

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Estratégia de Uso de Fertilizante Nitrogenado de
Eficiência Aumentada na Produção Sustentável de
Milho para Ensilagem**

Kennedy Xavier da Silva Júnior

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**ESTRATÉGIA DE USO DE FERTILIZANTE NITROGENADO DE
EFICIÊNCIA AUMENTADA NA PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE
MILHO PARA ENSILAGEM**

KENNEDY XAVIER DA SILVA JÚNIOR

Sob a Orientação do Professor

Everaldo Zonta

e Coorientação do Professor

João Batista Rodrigues de Abreu

Dissertação Submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

Seropédica, RJ
Agosto de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586e	<p>Silva Júnior, Kennedy Xavier da, 1969- Estratégia de uso de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada na produção sustentável de milho para ensilagem / Kennedy Xavier da Silva Júnior – Seropédica, 2023. 49 f.: il.</p> <p>Orientador: Everaldo Zonta. Coorientador: João Batista Rodrigues de Abreu Dissertação (Mestrado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2023.</p> <p>1. Fertilizantes de eficiência aumentada. 2. Manejo do nitrogênio. 3. Volatilização. I. Zonta, Everaldo, 1970-, orient. II. Abreu, João Batista Rodrigues de, 1962-, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo. IV. Título.</p>
-------	---

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 56 / 2023 - CPGACS
(12.28.01.00.00.27)**

Nº do Protocolo: 23083.049995/2023-34

Seropédica-RJ, 01 de agosto de 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

KENNEDY XAVIER DA SILVA JÚNIOR

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 01/08/2023.

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

(Orientador)

Leandro Azevedo Santos. Dr. UFRRJ

Adriano Portz. Dr. UFF

(Assinado digitalmente em 03/08/2023 11:32)

EVERALDO ZONTA
DIRETOR DE INSTITUTO
IA (12.28.01.21)
Matrícula: 2213075

(Assinado digitalmente em 02/08/2023 14:56)

LEANDRO AZEVEDO SANTOS
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO
CPGACS (12.28.01.00.00.27)
Matrícula: 2626406

(Assinado digitalmente em 02/08/2023 10:51)

ADRIANO PORTZ
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 021.913.487-18

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **56**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **01/08/2023** e o código de verificação: **6bd5e7c53c**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Kennedy Xavier da Silva e Astrid Maria Freitas da Silva, (In Memoriam), pelo exemplo de vida e pleno apoio que me deram em suas vidas, e aos meus filhos, Thiago Borba da Silva Xavier e Raphael Borba da Silva Xavier pelo apoio, suporte e incentivo desde o início dessa trajetória.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me amparou nos momentos mais difíceis dessa caminhada e não me deixou estar sozinho.

Aos professores Everaldo Zonta e João Batista pela orientação, incentivo, cobrança, apoio e companheirismo.

Ao PPGA-CS/UFRRJ pela oportunidade de capacitação e desenvolvimento profissional, como também por proporcionar a estrutura para desenvolvimento do projeto de pesquisa.

À PESAGRO – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro pela disponibilidade da área onde foi instalado o experimento.

À TIMAC Agro pela oportunidade que me proporcionou ao permitir a minha inscrição no PPGA-CS/UFRRJ.

Aos meus filhos Thiago Borba da Silva Xavier e Raphael Borba da Silva Xavier e ao meu sobrinho e afilhado João Victor Assunção Freitas da Silva por me ajudarem em todos os momentos que precisei.

A minha irmã Ana Karina Freitas da Silva pelo incentivo em todos os momentos.

A Zootecnista Marcellly Albuquerque por conduzir comigo o início dos trabalhos no campo.

À minha equipe de Consultores Técnicos Comerciais Monique Macário de Medeiros, Leonardo Poubel da Conceição e Dimas Ribeiro que me apoiaram nos trabalhos de campo.

Ao Laboratório Água Limpa, nas pessoas de Félix e Eustáquio que proporcionaram a realização das análises laboratoriais.

À Dra. em Microbiologia Agropecuária Maura Santos Reis de Andrade da Silva pela valiosa orientação e ajuda nas análises estatísticas.

Aos bolsistas e estagiários do Laboratório das relações solo planta – LSP da UFRRJ pela ajuda dada nos trabalhos de preparação das amostras.

Aos demais pesquisadores e professores de diversas instituições de pesquisa e ensino que contribuíram com orientações e informações para o desenvolvimento das atividades.

A TODOS, OS MEUS MAIS SINCEROS AGRADECIMENTOS!

RESUMO

SILVA JÚNIOR, Kennedy Xavier da. **Estratégia de uso de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada na produção sustentável de milho para ensilagem**. 2023. 49f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

A perda do nitrogênio por volatilização que ocorre nos fertilizantes nitrogenados amoniacais quando aplicados na superfície do solo, principalmente a ureia, somado a diminuição da oferta de mão de obra, tem levado os produtores a buscarem novas estratégias para diminuir as operações no campo e aumentar a eficiência de aproveitamento do nutriente. Este trabalho teve como objetivo testar a estratégia de uma única aplicação nitrogenada no plantio, utilizando um fertilizante de eficiência aumentada e ureia em diferentes doses de nitrogênio (40, 80, 120 e 160 kg de N ha⁻¹), com o intuito de saber se essa estratégia de aplicação seria suficiente para atender a demanda de nitrogênio pela planta em todo o seu ciclo. Em paralelo, foi realizada a aplicação parcelada, a fim de comparação, com 30% da dose do nutriente no plantio e o restante em cobertura no estágio fenológico V6 da planta de milho. O experimento foi realizado na área da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro – PESAGRO, em Seropédica (RJ). O delineamento experimental foi blocos casualizados em esquema fatorial 2x4x2 (2 fontes de fertilizantes, 4 doses de nitrogênio e 2 modos de aplicação), com quatro repetições. Foi estimada a produtividade de massa verde, realizadas as medições de altura de planta, diâmetro do colmo e peso de espiga. Também foram determinados o teor de clorofila, com o auxílio de um clorofilômetro, nos estádios de desenvolvimento V3, V7, V11 e VT, neste caso utilizando-se a folha bandeira para coleta, e o teor de nitrogênio, nos mesmos estádios, através do método Kjeldahl. O conjunto de dados foi analisado com o software estatístico R, as médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade e utilizada a análise de regressão para as doses. Os resultados revelaram que as estratégias de fornecimento de nitrogênio utilizadas, assim como as diferentes doses e fontes testadas, não diferiram em produtividade de massa verde de silagem, altura de planta e peso de espiga. O fertilizante de eficiência aumentada aplicado em cobertura na dose de 80 quilos de N ha⁻¹ produziu plantas com maiores diâmetros de colmo, refletindo diretamente na produtividade de massa verde de silagem, levando a concluir que o incremento da produtividade não está linearmente correlacionado com o aumento das doses de nitrogênio. Ambas as fontes forneceram nitrogênio adequadamente para as plantas nas diferentes doses e estratégias de manejo, com exceção da dose de 40 quilos de N ha⁻¹ aplicados no plantio, o que inviabiliza a execução dessa estratégia e dose nas condições em que o experimento foi conduzido.

Palavras-chave: Fertilizante de eficiência aumentada. Manejo do nitrogênio. Volatilização.

ABSTRACT

SILVA JÚNIOR, Kennedy Xavier da. **Strategy for the use of enhanced efficiency nitrogen fertilizers in the sustainable production of corn for silage.** 2023. 49p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Losses due to nitrogen volatilization in ammoniacal nitrogen fertilizers, mainly urea, when applied on the soil surface in addition to the decrease in labor supply, have led farmers to seek new strategies to reduce field operation and increase nutrient use efficiency. This work aimed to assess the effectiveness of a single nitrogen application at planting, using enhanced efficiency fertilizers and urea at different doses of nitrogen (40, 80, 120 and 160 kg of N ha⁻¹), to know whether this application strategy would be sufficient to meet the nitrogen demand by the plant throughout its cycle. In parallel, split application was carried out, for comparison purposes, with 30% of the nutrient dose at planting and the remainder at side dressing at the V6 phenological stage of the corn plant. The experiment was carried out at the Agricultural Research Corporation of the State of Rio de Janeiro – PESAGRO, in Seropédica (RJ). The experimental design consisted of randomized blocks in a 2x4x2 factorial scheme (2 fertilizer sources, 4 nitrogen doses and 2 application modes), with four replications. Parameters such as green mass productivity, plant height, stem diameter and ear weight were measured. The chlorophyll content was also determined at the V3, V7, V11, and VT development stages, using a chlorophyll meter, as well as the nitrogen content at the same stages through the Kjeldahl method. The data set was analyzed using R statistical software, the means compared by Tukey's test at a 5% probability level and regression analysis was used for the doses. The results revealed that the strategies used for nitrogen supply, as well as the different doses and sources tested, did not affect the silage green mass productivity, plant height and ear weight. The enhanced efficiency fertilizer applied at side dressing at the dose of 80 kg of N ha⁻¹ produced plants with larger stem diameters, reflecting directly on the silage green mass productivity. This suggests that the relationship between productivity and nitrogen doses is not strictly linear. Both sources of fertilizers adequately supplied nitrogen to the plants at different doses and management strategies. On the other hand, the dose of 40 kg of N ha⁻¹ applied at planting did not supply enough nitrogen, which impaired the implementation of this strategy and dose under the conditions the experiment was conducted.

Keywords: Enhanced efficiency fertilizers. Nitrogen management. Volatilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático da demanda de nutrientes pela planta e a aplicação de fertilizantes durante o seu crescimento (OX = Ciclo da cultura). Linha azul: Fertilizante convencional; Linha verde: Demanda da planta; Linha azul pontilhada: Aplicação de fertilizante convencional; Linha laranja: Fertilizante de eficiência aumentada. Fonte: Adaptado de (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014).	5
Figura 2. Imagem de satélite a área do experimento.	17
Figura 3. Precipitação pluvial mensal acumulada (barras), média das temperaturas máximas e média das temperaturas mínimas (linhas) ocorrida durante o período do experimento. Fonte: (INMET, 2023).	18
Figura 4. Gráfico do Balanço Hídrico durante o período experimental. Onde, DEF – Deficiência; EXC – Excesso; E.F. – Estádios fenológicos. Fonte: (INMET, 2023).	18
Figura 5. Área preparada para plantio.	19
Figura 6. Plantio do milho.	20
Figura 7. Croqui do experimento.	21
Figura 8. Medição do teor de clorofila e coleta das amostras para envio ao laboratório.	23
Figura 9. Distribuição da precipitação semanal e estádios fenológicos da cultura.	25
Figura 10. Distribuição da precipitação semanal, estádios fenológicos da cultura, teor de N foliar (g kg^{-1}) e clorofila.	26
Figura 11. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V3 em função de doses de N na forma de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada e ureia.	30
Figura 12. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V7 em função de doses de N na forma de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada e ureia aplicados no plantio.	31
Figura 13. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V11 em função das doses de N.	32
Figura 14. Teores médios de nitrogênio na folha bandeira no estágio fenológico VT em função das doses de N.	33
Figura 15. Teores médios do índice de clorofila no estágio fenológico V7 em função das doses de N.	35
Figura 16. Teores médios do índice de clorofila no estágio fenológico V11 em função das doses de N e aplicação no plantio.	36
Figura 17. Análise dos componentes principais (PCA) 1 e 2, relacionando os tratamentos com características agronômicas da planta teste. Prod – Produtividade; DC – Diâmetro do colmo; PE – Peso da espiga; AP – Altura da planta; Nvn – Teor de nitrogênio foliar nos estádios fenológicos; ICvn – Índice de clorofila nos estádios fenológicos; Tn – Tratamentos.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais formas de Nitrogênio (N) no ambiente e seus estados de oxidação.	2
Tabela 2. Tecnologias utilizadas: Vantagens e desvantagens.	8
Tabela 3. Análise financeira comparativa entre ureia e dois fertilizantes de eficiência aumentada levando em conta o custo extra dos fertilizantes, redução da volatilização e os potenciais danos à saúde humana e ao ecossistema.....	11
Tabela 4. Diminuição da poluição do nutriente pelo aumento da eficiência de uso do nitrogênio.	13
Tabela 5. Estádios vegetativos e reprodutivos do milho.	16
Tabela 6. Análise química do solo.....	19
Tabela 7. Análise física do solo.....	19
Tabela 8. Tratamentos.	21
Tabela 9. Desempenho agrônômico da produtividade em massa verde, altura da planta, diâmetro do colmo, peso da espiga e análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação dos fertilizantes ⁽¹⁾	27
Tabela 10. Médias para o diâmetro do colmo (cm) para os fertilizantes em cada dose de N em cobertura ⁽¹⁾	28
Tabela 11. Médias para o diâmetro de colmo (cm) para os fertilizantes em cada dose de N no plantio ⁽¹⁾	28
Tabela 12. Teores médios de N (g kg^{-1}) nos estádios fenológicos V3, V7 e V11 e na folha bandeira. Análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação dos fertilizantes ⁽¹⁾	28
Tabela 13. Média do teor foliar de N no estágio fenológico V7 para aplicação em cada dose de N ⁽¹⁾	31
Tabela 14. Média do teor foliar de N no estágio fenológico V11 para aplicação ⁽¹⁾	32
Tabela 15. Média do teor foliar de N na folha bandeira, no estágio fenológico VT, para o fator aplicação ⁽¹⁾	33
Tabela 16. Índice de clorofila nos estádios fenológicos V3, V7 e V11 e na folha bandeira. Análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação ⁽¹⁾	34
Tabela 17. Média do índice de clorofila no estágio fenológico V11 para aplicação em cada dose de N ⁽¹⁾	36
Tabela 18. Média do índice de clorofila na folha bandeira no estágio fenológico VT para aplicação ⁽¹⁾	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Nitrogênio	2
2.2 Fertilizantes Nitrogenados Convencionais	3
2.3 Fertilizantes Nitrogenados de Eficiência Aumentada.....	4
2.4 Viabilidade na Utilização de Fertilizantes Nitrogenados de Eficiência Aumentada	10
2.5 Estratégia de Fertilização Utilizando Fertilizantes de Eficiência Aumentada.....	11
2.6 Fertilizantes de Eficiência Aumentada e a Saúde do Solo.....	13
2.7 Teor de Clorofila nas Folhas.....	14
2.8 Milho.....	15
2.9 Fases de Desenvolvimento do Milho.....	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 Local e Período	17
3.2 Clima.....	17
3.3 Solo e Preparo da Área	19
3.4 Instalação do Experimento.....	20
3.5 Caracterização do Fertilizante de Eficiência Aumentada	22
3.6 Avaliação do Teor de Clorofila nas Folhas e Análise de Nitrogênio	23
3.7 Avaliações Agronômicas	23
3.8 Análises Estatísticas.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5. CONCLUSÕES	38
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

As plantas requerem o elemento nitrogênio (N) em grandes quantidades. Isso ocorre porque ele é parte de inúmeros compostos em seu interior, como: ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas entre outros. Entretanto, do momento que esse nutriente chega ao solo até ser absorvido pela planta, sofre inúmeras transformações, podendo ocasionar enormes perdas desse elemento para a atmosfera, ou mesmo para as camadas mais profundas do solo, possuindo alto potencial de contaminação dos mananciais.

O fertilizante nitrogenado mais utilizado pelos produtores rurais devido a sua alta concentração de N, estabilidade e solubilidade é a ureia. No entanto, a sua maior desvantagem é a perda do N por volatilização, sendo capaz de chegar a 80% quando aplicado em superfície. O parcelamento da adubação nitrogenada e/ou a incorporação desse fertilizante ao solo pode reduzir essas perdas, porém elevam o custo de produção. Acrescendo a esses fatos, a escassez de mão de obra no campo tem levado os agricultores a reduzirem as operações e aumentar a eficiência das mesmas.

Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada podem ser importantes ferramentas no manejo da adubação, na busca de altas produtividades e na conservação do meio ambiente, contudo possuem preços mais elevados que os fertilizantes convencionais como, por exemplo, a ureia.

A hipótese a ser testada é que uma única aplicação nitrogenada no plantio, utilizando um fertilizante de eficiência aumentada, seja suficiente para atender a demanda de N da planta em todo o ciclo da cultura.

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar a viabilidade de uso de um fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada na produção de milho para ensilagem utilizando uma estratégia alternativa. Ao mesmo tempo, buscaremos determinar a equivalência de doses de N em relação ao fertilizante convencional nitrogenado mais utilizado pelo mercado, acompanhar o estado nutricional das plantas e estabelecer correlações do estado nutricional com a produção.

Esse ensaio pode contribuir no manejo da fertilização nitrogenada, que por vezes necessita ser parcelada ao longo do ciclo, nos diversos cultivos, gerando economia para o produtor rural, otimizando as operações, aumentando a eficiência do uso do nitrogênio e contribuindo para a saúde do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Nitrogênio

Estima-se que o incremento da produção de alimentos até o ano de 2050, deverá ser da ordem de 70 a 100% do que é produzido atualmente para poder alimentar a população mundial, que poderá ser de aproximadamente nove bilhões de pessoas ou mais. Isso certamente irá requerer uma grande quantidade de fertilizante nitrogenado, sintetizado via processo industrial, onde o nitrogênio (N), relativamente não reativo N_2 , é hidrogenado para a produção da amônia (NH_3), forma biologicamente disponível (COSKUN, BRITTO, et al., 2017b). A importância desse elemento para a produção de alimentos é tamanha, que a estimativa no início do século XXI era que metade da população humana dependia de fertilizantes a base de nitrogênio para o seu alimento (FOWLER, COLYLE, et al., 2013). No entanto, é um dos nutrientes que mais limita o crescimento vegetal e a produção agrícola (LOUARN, BEDOUSSAC, et al., 2021).

