



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Instituto de Química

**FERTILIZANTES NITROGENADOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE
IMPACTOS AMBIENTAIS.**

ANA LUÍZA CORDEIRO LIMA

UBERLÂNDIA

2024

ANA LUÍZA CORDEIRO LIMA

FERTILIZANTES NITROGENADOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE IMPACTOS
AMBIENTAIS.

Trabalho apresentado ao Instituto de Química de
Universidade Federal de Uberlândia como requisito
parcial à conclusão do curso de Química Industrial

UBERLÂNDIA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Química Industrial
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1A, Sala 1A233 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia- MG, CEP
38400-902



Telefone: (34) 3239-4103 - coqin@iqufu.ufu.br

ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Química Industrial				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - GQB056				
Data:	23/04/2024	Hora de início:	16:00	Hora de encerramento:	18:00
Matrícula do Discente:	11811QID049				
Nome do Discente:	Ana Luíza Cordeiro Lima				
Título do Trabalho:	Fertilizantes nitrogenados: uma revisão bibliográfica sobre impactos ambientais.				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não				

Reuniu-se na sala 206 do bloco 50A no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Coordenador do Curso de Graduação em Química Industrial, assim composta: Prof. Dr. João Flávio da Silveira Petrucci - **Orientador**; Prof. Dr. Osmando Ferreira Lopes - Titular; Doutoranda Josiele Aparecida Magalhães Conrado - Titular e Prof. Dr. Sidnei Gonçalves da Silva - Suplente.

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Dr. João Flávio da Silveira Petrucci, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença dopúblico, e concedeu ao(à) discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a) Nota: 95 pontos(
 Reprovado(a)

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presenteata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **João Flávio da Silveira Petrucí**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2024, às 11:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Osmando Ferreira Lopes**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 30/04/2024, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Josiele Aparecida Magalhães Conrado**, **Usuário Externo**, em 07/05/2024, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5330253** e o código CRC **B31974A0**.

Referência: Processo nº 23117.025489/2024-04

SEI nº 5330253

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir e me dar forças para concluir este trabalho e o curso de Química Industrial.

Agradeço a minha família e meus amigos por sempre terem me ajudado e me apoiado ao longo de todos esses anos de faculdade.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Flávio da Silveira Petrucci que me auxiliou e aceitou me orientar.

Dedico esse trabalho a Maria Luiza, Vicente, Arthur, Paula, Naira, Lucas Gabriel e Guilherme (*in memoriam*).

RESUMO

O Brasil é o principal produtor e exportador de soja e milho do mundo. Geralmente, a produção ocorre por 2 a 3 safras por ano, na maior parte em solos ácidos e pobres. Por esse motivo, faz-se necessária a reposição de nutrientes periodicamente. A adição de nutrientes ao solo é feita por meio de fertilizantes, que são substâncias que adicionam os nutrientes que faltam para as plantações, aumentando a produção e a qualidade da cultura, os principais são nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Assim como outros nutrientes, o nitrogênio se mostra essencial para as plantas, é fundamental para a formação de aminoácidos e proteínas e, além disso, auxilia na fotossíntese, fazendo a manutenção da vida do vegetal. Os fertilizantes nitrogenados possuem diferentes formulações, mas todos são advindos da amônia anidra produzida pelo processo de Haber-Bosch, sendo extremamente importante na alimentação da população mundial, o nitrogenado mais utilizado é a ureia, que possui 46% de nitrogênio, seu uso é o mais viável por ser barato e apresentar alta concentração de N, mas apresenta alto nível de perda por volatilização de amônia. A elevada utilização de fertilizantes nitrogenados altera o ciclo do nitrogênio que causam impactos ambientais irreversíveis, o presente trabalho revisa os principais problemas causados pela alta concentração de nitrogênio reativo e métodos que minimizam esses impactos.

Palavras chaves: Fertilizantes; Fertilizantes nitrogenados; Nitrogênio reativo; Impactos ambientais.

ABSTRACT

Brazil is the world's leading producer of soybeans and corn. Due to the occurrence of 2 to 3 harvests per year in acidic and poor soils, it is necessary to periodically replenish nutrients. Nutrient addition to the soil is done through fertilizers, which are substances that supply the lacking nutrients for crops, thereby increasing production and crop quality. The main nutrients are nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). Like other nutrients, nitrogen is essential for plants, playing a key role in the formation of amino acids and proteins, and also aiding in photosynthesis, therefore, maintaining plant life. Nitrogen fertilizers come in various formulations, but all are derived from anhydrous ammonia produced by the Haber-Bosch process, which is extremely important in feeding the world's population. The most commonly used nitrogen fertilizer is urea, which contains 46% nitrogen. Its use is most viable due to its low cost and high nitrogen concentration, but it also has a high level of ammonia volatilization loss. The extensive use of nitrogen fertilizers alters the nitrogen cycle, causing irreversible environmental impacts. This study reviews the main problems caused by high concentrations of reactive nitrogen and methods to minimize these impacts.

Key words: Fertilizers; Nitrogen fertilizers; Reactive nitrogens; Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação do consumo de fertilizantes no Brasil.....	4
Figura 2. Sintomas de deficiência de nitrogênio em morangueiro. No vaso à esquerda possui a presença de nitrogênio. Já no vaso à direita, possui a omissão de nitrogênio.....	7
Figura 3. Gráfico referente ao consumo de fertilizante nitrogenados no mundo em 2021.....	8
Figura 4. Ureia branca granulada	9
Figura 5. Esquema de representação do ciclo do nitrogênio	11
Figura 6. Raízes de leguminosas com nódulos.....	12
Figura 7. Cascata de N: efeitos de um átomo de N_r no tempo e espaço.....	15
Figura 8. Balanço energético global.....	16
Figura 9. Céu escuro na cidade de São Paulo às 16 horas.....	19
Figura 10. Processo de eutrofização em corpo de água.....	20
Figura 11. Mortandade de peixes de corpo de água eutrofizado	20
Figura 12. Esquema de aplicação de fertilizante e coleta de água de poço	22
Figura 13. Fluxograma dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada.....	25
Figura 14. Estrutura NBPT (S) e (O).....	26
Figura 15. Ureia convencional branca e tratada com aditivo NBPT amarelo.....	26
Figura 16. Volatilização de $N-NH_3$ ao longo do tempo. Comparando a ureia comum x tratada com NBPT	27
Figura 17. Perdas acumuladas de NH_3 durante 21 dias após tratamento com inibidores de urease e nitrificação	28
Figura 18. Liberação controlada da ureia revestida.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fertilizantes nitrogenados e suas concentrações de nitrogênio.....	8
Tabela 2. Perda de biodiversidade ao longo dos séculos.....	24

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	7
Equação 2	9
Equação 3	10
Equação 4	11
Equação 5	13
Equação 6	13
Equação 7	13
Equação 8	13
Equação 9	13
Equação 10	14

SUMÁRIO

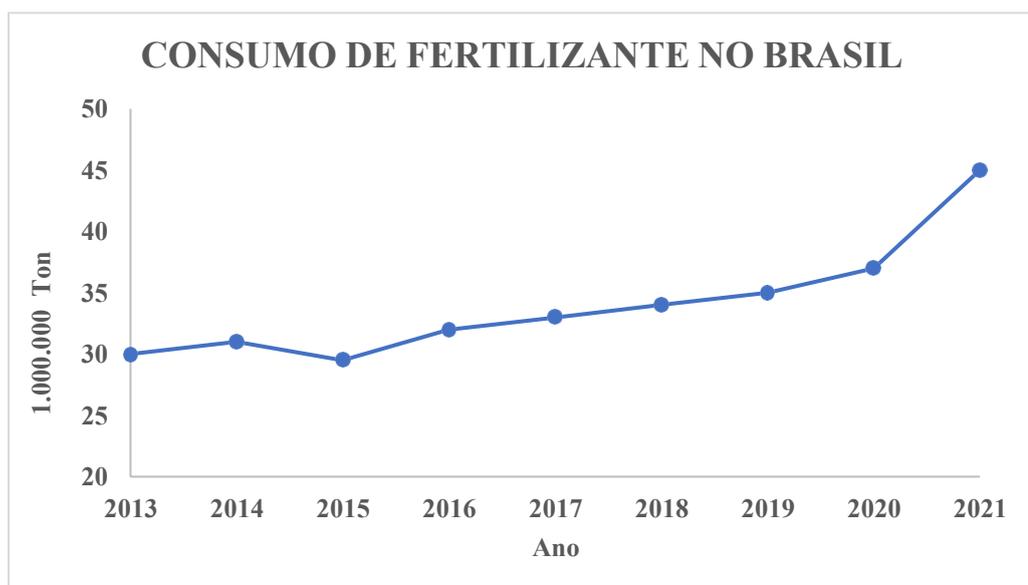
1	INTRODUÇÃO	4
1.1.	Fertilizantes	4
1.2.	Nitrogênio	5
1.3.	Fertilizantes Nitrogenados	6
1.3.1.	Ureia	9
2	CICLO DO NITROGÊNIO	10
2.1.	Fixação	11
2.2.	Nitrificação	13
2.3.	Desnitrificação	14
3	NITROGÊNIO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS	14
3.1.	Mudanças Climáticas e Atmosfera	16
3.1.1.	Efeito estufa e aquecimento global.....	16
3.1.2.	Formação e emissão de aerossóis	17
3.2.	Poluição da Água.....	19
3.2.1.	Poluição da água doce	19
3.2.2.	Lixiviação do nitrato e as águas subterrâneas.....	21
3.3.	Perda de Biodiversidade	23
4	MÉTODOS PARA INIBIÇÃO DE UREASE E NITRIFICAÇÃO.....	24
4.1.	Inibição de urease: Uso de NBPT.....	25
4.2.	Inibição de nitrificação: Uso de DCD	27
4.3.	Fertilizantes de liberação controlada: Revestimento polimérico.....	28
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

1.1. Fertilizantes

O Brasil é um grande celeiro mundial de produção e exportação de grãos, sendo o maior produtor de soja e o terceiro maior produtor de milho do mundo, se tornando em 2022/2023 o maior exportador dos grãos, ultrapassando assim potências como Estados Unidos e China (BOSCHIERO, 2023; SILVA, 2016). Além disso, é responsável também por grande parte da produção de proteína animal consumida pela população mundial, sendo que para alcançar essa alta produção é necessário um grande consumo de grãos, principalmente milho e soja, como fonte de alimento dos animais (APEXBRASIL, 2023). Esses altos índices de produção são obtidos, em sua grande maioria, em plantações cultivadas em solos ácidos e pobres em nutrientes, e mesmo assim o Brasil é um dos únicos países em que 2 a 3 safras ocorrem ao ano. Mesmo que o clima e algumas características dos solos brasileiros sejam favoráveis para plantações, é necessária aplicação de fertilizantes para torná-lo produtivo, já que colheitas constantes esgotam os nutrientes dos solos (MOTTA e PAULETTI, 2023). O consumo de fertilizantes no Brasil tem crescido cada vez mais nos últimos anos, evidenciando, dessa forma, a dependência de fertilizantes que o país apresenta para atender a alta demanda de produção. A Figura 1 apresenta o consumo de fertilizante no Brasil entre 2013 e 2021.

Figura 1. Representação do consumo de fertilizantes no Brasil.



Fonte A autora baseada nos dados de (MAPA, 2022).

