adicionadas à ureia visando aumentar sua eficiência, conhecidos por protetores ou inibidores.

A finalidade dos protetores ou inibidores é essencialmente a mesma – fazer com que haja o maior aproveitamento da adubação nitrogenada – porém através de mecanismos diferentes. Quando ocorre através de barreiras físicas que promovem a dissolução lenta do grânulo, são chamados de protetores. Quando há substâncias químicas que agem retardando sua disponibilização no meio pela inibição da enzima urease, são chamados de inibidores. Dessa forma, esses produtos promovem um aumento da eficiência do adubo pela redução de perdas, principalmente por volatilização e lixiviação. Isso não só pode representar ganhos econômicos, mas principalmente ambientais, pois com o menor desperdício há também um menor risco de contaminação dos lençóis freáticos e cursos d'água com o nitrato lixiviado.

Gioacchini et al. (2002) obtiveram resultados interessantes com o inibidor da urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT), relatando redução da volatilização de $N-NH_3$ da ureia de até 91% em solo arenoso, porém isso não se efetivou numa produção final maior. Grant et al. (2010) encontrou – em alguns talhões experimentais - uma maior produtividade de grãos de canola e menor dano em plântulas quando se associou o NBPT à elevadas doses de N aplicadas na forma de URAN ou ureia.

De modo geral, trabalhos que avaliam os efeitos dos inibidores e protetores conseguem detectar uma redução – as vezes singela, as vezes expressiva – na volatilização e lixiviação do N. Mas a grande pergunta que vem em seguida é: de que forma e dentro de quais situações isso gera o que realmente importa – uma produtividade maior final utilizando a mesma dose?

Levando essa problemática em conta, um levantamento aprofundado dos trabalhos realizados com inibidores e protetores dos adubos nitrogenados e suas eficiências, possibilitará verificar se é viável utilizar esses produtos, quais são os mais eficientes e se a utilização dessas tecnologias permite a recomendação de menores doses de N. Tal ferramenta pode contribuir para que possa haver redução de custos ao produtor e de possíveis impactos ambientais.

1.1 OBJETIVOS

• Objetivo Geral

Verificar o efeito de inibidores e protetores de ureia em diminuir as perdas e promover melhor utilização do nitrogênio pelas plantas em relação à ureia convencional não protegida.

• Objetivos Específicos

- Estudar os diferentes protetores de ureia presentes no mercado e suas eficiências.
- Estabelecer estimativas de perdas de nitrogênio principalmente por volatilização e lixiviação da ureia protegida em relação à ureia convencional.
- Identificar a eficiência agrônômica com base em dados de produtividade de culturas adubadas com ureia protegida ou inibida em comparação à ureia convencional, estimando o ganho potencial propiciado por elas.

1.2 HIPÓTESE

A hipótese que embasa este trabalho é que o uso de inibidores ou protetores na ureia (como NBPT, polímeros, tiosulfato de amônio) reduzem a perda de nitrogênio por volatilização e lixiviação, melhorando a eficiência do adubo. Além disso,

a produtividade das culturas agrícolas será maior com a adição destes produtos aplicados na mesma dose que a ureia convencional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na forma de pesquisa bibliográfica, onde artigos vinculados ao tema foram pesquisados e lidos no período de janeiro a maio de 2020. A escolha dos artigos foi feita predominantemente com o auxílio da plataforma Google® Acadêmico e SciELO, com artigos nacionais e internacionais com alta relevância e publicados nos últimos 10 anos. Após a escolha dos artigos iniciais, foi realizada a leitura e interpretação atenta, seguido de análise crítica. Realizou-se também a tabulação dos dados de volatilização e produção em uma tabela única, sempre que o autor apresentou dados suficientes em seu trabalho que possibilitou tal.

Ao final, o trabalho foi composto pelo levantamento de 45 artigos científicos, sendo 35 de fontes internacionais e/ou nacionais publicados em inglês; 10 artigos nacionais locais publicados em português.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 NITROGÊNIO NA PLANTA

O N é um macronutriente essencial para as plantas e constituinte essencial da proteína (criada a partir de amino ácidos que envolvem a catalização de respostas químicas e transporte de elétrons) e da clorofila (possibilitando o processo da fotossíntese) presente nos principais órgãos das plantas. O N apresenta também uma função vital em muitos processos fisiológicos. É ele que promove a coloração verde escuro nas plantas, além do crescimento das partes vegetativas como caule, folha, raiz e outros. O N promove um crescimento inicial rápido, melhora a qualidade dos frutos, estimula o crescimento em vegetais folhosos e aumenta o teor de proteína em forragens animais. Além disso, estimula a absorção e utilização de outros nutrientes incluindo potássio, fósforo e de forma geral controla o crescimento da planta (LEGHARI et al., 2016).

3.1.1 Absorção de nitrogênio pelas plantas

Predominantemente, nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) são as formas preferenciais absorvidas pelas plantas (GLASS, 2003). Porém, há relatos de formas orgânicas – como aminoácidos – sendo comprovadamente absorvidos em situações de baixa produtividade e disponibilidade de N (NORDIN; HÖGBERG; NÄSHOLM, 2001).

Dessa forma, todo o N aplicado – seja a partir de fontes orgânicas ou inorgânicas – precisa sofrer processos bioquímicos comandados por microrganismos para formar em última estância uma dessas formas absorvíveis. Após, esse N absorvido estará novamente sujeito a processos bioquímicos para ser convertido às formas orgânicas num processo conhecido como assimilação. Somente então poderá entrar na composição de aminoácidos e proteínas fazendo parte da constituição da planta.

3.1.1.1 O processo de assimilação

Segundo Xu, Fan e Miller (2012), após a absorção uma pequena parcela do N será assimilado na própria raiz, porém a maior parte será primeiramente translocada para as folhas onde sofrerá reações. Para o nitrato, o processo inicia-se com a ação da nitrato redutase no citoplasma – que converte o nitrato a nitrito - e depois reduz novamente para amônio pela ação da nitrito redutase e sintase da glutamina, nos cloroplastos. Se esse processo ocorrer nas raízes, a redução do nitrito a amônio ocorre nos plastídios. Em seguida o amônio derivado deste processo anterior - ou absorvido diretamente do solo - é assimilado em aminoácidos pelo ciclo da sintase da glutamina/glutamina-2-oxoglutarato aminotransferase (GOGAT). O amônio é assimilado na raiz enquanto quase todo o nitrato é reduzido e assimilado nas folhas.

3.2 NITROGÊNIO NO SOLO

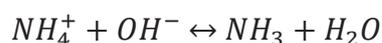
O teor e formas de N no solo é afetado amplamente por fatores de clima e do próprio solo. Entre tais fatores inclui-se pH, textura, estrutura, ausência/presença de plantas, infiltração, compactação, teor de matéria orgânica (MO), umidade, presença de outros nutrientes, forma de aplicação do N além de muitos outros fatores. Portanto, destaca-se a instabilidade do N no solo por estar sujeito a muitas reações podendo assim ser perdido de várias maneiras sendo uma das principais por volatilização (LEGHARI et al., 2016). A eficiência do uso do N pelas plantas está no seu ponto excelente numa faixa de pH entre 6,5 a 7,0. Por outro lado, a textura do solo (porcentagem de areia, silte e argila) também deve ser considerada no manejo do solo. Solos arenosos e com partículas grandes não retêm bem o N, em razão do menor número de cargas livres para a adsorção do elemento. Por outro lado, solos argilosos, francos e franco-argilosos possuem maior capacidade de retenção. Consequentemente, a eficiência do uso do N é maior nesses últimos tipos de solos (LEGHARI et al., 2016).