Na forma de gás, o nitrogênio participa em 78% na composição do ar atmosférico, onde é encontrado em sua forma molecular N_2 , altamente estável e praticamente inerte, sendo inapropriado para os seres vivos (MARTÍNEZ-DALMAU, BERBEL e ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, 2021). Além do ar atmosférico, podemos encontrar o N no ecossistema marinho e no ecossistema terrestre (FOWLER, COLYLE, et al., 2013), entretanto Raji (2011) e Prado (2021) concordam em dizer que apesar de sua grande abundância na atmosfera, o nitrogênio praticamente não é encontrado nas rochas que dão origem ao solo, fazendo da atmosfera o seu principal reservatório. No entanto, Steveson (1982) citado por Cantarella (2007) aponta que a maior parte do N no planeta está na litosfera, sendo constituinte de rochas ígneas da crosta e do manto terrestre. Malavolta (2006), por sua vez, escreve que, no solo, o nitrogênio encontra-se principalmente na forma orgânica, cerca de 98%, e apenas 2% na forma mineral. Levando em consideração todos os lugares que o N pode ser encontrado, percebe-se que a fonte mais acessível é o ar atmosférico.

O nitrogênio é essencial para todas as formas de vida, que o demandam em grandes quantidades, ficando atrás somente do carbono, do oxigênio e do hidrogênio. Ele é fundamental na formação de aminoácidos, que por sua vez são a base para a formação de proteínas, ácidos nucleicos, bases nitrogenadas e clorofila. Entretanto, algumas transformações precisam ocorrer para que o nitrogênio do ar possa ser assimilado pelas plantas e outros seres vivos (MARTÍNEZ-DALMAU, BERBEL e ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, 2021). Essas transformações só são possíveis em virtude da grande flexibilidade que ele apresenta nas reações de oxirredução, podendo estar na forma reduzida (-3), como no amônio (NH_4^+) e até na forma oxidada (+5), como no nitrato (NO_3^-) (Tabela 1), conferindo-lhe grande importância nos ciclos biogeoquímicos (CANTARELLA, 2007) (COSKUN, BRITTO, et al., 2017a).

Tabela 1. Principais formas de Nitrogênio (N) no ambiente e seus estados de oxidação.

Nome	Espécies	Estados de Oxidação
N orgânico	R_{NH_3}	-3
Amônio	NH_4^+	-3
Amônia	NH_3	-3
Dinitrogênio	N_2	0
Óxido nitroso	N_2O	+1
Óxido nítrico	NO	+2
Nitrito	NO_2^-	+3
Dióxido de nitrogênio	NO_2	+4
Nitrato	NO_3^-	+5

Fonte: Adaptado de (ROBERTSON e VITOUSEK, 2009).

Os principais mecanismos que transferem nitrogênio para o solo em condições naturais, ou seja, sem a introdução de fertilizantes, são as descargas elétricas na atmosfera, transformando o nitrogênio elementar em óxidos, que por sua vez são convertidos em ácido nítrico, este levado ao solo pela chuva; e a fixação direta do nitrogênio do ar por microrganismos do solo (NOVAIS, V., et al., 2007) (FOWLER, COLYLE, et al., 2013). O nitrogênio também pode ser adicionado ao solo através da aplicação de fertilizantes nitrogenados, provenientes da fixação industrial do nitrogênio, considerado um processo bastante oneroso (FERNANDES, SOUZA e SANTOS, 2018). Apesar disso, a quantidade fixada pelo processo industrial é de aproximadamente 120 Tg Ano^{-1} (Tg, Teragrama), ou seja, duas vezes o que é fixado por todos os processos terrestres naturais combinados (63 Tg Ano^{-1}) (FOWLER, COLYLE, et al., 2013) (COSKUN, BRITTO, et al., 2017b). Contudo, entre as formas de adição do nitrogênio ao solo, a que mostra maior potencial e melhor relação benefício/custo é a adição através da fixação biológica de nitrogênio (FBN) efetuado por bactérias diazotróficas (CARDOSO e ANDREOTE, 2016) (PRADO, 2021).

2.2 Fertilizantes Nitrogenados Convencionais

A legislação brasileira, pela Lei 6.894 de 16 de dezembro de 1980 define fertilizante como sendo a substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes vegetais (BRASIL, 1980). Uma definição semelhante a esta colocada por Shahena, et al. (2021) diz que fertilizante é qualquer tipo de material que aplicado ao solo ou ao tecido vegetal fornece um ou mais nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Na literatura podemos encontrar outras definições de fertilizantes, porém muito semelhantes a essas.

Até início do século XX, fazendeiros utilizavam esterco de animais e minerais para aumentar a produtividade de suas lavouras. Entretanto, o processo industrial Harber-Bosh desenvolvido no começo do mesmo século, revolucionou a indústria de fertilizantes (SHAHENA, RAJAN, et al., 2021). O químico alemão Fritz Haber desenvolveu em 1908 o método onde N_2 é combinado com H_2 sob alta pressão e temperatura, resultando em amônia (NH_3), e em 1911 o processo foi industrializado por Carl Bosch, construindo a primeira planta industrial (HUMPHREYS, LAN e TAO, 2020).

A principal fonte de nitrogênio para a produção dos fertilizantes nitrogenados é o N_2 atmosférico, onde é hidrogenado para a produção de NH_3 via processo industrial Harber-Bosh (COSKUN, BRITTO, et al., 2017b) (CANTARELLA, 2007), conforme fórmula abaixo citada por Humphreys et al. (2020):



Após esse processo, a amônia é oxidada e dá origem ao ácido nítrico (HNO_3) e ambos vão servir de base para a produção de outros tipos de fertilizantes, como por exemplo: nitrato de amônio (NH_4NO_3), quando a própria amônia é combinada com o ácido nítrico; o nitrato de cálcio [$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$], a amônia é combinada com o carbonato de cálcio; sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$], a amônia é neutralizada por outros ácidos; e a ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$], que é produzida através da reação da amônia com o gás carbônico (CO_2) (CANTARELLA, 2007).

Devido à alta demanda das plantas nesse elemento e a baixa quantidade encontrada no solo na forma mineral, na maioria dos cultivos ocorre a necessidade do aporte desse nutriente ao solo através da adubação com fertilizantes nitrogenados. Dentre todos os fertilizantes nitrogenados citados acima, o mais usado no país e no mundo é a ureia (FRAZÃO, SILVA, et al., 2014). A utilização deste fertilizante em larga escala acontece em razão de sua alta concentração de nitrogênio (45%), baixo custo de aquisição quando comparado com outros

fertilizantes nitrogenados, alta solubilidade, prontamente disponível, fácil aplicação, ação rápida e boa mistura com outros adubos (HAZRA, 2016) (SANTOS, PINTO, et al., 2020). No entanto, fertilizantes como a ureia ou fertilizantes com N amoniacal, quando aplicados ao solo, sem incorporação, possuem grande potencial de perdas pela volatilização da amônia (LIU, WANG, et al., 2019). De acordo com Lawrencina et al. (2021), a ureia tem uma eficiência de uso do nutriente (EUN, em inglês NUE) de 50%, isso se deve a perda por volatilização, entre 2% e 20%, perdas por ações dos microrganismos do solo, entre 15% e 25% e perdas de 2% a 10% por lixiviação.

Depois de aplicada ao solo e sem incorporação, a ureia sofre hidrólise provocada pela enzima urease, que é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo, ou podendo ter como origem restos vegetais (FRAZÃO, SILVA, et al., 2014), dando origem à carbonato de amônio [$Co(NH_2)_2 + 2H_2O \rightarrow (NH_4)_2CO_3$], que rapidamente se decompõe formando amônio, bicarbonato e hidroxila [$(NH_4)_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2NH_4^+ + OH^- + HCO_3^-$], o que eleva o pH ao redor dos grânulos do fertilizante, convertendo parte do amônio (NH_4^+) em amônia (NH_3) que volatiliza para a atmosfera (TASCA, ERNANI, et al., 2011).

As perdas por volatilização podem ou não ser expressivas, isso porque ela depende de inúmeros fatores, como: atributos relacionados ao solo (pH, umidade, CTC, tipo de solo e presença de palha) e condições climáticas (temperatura, chuva) (LIU, WANG, et al., 2019). Tasca et al. (2011), relataram que tiveram perdas de aproximadamente 50% do N aplicado na forma de ureia por volatilização de amônia em quatro dias. Cabezas e Souza (2008) chegaram a ter perdas de até 76% do nitrogênio aplicado na superfície do solo na cultura do milho. Cassimiro et al. (2020) estudando fontes de fertilizantes nitrogenados em capim-marandu concluem que as doses de N utilizadas influenciaram na volatilização da amônia e que dentre as fontes utilizadas a ureia foi a que teve maior perda de N por volatilização.

Portanto, apesar de toda a revolução provocada pelo processo industrial Harber-Bosh na produção de fertilizantes nitrogenados, estamos sendo ineficientes na utilização desse N na agricultura, aplicando em momentos errados, em condições adversas e muitas vezes em doses desnecessárias, acarretando a perda do nitrogênio de volta para a atmosfera, ou mesmo para camadas mais profundas do perfil do solo.

2.3 Fertilizantes Nitrogenados de Eficiência Aumentada

A estimativa que existe atualmente é que aproximadamente 70% do fertilizante convencional utilizado pelos agricultores pode estar sendo perdido no ambiente por causa da lixiviação, volatilização da amônia e outras formas de perdas (DUAN, JIANG, et al., 2023). Vários estudos agronômicos com fertilizantes convencionais têm mostrado que apenas uma pequena parte dos fertilizantes aplicados ao solo é realmente utilizado pelas plantas. Uma das causas é que o momento do fornecimento do nutriente e a quantidade, muitas das vezes não coincide com o que a planta necessita, como mostrado na Figura 1 (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014). Além disso, a aplicação constante de fertilizantes pode causar a destruição das propriedades do solo, como a capacidade de reter água; levar à uma baixa eficiência dos fertilizantes, aumentar o nível de toxidade e afetar negativamente os microrganismos do solo, com influências negativas no crescimento de espécies agrícolas e na segurança alimentar (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021) (DUAN, JIANG, et al., 2023).

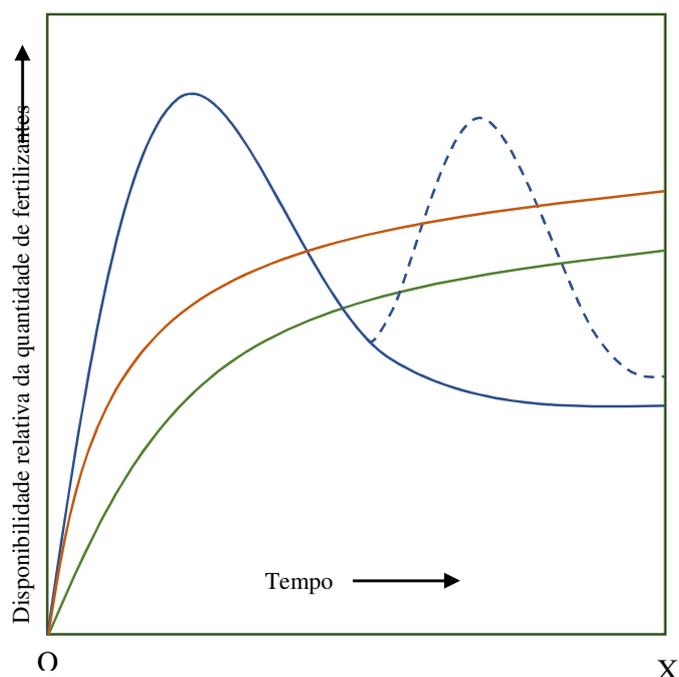


Figura 1. Diagrama esquemático da demanda de nutrientes pela planta e a aplicação de fertilizantes durante o seu crescimento (OX = Ciclo da cultura). Linha azul: Fertilizante convencional; Linha verde: Demanda da planta; Linha azul pontilhada: Aplicação de fertilizante convencional; Linha laranja: Fertilizante de eficiência aumentada. Fonte: Adaptado de (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014).

Para diminuir as perdas e evitar os impactos negativos, a pesquisa e o desenvolvimento de fertilizantes de liberação lenta ou de liberação controlada tem atraído muita atenção, principalmente nas últimas duas décadas (DUAN, JIANG, et al., 2023). Eles têm sido desenvolvidos para retardar ou mesmo controlar a liberação dos nutrientes ao solo, de forma que coincida com a demanda da planta. Estes fertilizantes têm sido chamados na literatura de Fertilizantes de Eficiência Aumentada (FEA). Isso acontece porque a produtividade das culturas são as mesmas ou mesmo maiores quando se usa uma menor quantidade dos FEAs em comparação com os fertilizantes convencionais. Além do mais, devido a sua capacidade de reduzir a poluição ambiental por causa da menor perda de nutrientes, também são chamados de Fertilizantes Ambientalmente Inteligentes (FAI) (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014).

Timilsena et al. (2014) definem FEA como sendo aqueles fertilizantes que apresentam algum benefício agrônômico, econômico ou ambiental que difere dos fertilizantes convencionais, porém, a maioria dos fertilizantes presentes no mercado que se adequam a essa classificação, pertence ao grupo dos fertilizantes nitrogenados, que passaram a usar algum tipo de tecnologia, principalmente os que tem como base a ureia, devido a sua baixa efetividade como fonte de N para as plantas (LI, HU, et al., 2020).

Trenkel (2010) descreve em seu livro a classificação e a definição da Associação Americana de Agentes para o Controle de Nutrientes de Plantas (AAPFCO) para esses produtos, abaixo indicada:

- Fertilizante de liberação lenta ou liberação controlada: É um fertilizante que prolonga a liberação do nutriente para a absorção pela planta, podendo ser para uso posterior à aplicação ou para prolongar a disponibilidade do nutriente. A liberação é mais lenta do que uma fonte de fertilizante convencional, como a ureia.

- Fertilizante Nitrogenado Estabilizado: Esse tipo de fertilizante recebe um aditivo para aumentar o tempo do componente nitrogenado quando aplicado ao solo na forma de ureia ou na forma amoniacal.

- Inibidor de nitrificação: Esse fertilizante recebe uma substância que inibe oxidação do N amoniacal para nitrato.

- Inibidor de urease: É adicionado ao fertilizante uma substância que inibi a ação da enzima urease.

Entretanto, Timilsena et al. (2014) separam os FEAs em três classes baseado no modo de fornecimento do nutriente e em sua funcionalidade:

a) Fertilizantes de liberação lenta quimicamente modificado;

b) Fertilizante de liberação controlada com uma camada como barreira;

c) Fertilizante de eficiência aumentada contendo inibidores (também chamados de fertilizantes estabilizados).

Contudo Rajan et al. (2021) classifica os fertilizantes de eficiência aumentada em apenas dois tipos: Fertilizantes de liberação controlada (A duração da liberação dos nutrientes e a taxa da liberação são bem conhecidos e podem ser controlados durante a fabricação) e fertilizantes de liberação lenta (Os nutrientes são liberados mais lentamente quando comparados com os fertilizantes convencionais). Por fim, Duan et al. (2023) em revisão sobre fabricação, avaliação de metodologias e tipos de fertilizantes de liberação lenta, junta todas as classificações em apenas uma, chamando todos os fertilizantes de eficiência aumentada de fertilizantes de liberação lenta, isso porque todos tem a função de diminuir a taxa de liberação dos nutrientes, porém sem a capacidade de liberação dos nutrientes de acordo com a demanda de uma específica espécie agrícola.

Apesar da primeira patente com uma nova tecnologia na proteção do nitrogênio ser criada no ano de 1924 na Europa, quando foi apresentada a ureia-formaldeído (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014) (DUAN, JIANG, et al., 2023), de lá para cá, a demanda por essa tecnologia foi pequena, todavia, na última década essa demanda aumentou, levando a uma crescente capacidade de produção das empresas, o que fez a produção mundial dos fertilizantes de eficiência aumentada saltar de 6,5 milhões de toneladas em 2011 para 11,6 milhões de toneladas em 2014 (GUELF, 2017).

Esses produtos têm como objetivo atender melhor às necessidades nutricionais das plantas, ao mesmo tempo que busca diminuir as perdas do nitrogênio por volatilização, lixiviação e desnitrificação, proporcionando uma agricultura mais amigável ao meio ambiente (CHENG WANG, YU, et al., 2021). Dentre as diversas vantagens descritas na literatura sobre os fertilizantes de eficiência aumentada, aqui estão as mais citadas:

a) Nutrição prolongada: esses fertilizantes fornecem nutrientes às plantas por um período mais longo, sem a necessidade de aplicações frequentes (TRENKEL, 2010) (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014) (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021);

b) Maior eficiência: como os nutrientes são liberados gradualmente, há menos perda de nutrientes para o meio ambiente e uma maior eficiência na utilização do fertilizante (TRENKEL, 2010) (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021);

c) Menor risco de toxicidade: a liberação gradual dos nutrientes reduz o risco de toxicidade (stress osmótico) nas plantas (TRENKEL, 2010) (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014);

d) Maior conveniência: aplicações menos frequentes de fertilizantes pode ser mais conveniente para os produtores (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021);

e) Menor impacto ambiental: redução da lixiviação de nutrientes no solo e na água, redução da volatilização, redução da nitrificação e emissão de óxido nitroso (N₂O)

(TRENKEL, 2010) (TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014) (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021).

Como qualquer tecnologia, os fertilizantes de eficiência aumentada também apresentam algumas desvantagens, tais como:

a) Custo: a sua fabricação é mais cara que as dos fertilizantes convencionais, o que reflete no preço final para o produtor (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021);

b) Acidificação do solo: aplicação de fertilizantes recoberto com enxofre, pode levar à um abaixamento do pH do solo (TRENKEL, 2010) (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021); e

c) Possível impacto no meio ambiente: o uso de FEA pode deixar resíduos indesejáveis de material sintético no solo (TRENKEL, 2010).