Os fertilizantes são substâncias de origem inorgânica ou orgânica utilizadas no solo com o objetivo de nutrição, fazendo com que haja aumento na produção e qualidade do produto

vegetal. Para isso, os solos devem possuir boa fertilidade e fornecer elementos que são essenciais para que as plantas se desenvolvam. A partir dessa necessidade o uso de fertilizantes se tornou indispensável na agricultura (AGROPÓS, 2022). Os solos possuem fertilidades inerentes a eles, mas em níveis moderados, gerando a necessidade de reposição periódica de mais nutrientes além do que o solo já oferece para as plantações (REETZ, 2017).

A fertilização física dos solos é necessária, pois, a maioria dos elementos químicos são encontrados nas plantas, mesmo que nem todos são essenciais a ela, apenas uma parcela dos elementos demonstra que sem eles não é possível completar o seu ciclo de vida (REETZ, 2017). Os principais elementos que são encontrados em maiores quantidades são oxigênio (O), hidrogênio (H) e carbono (C), os quais são provenientes do ar e da água.

Os nutrientes são classificados de acordo com as quantidades em que são encontrados no solo, dividem-se em micronutrientes, que estão presentes em baixa concentração, e macronutrientes, que estão presentes em alta concentração. Além do carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), os outros elementos considerados como macronutrientes são: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), podendo considerar também como macronutrientes secundários o enxofre (S), o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg). Os principais micronutrientes são ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), boro (B), entre outros. Os micros e macros secundários não tem menos importância que os macronutrientes, apenas são encontrados e demandados em uma menor concentração (PLACIDO, 2022).

1.2. Nitrogênio

Dos principais nutrientes que devem ser considerados para fertilização, o nitrogênio está presente em cerca de 29% dos fertilizantes utilizados no Brasil, causando maior impacto na produção de diferentes culturas, aumentando a qualidade do que é produzido. O nitrogênio é fundamental para formação de aminoácidos e proteínas porque está presente na molécula de clorofila, responsável pela fotossíntese da planta, que é o processo de produção de energia que faz a manutenção da vida do vegetal (KLUGE, TEZOTTO-ULIANA e DA SILVA, 2015). Logo, a suplementação de nitrogênio deve ser realizada adequadamente, pois sua ausência limita o crescimento e causa redução da área foliar, expansão e divisão celular e fotossíntese (ARGENTA, SILVA e BORTOLINI, 2001).

Segundo estudo realizado por Bender et al (2013), uma cultura de milho absorve nitrogênio durante todo o ciclo de vida, desde os estágios iniciais até os reprodutivos, observando que a maior demanda está na fase final do ciclo para produzir fotoassimilados, fonte

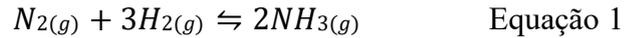
energética, por meio da fotossíntese e proteínas que auxiliam no enchimento de grãos. No ciclo inicial, o nitrogênio é utilizado para crescimento de raízes e parte foliar, sendo essencial em todo o ciclo do vegetal (LAZZARINI, 2022).

O nitrogênio está presente no solo em diferentes composições, pelas adições via fertilizantes, água da chuva e pela fixação biológica (MALAVOLTA, 2006). As plantas o absorvem de algumas formas ao longo do crescimento, predominantemente pelas raízes na forma de nitrato (NO_3^-) e íon amônio (NH_4^+) (BREDEMEIER e MUNDSTOCK, 2000). O nitrogênio é transformado por meio de processos tanto biológicos quanto químicos, que podem aumentar ou reduzir a disponibilidade deste para o vegetal.

Na grande parte dos cultivos, o nutriente de maior demanda é o nitrogênio e, por isso, os fertilizantes possuem altas quantidades do elemento. Entretanto, nem todo nitrogênio reativo adicionado no solo é aproveitado pelas plantas e uma boa parcela é perdida para a atmosfera, podendo ocorrer de diferentes formas, como gás N_2 , amônia (NH_3), óxido nitroso (N_2O), entre outros. A fração solúvel, na forma de nitrato (NO_3^-) e nitrito (NO_2^-), a perda ocorre por lixiviação, que consiste no processo de arraste dos compostos solúveis por meio de agentes naturais, principalmente a água (CAIXETA, FELIX e DE ASSIS CHAVIER, 2015). Por ser um elemento muito reativo, formando diversos compostos nas plantas e exercendo função vital em seu crescimento e desenvolvimento, o seu manejo se torna um dos mais difíceis de ser realizado (SANTOS, FAGERIA, *et al.*, 2003). O preço de fertilizantes nitrogenados e as altas perdas tanto na aplicação quanto na absorção necessitam de práticas que melhorem a eficiência, fazendo-se necessários estudos e inovações para uma maior eficácia no uso do nitrogênio, diminuindo perdas financeiras e reduzindo impactos ambientais (FERNANDES, 2006).

1.3. Fertilizantes Nitrogenados

A classe de fertilizantes nitrogenados é composta por uma variedade de formulações, possuindo diferentes usos para produção de diversas culturas, apresentando também propriedades que os diferem, porém todos são produzidos a partir da amônia anidra (REETZ, 2017). Ela é produzida pelo processo Haber-Bosch, que consiste em adicionar H_2 e N_2 em um reator sob temperatura e pressão elevada formando amônia gasosa (equação 1), que ao ser condensada é convertida em amônia líquida. A amônia é utilizada nesse estado para a produção dos fertilizantes (SOUZA, 2024).



Estima-se que a falta de fertilizantes nitrogenados resultaria em produções de alimentos 48% menor do que é produzido atualmente, fazendo com que o processo de Haber-Bosch contribua em grande parcela na alimentação da população mundial (ERISMAN, SUTTON, *et al.*, 2008). A amônia anidra é usada como componente básico para os fertilizantes, resultando em diferentes opções de manejar o nitrogênio nas culturas, atendendo necessidades logísticas e nutricionais, proporcionando colheitas produtivas (REETZ, 2017). Fertilizantes nitrogenados auxiliam na coloração das folhas por evitar baixos níveis de clorofila, o que impede coloração amarelada, além de aumentar a parte aérea das plantas, além de aumentar o sistema de raízes, ajudando na absorção de nutrientes na água do solo e, conseqüentemente, contribuindo positivamente para a produtividade (EQ. AGRONÔMICA, 2022). A Figura 2 traz um experimento feito comparando um morangueiro tratado com nitrogênio e outro cultivado sem a adição de N, nota-se a coloração amarelada e a diferença da parte aérea entre os dois vasos.

Figura 2. Sintomas de deficiência de nitrogênio em morangueiro.



Fonte: Retirado pela autora de (BARRETO, NAVROSKI, *et al.*, 2018).

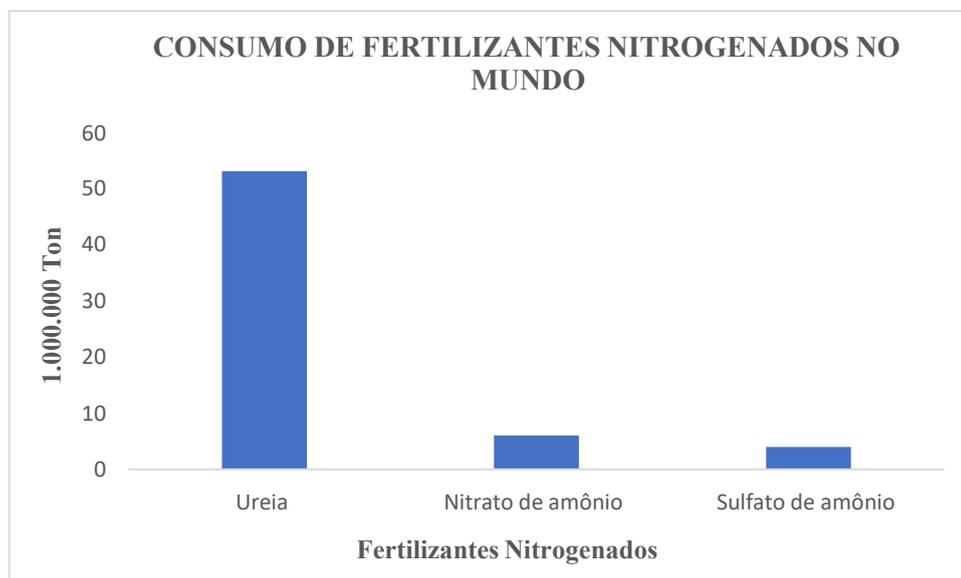
Na Tabela 1 estão exibidos os principais compostos utilizados em fertilizantes nitrogenados usados nas grandes culturas e as concentrações em porcentagens de nitrogênio presente em cada um deles.

Tabela 1. Fertilizantes nitrogenados e suas concentrações de nitrogênio.

Fertilizantes	Concentração (%)
Ureia	46
Sulfato de amônio	21
Nitrato de amônio	34

Fonte: A autora baseada em (REETZ, 2017; FERRARI, 2022).

O composto presente nos fertilizantes nitrogenados mais empregado dentre os citados é a ureia, sendo também o mais utilizado no mundo (FACRE, 2007), como mostrado na Figura 3.

Figura 3. Consumo de fertilizante nitrogenados no mundo em 2021.

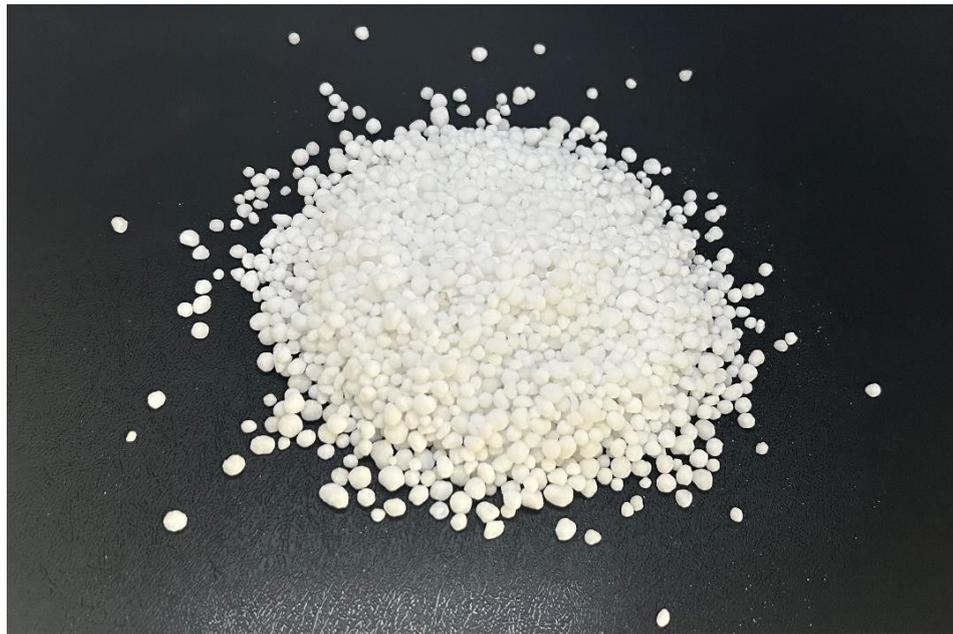
Fonte: A autora baseada nos dados (INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION, 2024).

Embora os fertilizantes nitrogenados apresentem grandes vantagens para produção de alimentos em escala mundial, a aplicação de nitrogênio reativo (Nr) no solo tem se mostrada prejudicial ao meio ambiente ao longo dos anos, contribuindo para problemas ambientais como aquecimento global, chuva ácida, eutrofização e outros. No último século, estima-se que a quantidade de Nr encontrado em solos, água e ar tenha dobrado, sendo que o uso de fertilizantes é um dos principais motivos para o aumento. Mesmo que o nitrogênio já tenha se mostrado como essencial para vida terrestre, ele é um poluente que está prejudicando os humanos, animais, plantas e, principalmente, corpos de água (ERISMAN, GALLOWAY, *et al.*, 2015). A ureia, como citado anteriormente, é o fertilizante nitrogenado mais utilizado mundialmente, contribuindo diretamente para o aumento de nitrogênio reativo nos solos e na atmosfera.