3.2.1 Volatilização

A volatilização é a transformação do N presente no solo em amônia. Segundo Leghari et al. (2016) o N começa a faltar no solo em razão do processo de alta volatilização. Isto é causado por um déficit de umidade na superfície do solo, especialmente em áreas áridas onde a água não está disponível em quantidades

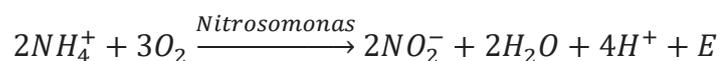
suficientes e a temperatura é alta. O N é perdido para a atmosfera na forma de gás amônia (NH_3), reduzindo a eficiência no uso do elemento pelas plantas. A presença da água reduz a volatilização por diluir o N solúvel reduzindo a pressão parcial, mas também por carregá-lo mais para o interior do solo, reduzindo a probabilidade de volatilizar (WHITEHEAD; RAISTRICK, 1991).

A reação abaixo mostra simplificadamente o equilíbrio químico envolvido no solo entre o NH_4^+ e o NH_3 para que ocorra a volatilização. Tal fato explica por que a taxa de volatilização é naturalmente mais elevada quanto maior for o pH do solo. Maiores teores de hidroxila (OH^-) deslocam o equilíbrio químico favorecendo a formação de amônia, se estabelecendo assim o fenômeno da volatilização.

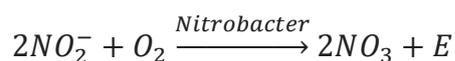


3.2.2 Nitrificação

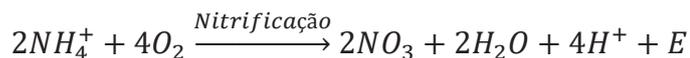
O amônio presente no solo ou de fontes amoniacais de como amônia anidra, sulfato de amônio, nitrato de amônio e até outras fontes de N orgânico podem sofrer o processo de nitrificação. Nesse processo, bactérias conhecidas como nitrificantes oxidam o amônio à nitrito gerando também água, próton e energia (E) a qual usam no seu metabolismo. Esta é a primeira etapa do processo de nitrificação, também conhecido como nitrosação:



Em seguida, o nitrito formado é novamente oxidado liberando mais energia formando assim nitrato. Esta segunda etapa da nitrificação chamamos de nitratação:



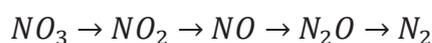
A nitratação é uma reação muito mais rápida que a nitrosação, por isso a presença de NO_2^- é muito baixa no solo. Somando as duas etapas apresentadas acima é possível determinar a equação geral da nitrificação (AZEEM et al., 2014):



3.2.3 Desnitrificação

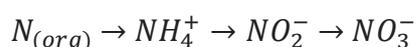
Nesse fenômeno, bactérias ditas desnitrificantes (como *Alcaligenes sp.*, *Pseudomonas sp.*) presentes naturalmente no solo reduzem o nitrato ou nitrito para a obtenção de oxigênio, convertendo essas formas até a formação em último estágio de nitrogênio elementar (N₂). O processo da desnitrificação é o único fenômeno ao qual o N presente nos solos pode ser perdido de forma irreversível, visto que neste o N é convertido e perdido para a atmosfera na forma de gás (KNOWLES, 1982).

Em cenários agrícolas, a desnitrificação ocorre principalmente em ambientes onde ocorre a falta de oxigênio (apóxicos), como por exemplo em solos inundados. As bactérias desnitrificantes são normalmente anaeróbicas ou anaeróbicas facultativas, e dessa forma obtém o oxigênio para o funcionamento do seu metabolismo através da redução do nitrato e seus derivados. A equação geral simplificada da desnitrificação pode ser descrita a seguir:



3.2.4 Mineralização e Imobilização

Quando o N está naturalmente presente e/ou é aplicado na forma de resíduos orgânicos – serapilheira, cama de aviário, esterco, etc – este é disponibilizado para as plantas pelo processo conhecido como mineralização. Neste, moléculas orgânicas que contém N na sua composição – como aminoácidos, proteínas – são degradados pela microbiologia presente que usa o material como alimento. Essa atividade gera como resíduo para o solo primeiramente o amônio, convertido então para nitritos e nitratos que são as formas absorvíveis pelas plantas (CARNEIRO et al., 2013).



É importante lembrar que o processo de mineralização segue a relação C/N de equilíbrio – 30:1 – pois é essa relação que os microrganismos precisam para se

reproduzirem e formarem novas células. Dessa forma, se o material presente tiver relação C/N inferior a 30:1 o excedente de N será mineralizado conforme a reação simplificada descrita acima. Por outro lado, se o resíduo orgânico apresentar uma relação maior, nada será mineralizado e ao invés terá que ser importado do presente no solo num processo conhecido como imobilização para que a degradação ocorra (KAYE; HART, 1997).

A imobilização é o fenômeno oposto à mineralização, estando diretamente em balanço com ele. Formas inorgânicas do N presentes no solo são convertidas pela microbiota em formas orgânicas estáveis, que ficam retidos nos solos e são indisponíveis para a utilização pelas plantas. Em sistemas com muita atividade microbiana e vegetação - tal como ocorre com o plantio direto - ocorre a redução da recuperação do N aplicado. Apesar disso, a imobilização pode ser benéfica pois melhora o sistema solo-planta. É através desse fenômeno que é possível aumentar os teores de MO nos solos, amplamente conhecidos por melhorar as características físicas, químicas e biológicas dos solos através do aumento da CTC, aumento da biodiversidade do solo e como consequência também maior retenção de nutrientes (CABEZAS; COUTO, 2007).

3.2.5 Lixiviação

Compreende na perda das formas solúveis do N pela ação da água, fazendo com que penetrem no solo muito profundamente saindo da faixa de alcance das raízes. É um processo natural – assim como os anteriores – que acontece nos solos, sendo maior quanto menor for a imobilização e maior a precipitação e teor de N disponível no solo (PRIMAVESI et al., 2006).

A lixiviação ocorre principalmente com o nitrato, que pelo fato de ser um ânion não consegue se ligar às cargas dos colóides do solo que são predominantemente negativas (CTC). Dessa forma, o composto se não absorvido fica quimicamente livre e é carregado pela água. Este processo é importante, pois essa água carregada de nutrientes pode se tornar um passivo ambiental, principalmente se atingir lençóis freáticos ou córregos d'água devido ao risco de contaminação com nitrato para humanos e animais, além da eutrofização (PRIMAVESI et al., 2006).

Segundo Tamme, Reinik e Roasto (2010) o íon nitrato apresenta uma toxicidade aguda leve para o corpo humano, porém o problema está quando este

acaba sendo convertido à nitrito pelo organismo. De acordo com os autores, essa última substância está ligada a produção excessiva de meta-hemoglobina, substância a qual está ligada a cianose (azulamento da pele em razão da baixa saturação de oxigênio) além da formação endógena de substâncias carcinogênicas derivadas de N-nitroso.

Quanto ao meio ambiente, a eutrofização – causada pela elevação nos teores de P e N – é notoriamente conhecida por causar um *boom* de algas, aumentando a demanda biológica de oxigênio (DBO). Isso causa a morte de peixes e outros organismos aquáticos, sendo assim um fator de grande risco à esses ambientes (SCHINDLER, 2006).

3.3 PRINCIPAIS ADUBOS NITROGENADOS UTILIZADOS COM PROTETORES OU INIBIDORES

3.3.1 Ureia

Já em 1930, a ureia era considerada como a mais importante fonte de N concentrado do futuro (KRASE; GADDY; CLARK, 1930). Porém, a ureia foi utilizada como um fertilizante pela primeira vez em 1935 e não foi amplamente utilizada até meados de 1960. Um grande número de problemas considerando as propriedades físicas do produto e a baixa eficiência do nitrogênio impediram sua rápida aceitação como fertilizante. Apesar disso, muitos desses problemas foram ultrapassados por novas tecnologias e procedimentos corretos de manejo. A produção da ureia cresceu mais rapidamente que qualquer outro fertilizante nitrogenado. Já em 1980/81 a ureia representava 12% das 12,7 milhões de toneladas de fertilizante utilizadas na América do Norte e 70% do N usado na Ásia (GOULD; HAGEDORN; MCCREADY, 1986).