Diversas tecnologias têm sido utilizadas para proteger o nitrogênio e tentar sincronizar a demanda da planta com a liberação do nutriente, variando conforme os produtos (aditivos) utilizados, bem como os revestimento ou tratamentos aplicados a ureia. De acordo com Purnomo e Saputra (2021) as tecnologias mais utilizadas para a fabricação dos fertilizantes de eficiência aumentada, são:

a) fertilizantes revestidos com enxofre;

b) fertilizantes revestidos com polímeros;

c) fertilizantes com revestimento híbrido (combinação entre o revestimento com enxofre e o revestimento com polímeros);

d) fertilizantes revestidos com materiais biológicos, por exemplo: amido;

e) fertilizantes dispersos em ceras, e

f) fertilizantes dispersos em materiais naturais, por exemplo: esterco de animais.

Na Tabela 2 é apresentado um compilado das várias tecnologias utilizadas, bem como as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 2. Tecnologias utilizadas: Vantagens e desvantagens.

Tecnologias	Base química / física	Vantagens	Desvantagens	Observação	Referências
Síntese química	<p>Ureia formaldeído (UF): Produzido a partir da reação entre a ureia e formaldeído.</p> <p>Diureia isobutilideno (IBDU): Elaborado através da reação de isobutaldeído com ureia.</p> <p>Ureia-triazona (UT): Formada pela reação de ureia-amônia e formaldeído.</p>	<p>Longo prazo de liberação, a eficiência de uso do nitrogênio pode passar de 50%.</p>	<p>A liberação de nutrientes depende principalmente da atividade microbiana do solo, que é influenciada pela umidade do solo e temperatura.</p>	<p>Desenvolvido em 1924, este é a forma mais antiga de FEA e continua sendo o produto mais comum no mercado.</p>	<p>(TIMILSENA, ADHIKARI, et al., 2014); (GUO, ZHANG, et al., 2018) (RAJAN, SHAHENA, et al., 2021);</p>
Incorporado a matriz	<p>LDH (Dupla camada de hidróxido): Permite a incorporação de N e P em seus espaços interlamelar por troca de íon entre a dupla camada.</p> <p>Zeolita: Pode acomodar cátions em suas estruturas porosas por adsorção e troca de íons.</p> <p>Nano argila: Adequado para vários nutrientes, como borato, nitrato e fosfato devido a capacidade de troca aniônica.</p> <p>Carbono: Biochar exibe fantástico adsorção de nutrientes.</p>	<p>LDH podem ser empregados como adsorventes para pegar as espécies aniônicas que contaminam o ambiente, solo e água.</p>	<p>A capacidade de incorporação do nutriente é limitada.</p>	<p>O tipo de interação entre o fertilizante e a matriz é um parâmetro muito importante a ser medido. Se a interação for através de ligações químicas, a transferência poderá ser limitada.</p> <p>As interações serão físicas (armadilha) ou através de ligações químicas fracas (troca iônica) para melhor entrega.</p>	<p>(BERNARDO, GUIMARÃES, et al., 2018); (RAKHIMOL, THOMAS, et al., 2021) (DUAN, JIANG, et al., 2023)</p>
Recobrimento	<p>Inorgânico: Ureia revestida com enxofre ou materiais inorgânicos, como gesso ou bentonita.</p> <p>polímeros: poliuretano, polietileno etc.</p>	<p>O processamento é razoavelmente simples. A espessura do recobrimento pode regular a velocidade de liberação do nutriente.</p>	<p>A ureia revestida de enxofre diminui o pH do solo. O custo é um problema para todos os fertilizantes de liberação lenta com recobrimento. Alguns polímeros à base de petróleo são não biodegradáveis.</p>	<p>O enxofre puro é o material de recobrimento mais usado na síntese dos fertilizantes de liberação lenta.</p>	<p>(LAWRENCIA, KIATWONG, et al., 2021); (MEHMOOD, NIAZI, et al., 2019)</p>

Continuação da Tabela 2.

Tecnologias	Base química / física	Vantagens	Desvantagens	Observação	Referências
Materiais biodegradáveis	<p>Polímeros sintéticos biodegradáveis: Álcool polivinílico (PVA), Epóxi de base biológica e outros.</p> <p>Polímeros naturais biodegradáveis: lignina, amido, quitina, celulose e outros polissacarídeos e polipeptídios.</p>	<p>Resolve as questões ambientais e preocupações com a poluição revestimento.</p>	<p>Custo mais alto e o tempo de biodegradação dos polímeros sintéticos é muito maior do que o tempo de aplicação dos fertilizantes.</p> <p>Os polímeros naturais, puros, biodegradáveis, não podem ser usados como materiais de revestimento eficazes devido a serem hidrofílicos e pobres em propriedades mecânicas.</p>	<p>Polímeros biodegradáveis foram introduzidos na década de 1980 e são uma alternativa promissora para o revestimento que é atualmente usado à base de petróleo. Teste são necessários para garantir se o uso dos polímeros sintéticos biodegradáveis são ambientalmente seguro.</p>	<p>(MEHMOOD, NIAZI, et al., 2019); (LAWRENCIA, KIATWONG, et al., 2021); (DUAN, JIANG, et al., 2023)</p>
<p>Hidrogel (Também chamados de polímeros superabsorventes – PSA, em inglês SAP)</p>	<p>Polissacarídeos naturais e polipeptídeos: amido, celulose, quitosana, gelatina, proteína isolada de soja e seus derivados.</p> <p>Polímeros sintéticos: monômeros hidrofílicos como acrilamida (AM), ácido acrílico (AC), ácido metacrílico (MAC) etc.</p> <p>Polímeros sintéticos naturais: preparados a partir de materiais sintéticos e materiais natural/inorgânico.</p>	<p>Reduz a desintegração e melhora as propriedades físicas do solo. Reduz o consumo da água de irrigação, principalmente em áreas propensas à seca, e melhora a quantidade de fertilizante retido no solo.</p>	<p>A maioria dos SAPs são baseados em polímeros sintéticos, que são de custo mais elevado. Nenhum produto está no mercado atualmente.</p>	<p>Atualmente, a combinação de SAPs e fertilizantes é uma tendência crescente para regular os nutrientes e água em um material.</p>	<p>(LAWRENCIA, KIATWONG, et al., 2021); (DUAN, JIANG, et al., 2023);</p>

Fonte: Adaptado de (DUAN, JIANG, et al., 2023).

2.4 Viabilidade na Utilização de Fertilizantes Nitrogenados de Eficiência Aumentada

A aplicação imprópria e sem critérios agronômicos de altas doses de fertilizantes convencionais, somada a baixa eficiência de uso dos nutrientes, que dificilmente excede 30-35%, 18-20% e 35-40% para nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), respectivamente (SUBRAMANIAN, MANIKANDAN, et al., 2015) (LAWRENCIA, KIATWONG, et al., 2021), não só sobrecarrega o produtor aumentando os seus custos, como também causa diversos transtornos ao meio ambiente (KUMAR, SAMOTA, et al., 2023). Por isso, empregar estratégias diferentes para reduzir o desperdício e ou melhorar a eficiência do uso dos nutrientes contidos nos fertilizantes, é fundamental para uma agricultura mais sustentável.

Para tentar resolver esse problema, existe a necessidade de novos tipos de fertilizantes que possam suprir as necessidades nutricionais das culturas ao mesmo tempo que reduzem as perdas de nutrientes e aumentem a produção das lavouras (VEJAN, KHADIRAN, et al., 2021). Os fertilizantes de eficiência aumentada possuem grande potencial para elevar a eficiência de uso dos nutrientes ao mesmo tempo que podem diminuir os problemas ambientais causados pelos fertilizantes convencionais. Entretanto, a utilização desses fertilizantes em larga escala ainda não é uma realidade devido à algumas desvantagens, como: custo de produção, o que impacta diretamente nos preços dos produtos para os produtores; alguns fertilizantes possuem baixa eficiência na liberação do nutriente; e os resíduos que deixam no solo, pois muitos dos polímeros utilizados no recobrimento dos fertilizantes são derivados de petróleo e não são biodegradáveis (VEJAN, KHADIRAN, et al., 2021).

Com o propósito de superar essas barreiras, vários trabalhos têm sido realizados comparando os fertilizantes convencionais com os fertilizantes de eficiência aumentada. Essas comparações estudam doses de nutrientes, taxa de liberação, perdas por volatilização e lixiviação, impactos ao meio ambiente, viabilidade econômica e outras características dos fertilizantes de eficiência aumentada. Em uma dessas comparações, entre a dose recomendada de ureia comum incorporada ao solo (104 kg de N), dose recomendada de ureia de liberação controlada aplicada em superfície (96 kg de N) e metade da dose recomendada de ureia de liberação controlada também aplicada em superfície (49 kg de N), Civardi et al (2011) observaram maior rendimento e produtividade da ureia comum em relação a ureia de liberação controlada, e redução do rendimento com a redução da dose de ureia de liberação controlada.

Em outro experimento no cerrado, comparando-se ureia comum com ureia de liberação controlada na produção de milho, não se obteve diferenças significativas na produtividade de grãos e no teor de N foliar, mesmo com a utilização de irrigação (MAESTRELO, BUZETTI, et al., 2014).

Bono et al (2011), observaram maiores teores foliares de nitrogênio com ureia de liberação controlada comparado com ureia comum, e melhor eficiência produtiva da ureia de liberação controlada quando aplicada acima de 100kg ha⁻¹ de N em dose única e em cobertura em relação a ureia comum. Nesse estudo foi observado que a pluviosidade durante o período experimental ficou abaixo do recomendado para a produção de milho, que necessita em torno de 600 mm em seu ciclo.

Martins et al. (2014) descreveram que ureia de liberação controlada e ureia comum apresentaram desempenho semelhante quando aplicados em dose única, em superfície, em períodos de chuvas frequentes. Também relataram que ambas se dissolveram simultaneamente na presença de água, porém, a ureia de liberação controlada obteve maiores índices de produtividade quando aplicada em doses acima de 170 kg ha⁻¹ de N.

Em estudo conduzido por Liu et al. (2019) comparando ureia convencional com ureia tratada com NBPT em plantio direto na cultura do milho, observaram que ureia tratada com NBPT resultou em menores perdas do nitrogênio por volatilização, maior produtividade, maior

remoção do nitrogênio pelo grão e melhor eficiência de uso do nitrogênio do que a ureia não tratada.

Da mesma forma, Frazão et al. (2014) confrontando ureia revestida com polímeros e ou tratada com inibidor de urease com ureia convencional, verificaram que a ureia com tratamento proporcionou maior teor de N na folha, bem como maior produtividade de grãos com doses acima de 65 kg ha⁻¹ de N do que a ureia convencional.

Na avaliação de perdas de nitrogênio por volatilização entre ureia, ureia revestida com NBPT e ureia revestida com polímero em sistemas intensivos de pastagem no período do outono e no período da primavera, Lam et al. (2019), verificaram que a perda acumulativa de amônia para o tratamento ureia foi de 5,8 e 5,6 kg N ha⁻¹ durante o outono e primavera respectivamente, correspondendo de 11 a 12% do N aplicado, o que é comparável com a média global de perda de nitrogênio por volatilização quando se utiliza ureia aplicada em superfície em diferentes sistemas agrícolas (PAN, LAM, et al., 2016). Relatam ainda que a perda por volatilização levou ao pecuarista um prejuízo de \$ 7,80 dólares australiano por hectare (R\$ 26,29 em 8/04/2023 Fonte: Google Finanças (2023)) e que a União Europeia estima um custo de € 10 a 30 por quilo de amônia volatilizado em decorrência dos potenciais danos à saúde humana e ao ecossistema. Na Tabela 3 podemos acompanhar uma análise financeira comparativa entre as fontes de N elaborada por esses autores.

Tabela 3. Análise financeira comparativa entre ureia e dois fertilizantes de eficiência aumentada levando em conta o custo extra dos fertilizantes, redução da volatilização e os potenciais danos à saúde humana e ao ecossistema.

	Ureia (controle)	Ureia com NBPT	Ureia revestida com polímeros
Custo do fertilizante (R\$ t ⁻¹) ^a	2.125,00	2.324,00	5.060,00
Custo do quilo do N do fertilizante (R\$ ha ⁻¹) ^b	4,62	5,06	11,00
Aplicação de 50 quilos de N ha⁻¹			
Custo do N por hectare (R\$ ha ⁻¹)	231,00	253,00	550,00
Custo extra em relação à ureia (R\$ ha ⁻¹) (I)	-	22,00	319,00
Perda média de NH ³ nos dois períodos do experimento (kg N ha ⁻¹)	5,7	2,85	1,1
Quantidade de NH ³ não volatilizada em relação à ureia (kg N ha ⁻¹)	-	2,85	4,6
Valor do N da NH ³ não volatilizada em relação à ureia (R\$ ha ⁻¹) (II)	-	13,16	21,25
Benefício para o produtor (R\$ ha ⁻¹) (II – I)	-	-8,84	-297,75
Valor do custo do potencial de dano da NH ³ não volatilizada em relação à ureia (R\$ ha ⁻¹) (III)	-	158,00 a 475,00	255,00 a 767,00
Benefício social em relação à ureia (R\$ ha ⁻¹) (III-I)	-	136,00 a 453,00	-64,00 a 448,00

Fonte: Adaptado de (LAM, SUTER, et al., 2019) – ^a Preço dos fertilizantes retirado do artigo e convertido para Real (Google Finanças, 2023); ^b Ureia com 46% de nitrogênio; ^c Custo do potencial de dano estimado em € 10 – 30 por kg N - NH³ (LAM, SUTER, et al., 2019) e convertido para Real (Google Finanças, 2023).

2.5 Estratégia de Fertilização Utilizando Fertilizantes de Eficiência Aumentada

O momento certo da aplicação de fertilizantes e a quantidade adequada é sempre uma decisão importante que o produtor ou o técnico devem tomar (DAVIES, COUTLER e PAGLIARI, 2020), principalmente no caso do nitrogênio, que quando em falta é considerado um dos principais limitantes ao crescimento e à produtividade das culturas, pois exerce importante função nos processos bioquímicos das plantas (TAIZ, ZEIGER, et al., 2017) (MA, WANG, et al., 2021). Na fertilização com esse nutriente, devemos ter como objetivo o máximo aproveitamento pela planta e a mínima perda, seja ela por qualquer forma.

Como já citado anteriormente, a ureia é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na produção agrícola, porém a sua rápida liberação do nitrogênio não permite sincronizar a

demanda de N das culturas com a velocidade de liberação, fazendo com que grande parte do nitrogênio seja perdido, resultando em produtividades inconsistentes e baixa eficiência de uso do nutriente. Ademais, a rápida liberação do N provoca vários problemas ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e a eutrofização de cursos d'água (ZHANG, ZHAO, et al., 2022).

Várias técnicas são utilizadas para melhorar a eficiência de uso do nitrogênio, bem como diminuir as suas perdas, entre elas está o parcelamento da ureia, técnica considerada umas das mais efetivas (YOUSEFTABAR, FALLAH e DANESHIYAN, 2012) (RUI, RUARK, et al., 2019). Embora o parcelamento tenha se mostrado eficiente no aumento das produtividades, na eficiência de uso e na redução das perdas, ele aumenta as operações de campo, demandando mais trabalho e custo para o produtor do que uma simples aplicação do fertilizante na base, antes do plantio (MA, WANG, et al., 2021) (ZHANG, ZHAO, et al., 2022).

Fertilizantes de eficiência aumentada tem o potencial de aumentar a eficiência de uso do nitrogênio, reduzir as suas perdas e incrementar as produtividades de várias culturas (RUI, RUARK, et al., 2019). A sua aplicação poder ser similar aos fertilizantes convencionais, como a ureia, ou seja, pode-se parcelar as quantidades a serem aplicadas, porém diferentemente dos fertilizantes convencionais, eles são geralmente aplicados no plantio, em uma única vez, o que reduz mão de obra e diminui custo (ZHANG, ZHAO, et al., 2022).

Em trabalhos de Zhu (2014), Duan et al. (2016) e Jiang et al. (2014) citados por Zhang et al. (2022), esses autores não encontraram diferenças significativas na produtividade quando compararam a resposta da aplicação dos fertilizantes de eficiência aumentada toda no plantio, com a aplicação parcelada de ureia para as culturas de milho, batata e arroz, respectivamente.

Avaliando doses de N, tipos de fertilizantes e momento de aplicação na cultura do milho, em solo arenoso com irrigação, Rui et al. (2019) concluíram que o fertilizante de eficiência aumentada foi agronomicamente vantajoso em comparação com os outros fertilizantes nitrogenados. A aplicação pré-plantio foi tão eficiente quanto a aplicação parcelada ou ao lado das plantas de sulfato de amônia ou ureia em anos com precipitação normal ou abaixo da média, e performou melhor do que a aplicação em pré-plantio dos outros fertilizantes convencionais em anos chuvosos.

Ma et al. (2021), estudando o parcelamento ou não de dois tipos de fertilizantes de eficiência aumentada e vários parcelamento da ureia na cultura do trigo, concluíram que o parcelamento em duas vezes de ambos os fertilizantes de eficiência aumentada foi o suficiente para promover um bom suprimento do nutriente e sincronizar a demanda da planta por N com a taxa de liberação dos fertilizantes, aumentando a produtividade, a eficiência de uso do nutriente e reduzindo o trabalho necessário para realizar várias aplicações.

Com o objetivo de avaliar se os fertilizantes de eficiência aumentada podem, com uma única aplicação no plantio, substituir múltiplas aplicações de ureia, reduzindo assim o custo da mão de obra, Zhang et al. (2022) realizaram uma meta-análise baseada nas produtividades das culturas de grãos e na eficiência de uso do nitrogênio. Com base nos resultados obtidos, eles sugerem que os fertilizantes de eficiência aumentada podem ser usados no lugar do parcelamento da ureia, e que isto pode aumentar a produtividade, reduzir o custo ambiental e a mão de obra. Entretanto, essa substituição pode ser afetada pelas propriedades químicas e físicas dos solos, culturas, taxa de aplicação do fertilizante nitrogenado e clima (RUI, RUARK, et al., 2019).