1.3.1. Ureia

Sintetizada em pressão e temperatura elevada a partir do gás carbônico e amônia com fórmula molecular $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, a ureia ou carbamida apresenta coloração branca e não possui cheiro, em temperatura ambiente é sólida, podendo ter formas variadas que são diferenciadas pelo tamanho, sendo a mais comum a ureia granulada, mostrada na Figura 4, possuindo tamanho entre 2 a 4 milímetros (FACRE, 2007).

Figura 4. Ureia branca granulada.



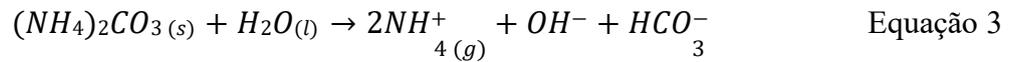
Fonte: A autora.

Como citado anteriormente, a concentração de Nr na ureia faz com que o seu uso seja o mais viável entre os nitrogenados, por baratear os custos de transporte e aplicação, mas além dos seus benefícios a ureia apresenta o maior nível de perda de nitrogênio por volatilização de amônia (KIEHL, 1989). O processo de volatilização se inicia logo após a aplicação do fertilizante no solo. Ao ser aplicada, a ureia sofre hidrólise e é convertida em carbonato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ pela enzima urease encontrada nos solos produzidas por bactérias e fungos (ERNANI, STECKLING e BAYER, 2001; ROCHETTE *et al.*, 2009) como apresentada na Equação 2.



O carbonato de amônio é decomposto em amônio, hidroxila e bicarbonato (Equação 3), podendo ocorrer a incorporação de NH_4^+ pelo solo, necessário para as plantas, ou a liberação de NH_3 para a atmosfera. Essa conversão é causada devido ao aumento do pH do solo

proveniente da decomposição do carbonato de amônio (ERNANI, STECKLING e BAYER, 2001; ROCHETTE *et al.*, 2009).



A volatilização da amônia é favorecida em certas condições, como excedente de Nr, aumento do pH do solo, temperaturas mais elevadas e umidade (TASCA, ERNANI, *et al.*, 2011). Em estudo realizado por TASCA, ERNANI, *et al.* (2011), demonstrou-se que, em condições mais favoráveis à volatilização, houve perda de 50% do aplicado no plantio podendo atingir até 78% de NH₃ volatilizado. Mesmo que a amônia seja vital para a vida humana, por ser base de aminoácidos, proteínas e enzimas, altas concentrações na atmosfera causam impactos ambientais, como a poluição de corpos de água, formação de aerossóis atmosféricos que prejudicam a qualidade do ar, liberação de gases do efeito estufa e perda de biodiversidade (GARCIA, CARDOSO e SANTOS, 2013).

Em uma das etapas do ciclo do nitrogênio, a amônia/amônio é oxidada a nitrato, que é uma das principais formas de fixação pelas plantas. O excedente de nitrato não absorvido é arrastado para corpos d'água pela chuva, pelo processo de lixiviação, levado para as camadas mais profundas do solo, podendo atingir os lençóis freáticos, causando contaminação desses que são fontes de abastecimento de grande parcela de água consumida mundialmente (ANDRADE, AQUINO, *et al.*, 2009).

2 CICLO DO NITROGÊNIO

O ciclo do nitrogênio, classificado como ciclo biogeoquímico, promove a circulação do elemento químico entre os reservatórios ambientais, como mostra o esquema de representação na Figura 5. O nitrogênio pode ser encontrado em diversas formas químicas e lugares, como nos oceanos, rochas e, principalmente na atmosfera terrestre, a qual é composta por 79% dos gases presentes. Embora seja um elemento abundante, a maioria dos seres vivos não são capazes de fixar e o incorporarem em matérias orgânicas, apenas algumas espécies de bactérias que conseguem realizar essa função, fazendo com elas sejam fundamentais para o ciclo.

Figura 5. Esquema de representação do ciclo do nitrogênio.

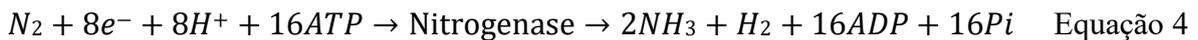


Fonte: Retirado de (TRAMONTINI, VELHO e STELLA DE FREITAS, 2020).

A Figura 5 traz o esquema do ciclo, como citado anteriormente, e as reações que ocorrem durante o processo, que são divididas por etapas: fixação, onde ocorre também a amonificação, nitrificação e desnitrificação.

2.1. Fixação

A fixação de nitrogênio não ocorre de forma direta para a maioria dos seres vivos devido à estrutura que o gás nitrogênio apresenta. A ligação tripla que une a molécula o torna estável à temperatura ambiente e para romper essa ligação é necessário que o organismo possua a enzima nitrogenase, que é encontrada em microrganismos, denominados de diazotróficos, fixadores de nitrogênio atmosférico (VIEIRA, 2017). A fixação biológica do nitrogênio, de sigla FBN, consiste na redução do N_2 a NH_3 catalisada pela enzima nitrogenase, Equação 4.



Os microrganismos diazotróficos podem ser divididos em três grupos, não simbióticos ou de vida livre, associativos e simbióticos. Os não simbióticos ou de vida livre agem em superfície de plantas, materiais em decomposição e solo, os associativos se associam a raízes e em partes aéreas das plantas, mas não apresentam uma relação estável, e os simbióticos se ligam

as leguminosas de forma bem estruturada e estável, sendo os principais fixadores de N_2 (REETZ, 2017).

O processo de FBN em leguminosas ocorre por meio da associação com bactérias *rhizobium*, que ao interagir com as raízes da planta formam nódulos, como exibido na Figura 6, que a bactéria fixa o N_2 o convertendo para amônia. As leguminosas favorecem a fixação por serem fontes de carbono e apresentarem ambiente favorável às bactérias, o processo irá variar de acordo com o meio, e os fatores que podem influenciar são: hospedeiro, o microrganismo e ambiente, podendo fixar de 25 a 200 $Kg.ha^{-1}$ por ciclo de vida da planta (VIEIRA, 2017).

Figura 6. Raízes de leguminosas com nódulos.

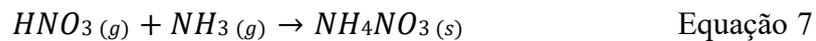
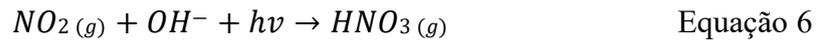
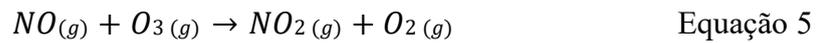


Fonte: Retirado de (DA SILVA, 2019).

Como citado anteriormente, o processo de Haber – Bosch é utilizado para produção de amônia a partir do gás N_2 , que posteriormente é utilizado na fabricação dos fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas, logo esse também é um método de fixação de nitrogênio no solo, denominado de fixação industrial, sem que haja os processos e organismos da FBN. A fixação de forma industrial traz prejuízos ambientais, por causar poluição pela adição dos fertilizantes no solo e na produção da amônia, que requer alta demanda energética e combustíveis fósseis, como o gás natural que é a fonte de H_2 para reação, emitindo 2 toneladas de CO_2 para 1 tonelada de amônia (CHAGAS, 2007).

A fixação de nitrogênio pode ocorrer de forma não intencional, processos combustivos, reação entre um combustível e O_2 , provocam a fixação de nitrogênio e geram energia térmica,

favorecendo a formação do gás NO a partir das reações dos principais gases que compõe a ar, N₂ e O₂. O ozônio (O₃) presente na atmosfera possui propriedades oxidantes que oxida o NO em NO₂, Equação 5, o transformando em ácido nítrico (HNO₃), Equação 6, na troposfera em presença de luz solar. O HNO₃ é neutralizado por amônia presente na atmosfera que gera o nitrato de amônio, Equação 7 (GARCIA, CARDOSO e SANTOS, 2013).

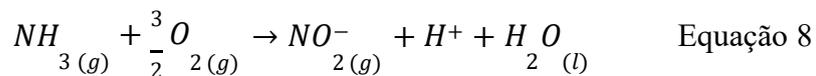


Durantes as reações, os compostos de nitrogênio podem ser depositados e o excesso do nutriente na atmosfera provoca cada vez mais essas deposições, provocando prejuízos ambientais irreversíveis (GARCIA, CARDOSO e SANTOS, 2013).

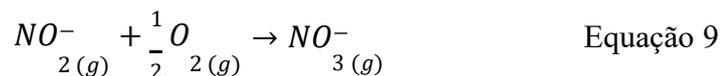
2.2. Nitrificação

O processo de nitrificação é a transformação de NH₃ /NH₄⁺ em nitrito (NO₂⁻) e, posteriormente, em nitrato, por meio de bactérias conhecidas como quimiossintetizantes nitrificantes. A conversão acontece em duas etapas, a nitrosação e a nitratação, e são realizadas por dois tipos de bactérias, as *nitrosomonas* e as *nitrobacter*, respectivamente.

A Equação 8 descreve a conversão da amônia para nitrito, a nitrosação, onde as *nitrosomonas* utilizam a amônia, que não foi absorvida pelas plantas, como fonte energética para seu metabolismo (RITTMANN e LANGELAND, 1985).



Na etapa da nitratação, as *nitrobacter*, assim como as *nitrosomonas*, utilizam essas reações para obter energia para o seu metabolismo, sendo sua fonte energética o nitrito que é convertido a nitrato, Equação 9, enquanto liberam energia.

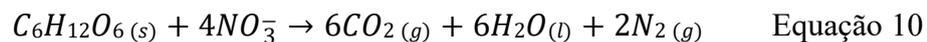


A concentração de nitrito acumulado no solo é sempre baixa, pois as bactérias da segunda etapa precisam utilizar o nitrito com maior velocidade para um maior ganho energético, logo a concentração de nitrato acumulado é alta. O NO₃⁻, resultante da nitratação, possui a forma

absorvível que as plantas necessitam, mas é uma das formas em que o nitrogênio é lixiviado pela solubilidade em água (VIEIRA, 2017).

2.3. Desnitrificação

A desnitrificação é a redução do nitrato para as formas gasosas do nitrogênio, a ausência de oxigênio força os microrganismos à respiração anaeróbia que é realizada a partir do NO_3^- . Por se tratar de um ciclo, o nitrogênio deve voltar à forma em que o processo se iniciou, N_2 , para que todas as etapas ocorram novamente, a desnitrificação é a redução do nitrato para óxido nitroso ou N_2 , que se trata do N_2 . A reação de desnitrificação ocorre a partir das necessidades dos microrganismos desnitrificantes, além do nitrato, a matéria orgânica oxidável, na forma de glicose, é utilizada para ser fonte de carbono e elétrons, como mostra a Equação 10 (ZOPPAS, BERNARDES e MENEGUZZI, 2016).