O processo de produção da ureia utiliza materiais iniciais baratos, dióxido de carbono e amônia (KRASE; GADDY; CLARK, 1930). Este primeiro é um sub-produto, e o último é o produto final provindo do processo industrial da amônia anídrica. A síntese química da ureia possui uma produção e eficiência mais elevada da obtida com o nitrato de amônio. A ureia possui menor tendência a coalescer e compactar que o nitrato de amônio, é menos corrosivo que outros fertilizantes

nitrogenados além de ser um transportador adequado para um número de herbicidas (GOULD; HAGEDORN; MCCREADY, 1986).

Após a aplicação da ureia, ocorre rápida hidrólise desta no solo gerando aumento no pH ao redor do grânulo e aumento na concentração do íon amônio em razão da liberação de amônia pela hidrólise (REYNOLDS; WOLF; ARMBRUSTER, 1985). Esta formação de NH_3 leva ao maior problema observado na fertilização com ureia que é a perda do N aplicado na forma deste gás volátil (RAPPAPORT; AXLEY, 1984). Há também relatos sobre a toxidez do NH_3 formada para plântulas jovens (SHEDLEY; DELL; GROVE, 1995).

Além disso, o acúmulo de nitrito no solo subsequente à hidrólise da ureia pode resultar em toxicidade e perda de N. O biureto – um possível contaminante gerado durante o processo de produção da ureia – é normalmente encontrado em baixas concentrações no produto (MIKKELSEN, 1990) mas pode ser fitotóxico às culturas se presente numa concentração maior que 1,5% M/M (JAMES; OOMEN, 1987).

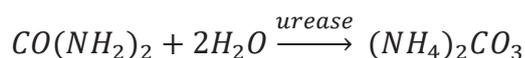
A ureia sólida pode ser encontrada no mercado de duas formas, como grânulos pequenos (chamada de prill ou perolada) e grânulos maiores (granulada). A utilização de uma ou outra pode trazer vantagens e desvantagens na hora da aplicação. A baixa densidade e pequeno tamanho da ureia perolada (prill) torna esse material inadequado para a aplicação a lanço e em formulações com outros fertilizantes. A ureia perolada também é friável e tende a formar granículos durante o transporte, além de se compactar mais facilmente (GOULD; HAGEDORN; MCCREADY, 1986). Já a ureia na forma granular - por possuir particular de maior tamanho e mais regulares – é bem mais adequada para aplicação a lanço e fabricação de formulados, formando pó e torrões com mais dificuldade.

3.3.1.1 A volatilização do N da ureia

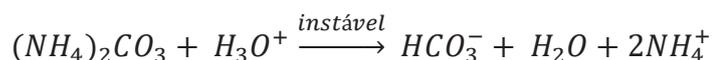
Quando aplicada no solo, a ureia é um composto de fácil decomposição pelos microrganismos visto que o N é um dos elementos limitantes para o crescimento e proliferação de bactérias e plantas da maior parte do agroecossistemas. Apesar disso, esse composto apresenta desvantagens no seu uso agrônômico, sendo o maior deles a propensão de ser perdida por volatilização durante o processo de transformação e uso pelos organismos presentes no solo. Outras fontes também não estão totalmente livres de sofrerem perdas - principalmente lixiviação para fontes de N na forma de

nitrito – mas a ureia é a mais susceptível a sofrer volatilização em razão da enzima urease ser abundante em todos os ambientes agrícolas. Dessa forma, a ureia merece uma atenção especial quando se trata desse quesito.

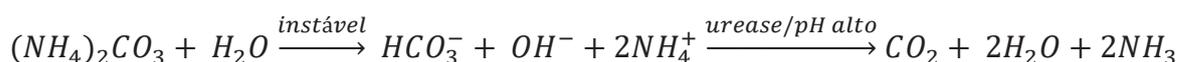
Após a aplicação, a decomposição da ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) se inicia pela ação da urease – em solo úmido – e é logo convertida pela hidrólise em carbonato de amônio, que é um composto instável (AZEEM et al., 2014):



Em seguida, o carbonato formado reage com a acidez natural presente no solo (H_3O^+), gerando água, íon bicarbonato e amônio (NH_4^+) aquoso que logo infiltram no solo e podem ser então absorvidos pelas plantas ou utilizados pelos microrganismos no processo de nitrificação (AZEEM et al., 2014):



Porém, quando o carbonato gerado pela reação de hidrólise - intermediado pela urease - entra em contato num meio mais alcalino ou com um pH mais próximo da neutralidade (6,5 ou superior), uma reação diferente acontece:



Este é o cenário que se observa numa aplicação de ureia em superfície, onde se pratica o plantio direto com calagem superficial. Podemos observar que como falta H^+ livre no solo, isso faz com que haja a desprotonação da água e formação de bicarbonato, hidroxila e íon amônio. Porém, como os produtos da reação são relativamente instáveis e entram em contato com um meio mais alcalinizado, pela ação da urease o amônio reage com a hidroxila formada gerando água, gás amônia e carbônico, volatilizando-se assim para o meio.

3.3.2 Uran

A ureia também é aplicada na forma da solução URAN, a qual é composta pela combinação de ureia, nitrato de amônio e água, gerando uma solução com 28-32% de N (GOULD; HAGEDORN; MCCREADY, 1986).

3.4 USO DE PROTETORES DE UREIA

3.4.1 Uso de protetores no mundo

3.4.1.1 NBPT

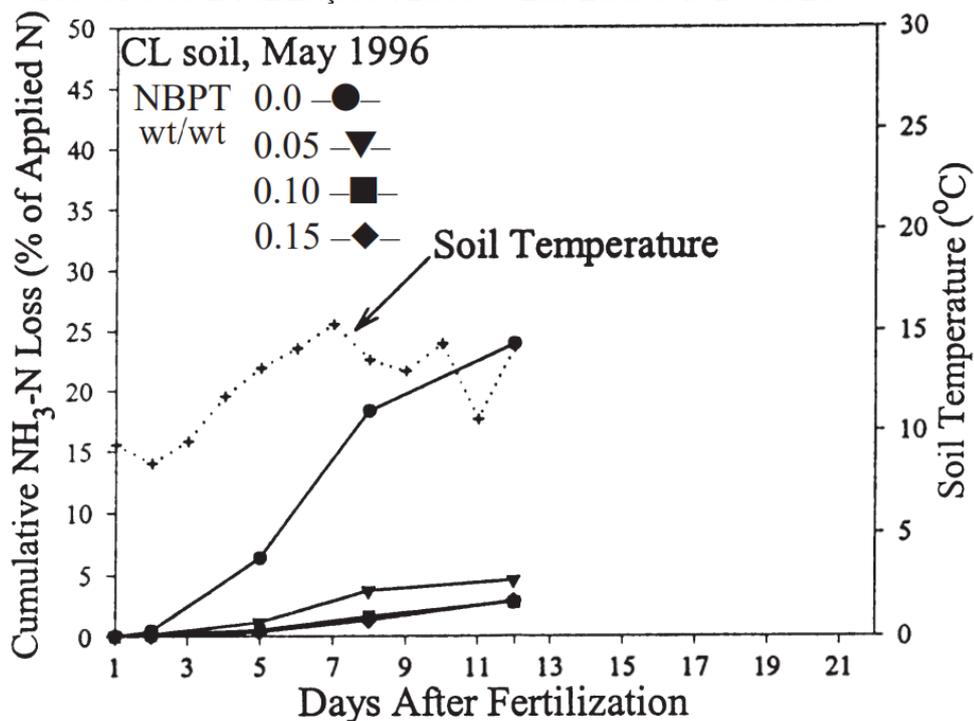
O inibidor de urease NBPT - N-(n-butil) tiofosfórico triamida – é o inibidor mais utilizado no mundo e possivelmente o mais eficiente dentre os existentes considerando o seu poder de reduzir a volatilização da ureia (CANTARELLA et al., 2018). A substância atua bloqueando fortemente três sítios ativos da urease, formando uma ligação tridentada com dois átomos de níquel e um de oxigênio, reduzindo assim a probabilidade com que a ureia atinja o átomo do níquel (MANUNZA et al., 1999).