2.6 Fertilizantes de Eficiência Aumentada e a Saúde do Solo

A agricultura moderna necessita de múltiplos insumos, como produtos fitossanitários, fertilizantes químicos, sementes melhoradas, irrigação e outros. A utilização deles na agricultura é fundamental para a segurança alimentar mundial. Dentre eles, os fertilizantes químicos possuem papel de grande importância, pois são vitais para o aumento da fertilidade do solo e da produtividade das culturas, sendo a produção mundial de alimentos altamente dependente do seu uso, porém o uso indevido provoca um impacto desfavorável no meio ambiente e na capacidade produtiva do solo (PAHALVI, RAFIYA, et al., 2021).

Podemos descrever o solo como uma camada natural com um ecossistema dinâmico e altamente complexo que promove uma imensa variedade de vida, que compreende a maior parte da diversidade genética da terra. O solo é a base da agricultura e é responsável por muitas funções vitais como reciclagem de nutrientes, trocas gasosas, suprimento de água e nutrientes para as plantas e animais, desintoxicação de poluentes, regulador da qualidade da água e habitat para os organismos do solo. (NADARAJAN e SUKUMARAN, 2021).

Entretanto, o uso de práticas agrícolas contínuas e a constante utilização de fertilizantes químicos, podem diminuir o conteúdo de matéria orgânica do solo rapidamente, levando à um declínio estrutural e a acidificação deste. Com isso, organismos benéficos podem ser afetados, o crescimento das plantas prejudicado, ocorrer o aparecimento e a proliferação de pragas e/ou doenças e até mesmo contribuir para uma indesejável liberação de gases de efeito estufa (NADARAJAN e SUKUMARAN, 2021). Sendo assim, o manejo da saúde do solo é necessário para construirmos uma agricultura e biodiversidade do solo sustentável (PAHALVI, RAFIYA, et al., 2021).

Fertilizantes químicos são compostos com uma grande quantidade de nutrientes necessários para o crescimento das plantas, porém o uso constante, sem critério e sem conhecimento adequado, podem causar vários efeitos deletérios ao solo, como acidificação, acumulação de metais pesados, emissão de gases de efeito estufa, acumulação de sais dos fertilizantes, afetar a comunidade microbiana, inibir a fixação simbiótica de nitrogênio, reduzir o valor nutricional das culturas, compactação, afetar a atividade de enzimas, diminuir o conteúdo de matéria orgânica e etc. (NADARAJAN e SUKUMARAN, 2021) (PAHALVI, RAFIYA, et al., 2021) (BAWEJA, KUMAR e KUMAR, 2020).

Uma forma de reduzir o impacto ao solo causado pelo uso dos fertilizantes é aumentar a eficiência de uso dos nutrientes, especialmente o nitrogênio (Tabela 4), pois assim reduziríamos as perdas para o ambiente que são causadas pelas volatilização e lixiviação, com isso a emissão de gases de efeito estufa seria menor e a contaminação de corpos de água minimizaria (TRENKEL, 2010). O mesmo Trenkel (2010) escreve que os efeitos adversos ao solo podem ser minimizados quando a liberação de nutrientes dos fertilizantes é sincronizada com a demanda da planta, o que pode ser feito com os fertilizantes de eficiência aumentada.

Tabela 4. Diminuição da poluição do nutriente pelo aumento da eficiência de uso do nitrogênio.

Caso	Eficiência de uso do nutriente (%)	Quantidade de N aplicado (kg ha ⁻¹)	Redução da quantidade de N aplicado (%)	Absorção de N pelo arroz (kg ha ⁻¹)	Potencial máximo de poluição pelo fertilizante (Kg ha ⁻¹)
1	30	100	0	30	70
2	50	60	40	30	30
3	80	40	60	32	8

Fonte: Adaptado de (SHOJI, 2005). Nota: 30% de eficiência de uso para aplicação do fertilizante convencional, 80% de eficiência de uso para aplicação do fertilizante de eficiência aumentada.

Duan et al. (2023) corrobora com Trenkel (2010) quando relata que a poluição dos fertilizantes pode ser reduzida diminuindo ou controlando o número de aplicações de nutrientes acima da capacidade de absorção pelas plantas.

Por fim, Vejan et al. (2021) relata que a habilidade dos fertilizantes de eficiência aumentada em liberar nutrientes em uma taxa desejada, aumentaria a segurança agroambiental, e que existe uma tendência para a criação de fertilizantes ambientalmente sustentável, que suportariam a produção de alimentos com redução na perda de nutrientes por lixiviação ou carreamento pelas águas superficiais, sendo interessante para a saúde do solo, saúde humana, conservação do ambiente e preservação dos recursos naturais.

2.7 Teor de Clorofila nas Folhas

As clorofilas são os principais pigmentos fotossintéticos responsáveis pela absorção da luz (KERBAUY, 2019), estando a sua concentração nas folhas diretamente relacionado com a capacidade que a planta tem de fazer fotossíntese, além do mais, essa capacidade é altamente influenciada pela nutrição com nitrogênio (DONG, SHANG, et al., 2019).

A adubação nitrogenada em cobertura é uma prática cultural normalmente utilizada em várias culturas. No campo, os produtores quantificam essa adubação através das recomendações dos técnicos baseadas em estudos passados, pela análise visual da lavoura ou pela experiência adquirida ao longo do tempo. No entanto, quando a adubação nitrogenada não é realizada de forma correta, pode ocorrer a redução da produtividade e/ou o aumento dos custos de produção (SILVEIRA, GONZADA e SARMENTO, 2017).

A sub ou superestimativa da dose de N a ser utilizada ocorre frequentemente no sistema convencional de recomendação pelo fato de serem adotados conjuntos de práticas culturais em lavouras sem considerar suas particularidades. Por esse motivo, haverá áreas ou manchas em que a adubação aplicada estará abaixo da necessidade das plantas e outras que estarão acima da necessidade (ARGENTA, SILVA, et al., 2003).

Alguns métodos de previsão da necessidade de N durante o desenvolvimento vegetativo das plantas têm sido propostos (SIMS, VASILAS, et al., 1995). Baseados em análises químicas do solo e em análises laboratoriais de amostras de tecido, tais métodos têm a vantagem de apresentar alta correlação com a produtividade e aceitável nível de exatidão. Contudo, por serem laboratoriais, apresentam as desvantagens de serem destrutivos. No caso da análise de folha, depende-se tempo e trabalho, envolve despesas com coleta, processamento e análise de amostras e, principalmente, não possibilita a correlação da deficiência de N na planta no mesmo ano agrícola, servindo apenas com critério indicativo para os próximos anos (ARGENTA, SILVA, et al., 2001) (DONG, SHANG, et al., 2019).

A detecção precoce da concentração de um nutriente na planta, por exemplo o nitrogênio, auxilia na tomada de decisão caso se identifique um problema, permitindo ao produtor tempo para que ele tome as devidas ações corretivas, a fim de não prejudicar a produtividade (PINZÓN-SANDOVAL, BALAGUERA-LÓPEZ e ALMANZA-MERCHÁN, 2023).

A utilização de um clorofilômetro constitui uma alternativa promissora para avaliação do nível de N nas plantas. A leitura efetuada pelo clorofilômetro corresponde ao teor de clorofila presente na folha, o qual correlaciona-se com a concentração de N na planta (SILVEIRA, GONZADA e SARMENTO, 2017), possibilitando o manejo mais eficiente da adubação nitrogenada. Além disso, poderá permitir a sincronização da aplicação do nitrogênio com a época de demanda do nutriente pela planta (ROCHA, GALVÃO, et al., 2005).

Fernandes et al. (2021) conduziram um trabalho para avaliar a eficácia de um clorofilômetro em prover informações sobre o nível de nitrogênio de uma folha de batata, com o intuito de ajustar o momento e a quantidade de N a ser aplicado. O resultado mostrou que

apesar do clorofilômetro ter sido eficiente na otimização da aplicação do fertilizante nitrogenado quando as condições do ambiente foram favoráveis para o cultivo da batata, inclusive detectando bom suprimento de N, o que permitiu a redução da adubação sem comprometer a produtividade, porém, quando as condições ambientais foram menos favoráveis (muita chuva, baixas temperaturas e baixa radiação solar) para a cultura estudada, o gerenciamento do N pelo clorofilômetro foi prejudicial para a produtividade.

Entretanto, Pinzón-Sandoval et al. (2023) avaliando um modelo de clorofilômetro em três variedades de mirtilo (*Vaccinium corymbosum* L.), encontrou correlação significativa entre o total de clorofila e a concentração de nitrogênio e de magnésio nas folhas, concluindo que a utilização de um clorofilômetro é um importante e prático método não destrutivo para avaliar o conteúdo de nitrogênio e magnésio em variedades de mirtilo e em condições de campo, sendo fácil, rápido e acessível método para produtores.

Com o objetivo de propor o estágio de desenvolvimento da planta e partes foliares possíveis de serem utilizadas para diagnóstico de nitrogênio usando um medidor de clorofila, Milagres et al. (2021) conduziram um experimento em plantas de milho doce e encontraram que a posição de leitura na parte média da folha no estágio vegetativo V10 e no estágio reprodutivo R1 são adequados para avaliar o status de N da planta com um clorofilômetro.

2.8 Milho

A cultura do milho (*Zea mays* L.) pertencente à família Poaceae é uma espécie originária da América do Norte, com centro de origem no México (SILVEIRA, BONETTI, et al., 2015) (MAITI, RODRÍGUEZ, et al., 2022). Essa gramínea apresenta características que possibilitam a sua produção em praticamente todos os continentes (FORNASIERI FILHO, 2007), sendo cultivada desde a latitude 58° N até a 40° S, nas mais variadas condições climáticas e épocas do ano. A sua versatilidade de produção tornou essa planta umas das mais importantes espécies agrícolas cultivada no mundo (BORÉM, GALVÃO e PIMENTEL, 2017).

A sua importância a nível mundial se deve ao fato de ser um alimento de alto valor energético e de custo relativamente baixo. Ademais, o milho é utilizado em muitos produtos, tanto para a alimentação humana (BORÉM, GALVÃO e PIMENTEL, 2017), bem como na utilização para a alimentação animal (PEREIRA, LEÃO, et al., 2009), o que tem um grande impacto na demanda do milho no mercado.

Segundo projeção do USDA, no relatório de maio do ano de 2023, a produção mundial de milho na safra 2022/2023 será de 1.150 bilhões de toneladas (USDA, 2023), enquanto que o consumo mundial, estimado pela International Grains Council – IGC, ficará bem próximo, 1.172 bilhões de toneladas (IGC, 2023), o que caracteriza a necessidade do aumento da produção. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, com produção estimada para a safra de 2022/2023 de 130 milhões de toneladas, o que mostra a elevada importância dessa cultura no país, que em produção mundial perde para os Estados Unidos e China, que possuem produções estimada pelo USDA para a safra 2022/2023 de 348 e 277 milhões de toneladas respectivamente (USDA, 2023).

Da mesma forma que acontece a nível mundial, no Brasil a cultura do milho está entre as de maior importância, sendo cultivado em praticamente todas as regiões do país, com destaque para as regiões Centro-Oeste e Sul, as quais cultivam aproximadamente 70% da área de milho no país, sendo responsáveis por aproximadamente 75% de todo o milho produzido no Brasil (BORÉM, GALVÃO e PIMENTEL, 2017).

2.9 Fases de Desenvolvimento do Milho

Com uma ampla faixa de cultivo e podendo ser plantado em várias épocas do ano, é de se esperar que a duração do ciclo do milho ou o desenvolvimento, do plantio à colheita, varie de acordo com o local e as condições climáticas de onde está sendo plantado. Com o intuito de facilitar o manejo durante o cultivo, como por exemplo: aplicações de fertilizantes, controle de ervas daninhas, colheita e outros, as fases da planta foram divididas para maior otimização dos tratamentos culturais e prevenções ou resoluções de problemas que possam aparecer durante o desenvolvimento da planta. Na literatura podemos encontrar diversos modelos de classificação, por sinal, muitos parecidos (DANFORTH, 2009) (SOLAIMALAI, ANANTHARAJU, et al., 2021), porém para esse estudo optou-se pela utilização do modelo usado pela Embrapa, proposto por Magalhães et al (2006).

Os estádios de desenvolvimento foram divididos em vegetativos (representados pela letra V) e reprodutivos (representados pela letra R), e então foram subdivididos, iniciando pela emergência (VE), após isso são representados por números que representam a quantidade de folhas completamente desenvolvidas, o que se caracteriza pela presença visível do colar na inserção da bainha da folha com o colmo, até o momento do pendoamento, representado pelas letras VT. Após o pendoamento, iniciam-se os estádios reprodutivos, que indicam o grau de amadurecimento do milho, começando do R1 e terminando no R6, como mostrados na tabela a seguir (Tabela 5) (MAGALHÃES e DURÃES, 2006).

Tabela 5. Estádios vegetativos e reprodutivos do milho.

Estádios vegetativos	Estádios Reprodutivos
VE: emergência	R1: embonecamento
V1: 1ª folha desenvolvida	R2: bolha d'água
V2: 2ª folha desenvolvida	R3: leitoso
V3: 3ª folha desenvolvida	R4: pastoso
V4: 4ª folha desenvolvida	R5: formação do dente
Vn: número total folhas desenvolvidas	R6: maturidade fisiológica
VT: pendoamento	

Fonte: Adaptado de (MAGALHÃES e DURÃES, 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e Período

O experimento foi realizado na área da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro - PESAGRO, no município de Seropédica - RJ (Latitude -22,759793, Longitude -43,668103) (Figura 2), no período de março a julho de 2022.



Figura 2. Imagem de satélite a área do experimento.

3.2 Clima

O clima da região é do tipo Aw segundo a classificação de Köppen (KÖPPEN, 1948), com uma estação seca que se estende de abril a setembro e outra estação quente e chuvosa de outubro a março. Os dados meteorológicos coletados na estação mais próxima a área do experimento, a estação [A601] Seropédica – Ecologia Agrícola – RJ (Latitude -22,757887, Longitude -43,684839), de precipitação pluvial mensal, média das temperaturas máximas e médias das temperaturas mínimas ocorridas no período do experimento, encontram-se na Figura 3

Observa-se que durante o período do experimento, entre 24 de março de 2022 e 09 de julho de 2022, ocorreram boas precipitações nos meses de março e abril, 185 e 201 mm respectivamente, porém nos meses seguintes a chuva foi escassa chovendo 4 mm em maio, 36 mm em junho e 8 mm em julho. No mês de maio não ocorreu nenhum dia com precipitação acumulada maior do que 10 mm e no mês de junho apenas um dia teve precipitação acumulada maior do que 10 mm. Na Figura 3 encontra-se o balanço hídrico do ano de 2022 para a região onde o experimento foi instalado e os estádios fenológicos da cultura durante o período.

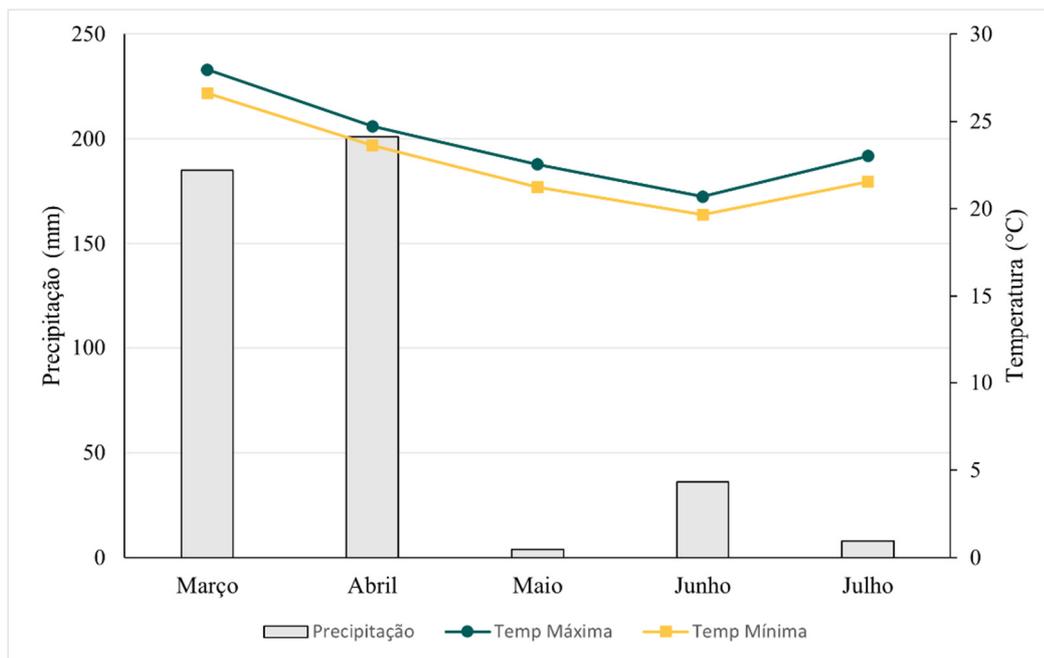


Figura 3. Precipitação pluvial mensal acumulada (barras), média das temperaturas máximas e média das temperaturas mínimas (linhas) ocorrida durante o período do experimento. Fonte: (INMET, 2023).