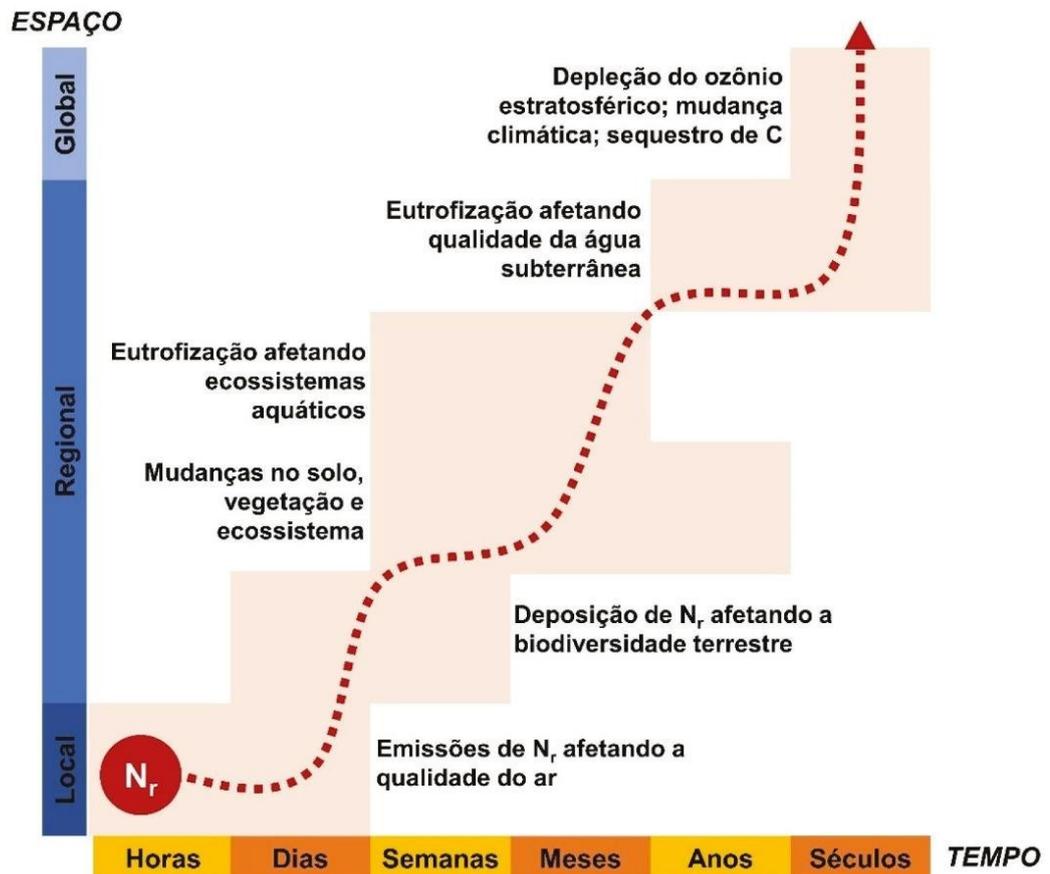
Em todas as fases do ciclo do nitrogênio há perdas significativas de nitrogênio no solo, na fixação a amônia sofre volatilização, aumentando a concentração de NH_3 na atmosfera, na etapa de nitrificação o nitrogênio em forma de nitrato é lixiviado, e na desnitrificação, o nitrogênio retorna à sua forma molecular que compõe o ar atmosférico (VIEIRA, 2017). Como citado anteriormente, o nitrogênio é extremamente essencial para os seres vivos e sua forma atmosférica não apresenta perigo para a saúde humana e ambiental, mas ao ser combinado com outras espécies podem se tornar prejudiciais, mesmo aqueles que ainda são necessários, como o nitrato, mas em altas concentrações se tornam maléficos para o meio ambiente e, conseqüentemente, aos humanos.

3 NITROGÊNIO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

O impacto ao ciclo do nitrogênio se deve ao fato de possuir uma quantidade exorbitante de nitrogênio reativo na atmosfera, solo e corpos d'água, o que ocasiona diversos problemas ambientais. Esse dano é consequência da enorme quantidade de N_r no meio ambiente, dispersas pela ação humana após a Revolução Industrial, e em maior abundância, após desenvolvimento do Processo Haber-Bosch. Devido às características químicas do nitrogênio, que o permitem assumir número de oxidação entre -3 e +5, e, conseqüentemente, formar diferentes compostos participando de diferentes classes de reação, a forma reativa do elemento possui a capacidade

de transitar facilmente pelo meio ao longo do tempo, como mostrado na Figura 7 (ROCHA e CARDOSO, 2021).

Figura 7. Cascata de N: efeitos de um átomo de N_r no tempo e espaço.



Fonte: Retirado de (ERISMAN, SUTTON, *et al.*, 2008; ROCHA e CARDOSO, 2021).

Segundo o relatório *Frontiers* (ENVIRONMENT, U. N., 2019), os humanos estão criando um *cocktail*, uma combinação, de nitrogênio reativo, ameaçando a saúde, clima e ecossistemas, o tornando um dos poluentes mais danosos à humanidade. As formas reativas que o nitrogênio apresenta são NH_3 , NO_3^- e óxido nitroso.

A amônia é encontrada em estrumes, mistura composta do dejetos de animais, urina e fertilizantes e, por ser base de aminoácidos, proteínas e enzimas, se tornam fundamental para os seres vivos, mas em alta concentração causa a proliferação de algas nos corpos de água, resultando na eutrofização, e forma material particulado no ar. O nitrato, que está presente nas águas residuais e de escoamento das plantações, é de extrema importância no uso de fertilizantes e, além disso, pode ser usado para fabricação de explosivos. Entretanto, sua

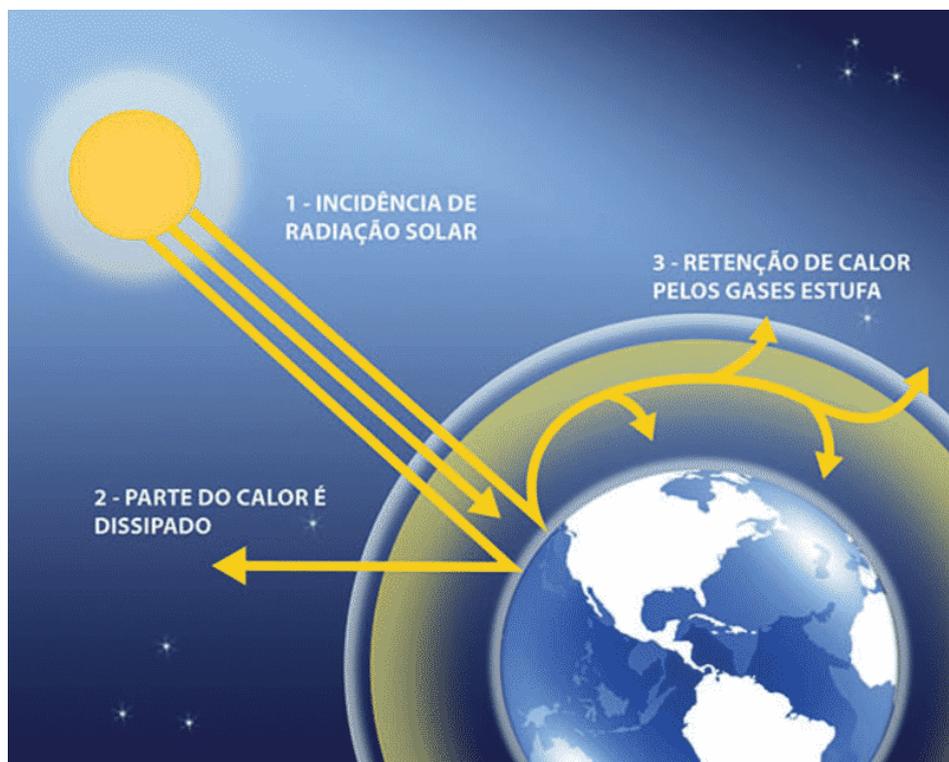
presença em grande quantidade contaminam os lençóis freáticos, causando a eutrofização. O óxido nitroso tem como fonte a agricultura/fertilizantes, indústrias e as combustões, possui grande participação em procedimentos médicos e odontológicos, agindo como anestésico nos tratamentos, e é combustível para foguetes. Porém, o gás é 300 vezes mais potente que o CO₂ para causar o aumento do efeito estufa, destruindo a camada de ozônio (DA SILVA, 2019).

3.1. Mudanças Climáticas e Atmosfera

3.1.1. Efeito estufa e aquecimento global

A presença dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera é responsável por deixar a temperatura da Terra 30 °C mais quente em comparação com a inexistência deles. O vapor d'água, o dióxido de carbono (CO₂), o ozônio (O₃), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são os principais gases naturais do efeito estufa (SEINFELD e PANDIS, 2016). A radiação solar penetra na atmosfera aquecendo a superfície terrestre, onde uma parte é absorvida pela superfície e pelos oceanos, e a outra é refletida de volta para o espaço, o que foi absorvido é liberado para a atmosfera como radiação térmica, infravermelha, a Figura 8 traz o esquema do balanço energético global (XAVIER e KERR, 2013).

Figura 8. Balanço energético global.



Fonte: Retirado de (APROBIO,2019).

Os GEE absorvem a radiação térmica e a emite para a superfície, esse processo mantém o planeta aquecido, porém, atividades antropogênicas intensificam a concentração desses gases na atmosfera, conseqüentemente, intensificam o efeito estufa que leva ao aquecimento global. Na conferência das nações unidas sobre as mudanças climáticas, COP21, fora acordado por 195 países, incluindo o Brasil, o “Acordo de Paris”, que visa a redução dos GEE emitidos, mantendo o aumento da temperatura média global menor que 1,5°C (TRINDADE, 2019), mas estudos indicam que as emissões crescentes de N₂O estão afetando a meta estabelecida pelo acordo e a temperatura da Terra poderá subir 3°C nesse século (TIAN, XU, *et al.*, 2020). O elevado potencial de aquecimento do óxido nitroso é devido a interação que pode ocorrer entre o gás e a radiação infravermelha.

A agricultura é responsável por 66% da emissão de N₂O, mas esse percentual não considera somente a aplicação de fertilizantes ou ao manejo agrícola para aumento de produtividade, considera também o processo produtivo dos fertilizantes. Nas indústrias, a maior parcela de emissão do óxido nitroso é a produção de HNO₃, que está envolvido diretamente na produção dos fertilizantes, cerca de 80% do que é produzido é destinado às produções dos nitrogenados (SANFORD, WAGNER, *et al.*, 2012; SIGNOR, CERRI e D. E. O. N., 2011). Mesmo que seja necessário a redução da emissão de GEE, a necessidade de maiores produções agrícolas, devido ao crescimento populacional no mundo, resulta na utilização cada vez mais crescente de fertilizantes, participando ativamente nas mudanças climáticas e nos desastres que resultam delas (REAY, DAVIDSON, *et al.*, 2012).

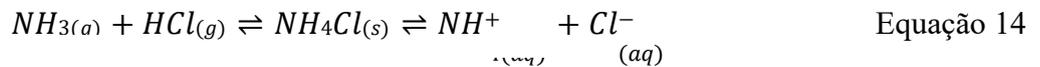
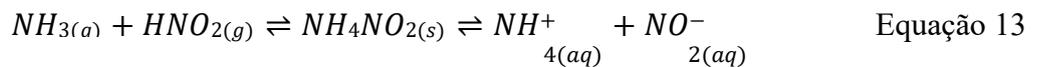
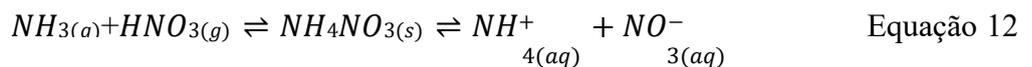
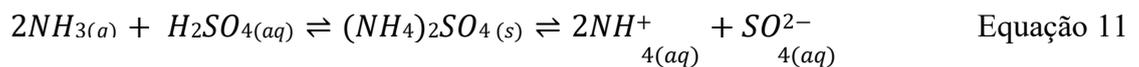
Embora o N₂O seja considerado um N_r, a reatividade do gás é baixa não sofrendo transformações quando está na troposfera, aumentando o acúmulo na atmosfera e residindo por 114 anos. Por apresentar alta estabilidade, ele alcança a estratosfera, participando de reações que o transforma em NO_x estratosférico, que é capaz de aumentar a velocidade, como um catalisador, da degradação do ozônio, danificando a camada e aumentando a passagem de raios UV para a superfície da Terra, sendo prejudiciais à saúde, agricultura e vida marinha (ROCHA e CARDOSO, 2021).