Apesar de ser a forma mais comumente aplicada, o NBPT não é de fato a forma ativa que consegue realizar a inibição da urease. Para se tornar ativo, o NBPT precisa sofrer reações no solo e se transformar em NBPTO - N-(n-butil) fosfórico triamida. As exatas reações e fatores que influenciam essa conversão não estão ainda totalmente claros, mas sabe-se que a reação costuma ser mais rápida em condições aeróbicas – podendo levar apenas minutos ou horas – e lenta em condição anaeróbica, ocorrendo em dias. A razão pela qual normalmente se aplica o NBPT e não o NBPTO é que esta última forma é mais instável e se degrada mais rapidamente, fazendo com que a aplicação do NBPT seja mais eficiente (MANUNZA et al., 1999).

Rawluk, Grant e Racz (2001) encontraram que doses do NBPT podem reduzir abruptamente a perda de ureia, nas doses de 0,05, 0,10 e 0,15%. O maior efeito obtido foi durante a primeira semana, quando a volatilização é mais alta na ureia não protegida (FIGURA 1). O efeito protetor do NBPT foi menos proeminente em temperaturas mais elevadas do solo, que causam uma rápida dissolução dos grânulos, elevada atividade da urease e movimentação ascendente da ureia e NH₃ devido à temperatura causando assim maiores teores de NH₃ perto da superfície. A dose comercial de NBPT utilizada no Canadá é de 0,14% massa/massa, porém as

doses utilizadas de 0,10 e 0,15% foram similares na eficiência encontrada para todos os testes. Os únicos testes que apresentaram eficiência um pouco reduzida foram os com a dose de 0,05% de NBPT.

FIGURA 1– PERDAS CUMULATIVAS DE NH₃-N EM UM SOLO ARGILOSO (CLAY LOAM) VERSUS DIAS APÓS FERTILIZAÇÃO VERSUS TEMPERATURA DO SOLO



FONTE: Adaptado de RAWLUK, GRANT e RACZ (2001)

Rawluk, Grant e Racz (2001) encontraram as maiores taxas de volatilização em solo franco-arenoso (*fine sandy loam*) o qual são caracterizados pela menor capacidade de reter NH₄⁺ por possuírem partículas de maior tamanho e com menor quantidade de cargas negativas (CTC). Os autores frisaram que os resultados obtidos podem ser diferentes em função das condições climáticas, interferindo abruptamente na performance do inibidor. Apesar disso, o uso do NBPT mesmo em pequenas doses pode ser visto como uma medida preventiva válida para a redução da volatilização da ureia.

Grant (2014) encontrou em situações de preparo reduzido do solo que a aplicação de URAN pulverizado diretamente no solo foi menos eficiente que a aplicação em linhas quando se avaliou a produtividade de grãos e palhada no trigo vermelho de verão. O URAN pulverizado também foi menos eficiente que a ureia a lançar ou em sulcos considerando esses mesmos parâmetros anteriores. Essa

redução na eficiência pode ser devido à imobilização do N na superfície dos resíduos e/ou pela volatilização. Neste trabalho, o uso de NBPT aumentou a eficiência do URAN pulverizado aumentando a produção de palhada e grãos para os mesmos valores encontrados nos testes com ureia e URAN aplicado em linhas superficiais. O autor também encontrou que a utilização de NBPT na ureia não causou aumento de produtividade de grãos de trigo nem de palhada tanto na aplicação a lanço como em sulcos dentro das condições encontradas em Manitoba, Canadá – temperatura média de 10 a 20°C e baixa precipitação. Dessa forma, pode abster-se do uso do inibidor dentro das condições estudadas, sem prejuízos à produtividade.

Grant et al. (2010) encontraram que o uso do inibidor de urease NBPT foi capaz de reduzir o dano causado às plântulas de canola pelo $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ tanto com o uso da ureia como URAN em todos os talhões e anos do estudo. Considerando uma recomendação elevada de doses de N, três dos seis talhões-ano apresentaram maior produção de grãos de canola quando se adicionou NBPT à ureia e ao URAN.

Gioacchini et al. (2002) obtiveram uma grande redução nas taxas de volatilização da ureia ao associá-la com o NBPT e com uma mistura de NBPT + dicianodiamida (DCD). No teste com o NBPT, aos 60 dias, os autores encontraram uma redução na volatilização de 91% em solo arenoso e de 54% em solo argiloso. Já a associação NBPT + DCD foi um pouco menos eficiente, com uma redução de 58% em solo arenoso e nenhuma redução em argiloso, aos 60 dias. Apesar disso, tal redução não se traduziu uma maior produtividade de grãos nem palhada. Na verdade, o oposto foi observado. Os autores relataram que tanto o NBPT como a associação NBPT + DCD proporcionaram na média uma produtividade de grãos e palhada inferior ao controle (somente ureia sem inibidores). Surpreendentemente, a maior redução na produtividade foi obtida no tratamento que obteve maior redução na volatilização (91%) – somente NBPT em solo arenoso. Não foi dado uma explicação clara para esse resultado pelos autores, visto que o esperado seria um aumento da produtividade à medida que menos N se volatiliza, pois a volatilização é uma importante fonte de perda do nutriente, reduzindo assim a quantidade total disponível para a planta.

Lasisi, Akinremi e Kumaragamage (2019) relataram redução na volatilização da ureia de até 91% em condições de campo na cultura da canola em Chernossolo, quando se utilizou a dose de NBPT de 0,2 a 0,3% V/M até os 28 dias. Já no tratamento do URAN dentro dessas mesmas condições, a redução na volatilização foi de até 69%.

Avaliando as mesmas variáveis em Regossolo, os autores encontraram uma redução causada pelo inibidor de até 74% para ureia e de 50% para URAN.

Sanz-Cobena et al. (2011) encontraram uma significativa redução na volatilização da ureia convencional aplicada em superfície quando a operação foi seguida de irrigação. A média do experimento 1 e 2 após 15 dias estimou uma perda de $31,6 \pm 4$ kg/ha dos 100 kg/ha aplicados para a ureia não tratada. Os autores obtiveram, respectivamente, uma redução de 77 a 89% das taxas de volatilização quando se utilizou 7 e 14 mm de irrigação em comparação ao teste onde não foi subsequentemente irrigado. Ao utilizar ureia previamente tratada com NBPT 0,14% M/M, mas sem irrigar obteve-se os mesmos 77% de redução na volatilização – comparável com o teste da ureia convencional subseguida de uma irrigação de 7 mm. Segundo os autores, a irrigação de 7 mm ou 14 mm do tratamento ureia + NBPT não interferiu na volatilização em comparação com o teste utilizando NBPT mas sem irrigar. Isso evidencia que ao optar pela versão do adubo com indutor não é tão necessário se preocupar com a ocorrência de chuva próxima ou irrigar a área posteriormente, visando reduzir as perdas por volatilização.

3.4.1.2 Polímeros

Salman (1988) testou a dissolução de ureia perolada protegida com diferentes polímeros. O autor testou a eficiência do cloreto de vinila co-polímero (VCC), policarbonato (PC), poliestireno (PS) e polietileno de baixa densidade (LDPE). Com exceção do LDPE, todos os protetores testados ofereceram uma barreira imperfeita na superfície do grânulo. Isso resultou na presença de microporos que prejudicou a eficiência dos produtos, obtendo assim uma dissolução média da amostra de 80% após 2 dias. Para o LDPE, entretanto, essa dissolução observada foi bem mais reduzida. O teste com a menor dose desse polímero (2,9%) fez dissolver apenas 65% da amostra após 2 dias, enquanto as doses maiores 4,8% e 5,7% proporcionaram respectivamente uma dissolução de 40 e apenas 8% após esse mesmo período. Depois de 7 dias essas 3 concentrações geraram, respectivamente, uma dissolução de 85, 45 e 11% aproximadamente. Essa notável diferença na eficiência entre o LDPE e os outros polímeros testados foi atribuído ao fato dessa substância conseguir cobrir o grânulo por completo, quase sem microporos, fazendo com que a dissolução do grânulo seja eficientemente retardada. Outra vantagem do LDPE é a resistência

mecânica que ele confere ao grânulo – em torno de 3,4 vezes a resistência de um grânulo convencional protegido com enxofre. Isso faz com que o produto seja menos suscetível a sofrer micro quebras durante o transporte não prejudicando assim sua eficiência.