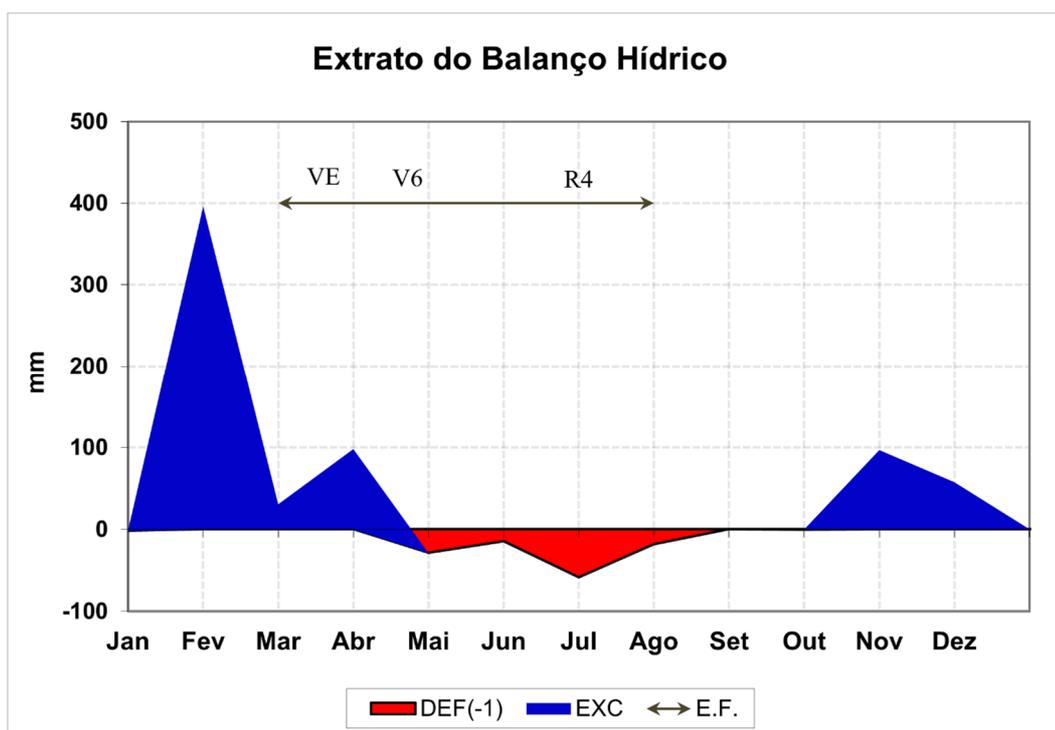


Figura 4. Gráfico do Balanço Hídrico durante o período experimental. Onde, DEF – Deficiência; EXC – Excesso; E.F. – Estádios fenológicos. Fonte: (INMET, 2023).

3.3 Solo e Preparo da Área

O solo da área onde o experimento foi instalado é classificado como Planossolo Háplico Distrófico, textura arenosa (FILHO, LUMBRERAS e SANTOS, 2000) (SANTOS, JACOMINE, et al., 2018). Foi realizado a coleta das amostras de solo, as quais foram submetidas às análises de atributos químicos e de granulometria. Os resultados estão nas Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6. Análise química do solo.

Profundidade	pH	P	K	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	S.B.	T	V (%)
cm	H ₂ O	mg/dm ³		cmol/dm ³							
0-20	5,71	9,81	34,88	1,32	1,32	0,45	0	2,1	1,86	3,93	48
20-40	5,27	3,91	20,26	1,08	0,89	0,34	0,14	3,1	1,28	4,38	29

Tabela 7. Análise física do solo.

Profundidade	Argila	Silte	Areia Total	Classificação Sistema Brasileiro – SBCS
cm	g/gg			
0 – 20	84,4	99,7	817,0	Arenosa
20 - 40	101,0	66,3	832,7	Arenosa

O solo foi preparado para o cultivo do milho de forma convencional, para isso utilizou-se grade aradora e niveladora (Figura 5).



Figura 5. Área preparada para plantio.

A adubação de plantio foi realizada de acordo com os resultados da análise de solo seguindo o manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro (FREIRE, BALIEIRO, et al., 2013), porém acrescentou-se 20% de P₂O₅ e 25% de K₂O na quantidade recomendada pelo manual com o intuito de evitar qualquer deficiência. Os fertilizantes escolhidos para o trabalho foram o superfosfato simples (19% de P₂O₅), não contendo nitrogênio, assim todo o nitrogênio foi fornecido pelos fertilizantes avaliados, e o cloreto de potássio (60% de K₂O). As quantidades aplicadas por hectare, no plantio, para os fertilizantes superfosfato simples e o cloreto de potássio foram 527 quilos e 83 quilos, respectivamente.

3.4 Instalação do Experimento

O plantio foi realizado no dia 24/03/2022 com o auxílio de uma semeadora-adubadora de três linhas (Figura 6), com o milho híbrido AG7098TRE da empresa Agrocerec, com ciclo precoce, possibilitando o plantio em segunda safra. Além disso, o híbrido apresenta as seguintes características agronômicas: excelente sistema radicular, alto porte de planta, bom empalhamento e bom stay green. O espaçamento entre linhas foi de 0,8 m e uma população de 62.500 plantas por hectare.



Figura 6. Plantio do milho.

Após o plantio as parcelas foram divididas, conforme croqui (Figura 7), cada uma com 28,8 m², composta por 6 linhas de plantas e 6 metros de comprimento. As duas linhas externas de cada parcela, e 2 m de cada rua (um metro de cada lado), foram considerados como bordadura, realizando as avaliações apenas nas quatro linhas centrais, o que resultou em uma área útil de 12,8 m². O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 4 x 2 (2 fontes de fertilizantes, 4 doses de nitrogênio e 2 modos de aplicação) com quatro repetições.



Figura 7. Croqui do experimento.

A aplicação dos fertilizantes escolhidos para a condução desse trabalho ocorreu após o plantio, em sulco afastado 5 cm da linha de plantio, conforme os tratamentos (Tabela 8).

Tabela 8. Tratamentos.

Tratamentos	Fertilizante	Dose total de N (kg ha-1)	Dose no plantio (kg ha-1)	Dose em cobertura (kg ha-1)	Estádio da cultura
T1	Ureia	40	40	-	Plantio
T2	Ureia	80	80	-	Plantio
T3	Ureia	120	120	-	Plantio
T4	Ureia	160	160	-	Plantio
T5	Ureia	40	12	28	V6
T6	Ureia	80	24	56	V6
T7	Ureia	120	36	84	V6
T8	Ureia	160	48	112	V6
T9	FEA	40	40	-	Plantio
T10	FEA	80	80	-	Plantio
T11	FEA	120	120	-	Plantio
T12	FEA	160	160	-	Plantio
T13	FEA	40	12	28	V6
T14	FEA	80	24	56	V6
T15	FEA	120	36	84	V6
T16	FEA	160	48	112	V6

Obs. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada.

Sendo o híbrido utilizado no experimento resistente ao herbicida glifosato, o controle do mato foi realizado nos estágios iniciais das ervas daninhas e do milho (V4 – V5) com o herbicida glifosato na dosagem de 2 litros do produto comercial por hectare.

No estágio V6 do milho, os tratamentos com aplicação parcelada, receberam os fertilizantes em cobertura próximo à linha de plantio.

O trabalho teve como um dos objetivos avaliar a utilização de um fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada em relação à uma fonte convencional de nitrogênio, no caso a ureia. A ideia da utilização desta fonte pressupõe algumas premissas, sendo a primeira que as empresas produtoras dos fertilizantes de eficiência aumentada relatam que para um determinado potencial de produção, este pode ser atingido com uma menor quantidade do nutriente, e por conseguinte foram avaliadas quatro doses de nitrogênio utilizando a fonte de N de eficiência aumentada, com 29% de nitrogênio, nas doses 40, 80, 120 e 160 kg/ha de N. Em conjunto, foi avaliado a forma de aplicação, o fertilizante foi aplicado de uma única vez no plantio e parcelado, parte no plantio e parte em cobertura, porque pressupõem que a liberação controlada do fertilizante poderia dispensar a necessidade do parcelamento reduzindo custo de uma nova reentrada na cultura. Estes tratamentos foram comparados com tratamentos que utilizaram ureia, também nas doses de 40, 80, 120 e 160 kg de N ha⁻¹ aplicados todo no plantio e parte no plantio e parte em cobertura. A razão para isso é que em sistemas de produção ocorre um parcelamento de aproximadamente 30% da dose no N no plantio e o restante é aplicado em cobertura quando a planta de milho está com 6 folhas (Estádio V6). Assim, esta comparação das dose de N na forma de ureia, duas estratégias de utilização, com as quatro doses, repetindo-se no fertilizante de eficiência aumentada (FEA), pode estatisticamente ser descrito por uma curva de regressão polinomial de primeira ou segunda ordem, que geraria uma equação, permitindo estimar qual quantidade de N na forma do fertilizante de eficiência aumentada seria necessária para conseguir a produção desejada, através da substituição da produção obtida com o fertilizante convencional na equação, e determinando a quantidade do fertilizante de eficiência aumentada correspondente àquela mesma produção, que foi esperada ser com menor quantidade de N na forma de fertilizante de eficiência aumentada.

3.5 Caracterização do Fertilizante de Eficiência Aumentada

O fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada da empresa TIMAC Agro é constituído com 29% de N, 5% de cálcio (Ca), 9% de enxofre (S), 1% de magnésio (Mg) e 0,3% de boro (B), com todos os nutrientes em um mesmo grânulo. Nervis e Gai (2013) escrevem que este fertilizante apresenta menores perdas por lixiviação e volatilização, sendo um fertilizante completo, que entrega de forma progressiva o nitrogênio para a planta, permitindo assim um melhor aproveitamento. Ademais, devido a sua forma de peletização, possibilita uma maior flexibilidade no momento da aplicação, tornando-se menos dependente das condições climáticas.

Segundo a empresa fabricante, a sua tecnologia consiste no envolvimento dos nutrientes contidos no grão com duas camadas, uma camada mineral e outra orgânica. Essa dupla camada é formada por uma matriz mineral e uma matriz orgânica, que em conjunto, servem como uma dupla barreira a penetração da água, promovendo a liberação gradual dos nutrientes. A matriz mineral é composta por sais de cálcio que formam uma estrutura cristalina de baixa solubilidade em água e que se deposita sobre a matriz orgânica. Já a matriz orgânica é composta por substâncias húmicas selecionadas que promovem a mobilidade e o aproveitamento dos nutrientes.

Em nota técnica, Alvarenga et al (2012), ressaltam que a tecnologia desse fertilizante de eficiência aumentada tem como grande diferencial a associação entre uma fração orgânica e inorgânica. A fração orgânica é composta pela molécula MPPA (molécula polifenólica ativada)

e a fração inorgânica é formada por carbonato de cálcio altamente reativo que juntas permitem um efeito de barreira física contra as perdas de lixiviação e volatilização do nitrogênio e criam um ambiente hidrofóbico que proporciona o efeito de liberação gradual do nitrogênio. Além da proteção descrita acima, a combinação entre essas duas frações promove a maior assimilação dos nutrientes do próprio fertilizante e a mobilização dos nutrientes disponíveis no solo, sem induzir a acidez provocada pelos dos adubos convencionais como a ureia, sulfato de Amônio e nitrato de amônio. Stankowski et al. (2015), complementa dizendo que o fertilizante também possui enxofre e magnésio, o que ajuda no metabolismo do nitrogênio.

3.6 Avaliação do Teor de Clorofila nas Folhas e Análise de Nitrogênio

Quando as plantas atingiram os estádios de desenvolvimento V3, V7, V11 e VT, utilizando-se a folha bandeira (FB) para coleta, foram medidos os teores relativos de clorofila em seis plantas escolhidas ao acaso em cada parcela com o uso do medidor eletrônico de teor de clorofila ClorofiLOG 1030 (Falker, Porto Alegre, Brasil). Em cada folha, totalmente expandida, sem a evidência de ataque de pragas ou doenças, foram medidos dois pontos na parte adaxial (APPEZZATO-DA-GLÓRIA e CARMELLO-GUERREIRO, 2006) (Figura 8).



Figura 8. Medição do teor de clorofila e coleta das amostras para envio ao laboratório.

As mesmas folhas mensuradas foram coletadas, identificadas e limpas com água para a remoção de qualquer contaminação em sua superfície e colocadas em estufa a 55°C por 72 horas, após esse período, foram enviadas ao laboratório Água Limpa (Manhuaçu – MG) para a quantificação do teor de nitrogênio através do método de digestão sulfúrica (SILVA, 2009).

3.7 Avaliações Agronômicas

No ponto de colheita das plantas para a confecção de silagem, o que correspondeu aos estádios R3/R4, estando a linha do leite entre 1/3 e 2/3 no grão (GALVÃO, BORÉM e PIMENTEL, 2017), dez plantas ao acaso de cada parcela foram cortadas rente ao solo para pesagem e para estimar a produtividade de massa verde por hectare de cada tratamento. Das plantas amostradas, separou-se uma sub amostra com cinco plantas para avaliação da altura,

medida da base do colmo, até a base da inflorescência masculina com o auxílio de uma fita métrica; diâmetro do colmo à vinte centímetro de altura da base da planta, medido através de paquímetro; e peso da espiga, realizado com uma balança digital com duas casas decimais.

3.8 Análises Estatísticas

Como citado anteriormente, foi montado um experimento fatorial $2 \times 4 \times 2$, distribuído em um delineamento em blocos ao acaso, sendo os fatores: (1) fertilizantes nitrogenados, (2) doses de nitrogênio e (3) modo de aplicação; com 4 repetições, somando 64 parcelas experimentais.

Foram investigadas as premissas fundamentais da análise de variância, a normalidade e homoscedasticidade da variância por meio do teste de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Em seguida os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), posteriormente ao teste de Tukey a nível de 5% quando significativos e à regressão para as doses, utilizando o software estatístico R Development Core Team, versão 4.2.0 (2022).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No decorrer do período experimental ocorreram condições climáticas adversas que atrapalharam o bom desenvolvimento das plantas prejudicando a condução do experimento. A irregularidade na distribuição das chuvas foi o principal fator (Figura 9), com excesso no primeiro mês e escassez nos meses seguintes, atrapalhando o desenvolvimento e principalmente a produtividade.

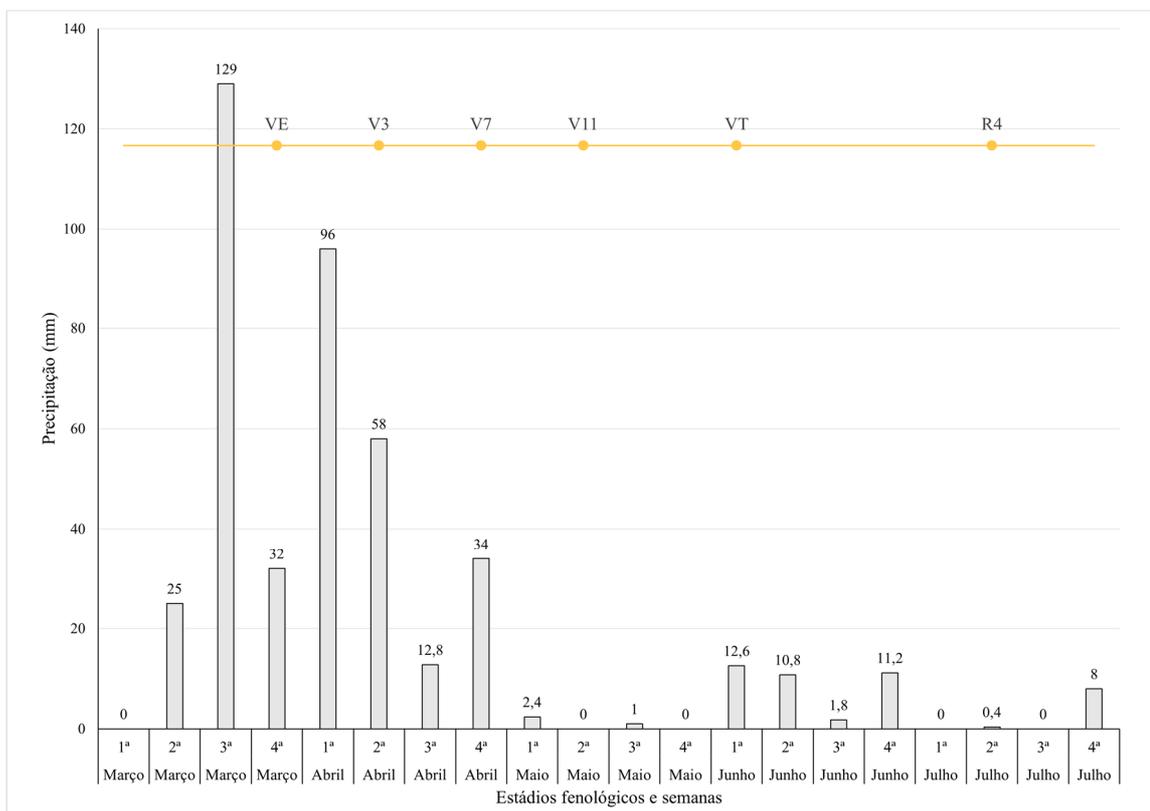


Figura 9. Distribuição da precipitação semanal e estádios fenológicos da cultura.

Conforme apresentado na figura 9, de uma forma geral, do estágio VE (Emergência das plantas) até o estágio V7 (Sétima folha desenvolvida), houve um bom suprimento de água, dando boas condições para a germinação e desenvolvimento inicial. Contudo, para a distribuição dos fertilizantes nitrogenados nos tratamentos que receberam adubos em cobertura no estágio V6, ocorreu um hiato na precipitação pluviométrica do momento da aplicação até o retorno da chuva, que durou 14 dias. Embora o bom volume de chuva ter beneficiado o desenvolvimento inicial das plantas, da 4ª semana de março até a 4ª semana de abril choveram 232 mm e levando em consideração a textura arenosa do solo, pode ter ocorrido lixiviação dos fertilizantes incorporados no plantio, principalmente a ureia, como descreve Sangoi et al. (2003) estudando a lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia em solo arenoso. Eles verificaram que a lixiviação da ureia era maior quando incorporada ao solo do que quando aplicada em superfície neste tipo de solo.