3.1.2. Formação e emissão de aerossóis.

As emissões de amônia causadas por atividades humanas configuram 36% do total de nitrogênio emitido, ao longo do ano, sendo a volatilização de NH₃ dos fertilizantes nitrogenados a maior responsável pela alta porcentagem da emissão (KRUPA, 2003). Por possuir caráter básico, o gás consegue neutralizar a acidez causadas pelos gases e partículas ácidos encontrados

na atmosfera, sendo o principal agente químico no processo de nucleação de partículas (KULMALA, VEHKAMÄKI, *et al.*, 2004). Segundo KIRKBY, CURTIUS *et al.*, estudos feitos sugeriram que 100 ppt de amônia consegue aumentar a nucleação das partículas de ácido sulfúrico (H₂SO₄) de 100 a 1000 vezes (KIRKBY, CURTIUS, *et al.*, 2011).

Para que haja a formação dessas partículas por meio da reação com H₂SO₄, o gás deve estar adsorvido em partículas aquosas, pois, na atmosfera possui quantidades baixas do ácido gasoso. Entretanto, com os ácidos voláteis, como HNO₃, ácido nitroso (HNO₂) e clorídrico (HCl), as reações podem ocorrer direto com os gases ou adsorvidos em compostos aquosos. As reações com os gases ácidos geram sais que formarão os aerossóis atmosféricos, as Equações 11-14 trazem as reações dessas transformações químicas, considera-se partículas de aerossóis como agregados de compostos, sais sólidos, que estão em equilíbrio químico com íons dissolvidos (KULMALA, VEHKAMÄKI, *et al.*, 2004).



O material particulado tem a capacidade de diminuir a quantidade de radiação solar que atinge a superfície do planeta, eles são capazes de absorver ou espalhar essa radiação. Quando espalham, resfriam o clima, porém, ao absorver aquecem a atmosfera, por perturbar o balanço energético global, efeito denominado de forçante térmica (KRUPA, 2003).

Mudanças climáticas vêm sendo associadas à poluição do ar por partículas, como a intensidade de chuvas em alguns países, influenciando também nas trajetórias das monções e secas (BEHERA, SHARMA, *et al.*, 2013). Além disso, a ocorrência de materiais particulados em alta concentração diminui a visibilidade (FELIX e CARDOSO, 2004), como ocorreu na cidade de São Paulo em 2019, que as 16 horas o céu escureceu, mostrado na Figura 9, tal escuridão foi causada pelo acúmulo de aerossóis e partículas geradas pela poluição.

Figura 9. Céu escuro na cidade de São Paulo às 16 horas.



Fonte: Retirado de (CORREIO BRAZILIENSE ACERVO, 2019).

3.2. Poluição da Água

3.2.1. Poluição da água doce

A superfície da terra é coberta por 75% de água, essa que é essencial para a vida de todas as espécies, à indústria e agricultura, entretanto, apenas 3% são de água doce e os outros 97%, os oceanos, que possuem águas salgadas impróprias para consumo. Do percentual de água doce, apenas 1% se encontra na superfície em estado líquido, como os rios, lagos e córregos, as geleiras representam 77% e as águas subterrâneas, 22% (BECKER, 2008).

Contudo, as atividades antrópicas causam cada vez mais danos à poluição das águas doces, devido aos constantes desmatamentos, resíduos de fertilizantes oriundos das atividades agrícolas, despejo de esgoto, entre outros. Os corpos de águas doces superficiais sofrem impactos resultantes das deposições do nitrogênio. A concentração do nitrogênio nessas águas são altas, principalmente nas formas de NH_3 e NO_3^- , como consequência do escoamento de água das plantações, esgotos sem tratamento e águas das estações de tratamento de esgoto. Além disso, as contaminações advindas do nitrogênio provocam o processo de eutrofização dos corpos (CABRAL, 2007).

A eutrofização é um fenômeno que ocorre nas águas, principalmente em rios, lagos e lagoas, devido ao aumento dos nutrientes combinado com luminosidade que resultam no crescimento desenfreado de algas e outras plantas, provocando complicações ao serem consumidas e problemas nos abastecimentos de água. A eutrofização é um processo que pode

ocorrer de forma natural, aumentando o nível em longos espaços de tempo, porém, se acontece de forma rápida, em um curto espaço de tempo, é devido a atividades humanas (BARRETO, BARROS, *et al.*, 2013).

O crescimento desenfreado das algas resulta numa cortina verde na superfície da água, como visto na Figura 10, que impede a passagem de luz para a partes mais fundas daquele corpo.

Figura 10. Processo de eutrofização em corpo de água.



Fonte: Retirado de (DE SOUZA, 2019).

A camada escura superficial promove a falta de oxigênio, por não haver a passagem de luz, não permitindo que as plantas do fundo consigam fazer fotossíntese, tornando o nível de O_2 mais baixo, resultando na morte de bactérias aeróbicas e espécies aquáticas, a Figura 11 traz exemplo de um corpo eutrofizado resultando na mortandade de peixes.

Figura 11. Mortandade de peixes de corpo de água eutrofizado.



Fonte: Retirado de (GEOKRATOS, 2023).

A gestão da eutrofização é desafiada pela abundância de fontes de poluição de nitrogênio, e mesmo que haja um controle eficiente do problema algumas fontes de N não podem ser controladas, como o fato de algumas algas conseguirem fixar nitrogênio por si próprias. A amônia e o nitrato são cruciais para o fenômeno por serem fontes de nutrientes para as plantas e algas, causando a proliferação delas (POHLING, 2009).

3.2.2. Lixiviação do nitrato e as águas subterrâneas

A água presente nos lençóis freáticos é responsável por 96% de toda a água potável para o consumo humano no mundo. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as águas subterrâneas abastecem mais de 50% dos distritos brasileiros, podendo ser usadas para a agricultura, indústrias e para consumo (IBGE, 2000). Outrossim, um estudo feito pela Agência Nacional de Água (ANA), em 2019, mostrou que essa água abastece 52% dos 5.570 municípios brasileiros (FREITAS, BRILHANTE e ALMEIDA, 2001). Podendo ser encontrada abaixo da superfície terrestre, a água subterrânea ocupa os espaços vazios entre o solo, rochas e fissuras e a existência dela se deve à formação geológica. As rochas que permitem que ela seja armazenada e que haja a sua circulação são denominadas de aquíferos. Além disso, elas podem ser extraídas com as perfurações de poços (FERREIRA, LIMA, *et al.*, 2007).

Entretanto, o meio líquido possui alta capacidade de dissolução e de transporte de substâncias. Com isso, a água dissolve compostos com facilidade os quais concedem diferentes características a ela. Essas partículas são lixiviadas pelos cursos da água, mudando frequentemente a posição na qual existem sólidos dissolvidos (SVS, 2006).

Sendo fundamental em todas as atividades metabólicas do organismo humano, a qualidade da água necessita apresentar um padrão mínimo. O Ministério da Saúde é o órgão responsável por garantir esse padrão da água potável no Brasil (ANA, 2011). Entretanto, a contaminação do aquífero pela presença de compostos de nitrogênio tem se tornado cada vez mais aparente. O composto pode ser encontrado de diferentes formas nos corpos hídricos, como nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. Além disso, é possível estabelecer se a contaminação é recente ou antiga. A contaminação será recente se houver uma maior concentração na forma reduzida, nitrogênio orgânico e amoniacal, caso haja uma maior concentração na forma oxidada, nitrato e nitrito, a contaminação será classificada como antiga (ALABURDA e NISHIHARA, 1998).

Um dos principais meios de contaminação por nitrato é resultado das atividades agrícolas, principalmente, o uso de fertilizantes nitrogenados. Análises feitas em poços particulares e de abastecimento público indicam aumento crescente na concentração do nutriente, consequência do uso contínuo da aplicação dos nitrogenados (HALLER, 2003). A Figura 12 traz um esquema simples mostrando a aplicação dos fertilizantes, a lixiviação de N e o poço de abastecimento da casa coletando a água subterrânea.

Figura 12. Esquema de aplicação de fertilizante e coleta de água de poço.



Fonte: Retirado de (CERH, 2019).

Segundo recomendações das agências vigilantes de água mundiais, o valor estabelecido máximo da concentração de N-NO_3^- nas águas de consumo é de 10 mg L^{-1} . Estudos ao redor do mundo foram desenvolvidos para rastrear a quantidade de nitrato presentes nas águas que estão nos aquíferos retirados por poços artesianos para consumo, no Canadá e Estados Unidos o resultado obtido foi de que 5 a 45% dos poços das áreas rurais revelam concentrações acima do recomendado (WASSENAAR, HENDRY e HARRINGTON, 2006). Na Europa, observou-se que em 14,4% de 33 mil poços presentes na União Europeia apresentaram concentrações acima de $11,3 \text{ mg L}^{-1}$ (CEE, 1991). No território chinês, maiores consumidores de fertilizantes derivado do nitrogênio do mundo, mostrou que mais de 57% dos poços estão fora do padrão de potabilidade (CHEN, WU, *et al.*, 2017). No Brasil, não existem pesquisas abrangentes e sistematizadas sobre os efeitos da contaminação por nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais.

A contaminação de nitrato nas águas consumidas mundialmente resulta em problemas que afetam a saúde da população e dos animais, como o possível surgimento de cânceres

gástricos e linfáticos, o nitrato ao reagir com amina e amida do corpo podem formar substâncias carcinogênicas. Os animais podem desenvolver intoxicações, diminuindo a produtividade e reprodutividade, perda de peso e abortos, as espécies ruminantes são as mais afetadas. Outro problema que afeta, majoritariamente, os bebês é a metehemoglobinemia, síndrome do bebê azul, devido a concentração de metehemoglobina no sangue que causam dificuldade respiratória, cianose, desmaios e pode levar ao óbito. A hemoglobina, responsável pelo transporte de O₂, se combina com nitrito, resultante da redução do nitrato consumido, formando a metehemoglobina que não é capaz de transportar oxigênio para órgãos vitais (WHO, 2002)

3.3. Perda de Biodiversidade

A deposição de nitrogênio reativo produzida pela combustão de combustíveis fósseis e pela agricultura intensiva é uma das principais causas da ameaça à biodiversidade, assunto frequentemente negligenciado pelas políticas públicas e pela sociedade. Tendo em vista que ecossistemas foram criados e evoluíram com uma limitação na presença de nitrogênio, o seu aumento a longo prazo, mesmo que em pequena quantidade, pode acarretar eutrofização e acidificação. Podendo levar à grandes consequências negativas para o ecossistema e à biodiversidade (ABER, MCDOWELL, *et al.*, 1998).