3.4.1.3 Tiosulfato de amônio (TSA)

Grant (2014) detectou que o TSA usado como inibidor na solução fertilizante URAN teve um efeito limitado em melhorar a eficiência do fertilizante. Apesar disso, a produção final de grãos encontrada no teste URAN + TSA foi comparável ao URAN sem protetor ou protegido com NBPT.

3.4.2 Uso de protetores no Brasil

3.4.2.1 NBPT

Espindula et al. (2014) obtiveram ganho de produtividade ao utilizar a associação ureia + NBPT na fertilização parcelada (sulco + complementação à lanço) no cultivo do trigo “Pioneiro”. Estimou-se um ganho de 15% em relação a esse mesmo modo de aplicação, mas com a ureia convencional. Porém, quando se aplicou a dose completa no sulco, ambas as formas da ureia foram similares quanto a produtividade de grãos do experimento, que foi de 3,8 Mg ha⁻¹. Dessa forma, os autores concluíram que para o cultivo dessa variedade de trigo dentro das condições edafoclimáticas de Viçosa-MG, é possível manter uma boa produtividade mesmo sem o uso do NBPT. Por outro lado, recomenda-se que toda a adubação nitrogenada com ureia seja feita logo no plantio, dentro do sulco.

Scivittaro et al. (2010) propôs para a região do Rio Grande do Sul em Planossolo Háplico que o NBPT pode trazer uma melhoria na produtividade do arroz irrigado e no acúmulo do N pelo grão. Segundo os autores, o uso do inibidor pode ser benéfico nos casos onde o plantio e inundação da área sejam feitos 10 dias passados da fertilização da área. Nesse mesmo período, mas com a ureia convencional, houve uma perda na produção estimada de 9% em relação à ureia protegida com o inibidor. Para intervalos mais curtos – 1 e 5 dias – a produtividade do tratamento com ureia + NBPT também foi maior, mas menos evidente e sem diferença em relação à ureia

convencional, diferentemente do tratamento onde se passaram 10 dias entre as operações. Dessa forma os autores concluíram que o NBPT pode ser uma ferramenta importante no cultivo do arroz irrigado, possibilitando maiores intervalos entre a fertilização e inundação da área sem prejudicar ao mesmo tempo a produtividade potencial da área.

Silva et al. (2017) encontrou na cultura do abacaxizeiro irrigado em Janaúba-MG (Latosolo Vermelho Eutrófico) as perdas acumuladas de 50,9; 48,9; 41,2 e 34,2% após 21 dias para as doses por plantas respectivas de 3,7; 7,3; 11 e 14,6 gramas. Segundo os autores, essa volatilização altíssima encontrada é reflexo das temperaturas e radiações altas do semiárido, somado de uma umidade relativa baixa tornando assim uma condição ambiental ideal para volatilizar. Para a menor adubação utilizada (3,7 g planta⁻¹), o tratamento com NBPT + dicianodiamida (DCD) foi capaz de promover a melhor redução de perdas para essa dose, em torno de 48,7%. Já para os outros tratamentos (7,3; 11 e 14,6 g planta⁻¹) a ureia protegida somente com NBPT foi a que apresentou melhor resultado. Os autores relataram reduções de 50,1; 43,4 e 41,2% para as respectivas doses.

3.4.2.2 Polímeros

Guareschi, Perin e Gazolla (2013) encontraram em Latossolo Vermelho Distroférico (Rio Verde - GO) que pode-se obter maior produtividade para a cultura ao se optar por ureia protegida por polímeros. Para todo o experimento, os autores aplicaram 25% no plantio em sulco e 75% em cobertura aos 25 dias. Em relação à 150 kg ha⁻¹ de ureia convencional que produziu 8,45 Mg ha⁻¹, a mesma dose e forma de aplicação para o adubo protegido resultou numa produtividade de 9,74 Mg ha⁻¹, um ganho de 11,5%. Os autores também avaliaram a massa fresca e seca, massa de 1000 grãos além do diâmetro/comprimento da espiga, porém, não foram observadas diferenças entre utilizar ou não a ureia protegida.

3.5 TABULAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS DE PERDAS POR VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ COM A ADIÇÃO DE INIBIDORES E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

Durante a leitura e interpretação dos artigos consultados fez-se concomitantemente a tabulação dos dados de volatilização e produtividade, sempre

que houve a possibilidade em razão dos dados disponibilizados no trabalho, elaborando-se a TABELA 1. Quando o autor apresentou uma grande variedade de testes realizados em vários anos e ou condições, realizou-se a padronização do dado a partir do cálculo de uma média entre as variáveis tornando possível a tabulação de um dado único. Sabe-se que tal decisão pode aumentar a imprecisão de cada trabalho ao definir um valor único para volatilização, variação de produtividade entre outros para aquela condição encontrada. Porém, como na TABELA 1 constam valores muito diversos - gerados em vários países, períodos, classes de solos e diferentes culturas testes - acredita-se que tal decisão tenha pouco impacto quando se visa olhar de forma ampla o resultado gerado pela utilização de diferentes protetores, inibidores ou técnicas de manejo cultural.

De 19 trabalhos avaliados quanto a eficiência do NBPT e polímeros (TABELA 1), houve redução de 67% nas perdas por volatilização, mas o aumento de produtividade foi de apenas 5% com o uso de NBPT. Com o uso de polímeros, houve uma redução de 17% nas perdas por volatilização, mas com o acréscimo de produtividade de 6%.

Considerando a distribuição de resultados, para NBPT 6 trabalhos (50%) apresentaram um ganho médio na produtividade nulo ou muito baixo, inferior a 5% de ganho (FIGURA 2). Já para polímeros, 3 trabalhos (43%) se enquadraram nessa categoria (FIGURA 3). Tal fato ajuda a evidenciar que talvez os autores que relataram um grande ganho - até 25% - ajudaram a elevar a média de ganho encontrada. Dessa forma, é possível que os ganhos reais propiciados pelos protetores e inibidores seja ainda inferior a 5%.

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continua)

Espécie	Local	Volatilização ureia sem protetor		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		Kg/ha	%						
Triticum aestivum L.	Bolonha, Itália	13	11	NBPT	Arenoso	91	-15,0	60 dias	GIOACCHINI et al. (2002)
Triticum aestivum L.	Bolonha, Itália	6	5	NBPT	Argiloso	54	-2,0	60 dias	GIOACCHINI et al. (2002)
Triticum aestivum L.	Bolonha, Itália	13	11	NBPT + DCD	Arenoso	58	-9,0	60 dias	GIOACCHINI et al. (2002)
Triticum aestivum L.	Bolonha, Itália	6	5	NBPT + DCD	Argiloso	0	-4,0	60 dias	GIOACCHINI et al. (2002)
Triticum aestivum L.	Viçosa/MG, Brasil	N/A	N/A	NBPT	Argiloso	N/A	0,0	Dose única em sulco	ESPINDULA et al. (2014)
Triticum aestivum L.	Viçosa/MG, Brasil	N/A	N/A	NBPT	Argiloso	N/A	15,0	Sulco + a lanço	ESPINDULA et al. (2014)
Triticum aestivum L.	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Argiloso	N/A	-1,7	Ureia em sulco	GRANT (2014)
Triticum aestivum L.	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Argiloso	N/A	0,0	Ureia a lanço	GRANT (2014)
Triticum aestivum L.	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Arenoso	N/A	9,8	Ureia em sulco	GRANT (2014)
Triticum aestivum L.	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Arenoso	N/A	-3,0	Ureia a lanço	GRANT (2014)
Triticum aestivum L.; cv, Aquila	Methven Canterbury, Nova Zelândia	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Franco-siltoso	N/A	4,5	Dose de 120kg de N/ha	ZAMAN et al. (2010)