Após o estágio V7, as chuvas diminuíram drasticamente, sendo o mês de maio o período com menor precipitação, chovendo apenas 3,4 mm em todo o mês, dando início ao déficit hídrico que continuou até o final da cultura, como mostrado no balanço hídrico do período experimental. Nesse intervalo de maior déficit hídrico a cultura chegou ao estágio VT (Pendoamento) e logo depois ao estágio R1 (Embonecamento), fase de máxima exigência

hídrica. O déficit hídrico nessa fase provoca a redução da produtividade em 40 a 50%. Além disso, déficit antes da fase de embonecamento reduz a produtividade em 20 a 30% e após o embonecamento em 10 a 20%, podendo agravar dependendo da extensão do período de déficit (ANDRADE, ALBUQUERQUE, et al., 2006).

Durante o período do experimento, pode-se observar um alto no teor de N foliar de todos os tratamentos no estágio V3, acima dos valores descritos como adequados (25 – 35 g de N kg⁻¹) de acordo com Cantarella et al. (2022). Em V7 os teores diminuíram e se adequaram os valores da literatura. Essa situação pode ser explicada pelo efeito de diluição do nutriente com o crescimento da planta (COELHO, FRANÇA, et al., 2002) Constatou-se também, decréscimo no teor médio de clorofila e no teor médio de nitrogênio dos tratamentos a partir do estágio fenológico V11, prosseguindo até o estágio VT (último estágio analisado) (Figura 10), refletindo a condição de déficit hídrico ao qual as plantas estavam submetidas, com consequências na produtividade.

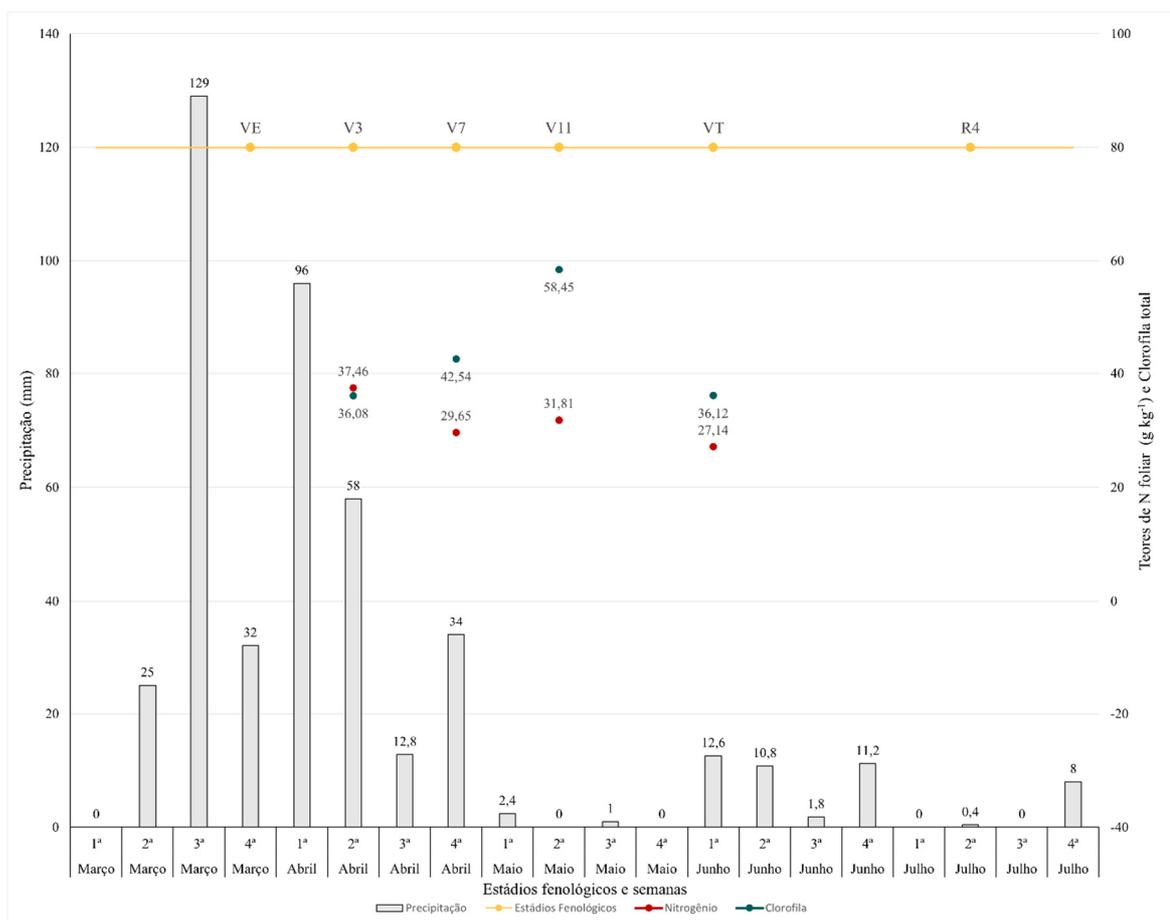


Figura 10. Distribuição da precipitação semanal, estádios fenológicos da cultura, teor de N foliar (g kg⁻¹) e clorofila.

Segundo Velho et al. (2020) a produtividade média de silagem nos experimentos conduzidos no Brasil é de 18,98 toneladas de matéria seca por hectare, o que corresponde à aproximadamente 55 toneladas de massa verde, isso porque o milho em ponto de silagem tem entre 30 e 35% de massa seca. Quando comparada a produtividade média de massa verde dos experimentos com a produtividade alcançada no presente estudo (Tabela 9), verifica-se que a produtividade foi muito baixa, provavelmente ocasionada pelo estresse hídrico suportado pelas plantas no decorrer do período experimental. A mesma situação foi relatada por Silva et al.

(2021) que avaliando parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas, concluíram que quando o estresse hídrico ocorre a partir do estágio fenológico VT acontece a não formação da espiga, e quando o déficit de água começa em R1 as espigas são mal formadas, com baixo rendimento, ocorre a redução da área foliar e da matéria seca.

Tabela 9. Desempenho agrônomo da produtividade em massa verde, altura da planta, diâmetro do colmo, peso da espiga e análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação dos fertilizantes ⁽¹⁾.

Tratamento Fertilizante	Produtividade (kg ha⁻¹)	Altura da planta (cm)	Diâmetro do colmo (cm)	Peso de espiga (g)
FEA	29.467	113,7	1,94	989
Ureia	29.006	111,9	1,86	955
Teste F	0,7805 ^{ns}	0,7312 ^{ns}	0,1813 ^{ns}	0,6453 ^{ns}
Doses de N (kg/ha)				
40	27.427	110,6	1,80	959
80	31.140	119,3	2,0	1082
120	28.925	109,4	1,87	921
160	29.455	112,0	1,94	926
Teste F	0,4644 ^{ns}	0,4955 ^{ns}	0,1291 ^{ns}	0,3655 ^{ns}
Aplicação				
Plantio	27.991	115,4	1,86	970
Cobertura	30.483	110,2	1,94	974
Teste F	0,1365 ^{ns}	0,3006 ^{ns}	0,2083 ^{ns}	0,9622 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x doses)	0,5807 ^{ns}	0,9409 ^{ns}	0,5906 ^{ns}	0,7623 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x aplicação)	0,3846 ^{ns}	0,5137 ^{ns}	0,0426*	0,4029 ^{ns}
Teste F (Doses x aplicação)	0,1329 ^{ns}	0,1209 ^{ns}	0,3781 ^{ns}	0,3449 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x doses x aplicação)	0,14 ^{ns}	0,389 ^{ns}	0,042*	0,6331 ^{ns}
Bloco	0,0022*	0*	0,0007*	0,1344 ^{ns}
CV (%)	22,49	17,44	12,98	29,7

⁽¹⁾ Apenas médias dentro do mesmo fator e coluna devem ser comparados. ^{ns} Não significativo. * Significante a 5% de probabilidade pelo teste F. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada. CV (%) – Coeficiente de variação.

Não ocorreram diferenças significativas para os fatores simples fertilizantes, doses e aplicação para as variáveis produtividade, altura de planta, diâmetro de colmo e peso de espiga. Porém, houve interação significativa entre os fatores fertilizantes, doses e aplicação ($p < 0,05$) para a variável diâmetro de colmo. Apesar de não haver diferenças significativas entre as médias de produtividade, altura de planta, diâmetro de colmo e peso da espiga, observou-se que dentro do fator fertilizante, o fertilizante de eficiência aumentada teve médias superiores em todas as variáveis analisadas.

Em relação ao fator aplicação, do mesmo modo que não houve diferença significativa entre as médias. Esse resultado ratifica o que observou Silva (2022), que testando diferentes manejos de adubação nitrogenada, não encontrou diferença significativa incorporando todo o nitrogênio no plantio com FEA e ureia ou quando aplicados em cobertura.

No que diz respeito as interações entre os fatores, foi verificada significância ($p < 0,05$) para a interação entre fertilizantes, dose e aplicação para a variável diâmetro de colmo. Desdobrando essa interação, observa-se que o fertilizante de eficiência aumentada foi superior a ureia na dose de 80 kg de N ha⁻¹ aplicado em cobertura (Tabela 10).

Tabela 10. Médias para o diâmetro do colmo (cm) para os fertilizantes em cada dose de N em cobertura ⁽¹⁾.

Fertilizantes	Doses (kg de N ha ⁻¹)			
	40 ^{ns}	80*	120 ^{ns}	160 ^{ns}
FEA ^{ns}	1,97	2,24 a	1,86	2,13
Ureia ^{ns}	1,84	1,67 b	2,02	1,82

⁽¹⁾ Apenas médias dentro da mesma coluna devem ser comparados. ^{ns} Não significativa. * Significante a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada.

A superioridade do FEA pode ser explicada pela menor taxa de volatilização que esse fertilizante apresenta em relação a ureia como descrito por Osorio e Khalajabadi (2012) e Santos et al. (2020). Fornasier Filho (2007) citado por Goes et al. (2013) relata que o N atua no crescimento vegetativo, influenciando diretamente na divisão e na expansão celular, proporcionando acréscimo em altura de planta e no diâmetro do colmo.

No que se refere ao diâmetro de colmo para ureia em relação as doses de N aplicadas no plantio, verifica-se que houve diferença significativa pelo teste F ($p < 0,05$), porém não se verificou um ajuste linear ou quadrático elevado (R^2 do modelo linear = 0,1606; R^2 do modelo quadrático = 0,2267), sendo realizado o teste de Scott-Knott para a diferenciação das médias (Tabela 11). Essa inconsistência nos dados pode ter sido influenciada pelo excesso de chuva que ocorreu logo após o plantio, como descrito anteriormente, provocando uma maior lixiviação dessa fonte de N, intensificada pela textura arenosa do solo.

Tabela 11. Médias para o diâmetro de colmo (cm) para os fertilizantes em cada dose de N no plantio ⁽¹⁾.

Fertilizantes	Doses (kg de N ha ⁻¹)			
	40 ^{ns}	80 ^{ns}	120 ^{ns}	160 ^{ns}
FEA ^{ns}	1,715	1,97	1,85	1,82
Ureia	1,670b	2,11a	1,75b	2,01a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, minúsculas nas linhas, diferem pelo teste de Scott-Knott à 5% de probabilidade. ^(ns) Não significativa. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada.

Em relação ao teor foliar de N (g kg⁻¹), foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para o fator simples doses, nos estádios V3, V11 e folha bandeira e para o fator aplicação, em todos os estádios fenológicos analisados (V3, V7 e V11) e na folha bandeira. Constatou-se também, interação significativa ($p < 0,05$) entre os fatores doses e aplicação no estádio V7 (Tabela 12).

Tabela 12. Teores médios de N (g kg⁻¹) nos estádios fenológicos V3, V7 e V11 e na folha bandeira. Análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação dos fertilizantes ⁽¹⁾.

Tratamento	V3 (g kg ⁻¹)	V7 (g kg ⁻¹)	V11 (g kg ⁻¹)	FB ⁽²⁾ (g kg ⁻¹)
Fertilizante				
FEA	37,96	29,41	31,88	27,37
Ureia	37,52	29,90	31,93	27,33
Teste F	0,5671 ^{ns}	0,5699 ^{ns}	0,9328 ^{ns}	0,9242 ^{ns}

Continua...

Continuação da Tabela 12.

Tratamento	V3 (g kg⁻¹)	V7 (g kg⁻¹)	V11 (g kg⁻¹)	FB⁽²⁾ (g kg⁻¹)
Doses de N (kg/ha)				
40	34,83	28,09	29,83	26,23
80	38,28	30,59	32,26	27,07
120	38,16	28,86	31,83	27,64
160	39,63	31,08	33,71	28,45
Teste F	0,0001*	0,0535 ^{ns}	0,0019*	0,0032*
Aplicação				
Plantio	38,82	30,73	29,57	26,45
Cobertura	36,63	28,58	34,25	28,25
Teste F	0,0029*	0,015*	0*	0,0001*
Teste F (Fertilizantes x doses)	0,6229 ^{ns}	0,2544 ^{ns}	0,4504 ^{ns}	0,0876 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x aplicação)	0,7656 ^{ns}	0,8302 ^{ns}	0,0527 ^{ns}	0,1042 ^{ns}
Teste F (Doses x aplicação)	0,3533 ^{ns}	0,0332*	0,1393 ^{ns}	0,6372 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x doses x aplicação)	0,4994 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,7365 ^{ns}	0,2493 ^{ns}
Bloco	0,4433	0,0004*	0,3018	0*
CV (%)	7,38	11,49	8,32	5,92

⁽¹⁾ Apenas médias dentro do mesmo fator e coluna devem ser comparados. ⁽²⁾ FB – Folha bandeira. ^{ns} Não significativo. * Significante a 5% de probabilidade pelo teste F. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada. CV (%) – Coeficiente de variação.

No estádio V3 o teor de N nas folhas foi influenciado ($p < 0,05$) pelas doses de N (kg ha⁻¹), verificando-se um ajuste linear (Figura 11). Resultado semelhante foi obtido por Soratto et al. (2010), que testando fontes de N alternativas, na ocasião um FEA e fertilizantes convencionais, como a ureia, relatou que as doses de N aplicadas em cobertura aumentaram linearmente os teores desse elemento nas folhas. Entretanto, vale destacar que os teores de N observados estão acima dos valores adequados geralmente encontrados na literatura, com exceção do teor referente a dose de 40 kg de N ha⁻¹ que se encontra dentro da faixa adequada. Malavolta et al. (1997) consideram adequados os valores entre 27,5 - 32,5 g de N kg⁻¹, Cantarella et al. (1997), citados por Goes et al. (2013) e Soratto et al. (2010), julgam adequados os valores entre 27 – 35 g de N kg⁻¹ e Danforth (2009) e Cantarella et al. (2022) estimam os valores entre 25 -35 g de N kg⁻¹.

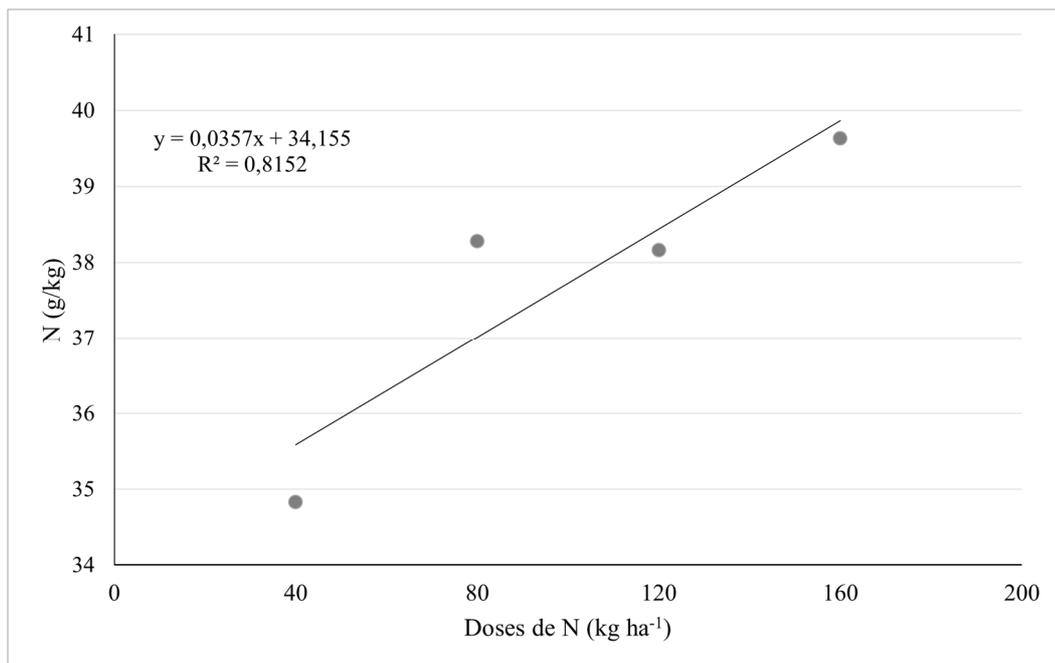


Figura 11. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V3 em função de doses de N na forma de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada e ureia.