Sabendo disso, estudos e experimentos de campo e laboratório mostraram que a deposição de nitrogênio em grande quantidade, a longo prazo, está relacionada à redução da biodiversidade vegetal de diversos ecossistemas naturais (DUPRÈ, STEVENS, *et al.*, 2010; DISE, ASHMORE, *et al.*, 2011). O excesso de nitrogênio prejudica as plantas devido a sua toxicidade direta, acidificação do solo, desequilíbrios de nutrientes e competição interespecífica (DISE, ASHMORE, *et al.*, 2011; ABER, MCDOWELL, *et al.*, 1998). A Tabela 2 traz os valores de perda de biodiversidade em relação a tempo, população e espaço usado para atividades antrópicas.

Tabela 2. Perda de biodiversidade ao longo dos séculos.

SÉCULO	POPULAÇÃO (BILHÃO)	ÁREA TERRESTRE UTILIZADA PARA ATIVIDADES HUMANAS (%)	PERDA DE ESPÉCIES NOS ECOSSISTEMAS (%)
18	0,9	7,6	1,8
19	1,7	16,9	4,9
20	6,1	39,3	13,6
21	8,1	75	31

Fonte: Retirado de (IBERDROLA, 2021).

Em um estudo feito por PAYNE, DISE, et al. intitulado “Nitrogen deposition and plant biodiversity: past, present, and future”, no qual é feito um levantamento da deposição de nitrogênio e seu efeito na biodiversidade com aspectos do passado, presente e futuro. Os autores propuseram a análise de três cenários que conseguem abranger uma gama de possíveis alternativas e desfechos que são sugeridos na literatura. No cenário de número 1, o aumento na deposição de nitrogênio produzirá uma perda instantânea à respeito de riquezas de espécies e, se reduzida essa deposição, haverá uma recuperação também instantânea. No cenário 2, aumentos e reduções de nitrogênio resultarão em um atraso de respostas. Por fim, no cenário 3, os efeitos de deposição do nitrogênio possuem resultados irreversíveis. No estudo, os autores concluem que os efeitos da deposição de nitrogênio sobre a biodiversidade são severos e dificilmente reversíveis (PAYNE, DISE, *et al.*, 2017).

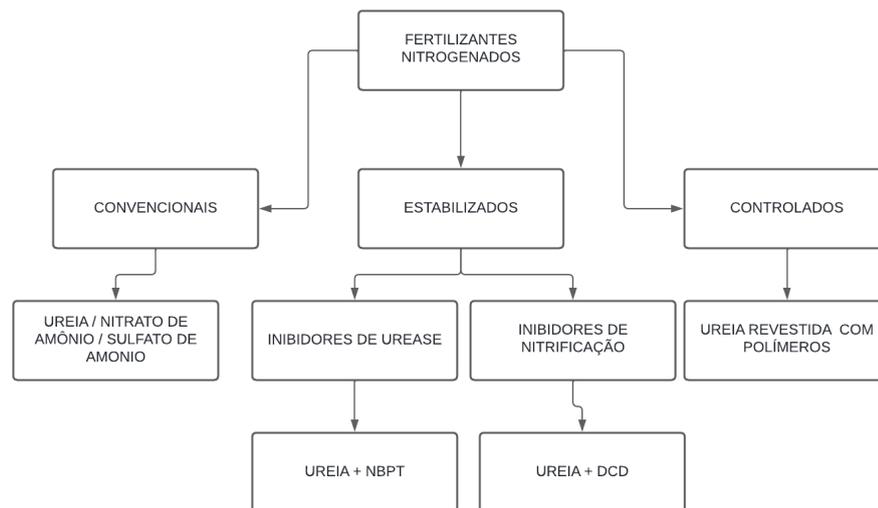
4 MÉTODOS PARA INIBIÇÃO DE UREASE E NITRIFICAÇÃO

Como visto ao longo deste trabalho, a ureia é a fonte nitrogenada mais utilizada no mundo por apresentar alta concentração de nitrogênio e seu custo ser baixo, entretanto, as perdas por volatilização de amônia pela atividade da enzima urease e por nitrificação são extremamente significativas, podendo chegar a 50% do que foi aplicado nas plantações (CANTARELLA, TRIVELIN, *et al.*, 2008; TRIVELIN, OLIVEIRA, *et al.*, 2002). Além dos prejuízos ambientais, essas perdas representam, também, prejuízos econômicos para os agricultores gerando, conseqüentemente, interesses em tecnologias que possam minimizar prejuízos financeiros (ZAMAN e BLENNERHASSETT, 2010).

Devido ao interesse ambiental e, principalmente, econômico, hoje existem fertilizantes nitrogenados com eficiência aumentada, classificados em categorias: estabilizados, liberação lenta e controlados, o presente trabalho focará nos estabilizados e controlados, como exibido

no fluxograma na Figura 13. A classe dos estabilizados são os fertilizantes tratados com aditivos que estabilizam o nitrogênio, inibindo a urease e a nitrificação. Os grânulos dos controlados são revestidos por uma barreira física que diminui a solubilidade deles em água, controlando a difusão do nitrogênio, um exemplo de revestimento é por polímeros (GUELF, 2017).

Figura 13. Fluxograma dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada.



Fonte: A autora baseada em (GUELF, 2017)

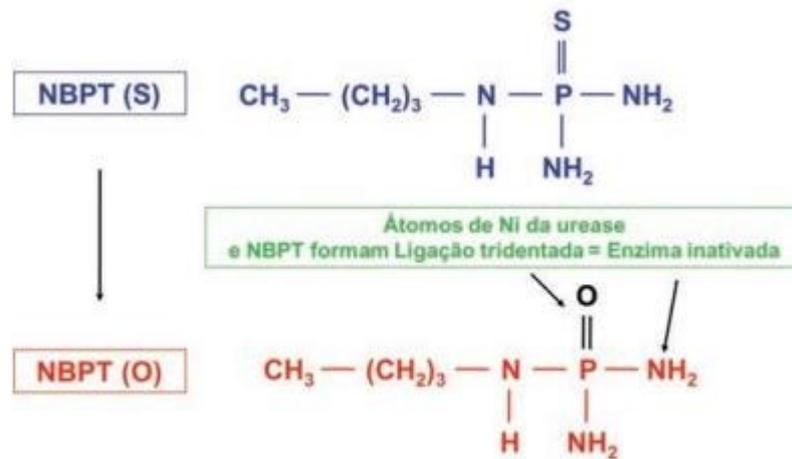
O uso de compostos químicos associados a ureia vem obtendo resultados satisfatórios na inibição da volatilização de NH_3 , como a molécula de N-(n-butil) tiofosfóricotriamida (NBPT) que reduz a velocidade da hidrólise inibindo a enzima urease, retardando o pico de volatilização do fertilizante (SANZ-COBENA, MISSELBROOK, *et al.*, 2008). Outra molécula é a dicianodiamida (DCD), que inibe a nitrificação reduzindo a perda de nitrogênio por manter a forma NH_4^+ , que não é tão lixiviável quanto o nitrato (TRENKEL, 2021). A aplicação conjunta de inibidores de urease e nitrificação, juntamente com irrigação, em áreas com clima quente ajuda a minimizar as perdas de nitrogênio do solo.

4.1. Inibição de urease: Uso de NBPT

A estabilização do nitrogênio por meio da adição de aditivos químicos possui baixo custo por conseguir aumentar a produtividade ao manter o nutriente disponível por mais tempo as plantas, 10 a 30% maior que a ureia convencional que pode atingir R\$ 2530 por tonelada, e apresenta ótimos resultados no aumento da eficiência dos fertilizantes (TRENKEL, 2021). O NBPT é eficaz pela sua composição, que pode ter ligações $\text{P}=\text{O}$ ou $\text{P}=\text{S}$ ligada a uma amida livre que reage com a urease (DOMÍNGUEZ, SANMARTÍN, *et al.*, 2008). Como mostrada na

Figura 14, o NBPT deve se converter em NBPT(O) para que o oxigênio e amina livre se liguem nos sítios ativos da enzima urease, inibindo a sua atividade.

Figura 14. Estrutura NBPT (S) e (O).



Fonte: (GUELFY, 2017)

A molécula de NBPT é solubilizada por solventes que aumentam sua estabilidade (WATSON, AKHONZADA, *et al.*, 2008), e há adição de cores à mistura para colorir as ureias devido a motivos comerciais, como mostrado na Figura 15, a ureia convencional branca é tratada com aditivo de base NBPT amarelo.

Figura 15. Ureia convencional branca e tratada com aditivo NBPT amarelo.



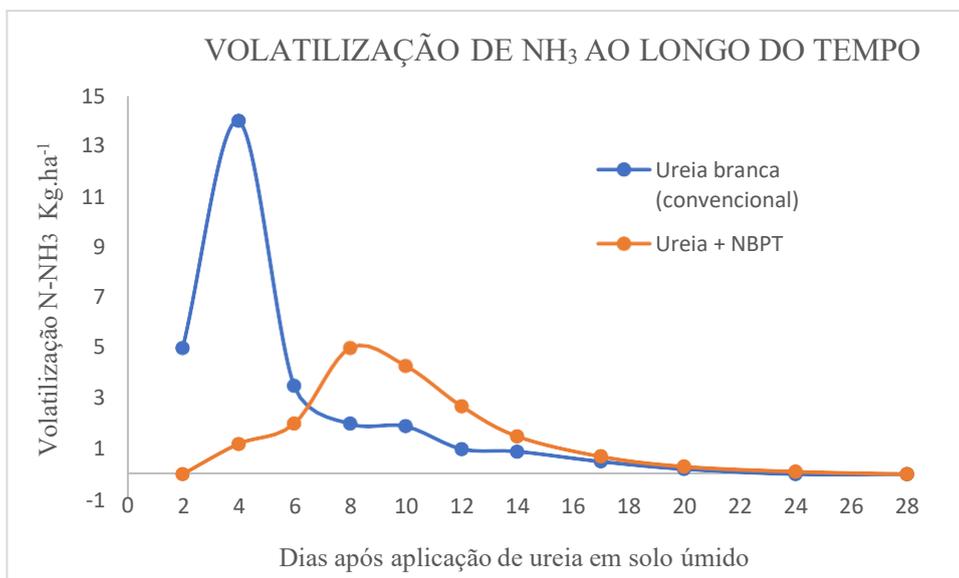
Fonte: A autora.

Ao ser estabilizada com a molécula, reduz as perdas de nitrogênio por atrasar o pico de volatilização e, conseqüentemente, aumenta a produtividade e qualidade de culturas por aumentar a absorção do nitrogênio nos solos (WATSON, AKHONZADA, *et al.*, 2008). Entretanto, para a adubação com Ureia + NBPT deve-se levar em consideração as características do solo e do local, como pH, temperatura, umidade relativa, entre outros. Chuvas

aumentam a eficiência do NPBT, já acidez e altas temperaturas prejudicam a funcionalidade da molécula, por promover sua degradabilidade (ENGEL, JONES e WALLANDER, 2011).

Em estudo realizado por FONSECA (2022), observou-se que a maior perda de amônia é vista na ureia sem tratamento, obtendo o pico nos primeiros 4 dias responsáveis por 70% de toda a volatilização, resultado advindo da rápida hidrólise do fertilizante convencional, que aumenta o pH e favorece a perda. A ureia tratada com NBPT teve seu pico entre o sexto e oitavo dia, mas com magnitude reduzida e obtendo o resultado esperado por atrasar a ação da urease e da hidrólise, mesmo que após o sexto dia as taxas de perdas tenham se invertido entre a ureia sem e com tratamento, o comportamento da volatilização é visto na Figura 16.

Figura 16. Volatilização de N-NH₃ ao longo do tempo. Comparando a ureia comum x tratada com NBPT.