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continuação)

Espécie	Local	Volatilização ureia sem protetor		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		Kg/ha	%						
Triticum aestivum L.; cv, Aquila	Methven Canterbury, Nova Zelândia	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Franco-siltoso	N/A	2,9	Dose de 200kg de N/ha	ZAMAN et al. (2010)
Triticum aestivum L.	Alberta, Canadá	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Chernozem	N/A	-0,1	Dose da média entre 30/60/90kg de N/ha Dose da média entre 30/60/90kg de N/ha	MCKENZIE et al. (2010) ²
Triticum aestivum L.	Alberta, Canadá	N/A	N/A	Polímero - ESN	Chernozem	N/A	-4,7	Dose da média entre 30/60/90kg de N/ha	MCKENZIE et al. (2010) ²
Hordeum vulgare L.; cv, Bedford	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Franco-argiloso	N/A	-1,6	Dose de 40kg de N/ha	GRANT e BAILEY (1999)
Hordeum vulgare L.; cv, Bedford	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Franco-argiloso	N/A	3,7	Dose de 80kg de N/ha	GRANT e BAILEY (1999)
Hordeum vulgare L.; cv, Bedford	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Franco-arenoso	N/A	20,0	Dose de 40kg de N/ha	GRANT e BAILEY (1999)
Hordeum vulgare L.; cv, Bedford	Manitoba, Canadá	N/A	N/A	NBPT 0,14% M/M	Franco-arenoso	N/A	3,2	Dose de 80kg de N/ha	GRANT e BAILEY (1999)
Oryza sativa	Capão do Leão-RS	13,5	15	NBPT	Argiloso/Saturado	83	1,0	1 dia pré plantio	SCIVITTARO et al. (2010)
Oryza sativa	Capão do Leão-RS	13,5	15	NBPT	Argiloso/Saturado	84	9,0	10 dias pré plantio	SCIVITTARO et al. (2010)

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continuação)

Espécie	Local	Volatilização ureia sem protetor		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		Kg/ha	%						
Oryza sativa	Capão do Leão-RS	19,7	22	NBPT	Argiloso/ Úmido	87	1,0	1 dia pré plantio	SCIVITTARO et al. (2010)
Oryza sativa	Capão do Leão-RS	19,7	22	NBPT	Argiloso/ Úmido	88	9,0	10 dias pré plantio	SCIVITTARO et al. (2010)
Brassica napus L.; cv, Liberty Link	Carman, Canadá	16,8	17	NBPT	Chernossolo	91	N/A	28 dias	LASISI, AKINREMI e KUMARAGAMAGE (2019)
Brassica napus L.; cv, Liberty Link	High Bluff, Canadá	21,6	22	NBPT	Regossolo	74	N/A	28 dias	LASISI, AKINREMI e KUMARAGAMAGE (2019)
N/A	Brandon, Canadá	23	23	NBPT 0,15% M/M	Argiloso	80	N/A	21 dias	RAWLUK, GRANT e RACZ (2001)
N/A	Brandon, Canadá	25	25	NBPT 0,15% M/M	Arenoso	59	N/A	21 dias	RAWLUK, GRANT e RACZ (2001)
N/A	Devon, Inglaterra	31,6	32	NBPT 0,14% M/M	Argiloso	77	N/A	15 dias	SANZ-COBENA et al. (2011)
N/A	Devon, Inglaterra	31,6	32	Outros - Irrigação - 7 mm	Argiloso	77	N/A	15 dias	SANZ-COBENA et al. (2011)
N/A	Devon, Inglaterra	31,6	32	Outros - Irrigação - 14 mm	Argiloso	89	N/A	15 dias	SANZ-COBENA et al. (2011)
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	Polímero - Producoat	Latossolo	4,4	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continua)

Espécie	Local	Volatilização ureia sem protetor		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		Kg/ha	%						
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	Outros - Sulfammo 29	Latossolo	13,1	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	Polímero - Kimcoat	Latossolo	3,6	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	NBPT - SuperN	Latossolo	4,4	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	NBPT - Super Nitro	Latossolo	40,2	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)
N/A	Lages/SC, Brasil	10,8	5,4	Outros - B e Cu (Nitro Mais)	Latossolo	-3,4	N/A	Até 35 dias/ dose 200 kg N/ha	DAL MOLIN (2016)
Ananas comosus L. cv, Vitória	Janaúba-MG	221	43	NBPT	Latossolo	39	N/A	21 dias	SILVA et al. (2017)
Ananas comosus L. cv, Vitória	Janaúba-MG	221	43	DCD	Latossolo	4	N/A	21 dias	SILVA et al. (2017)
Ananas comosus L. cv, Vitória	Janaúba-MG	221	43	NBPT + DCD	Latossolo	40	N/A	21 dias	SILVA et al. (2017)

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continua)

Espécie	Local	Volatilização ureia sem protetor		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		Kg/ha	%						
Zea mays L.	Jataí-GO	52	63	NBPT	Latossolo	48	6,5	11 dias	PEREIRA et al. (2009)
Zea mays L.	Jataí-GO	52	63	Polímero	Latossolo	42	1,0	11 dias	PEREIRA et al. (2009)
Zea mays L. cv, AG 3051	Planaltina-DF	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	-5,0	60kg/ha	SILVA et al. (2011)
Zea mays L. cv, AG 3052	Planaltina-DF	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	-5,5	120kg/ha	SILVA et al. (2011)
Zea mays L. cv, AG 3053	Planaltina-DF	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	13,6	180kg/ha	SILVA et al. (2011)
Zea mays L. cv, AG 3054	Planaltina-DF	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	6,1	240kg/ha	SILVA et al. (2011)
Zea mays L. cv, Impacto	Rio Verde/GO, Brasil	N/A	N/A	Polímero	Latossolo	N/A	11,5	Dose de 150kg de N/ha	GUARESCHI, PERIN e GAZOLLA (2013)
Zea mays L. cv, Impacto	Rio Verde/GO, Brasil	N/A	N/A	Polímero	Latossolo	N/A	0,6	Dose de 75kg de N/ha	GUARESCHI, PERIN e GAZOLLA (2013)
Zea mays L.	Virgínia, EUA	N/A	N/A	NBPT- Arborite	Franco-arenoso	N/A	1,6	Dose de 112kg de N/ha	HUNTER FRAME et al. (2013)
Zea mays L.	Virgínia, EUA	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Franco-arenoso	N/A	1,5	Dose de 112kg de N/ha	HUNTER FRAME et al. (2013)
Zea mays L.	Tennessee, EUA	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Franco-siltoso	N/A	16,9	Dose de 123kg de N/ha	ZHOU et al. (2018) ¹

TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continua)