Resultado diferente foi obtido por Sousa et al. (2016) que encontrou teor foliar de 21,3 g de N kg⁻¹ na folha do milho em estágio V3 com aplicação de 120 kg de N ha⁻¹ na forma de ureia, parcelada em 3 vezes. No estudo eles explicam que o baixo teor se deve a pouca absorção de N que a planta tem em V3 em virtude do início do crescimento das raízes e folhas. Contudo, Rocha et al. (2005) encontrou valores similares ao do presente estudo no estágio V4 com 48 e 120 kg de N ha⁻¹ aplicados na forma de ureia no plantio. Esses teores de N foliar maiores que os valores normalmente encontrados na literatura podem ser explicados devido a uma maior concentração do nutriente próximo às raízes, proveniente de ambos os fertilizantes, facilitando assim a sua absorção e acúmulo nos vacúolos. Ademais, as plantas possuem transportadores de nitrogênio de alta afinidade que aumentam a sua expressão quando ocorre o aumento das concentrações externas de N (SOUZA e FERNANDES, 2018).

No estágio V7 ocorreu interação significativa ($p < 0,05$) para os fatores doses e aplicação, influenciando no teor de N foliar. Observa-se pelo desdobramento da interação que o teor de N nas folhas aumenta com o incremento das doses de ambos os fertilizantes quando aplicados todo no plantio (Figura 11), o mesmo não ocorrendo em cobertura (Tabela 13).

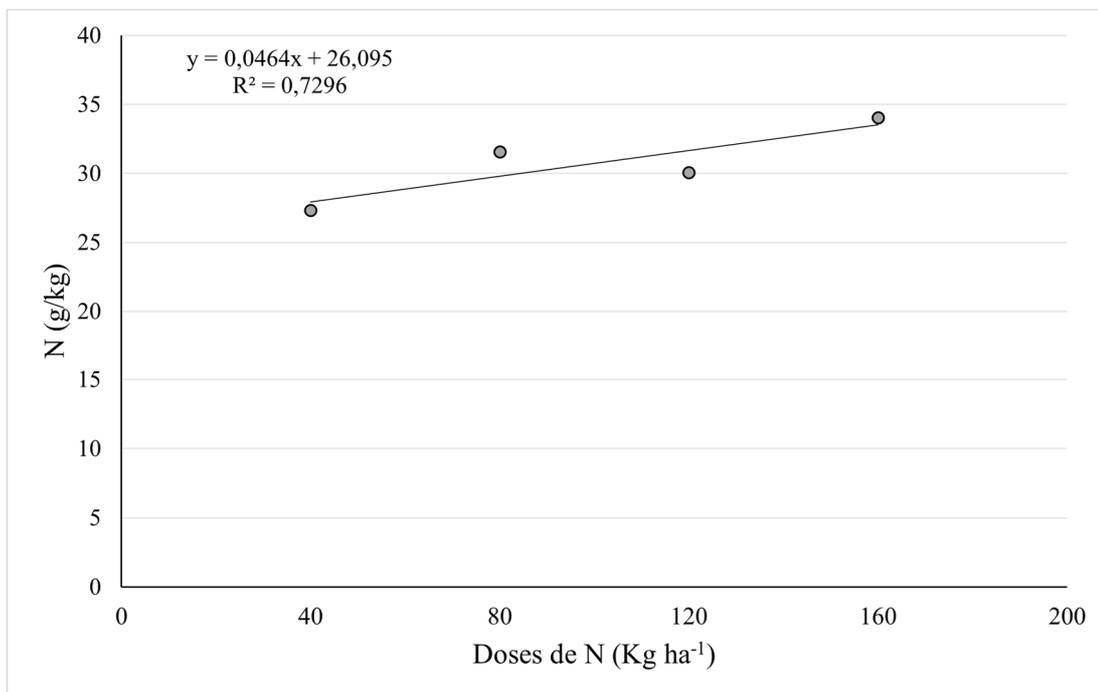


Figura 12. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V7 em função de doses de N na forma de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada e ureia aplicados no plantio.

Isso pode ter acontecido porque a aplicação da parcela dos fertilizantes em cobertura ocorreu no estágio V6, e desse momento até o estágio V7 ocorreram vários dias sem chuva e em apenas um dia choveu 34 mm. Essa condição climática pode ter provocado maiores perdas de N por volatilização do fertilizante ureia e prejudicado a liberação do nutriente do FEA, devido à uma maior necessidade de umidade que esse fertilizante tem para a liberação do nutriente. Um outro ponto a considerar é que Liu et al. (2019) relatam que a perda de amônia por volatilização geralmente tem uma relação positiva com a temperatura do ar, e do momento da aplicação em V6 até a estágio V7 as temperaturas médias variaram entre 22 e 27°C. Contudo, os valores de N neste estágio fenológico, mantiveram dentro dos limites considerados adequados encontrados na literatura, já citados anteriormente.

Verificou-se também pelo desdobramento, que na dose de 160 Kg de N ha⁻¹ a aplicação em plantio foi superior significativamente ($p < 0,05$) que a aplicação em cobertura (Tabela 13), muito provavelmente pelo que já foi discutido anteriormente, entretanto não ocorreu diferenças significativas para as outras doses.

Tabela 13. Média do teor foliar de N no estágio fenológico V7 para aplicação em cada dose de N⁽¹⁾.

Aplicação	Doses (kg de N ha ⁻¹)			
	40 ^{ns}	80 ^{ns}	120 ^{ns}	160
Plantio	27,32B	31,57AB	30,04Ab	34,02Aa
Cobertura ^{ns}	28,87	29,61	27,68	28,16b

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, diferem pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ^{ns} Não significante.

Em V11 não ocorreu interação significativa entre os fatores, entretanto houve significância para os fatores simples doses e aplicação ($p < 0,05$). Com o aumento das doses de

N, novamente se teve maiores teores de N foliar (Figura 13), repetindo o que aconteceu nos estádios fenológicos analisados anteriormente e dentro do esperado.

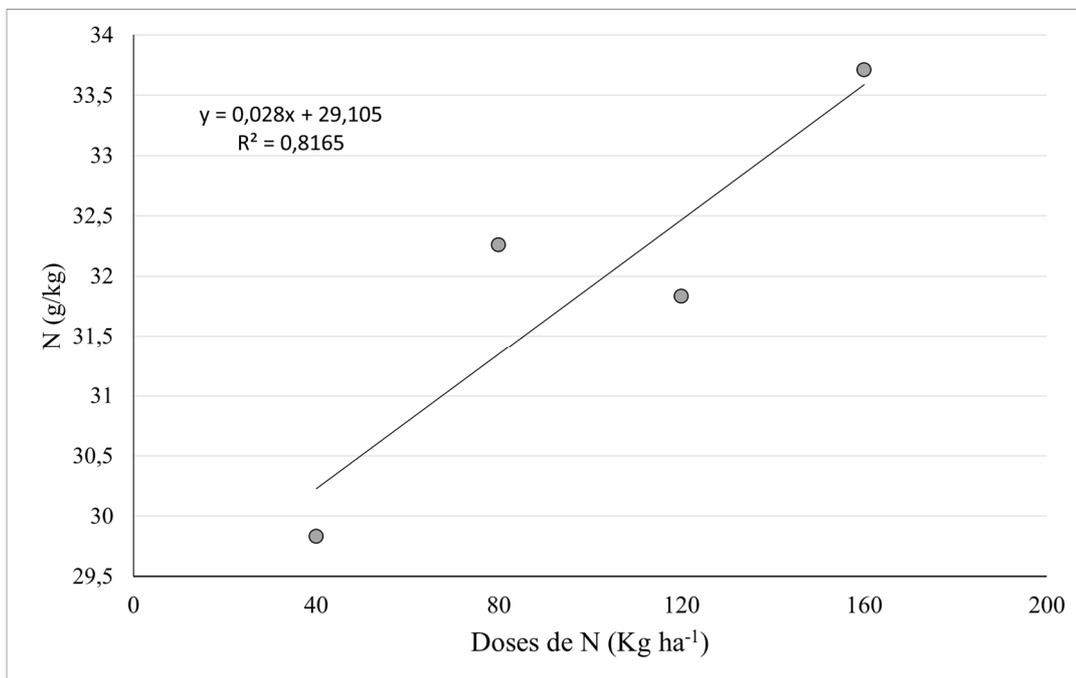


Figura 12. Teores médios de nitrogênio na folha no estágio fenológico V11 em função das doses de N.

Com relação a aplicação, constatou-se nesse estágio fenológico, onze folhas desenvolvidas, que a aplicação em cobertura proporcionou maiores teores de nitrogênio foliar ($p < 0,05$) do que a aplicação em plantio (Tabela 14).

Tabela 14. Média do teor foliar de N no estágio fenológico V11 para aplicação⁽¹⁾.

Aplicação	Teor de N (g kg ⁻¹)
Plantio	29,57b
Cobertura	34,25a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, minúsculas nas colunas, diferem pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Similares teores de N foram encontrados por Sousa et al. (2016) em V10, com a aplicação de ureia também em cobertura. Apesar da diferença significativa encontrada, ambos os fertilizantes proporcionaram teores de nitrogênio adequados com os parâmetros da literatura. A medição do teor de N foliar efetuada na folha bandeira, quando as plantas estavam no estágio fenológico VT, não apresentou interação significativa, entretanto mostrou novamente diferenças significativas para doses e aplicação ($p < 0,05$), como ocorreu em V11. Para doses, mais uma vez exibiu correlação linear com o teor foliar de N (Figura 14).

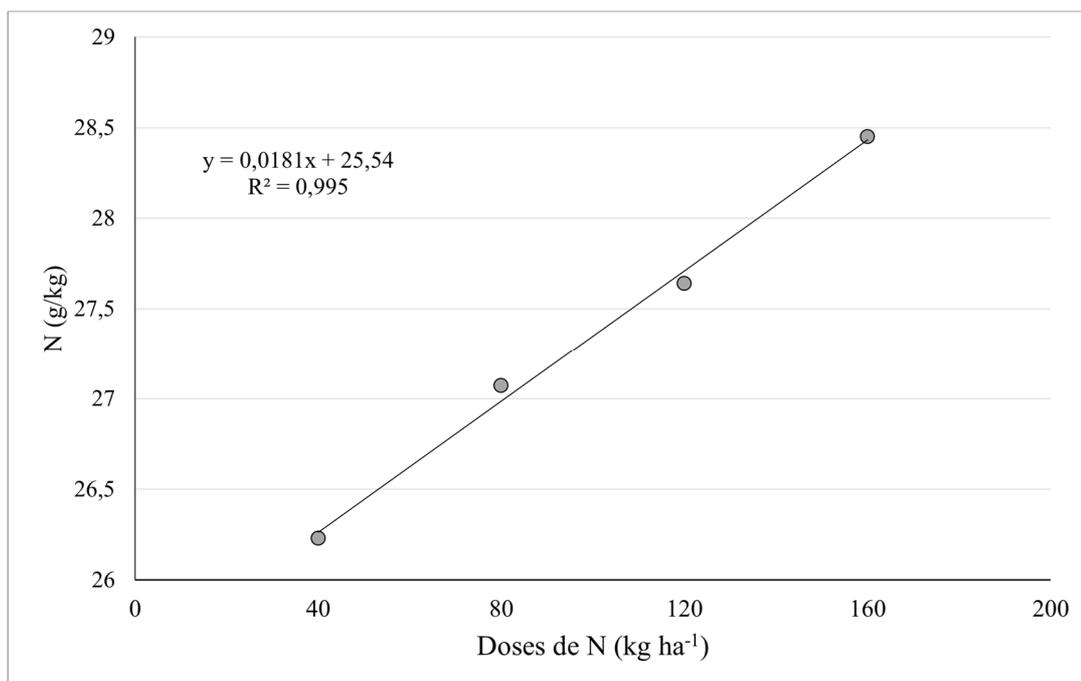


Figura 13. Teores médios de nitrogênio na folha bandeira no estágio fenológico VT em função das doses de N.

Contudo, para a dose de 40 kg de N ha⁻¹, o teor de N ficou abaixo dos valores considerados adequados e, de forma geral, todos os outros teores foram menores que os teores encontrados em V11 em suas respectivas doses, porém, continuaram dentro da faixa apropriada. Essa diminuição do teor de N, pode ser explicado pela condição de déficit hídrico que as plantas passaram entre o estágio V11 e o estágio VT.

Assim como ocorreu em V11, em VT, a média do teor de N foliar para os tratamentos que receberam N em cobertura foi maior significativamente que a média dos tratamentos que receberam todo o N no plantio. Além disso, o teor da aplicação em plantio ficou abaixo dos valores adequados, mostrando que essa estratégia para as condições do experimento, levou as plantas a passarem por uma deficiência do nutriente (Tabela 15).

Tabela 15. Média do teor foliar de N na folha bandeira, no estágio fenológico VT, para o fator aplicação⁽¹⁾.

Aplicação	Teor de N (g kg ⁻¹)
Plantio	26,45b
Cobertura	28,25a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, minúsculas nas colunas, diferem pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Quanto ao índice de clorofila, não ocorreu interação significativa nos estádios V3, V7 e folha bandeira, entretanto, verificou-se interação ($p < 0,05$) entre doses e aplicação no estágio V11. No que diz respeito aos fatores simples, houve significância em doses nos estádios V7 e V11 e em aplicação no estágio V7 e folha bandeira. Não ocorreram diferenças significativas em nenhum estágio e nem na folha bandeira para os fertilizantes, o que pode ser explicado pelo fato que as doses de nitrogênio e a forma de aplicação foram as mesmas. Desse modo, não ocorreu alteração no fornecimento de N proveniente de cada fonte que levasse a maiores ou menores índices, acreditando-se que com o suprimento de nitrogênio as plantas sintetizaram clorofila (Tabela 16).

Tabela 16. Índice de clorofila nos estádios fenológicos V3, V7 e V11 e na folha bandeira. Análise de variância entre os fertilizantes, as diferentes doses de nitrogênio e o tipo de aplicação⁽¹⁾.

Tratamento	V3 (g kg⁻¹)	V7 (g kg⁻¹)	V11 (g kg⁻¹)	FB⁽²⁾ (g kg⁻¹)
Fertilizante				
FEA	36,87	43,35	59,07	35,94
Ureia	35,29	41,74	58,81	36,30
Teste F	0,2045 ^{ns}	0,2153 ^{ns}	0,7576 ^{ns}	0,7024 ^{ns}
Doses de N (kg/ha)				
40	34,52	39,30	57,37	35,50
80	35,88	43,61	58,25	35,91
120	36,36	41,44	59,36	35,38
160	37,56	45,83	60,79	37,69
Teste F	0,38 ^{ns}	0,0053*	0,0406*	0,3029 ^{ns}
Aplicação				
Plantio	37,22	43,04	57,53	34,25
Cobertura	34,95	42,05	60,36	37,99
Teste F	0,0707 ^{ns}	0,4414 ^{ns}	0,0018*	0,0003*
Teste F (Fertilizantes x doses)	0,8324 ^{ns}	0,7526 ^{ns}	0,3367 ^{ns}	0,5713 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x aplicação)	0,6346 ^{ns}	0,1099 ^{ns}	0,1751 ^{ns}	0,4375 ^{ns}
Teste F (Doses x aplicação)	0,5453 ^{ns}	0,2058 ^{ns}	0,0373*	0,4449 ^{ns}
Teste F (Fertilizantes x doses x aplicação)	0,5429 ^{ns}	0,3684 ^{ns}	0,733 ^{ns}	0,1039 ^{ns}
Bloco	0*	0*	0,0708	0*
CV (%)	13,59	12,01	5,8	10,6

⁽¹⁾ Apenas médias dentro do mesmo fator e coluna devem ser comparados. ⁽²⁾ FB – Folha bandeira. ^{ns} Não significativo. *Significante a 5% de probabilidade pelo teste F. FEA – Fertilizante de eficiência aumentada. CV (%) – Coeficiente de variação.

Com respeito ao índice de clorofila no estágio V3, não ocorreu interação e nem diferenças significativas dentro dos fatores simples, entretanto, os valores medidos são similares ao encontrado por Sousa et al. (2016) nesse estágio. Esses mesmos autores relatam que o milho nessa fase absorve pouco N, pois suas raízes e folhas estão em início de crescimento e absorvem pouco nutrientes e por isso o índice tem um valor menor do que os outros estádios de desenvolvimento. Contudo, não aparenta que isso tenha acontecido no presente estudo, as plantas absorveram nitrogênio, mas ao que parece, acumularam esse nitrogênio e não converteram em clorofila.

Em V7, a leitura do clorofilômetro subiu com o aumento das doses, indicando que as plantas estavam convertendo grande parte do N fornecido pelos fertilizantes em clorofila, porém a correlação não foi alta ($R^2 = 0,6408$) (Figura 15). Ademais, como não se encontrou diferença significativa ($p < 0,05$) entre os fertilizantes para o índice de clorofila até esse momento, podemos supor que as tecnologias estavam suprindo as plantas de forma equivalente.

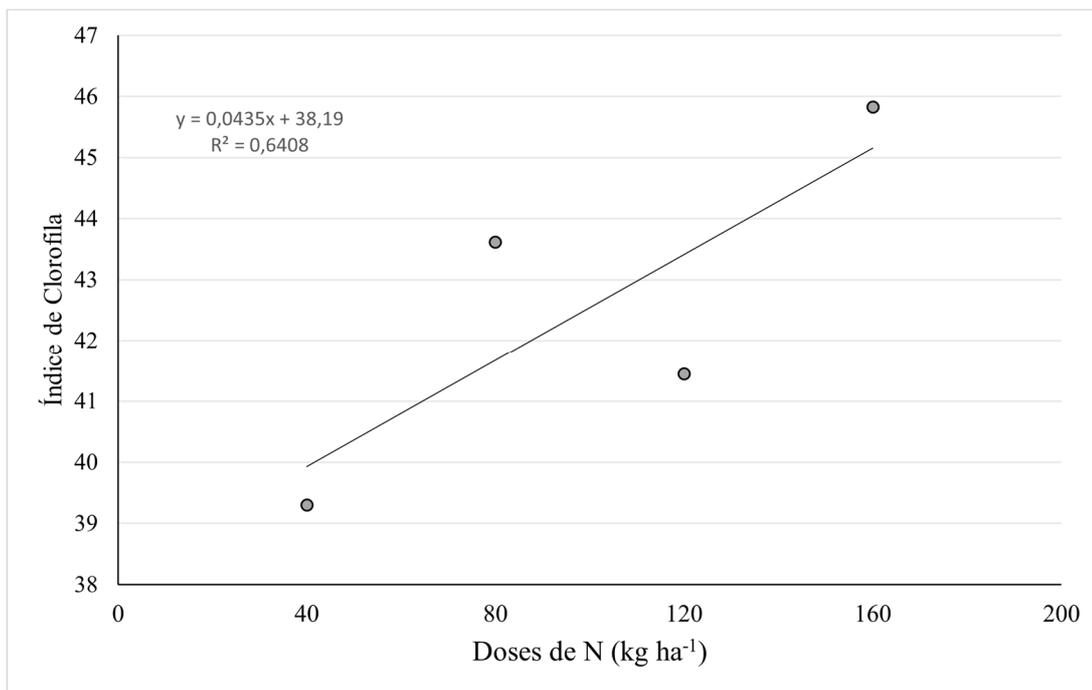


Figura 15. Teores médios do índice de clorofila no estágio fenológico V7 em função das doses de N.