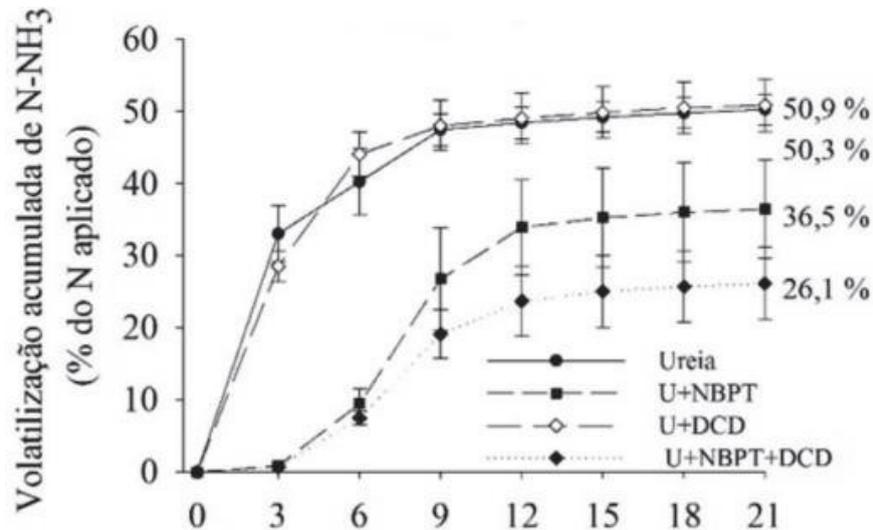
Fonte: A autora baseada em (FONSECA, 2022)

4.2. Inibição de nitrificação: Uso de DCD

A inibição de nitrificação se dá por químicos adicionados aos fertilizantes que tem o poder de atrasar a oxidação do íon amônio para nitrato, inibindo a atividade das bactérias responsáveis pela nitrosação, o DCD tem potencial de inibir cerca de 53% mesmo após 14 dias de aplicação dos nitrogenados (ABALOS, JEFFERY, *et al.*, 2014). Todavia, ao manter o nitrogênio como amônio aumenta a probabilidade de volatilização, principalmente se o meio estiver favorável a ela (TRENKEL, 2021). Em estudo de SILVA (2016), um cultivo tratado com ureia e inibidor de nitrificação obteve mais perda de NH₃ do que a ureia convencional, com porcentagens de perda do aplicado de 52,2 e 39,4%, respectivamente. Entretanto, em

estudo feito por (SILVA, PEGORARO, *et al.*, 2017), mostrou que ao combinar os tratamentos de NBPT, inibidor de urease, e DCD, inibidor de nitrificação, obtêm-se valores de volatilização inferiores a ureia tratada apenas com NBPT, exibido na Figura 17.

Figura 17. Perdas acumuladas de NH_3 durante 21 dias após tratamento com inibidores de urease e nitrificação.



Fonte: Retirado de (SILVA, PEGORARO, *et al.*, 2017).

Os inibidores de nitrificação diminuem o impacto da lixiviação de nitrato e emissões de óxido nitroso, relatou-se redução de até 96% na emissão de N_2O com a utilização dessas moléculas, sendo um dado de extrema importância para o meio ambiente (SNYDER, BRUULSEMA e JENSEN, 2007).

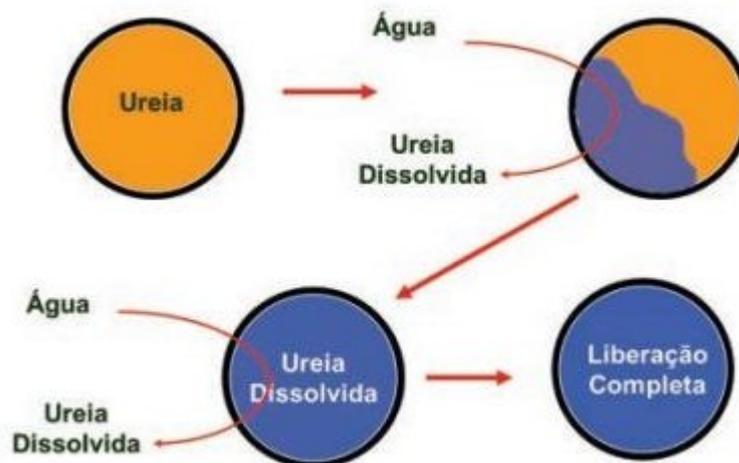
4.3. Fertilizantes de liberação controlada: Revestimento polimérico

A ureia convencional é recoberta para que a solubilização em água e a liberação dos nutrientes sejam controladas, o seu custo pode chegar a 10 vezes mais que do nitrogenado convencional. Os fertilizantes de liberação controlada devem seguir alguns requisitos para que sejam denominados dessa forma, não perder mais de 15% de N nas primeiras 24 horas e em 28 dias não se deve liberar mais de 75% do total de N aplicado (TRENKEL, 2021). Existem três tipos de revestimentos que se pode utilizar para recobrir a ureia, enxofre elementar (S), enxofre combinado com polímeros e apenas polímeros, o trabalho irá focar apenas no último recobrimento por apresentar a mais avançada tecnologia, entre as ureias estabilizadas e de liberação controlada (TIMILSENA, ADHIKARI, *et al.*, 2015).

Os polímeros podem ser divididos em duas classes, naturais e sintéticos, sendo os naturais compostos de amido, alginas e borrachas, e os sintéticos, poliuretano, poliacrilamida, entre outros. Ambos podem ser usados para revestir a ureia, sendo os sintéticos aqueles com a maior eficiência na liberação controlada, entretanto, pode levar a poluição por acumular no solo, assim, deve-se optar por materiais que não intoxicam o meio e seja biodegradável, ou seja, os polímeros naturais. Os polímeros são dissolvidos em solventes e aplicados na ureia por meio de tambor rotativo ou *spray dryer* (NAZ e SULAIMAN, 2016).

A liberação dos nutrientes da ureia ocorre por difusão, o vapor d'água adentra no grão, observado na Figura 18, e sofre o processo de condensação começando a solubilizá-lo, que gera um aumento de pressão no revestimento, podendo ocorrer o rompimento e liberação imediata ou a resistência do recobrimento, que irá liberar os nutrientes de forma controlada. A espessura do recobrimento é essencial para o controle da liberação, segundo GUELFY (2017), uma ureia recoberta com 67 micrometros de revestimento, em 63 dias, liberou 80% do nitrogênio, já com uma espessura de 99 micrometros, 60% nos mesmos 63 dias.

Figura 18. Liberação controlada da ureia revestida.



Fonte: Retirado de (GUELFY, 2017; TIMILSENA, ADHIKARI, *et al.*, 2015).

Ao ocorrer a liberação dos nutrientes de forma mais controlada, diminui a quantidade de ureia que se utiliza ao longo das adubações de cultura, minimizando os impactos ambientais que são causados pelos fertilizante nitrogenados em excesso.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade do uso de fertilizantes aumenta constantemente devido ao crescimento das produções de alimentos necessárias para suprir a demanda populacional, conseqüentemente, utiliza-se fertilizantes nitrogenados, que são fundamentais para culturas ricas e produtivas. Entretanto, o uso dos nitrogenados em grandes quantidades provocam impactos ao meio ambiente, como alterações climáticas e atmosféricas, poluição das águas próprias para consumo e perdas de biodiversidade, que afetam a saúde humana.

As perdas de nitrogênio ao aplicar fertilizantes no solo, por meio da volatilização e da lixiviação, podem resultar em mais de 70%, essa alta porcentagem causa tanto prejuízos ambientais quanto prejuízos financeiros aos agricultores. Logo, tecnologias estão sempre em desenvolvimento por se tratar de um mercado muito rentável tanto para empresas de aditivos quanto para os agricultores que visam minimizar o gasto com fertilizantes. As soluções mais eficazes são a utilização de fertilizantes de eficiência aumentada, que reduzem a volatilização, nitrificação e lixiviação, e aumentam o tempo de residência dos nitrogenados no solo, reduzindo a quantidade de fertilizantes adicionados ao longo das produções.

REFERÊNCIAS

- ABALOS, D. et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 189, p. 136–144, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>
- ABER, J. et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited. *BioScience*, v. 48, p. 921–934, 1998. <https://doi.org/10.2307/1313296>
- AGROBIO. Você sabe o que é o Efeito Estufa?. agrobio, 2019. Disponível em: <AGROBIO - Você sabe o que é o Efeito Estufa?>. Acesso em: 07 abril 2024.
- AGROPÓS. O que é fertilidade do solo? Aumente sua produtividade! agropos, 2022. Disponível em: <<https://agropos.com.br/2020/01/o-que-e-fertilidade-do-solo/>>. Acesso em: 12 março 2024.
- ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. *Revista de Saúde Pública*, v. 32, p. 160–165, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0034-89101998000200009>
- ANA. Guia Nacional De Coleta E Preservação De Amostras. Agência Nacional das Águas. Brasília, p. 327. 2011.
- ANDRADE, E. M. D. et al. Impacto da lixiviação de nitrato e cloreto no lençol freático sob condições de cultivo irrigado. *Ciência Rural*, v. 39, p. 88–95, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100014>
- APEXBRASIL. Reforço na exportação de proteínas animais. apexbrasil, 2023. Disponível em: <<https://apexbrasil.com.br/br/pt/conteudo/noticias/reforco-na-exportacao-de-proteinas-animais.html>>. Acesso em: 11 março 2024.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. D.; BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. *Ciência Rural*, v. 31, p. 715–722, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000400027>
- BARRETO, C. F. et al. Sintomas Visuais de Deficiência Nutricional em Morangueiro. EMBRAPA. Pelotas, p. 21. 2018.
- BARRETO, L. et al. Eutrofização em rios brasileiros. *Enciclopédia biosfera*, v. 9, 2013.
- BECKER, H. Controle analítico de águas. Fortaleza–CE, Versão, v. 4, p. 46, 2008.

BEHERA, S. N. et al. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, p. 8092–8131, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>

BENDER, R. R. et al. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. *Agronomy Journal*, v. 105, p. 161–170, 2013. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0352>

BOSCHIERO, B. N. 6 maiores produtores de soja do mundo: quando e quanto produzem? *agroadvance*, 2023. Disponível em: <[https://agroadvance.com.br/blog-6-maiores-produtores-de-soja-do-mundo/#:~:text=O Brasil lidera o ranking dos maiores produtores mundiais de,deverão ser exportados em 2023.>](https://agroadvance.com.br/blog-6-maiores-produtores-de-soja-do-mundo/#:~:text=O%20Brasil%20lidera%20o%20ranking%20dos%20maiores%20produtores%20mundiais%20de,%dever%C3%A3o%20ser%20exportados%20em%202023.>). Acesso em: 11 março 2024.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, v. 30, p. 365–372, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000200029>

CABRAL, N. M. T. Teores de nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺) nas águas do aquífero Barreiras nos bairros do Reduto, Nazaré e Umarizal-Belém/PA. *Química Nova*, v. 30, p. 1804–1808, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000800003>

CAIXETA, K. F.; FELIX, A. C. A.; DE ASSIS CHAVIER, F. Perda de nutrientes por lixiviação em Latossolo cultivado com diferentes híbridos de meloeiro sob ambiente protegido, 2015.

CANTARELLA, H. et al. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Scientia agrícola*, v. 65, p. 397–401, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000400011>

CEE. Directiva 91/676. eur-lex.europa.eu, December 1991. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:31991L0676>>. Acesso em: 18 março 2024.