Espécie	Local	Volatilização ureia		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		sem protetor	com protetor						
		Kg/ha		%		Grãos			
Zea mays L.	Tennessee, EUA	N/A	N/A	Polímero	Franco-siltoso	N/A	25,1	Dose de 123kg de N/ha	ZHOU et al. (2018) ¹
Zea mays L.	Tennessee, EUA	N/A	N/A	NBPT- Agrotain	Franco-siltoso	N/A	24,3	Dose de 168kg de N/ha	ZHOU et al. (2018) ¹
Zea mays L.	Tennessee, EUA	N/A	N/A	Polímero	Franco-siltoso	N/A	24,5	Dose de 168kg de N/ha	ZHOU et al. (2018) ¹
Zea mays L.	Goiânia/GO, Brasil	N/A	N/A	Polímero - Kimcoat	Latossolo	N/A	16,0	Dose de 130kg de N/ha	FRAZÃO et al. (2014)
Zea mays L.	Goiânia/GO, Brasil	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	17,8	Dose de 130kg de N/ha	FRAZÃO et al. (2014)
Zea mays L.	Goiânia/GO, Brasil	N/A	N/A	Polímero - Kimcoat	Latossolo	N/A	11,7	Dose de 260kg de N/ha	FRAZÃO et al. (2014)
Zea mays L.	Goiânia/GO, Brasil	N/A	N/A	NBPT	Latossolo	N/A	8,2	Dose de 260kg de N/ha	FRAZÃO et al. (2014)
Zea mays L.	Jaboticabal/SP, Brasil	N/A	N/A	Polímero	Latossolo	N/A	1,8	Dose de 123kg de N/ha	MARTINS (2013)
Zea mays L.	Jaboticabal/SP, Brasil	N/A	N/A	Polímero	Latossolo	N/A	13,7	Dose de 265kg de N/ha	MARTINS (2013)

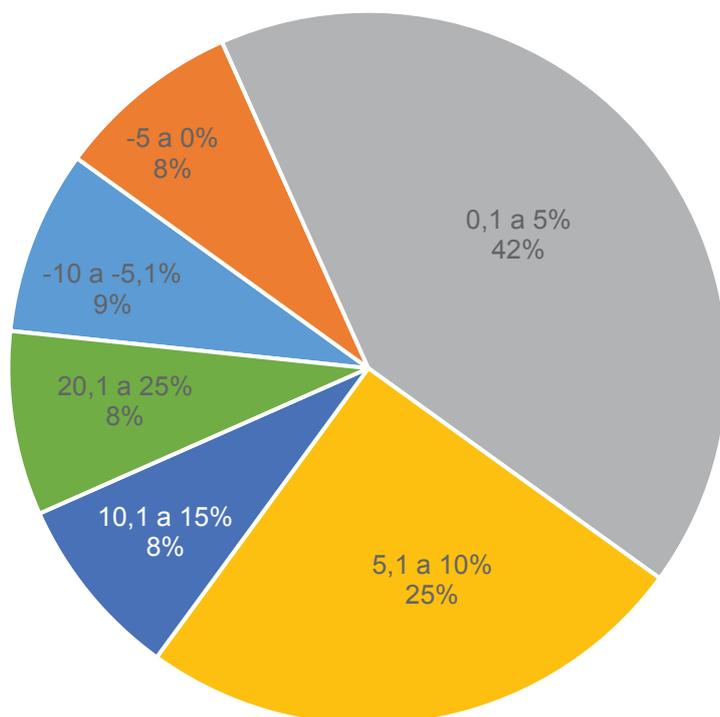
TABELA 1 – EFEITO DA APLICAÇÃO DE INIBIDORES NA VOLATILIZAÇÃO DE N-NH₃ DA UREIA E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES AGRÍCOLAS. (continua)

Espécie	Local	Volatilização ureia		Inibidor/Protetor	Solo/ Ambiente	Redução volatilização ureia (%)	Variação da produtividade (%)	Obs	Autor
		sem protetor	com protetor						
		Kg/ha		%		Grãos			
Zea mays L.	Salvília/MS, Brasil	N/A	N/A	Polímero - K- 0046	Latossolo	N/A	-6,9	Média 40- 80-120kg de N/ha	VALDERRAMA et al. (2014) ³
Zea mays L.	Salvília/MS, Brasil	N/A	N/A	Polímero - K- 0043	Latossolo	N/A	-3,0	Média 40- 80-120kg de N/ha	VALDERRAMA et al. (2014) ³
Zea mays L.	Salvília/MS, Brasil	N/A	N/A	Polímero - K- 0049	Latossolo	N/A	-2,3	Média 40- 80-120kg de N/ha	VALDERRAMA et al. (2014) ³
Zea mays L.	Salvília/MS, Brasil	N/A	N/A	Polímero - K- 0055	Latossolo	N/A	-3,8	Média 40- 80-120kg de N/ha	VALDERRAMA et al. (2014) ³
Média Exterior						51,1	4,5		
Média Brasil						57,2	7,0		
Média Milho						45,0	7,3		
Média Polímero						16,7	6,1		
Média NBPT						66,6	4,6		

FONTE: O autor (2020).

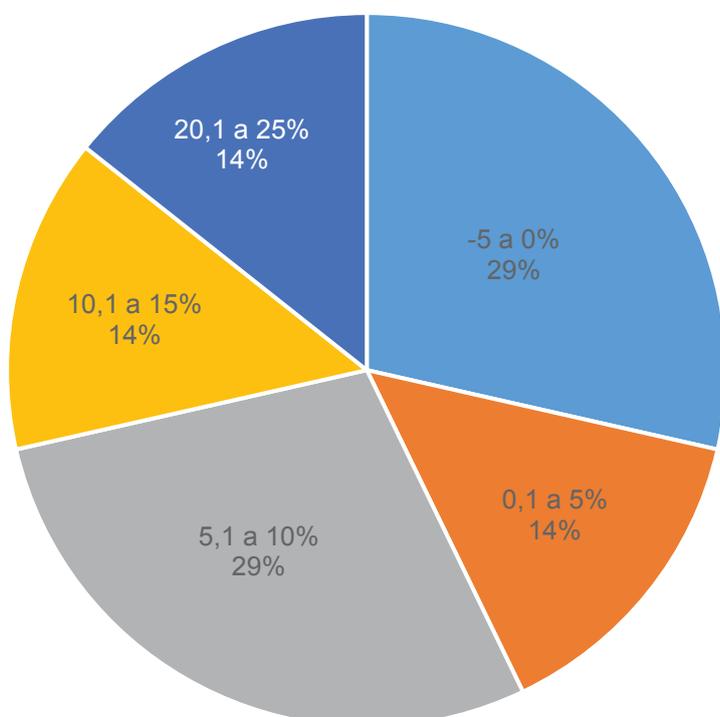
NOTA: N/A= parâmetro não avaliado pelo estudo; ¹ = avaliou 3 localidades, ao longo de 3 anos num total de 5 safras; ² = avaliou 3 localidades, ao longo de 3 anos num total de 9 safras; ³= avaliou 1 localidade, ao longo de 1 ano, média safra + safrinha.

FIGURA 2 - GANHO DE PRODUTIVIDADE MÉDIA OBTIDO POR AUTOR PARA NBPT - 12 TRABALHOS AVALIADOS



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 3 - GANHO DE PRODUTIVIDADE MÉDIA OBTIDO POR AUTOR PARA POLÍMEROS - 7 TRABALHOS AVALIADOS



FONTE: O autor (2020).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando à maior parte das condições encontradas, as perdas de N-NH₃ da ureia convencional variam entre 0 e 91% do total aplicado. Isso depende de fatores como clima, precipitação, tipo de solo, localidade, dose aplicada. As maiores perdas acontecem em solos franco ou arenosos, onde a aplicação é feita em superfície sob uma condição de pouca chuva no momento da aplicação e com pH mais alto - próximo de 6,5 ou superior.

Fatores ambientais e locais encontrados na safra interferem muito na volatilização da N-NH₃ da ureia, e como consequência no resultado do uso dos inibidores quanto ao aumento da produtividade. Acredita-se que os principais fatores são: pluviosidade, temperatura e umidade relativa, tipo de solo, manejo adotado.

Os valores médios de produtividade para ureia com NBPT considerando os trabalhos consultados variaram entre perdas de até 15% e ganhos de 25% em comparação com a ureia convencional. A média geral de todos os trabalhos e culturas consultados mostrou um ganho na produtividade de menos de 5%.