CERH. NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DESAFIOS FRENTE AO PANORAMA ATUAL. Conselho Estadual de Recursos Hídricos Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. São Paulo, p. 128. 2019.

CHAGAS, A. P. A síntese da amônia: alguns aspectos históricos. *Química nova*, v. 30, p. 240–247, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100039>

CHEN, J. et al. Assessing nitrate and fluoride contaminants in drinking water and their health risk of rural residents living in a semiarid region of Northwest China. *Exposure and Health*, v. 9, p. 183–195, 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-016-0231-9>

CORREIO BRAZILIENSE ACERVO. Dia vira noite em São Paulo devido a poluição e queimadas; veja fotos. *correiobraziliense*, 2019. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2019/08/19/interna-brasil,778049/dia-vira-noite-em-sao-paulo-devido-a-poluicao-e-queimadas-veja-fotos.shtml>>. Acesso em: 18 março 2024.

DA SILVA, F. P. Os dois lados da moeda do nitrogênio demanda melhores práticas de gestão. *unep.org*, May 2019. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/os-dois-lados-da-moeda-do-nitrogenio-demanda-melhores-praticas-de>>. Acesso em: 16 março 2024.

DA SILVA, K. Fixação de nitrogênio e aumento da fertilidade do solo. *revistacampoenegocios*, November 2019. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/fixacao-de-nitrogenio-e-aumento-da-fertilidade-do-solo/>>. Acesso em: 17 março 2024.

DE SOUZA, J. S. Eutrofização. *infoescola*, 2019. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/ecologia/eutrofizacao/>>. Acesso em: 18 março 2024.

DISE, N. B. et al. Nitrogen as a threat to European terrestrial biodiversity. *The European Nitrogen Assessment Sources, effects and policy perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge. Dómelas, M., Gotelli, NJ, McGill, B., Shimadzu, H., Moyes, F., Sievers, C. & Magurran, A.(2014) Assemblage time series reveal biodiversity change but not systematic loss. *Science*, v. 344, p. 296–299, 2011.

DOMÍNGUEZ, M. J. et al. Design, synthesis, and biological evaluation of phosphoramidate derivatives as urease inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 56, p. 3721–3731, 2008. <https://doi.org/10.1021/jf072901y>

DUPRÈ, C. et al. Changes in species richness and composition in European acidic grasslands over the past 70 years: the contribution of cumulative atmospheric nitrogen deposition. *Global Change Biology*, v. 16, p. 344–357, 2010. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01982.x>

ENGEL, R.; JONES, C.; WALLANDER, R. Ammonia volatilization from urea and mitigation by NBPT following surface application to cold soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 75, p. 2348–2357, 2011. <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0229>

ENVIRONMENT, U. N. *Frontiers* 2018/19: Emerging Issues of Environmental Concern. unep., March 2019. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/frontiers-201819-emerging-issues-environmental-concern>>. Acesso em: 16 março 2024.

EQ. AGRONÔMICA. Fertilizantes nitrogenados: Conheça os benefícios. yarabrasil, 2022. Disponível em: <<https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/fertilizantes-nitrogenados/>>. Acesso em: 13 março 2024.

ERISMAN, J. W. et al. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature geoscience*, v. 1, p. 636–639, 2008. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo325>

ERISMAN, J. W. et al. Nitrogen: too much of a vital resource: Science Brief. [S.l.]: WWF Netherlands, 2015. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3664.8163>

ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Soil chemical characteristics and corn dry mass yield as affected by application methods of phosphate fertilizers, at two soil ph levels. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 939–946, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400017>

FACRE, W. R. Três formas de fertilizantes nitrogenados e o futuro. *Inf. Agron*, v. 120, p. 5–6, 2007.

FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Amônia (NH₃) atmosférica: fontes, transformação, sorvedouros e métodos de análise. *Química Nova*, v. 27, p. 123–130, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000100022>

FERNANDES, F. C. S. Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.) em cultivo sucessivo com aveia-preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2006. 197p. Tese de Doutorado. [S.l.]. 2006.

FERRARI, F. B. Opções de fertilizantes nitrogenados e suas características. *nutrimosaic*, 2022. Disponível em: <<https://nutrimosaic.com.br/fertilizantes-nitrogenados/>>. Acesso em: 14 março 2024.

FERREIRA, A. N. P. et al. Águas Subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido. Ministério do Meio Ambiente, Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, Petrobras, Brasília, DF, 2007.

FONSECA, A. VOLATIZAÇÃO DE AMÔNIA A PARTIR DE UREOA COMUM E TRATADA COM INIBIDORES DE UREASE, 2022.

FREITAS, M. B. D.; BRILHANTE, O. M.; ALMEIDA, L. M. D. Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 17, p. 651–660, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000300019>

GARCIA, G.; CARDOSO, A. A.; SANTOS, O. A. M. D. Da escassez ao estresse do planeta: um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. *Química Nova*, v. 36, p. 1468–1476, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000900032>

GEOKRATOS. Eutrofização. *geokratos*, 2023. Disponível em: <<https://www.geokratos.ggf.br/2023/08/eutrofizacao.html>>. Acesso em: 18 março 2024.

GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. Piracicaba: IPNI, 2017.

HALLER, L. Nitrate pollution of groundwater. <http://www.alphausystems.com/nitratinfo.html>, 2003.

IBERDROLA. Perda de biodiversidade: um risco para o meio ambiente e para a humanidade. *iberdrola*, 2021. Disponível em: <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/perda-de-biodiversidade>>. Acesso em: 19 março 2024.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. International Fertilizer Association. *fertilizer*, 2024. Disponível em: <<https://www.fertilizer.org/>>. Acesso em: 14 março 2024.

KIEHL, J. D. C. Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de uréia. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 13, p. 75–80, 1989. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200018>

KIRKBY, J. et al. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, v. 476, p. 429–433, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10343>

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; DA SILVA, P. P. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. *Revista virtual de química*, v. 7, p. 56–73, 2015. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150004>

- KRUPA, S. V. Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental pollution*, v. 124, p. 179–221, 2003. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(02)00434-7)
- KULMALA, M. et al. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *Journal of Aerosol Science*, v. 35, p. 143–176, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.10.003>
- LAZZARINI, P. Nitrogênio para as plantas: para que serve e quais as vantagens na adubação mineral? *nutricaodesafras*, May 2022. Disponível em: <<https://nutricaodesafras.com.br/nitrogenio-para-as-plantas>>. Acesso em: 13 março 2024.
- MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. [S.l.]: Agronômica Ceres, 2006.
- MAPA, M. D. A. E. P. Estatísticas do Setor. www.gov.br, May 2022. Disponível em: <[https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor#:text=O Brasil vem presenciando nos,registrado no ano de 2019.>](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor#:text=O%20Brasil%20vem%20presenciando%20nos,registrado%20no%20ano%20de%202019.>). Acesso em: 11 março 2024.
- MOTTA, A. C. V.; PAULETTI,. Importância dos fertilizantes para a agricultura brasileira. *agrarias.ufpr*, 2023. Disponível em: <<https://agrarias.ufpr.br/blog/noticias/importancia-dos-fertilizantes-para-a-agricultura-brasileira>>. Acesso em: 11 março 2024.
- NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of Controlled Release*, v. 225, p. 109–120, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.01.037>
- PAYNE, R. J. et al. Nitrogen deposition and plant biodiversity: past, present, and future. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 15, p. 431–436, 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/fee.1528>
- PLACIDO, H. F. Fertilizantes: Tipos, funções e como fazer seu manejo na lavoura, 2022. Disponível em: <<https://www.agrotecnico.com.br/fertilizantes/>>. Acesso em: 13 março 2024.
- POHLING, R. Reações químicas na análise de água. [S.l.]: Arte Visual, 2009.
- REAY, D. S. et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature climate change*, v. 2, p. 410–416, 2012. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1458>
- REETZ, H. F. Fertilizantes e o seu uso eficiente. São Paulo: ANDA, v. 178, 2017.

RITTMANN, B. E.; LANGELAND, W. E. Simultaneous denitrification with nitrification in single-channel oxidation ditches. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, p. 300–308, 1985. <https://www.jstor.org/stable/25042591>

ROCHA, C. G.; CARDOSO, A. A. Gases de nitrogênio reativo como precursores do aerossol atmosférico: reações de formação, processos de crescimento e implicações ambientais. *Química Nova*, v. 44, p. 460–472, 2021. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170692>

ROCHETTE, P. et al. Banding of urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. *Journal of Environmental Quality*, v. 38, p. 1383–1390, 2009. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0295>

SANFORD, R. A. et al. Unexpected nondenitrifier nitrous oxide reductase gene diversity and abundance in soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, p. 19709–19714, 2012. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211238109>

SANTOS, A. B. D. et al. Resposta do feijoeiro ao manejo de nitrogênio em várzeas tropicais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, p. 1265–1271, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003001100003>

SANZ-COBENA, A. et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 126, p. 243–249, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.02.001>

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P.; D. E. O. N., M. D. Emissões de N₂O de um latossolo após a aplicação de fertilizantes nitrogenados., 2011.

SILVA, A. L. Eficiência agrônômica da ureia estabilizada com inibidores de urease e nitrificação na cultura do milho. 2016. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras. [S.l.]. 2016.

SILVA, D. F. D. 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, p. 327–335, 2017. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764030014>

SNYDER, C. S.; BRUULSEMA, T. W.; JENSEN, T. L. Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.021>

SOUZA, L. A. D. Brasil Escola. Brasil Escola, 2024. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/obtencao-amonia-processo-haberbosch.htm>>. Acesso em: 10 Março 2024.

SVS. VIGILÂNCIA E CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO. Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília, p. 213. 2006.

TASCA, F. A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 493–502, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200018>

TIAN, H. et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, v. 586, p. 248–256, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, p. 1131–1142, 2015. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6812>

TRAMONTINI, ; VELHO, ; STELLA DE FREITAS,. Ciclo do nitrogênio e suas reações. *ilsabrazil*, 2020. Disponível em: <<https://ilsabrazil.com.br/ciclo-do-nitrogenio-e-suas-reacoes/#:text=O ciclo do nitrogênio permite,que serão descritas a seguir.>>. Acesso em: 15 março 2024.

TRENKEL, M. Slow-and controlled-release and Stabilized Fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. [S.l.]: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2021.

TRINDADE, C. S. D. O acordo de Paris e as emissões de gases: impactos sobre a produção de suínos no Brasil, 2019.

TRIVELIN, P. C. O. et al. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 193–201, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000200011>

VIEIRA, R. F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas., 2017.

WASSENAAR, L. I.; HENDRY, M. J.; HARRINGTON, N. Decadal geochemical and isotopic trends for nitrate in a transboundary aquifer and implications for agricultural beneficial management practices. *Environmental science & technology*, v. 40, p. 4626–4632, 2006. <http://dx.doi.org/10.1021/es060724w>

WATSON, C. J. et al. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use and Management*, v. 24, p. 246–253, 2008. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00157.x>

WHO. Guidelines for drinking-water quality. World Health Organization. [S.l.]. 2002.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. A. F. S. O Efeito ESTUFA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS. *fap. if. usp*, 2013. Disponível em: <http://www.fap.if.usp.br/akerr/efeito_estufa.pdf>. Acesso em: 11 março 2024.

ZAMAN, M.; BLENNERHASSETT, J. D. Effects of the different rates of urease and nitrification inhibitors on gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, nitrate leaching and pasture production from urine patches in an intensive grazed pasture system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 136, p. 236–246, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.010>

ZOPPAS, F. M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, Á. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, p. 29–42, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100134682>