Dentre as culturas consideradas, a com melhor resposta ao uso de inibidores e protetores foi o milho, com decréscimos (7%) até aumento de 25% na produtividade de grãos. Considerando que na atualidade o uso de inibidores representa em média aumento de 15% a 40% sobre o custo do adubo nitrogenado, deve-se considerar que o aumento da produtividade deve gerar receita no mínimo igual a este custo.

5 CONCLUSÃO

A efetividade de protetores e inibidores de adubos nitrogenados é fortemente influenciada por condições ambientais, principalmente de solo e umidade. Desses, inibidores como NBPT e protetores à base de polímeros são os produtos com maior potencial de uso.

Fontes inibidas – NBPT – resultam em acentuada redução nas perdas, principalmente volatilização de $N-NH_3$ em 67% em comparação à uma condição análoga com produto convencional, porém, isso raramente se efetiva em ganho de produtividade.

Na média, polímeros aumentaram a produtividade em 6% enquanto inibidores em 5%.

Considerando os produtos avaliados, não há evidências suficientes que fomentem a ampla recomendação de fontes protegidas ou inibidas de N.

Dessa forma, a hipótese inicial do trabalho foi rejeitada.

REFERÊNCIAS

AZEEM, B. et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of controlled release**, v. 181, p. 11-21, 2014.

CABEZAS, W. A. R. L.; COUTO, P. A. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 739-752, 2007.

CANTARELLA, H. et al. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of advanced research**, v. 13, p. 19-27, 2018.

CARNEIRO, W. J. de O. et al. Mineralização de nitrogênio em Latossolos adubados com resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 715-725, 2013.

DAL MOLIN, S. J. **Desempenho de fertilizantes nitrogenados na volatilização de amônia, na lixiviação e no rendimento do feijoeiro**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2016.

ESPINDULA, M. C. et al. Urease inhibitor (NBPT) and efficiency of single or split application of urea in wheat crop. **Revista Ceres**, v. 61, n. 2, p. 276-279, 2014.

FRAZÃO, J. J. et al. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 12, p. 1262–1267, 2014.

GIOACCHINI, P. et al. Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. **Biology and fertility of soils**, v. 36, n. 2, p. 129-135, 2002.

GLASS, A. D. M. Nitrogen use efficiency of crop plants: physiological constraints upon nitrogen absorption. **Critical reviews in plant sciences**, v. 22, n. 5, p. 453-470, 2003.

GOULD, W. D.; HAGEDORN, C.; MCCREADY, R. G. L. Urea transformations and fertilizer efficiency in soil. In: **Advances in agronomy**. Academic Press, 1986. p. 209-238.

GRANT, C. A. et al. Nitrogen fertilizer and urease inhibitor effects on canola emergence and yield in a one-pass seeding and fertilizing system. **Agronomy journal**, v. 102, n. 3, p. 875-884, 2010.

GRANT, C. A. Use of NBPT and ammonium thiosulphate as urease inhibitors with varying surface placement of urea and urea ammonium nitrate in production of hard red spring wheat under reduced tillage management. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 94, n. 2, p. 329-335, 2014.

GRANT, C. A.; BAILEY, L. D. Effect of seed-placed urea fertilizer and N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) on emergence and grain yield of barley. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 79, n. 4, p. 491-496, 1999.

GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; GAZOLLA, P. R. Produtividade de milho submetido à aplicação de ureia revestida por polímeros. **Global science and technology**, v. 6, n. 2, 2013.

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. Global nitrogen fertilizer demand and supply: Trend, current level and outlook. In: **International Nitrogen Initiative Conference. Melbourne, Australia**. 2016.

HUNTER FRAME, W. et al. Agronomic evaluation of coated urea to reduce ammonia volatilization from side-dress applications to corn. **Crop Management**, v. 12, n. 1, 2013.

JAMES, G. R.; OOMEN, C. J. The biuret myth. **Journal of Environmental Science & Health Part A**, v. 22, n. 1, p. 93-104, 1987.

KAYE, J. P.; HART, S. C. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 12, n. 4, p. 139-143, 1997.

KNOWLES, R. Denitrification. **Microbiological reviews**, v. 46, n. 1, p. 43, 1982.

KRASE, H. J.; GADDY, V. L.; CLARK, K. G. A Direct Synthetic Urea Process¹. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 22, n. 3, p. 289-293, 1930.

LASISI, A. A.; AKINREMI, O. O.; KUMARAGAMAGE, D. Efficacy of a new N-(n-butyl) thiophosphoric triamide formulation in reducing ammonia volatilization from urea-based fertilizers. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 99, n. 4, p. 395-405, 2019.

LEGHARI, S. J. et al. Role of nitrogen for plant growth and development: A review. **Advances in Environmental Biology**, v. 10, n. 9, p. 209-219, 2016.

MANUNZA, B. et al. The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(N-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site. A comparative molecular dynamics study. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 5, p. 789-796, 1999.

MARTINS, I. S. **Doses, épocas e modos de aplicação da ureia comum e revestida na cultura do milho**. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

MCKENZIE, R. H. et al. Evaluation of polymer-coated urea and urease inhibitor for winter wheat in southern Alberta. **Agronomy journal**, v. 102, n. 4, p. 1210-1216, 2010.

MIKKELSEN, R. L. Biuret in urea fertilizer. **Fertilizer research**, v. 26, p. 311-318, 1990.

NORDIN, A.; HÖGBERG, P.; NÄSHOLM, T. Soil nitrogen form and plant nitrogen uptake along a boreal forest productivity gradient. **Oecologia**, v. 129, n. 1, p. 125-132, 2001.

PEREIRA, H. S. et al. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1685-1694, 2009.

- PRIMAVESI, O. et al. Lixiviação de nitrato em pastagem de coastcross adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 3, p. 683-690, 2006.
- RAPPAPORT, B. D.; AXLEY, J. H. Potassium Chloride for Improved Urea Fertilizer Efficiency 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2, p. 399-401, 1984.
- RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACZ, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 81, n. 2, p. 239-246, 2001.
- REYNOLDS, C. M.; WOLF, D. C.; ARMBRUSTER, J. A. Factors Related to Urea Hydrolysis in Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 1, p. 104-108, 1985.
- SALMAN, O. A. Polymer coating on urea prills to reduce dissolution rate. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 36, n. 3, p. 616-621, 1988.
- SANZ-COBENA, A. et al. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 8, p. 1517-1524, 2011.
- SCHINDLER, D. W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. **Limnology and oceanography**, v. 51, n. 1part2, p. 356-363, 2006.
- SCIVITTARO, W. B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1283-1289, 2010.
- SHEDLEY, E.; DELL, B.; GROVE, T. Diagnosis of nitrogen deficiency and toxicity of Eucalyptus globulus seedlings by foliar analysis. **Plant and Soil**, v. 177, n. 2, p. 183-189, 1995.
- SILVA, D. F. da et al. Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e nitrificação na cultura do abacaxi. **Revista Ceres**, v. 64, n. 3, p. 327-335, 2017.
- SILVA, D. R. G. et al. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 516-523, 2011.
- TAMME, T.; REINIK, M.; ROASTO, M. Nitrates and nitrites in vegetables: occurrence and health risks. In: **Bioactive Foods in Promoting Health**. Academic Press, 2010. p. 307-321.
- VALDERRAMA, M. et al. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 2, p. 659-670, 2014.

WHITEHEAD, D. C.; RAISTRICK, N. Effects of some environmental factors on ammonia volatilization from simulated livestock urine applied to soil. **Biology and fertility of soils**, v. 11, n. 4, p. 279-284, 1991.

XU, G.; FAN, X.; MILLER, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual review of plant biology**, v. 63, p. 153-182, 2012.

ZAMAN, M. et al. The effect of different rates of urea with or without urease inhibitor (NBPT) on wheat yield and quality. **Agricultural Journal**, v. 5, n. 5, p. 309-312, 2010.

ZHOU, X. V. et al. Profitability of enhanced efficiency urea fertilizers in no-tillage corn production. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 4, p. 1439-1446, 2018.