Porém, Argenta et al. (2003) sugerem que nesse estágio boa parte do N absorvido é provavelmente utilizado para produção de outras estruturas na planta e não para a formação de clorofila. Ainda assim, Sousa et. al. (2016) argumentam que em V7 o sistema radicular do milho está em pleno funcionamento com reflexo na maior absorção de nutrientes, o que levaria à uma maior concentração de clorofila.

Em relação ao índice de clorofila no estágio V11, a interação dose X aplicação foi significativa ($p < 0,05$), verificando-se pelo desdobramento que conforme as doses de N aumentaram, o índice de clorofila seguiu o mesmo movimento para o tratamento onde o N foi colocado todo em plantio, ajustando-se de forma quadrática (Figura 16). Contudo, isso não aconteceu para os tratamentos que receberam N em cobertura no estágio V6 (Momento da aplicação dos fertilizantes em cobertura) (Tabela 17). Vale ressaltar, que os índices de clorofila nesse estágio foram maiores para os tratamentos que receberam N em cobertura, correspondendo com os maiores teores de N foliar encontrado no mesmo estágio para aplicação em cobertura.

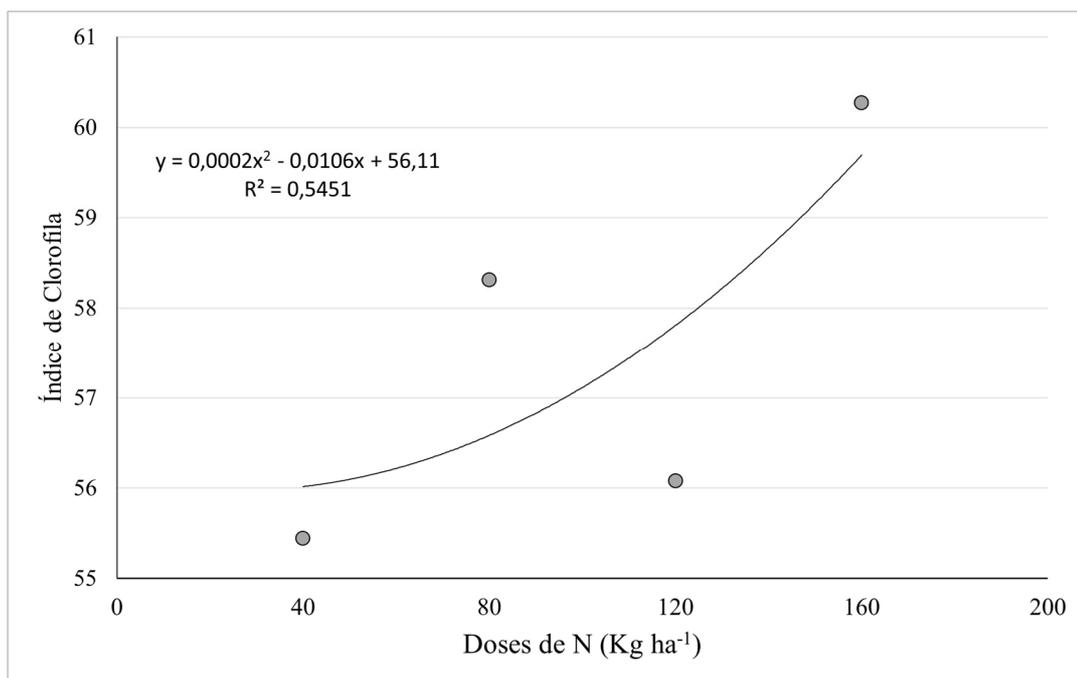


Figura 16. Teores médios do índice de clorofila no estágio fenológico V11 em função das doses de N e aplicação no plantio.

Tabela 17. Média do índice de clorofila no estágio fenológico V11 para aplicação em cada dose de N⁽¹⁾.

Aplicação	Índice de Clorofila			
	40	80ns	120	160ns
Plantio	55,44Bb	58,31AB	56,08ABb	60,27A
Coberturas	59,30a	58,18	62,63a	61,32

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, diferem pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ns Não significante.

Quando analisamos os teores de N foliar para os tratamentos que receberam todo o N em plantio, percebemos que os teores começam a diminuir a partir do estágio V11, muito provavelmente pelo efeito do estresse hídrico e pela lixiviação do N que foi colocado todo no plantio em ambas as fontes de fertilizantes. Porém, o grande aporte de N no plantio (160 kg de N ha⁻¹), proporcionou um maior teor de N foliar, refletindo no índice de clorofila para essa mesma dose, reafirmando o resultado obtido por Argenta et al. (2003).

Para o desdobramento aplicação dentro de doses, a aplicação em cobertura, para as diferentes doses, em ambos os fertilizantes, neste estágio de desenvolvimento, proporcionou, na sua maioria, maiores índices de clorofila do que a aplicação em plantio para as mesmas doses, como esperado (Tabela 17).

Ocorreu diferença significativa dentro do fator simples aplicação ($p < 0,05$) para o índice de clorofila, na folha bandeira, no estágio fenológico VT. A aplicação em cobertura resultou em índice maior do que a aplicação em plantio, seguindo o que ocorreu com o teor de N foliar neste mesmo momento (Tabela 18). Para um melhor entendimento de como os tratamentos se correlacionaram com as variáveis respostas, foi realizado um estudo dos componentes principais que podem ser visualizados na Figura 17.

Tabela 18. Média do índice de clorofila na folha bandeira no estágio fenológico VT para aplicação⁽¹⁾.

Aplicação	Índice de clorofila
Plantio	34,25b
Cobertura	37,99a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras diferentes, minúsculas nas colunas, diferem pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

De forma que quanto maiores os vetores, maior a influência da variável e quanto mais agrupadas, maior a correlação entre elas. Os dois primeiros eixos com os atributos agrônômicos da planta teste explicam 66,23% da variabilidade dos dados, sendo possível observar que os tratamentos T14, T16, T4, apresentaram associação com a produtividade e o diâmetro de colmo, entretanto os tratamentos T1 e T9, que receberam 40 kg de N ha⁻¹ no plantio de ambos os fertilizantes, tiveram baixa associação com produtividade e diâmetro de colmo, levando a deduzir que para as condições onde o experimento foi realizado, essa dose de N é insuficiente para ser ter boas produtividades. Por fim, apesar de Argenta et al. (2003) não ter encontrado correlação entre o teor de N e índice de clorofila no estágio fenológico V7, como citado anteriormente, os teores de N foliar e índice de clorofila correlacionaram positivamente em todos os estádios fenológicos, mostrando que parte do N assimilado foi convertido em clorofila, como era esperado.

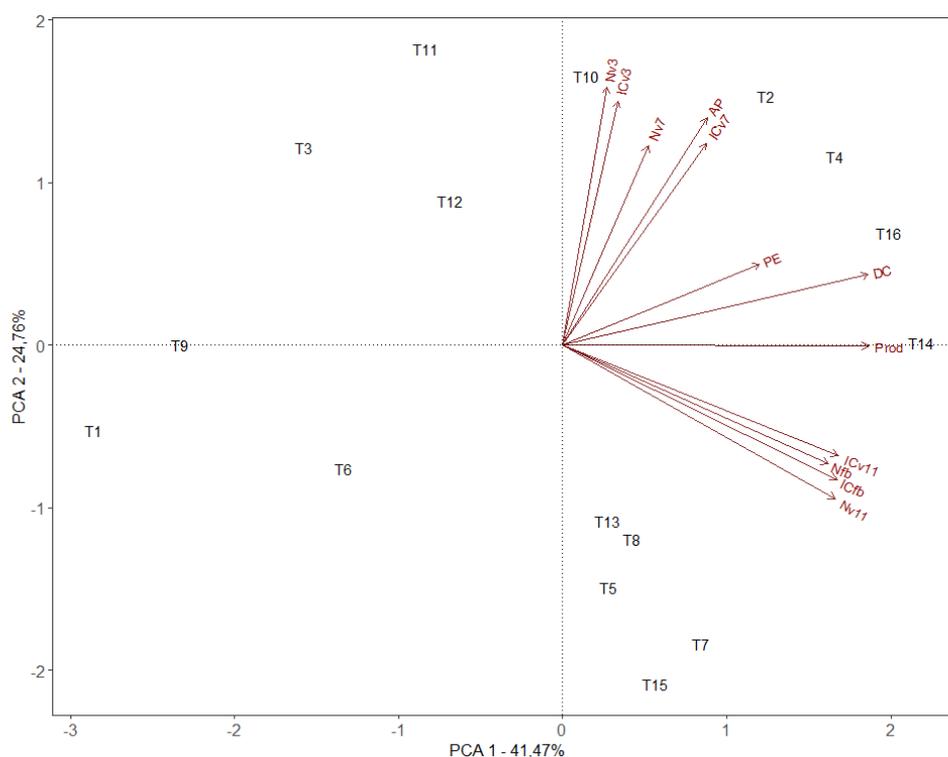


Figura 17. Análise dos componentes principais (PCA) 1 e 2, relacionando os tratamentos com características agrônômicas da planta teste. Prod – Produtividade; DC – Diâmetro do colmo; PE – Peso da espiga; AP – Altura da planta; Nvn – Teor de nitrogênio foliar nos estádios fenológicos; ICvn – Índice de clorofila nos estádios fenológicos; Tn – Tratamentos.

5. CONCLUSÕES

As estratégias de fornecimento de nitrogênio utilizadas, tudo no plantio e parte no plantio e parte em cobertura, bem como as diferentes doses e fontes de nitrogênio testadas, não diferiram em produtividade de massa verde de silagem, altura de planta e peso de espiga nas condições que o estudo foi realizado, apesar do fertilizante de eficiência aumentada apresentar as melhores médias em todos os atributos.

O FEA aplicado em cobertura na dose de 80 quilos de N ha⁻¹ produziu plantas com maiores diâmetros de colmo, refletindo diretamente na produtividade de massa verde de silagem, concluindo-se que para essa situação, o incremento de produtividade não é linearmente correlacionado com o aumento das doses de nitrogênio.

Ambas as fontes supriram adequadamente as plantas com nitrogênio nas diferentes doses e estratégia de manejo do N, com exceção da dose de 40 quilos de N ha⁻¹ aplicados todo em plantio para as duas fontes, o que inviabiliza a execução dessa estratégia e dose para o cenário vivenciado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade hídrica através da precipitação pluviométrica ou irrigação é fundamental para a aplicação de fertilizantes nitrogenados e para se obter boas produtividades na cultura do milho ou em qualquer outra. O desempenho das fontes testadas, bem como a produtividade da cultura podem ter sido afetados pelas condições edafoclimáticas vigentes durante a realização do experimento.

Acredito que conseguiríamos melhor evidenciar a resposta dos tratamentos se o experimento tivesse sido primeiramente montado em casa de vegetação e após isso, fosse levado para o campo os tratamentos mais promissores.

Um outro ponto a ser levado em consideração é que em um esquema fatorial triplo, temos muito fatores influenciando o resultado, e para uma melhor discussão dos dados, acredito que seria melhor desmembrar esse experimento em partes menores, assim menos fatores influenciariam no resultado.

É necessário que o experimento seja repetido em uma época com boa distribuição de chuva, permitindo uma melhor avaliação dos fertilizantes aplicados.

Apesar da grande influência da baixa precipitação que ocorreu no período experimental, prejudicando o desenvolvimento das plantas, espero que esse experimento ajude de algum modo o produtor rural.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, M. A. D.; LUCAS, T. A.; SANTINATO, R. **Menor acidez fisiológica com o uso da tecnologia Sulfammo MeTA 11, em lavoura cafeeira.** 38º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. Caxambu: CBPC. 2012. p. 356.
- ANDRADE, C. D. L. T.; ALBUQUERQUE, P. P.; BRITO, R. A. L.; RESENDE, M. Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico 85**, Sete Lagoas, Dezembro 2006. p. 12. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPMS/19629/1/Circ_85.pdf>. Acesso em: 17 Junho 2023.
- APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S. M. (Eds.). **Anatomia Vegetal**. 2ª. ed. Viçosa: UFV, 2006. 438 p.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, 13, n. 2, 2001. 158-167. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbfv/a/bq6hkDRMFbTkJGtNfCWGCf/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 20 Novembro 2021.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, n. 1, 2003. 109-119. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/RR37kTnjW5HWkhWpsbtsQsr/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 20 Novembro 2021.
- BAWEJA, P.; KUMAR, S.; KUMAR, G. Fertilizers and Pesticides: Their Impact on Soil Health and Environment. In: GIRI, B.; VARMA, A. **Soil Biology**. [S.l.]: Springer, v. 59, 2020. Cap. 15, p. 265 - 286.
- BERNARDO, M. P.; GUIMARÃES, G. G. F.; MAJARONA, V. F.; RIBEIROA, C. Controlled release of phosphate from LDH structures: dynamics in soil and application as smart fertilizer. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, 14 February 2018. 5152-5161. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssuschemeng.7b04806>>. Acesso em: 02 Abril 2023.
- BONO, J. A. M.; SETTI, J. C. A.; TRAESEL, E. J.; RANNO, S. K. Fonte nitrogenada de liberação lenta na cultura do milho em um latossolo argiloso na região de Maracaju em Mato Grosso do Sul. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, 15, n. 2, 2011. 101-110. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/260/26024358009.pdf>>. Acesso em: 10 Novembro 2021.
- BORÉM, A.; GALVÃO, J. C. C.; PIMENTEL, M. A. (Eds.). **Milho do Plantio à Colheita**. 2ª - atualizada e ampliada. ed. Viçosa: UFV, 2017. 382 p.
- BRASIL. **Lei N° 6.894, 16 Dezembro 1980**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/16894.htm>. Acesso em: 02 Abril 2023.
- CABEZAS, W. A. R. L.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de ureia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32, Dezembro 2008. 2331-2342.

Disponível em:
<<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/JL87ZTKYdNjNfytrbm76YSw/?format=pdf&lang=pt>>.
Acesso em: 16 Janeiro 2022.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. B.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. 1ª. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. Cap. 7, p. 376-449.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.). **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo - Boletim Técnico 100**. 2ª ed. rev. atual. ed. Campinas: Instituto Agrônômico - FUNDAG, 1997. 285 p.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR., D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. (Eds.). **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico (IAC), 2022.

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do Solo**. 2ª. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. 221 p.

CASSIMIRO, J. B.; ROCHETTI, A. C. A.; HEINRICHS, R.; CASTILLO, E. O. F. Ammonia volatilization and marandu grass evaluation under doses and sources of nitrogen fertilizers. **Research, Society and Development**, 9, n. 8, 15 jul. 2020. e526985823. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5823>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

CHENG W., J. L. J. X. ; YU, J.; LI, J.; ZHANG, J.; TANG, C.; NIU, T.; PATIENCE, B. E. Effect of Slow-release fertilizer on soil fertility and growth and quality of wintering chinese chives (*Allium tuberm Rottler ex Spreng.*) ing greenhouses. **Scientific reports**, 11, 13 April 2021. 1-14. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-021-87593-1>>. Acesso em: 31 Dezembro 2021.

CIVARDI, E. A.; NETO, A. N. S.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. R. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, 41, n. 1, Janeiro 2011. 52-59. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pat/a/WJv68h4hGqXTg3w4zsNGXqd/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 10 Novembro 2021.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E.; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C. **Cultivo do Milho: Diagnose foliar do estado nutricional da planta**. Comunicado Técnico 45. ed. Sete Lagoas: Embrapa, 2002. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/487010/1/Com45.pdf>>. Acesso em: 27 Junho 2023.

COSKUN, D.; BRITTO, D. T.; SHI, W.; KRONZUCKER, H. How Plant Root Exudates Shape the Nitrogen Cycle. **Trends in Plant Science**, 22, n. 8, August 2017a. 661-673. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138517300936?casa_token=At0JoZB8UhgAAAAA:1SPGnsvwZ8hhx_qb5yOHHwPIOZFxnUdQYgqoS_cqUUTH13zV2wrwfs wd51_894PzJlkHxC5B8>. Acesso em: 11 mar. 2023.

COSKUN, D.; BRITTO, D. T.; SHI, W.; KRONZUCKER, H. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. **Nature Plants**, 06 June 2017b. 17074. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nplants201774>>. Acesso em: 09 Outubro 2022.

DANFORTH, A. T. (Ed.). **Corn Crop Production: Growth, Fertilization and Yield**. New York: Nova Science Publishers, 2009. 377 p.

DAVIES, B.; COUTLER, J. A.; PAGLIARI, P. H. Timing and Rate of nitrogen fertilization influence maize yield and nitrogen use efficiency. **Plos One**, 29 May 2020. Disponível em: <<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0233674>>. Acesso em: 09 Abril 2023.

DONG, T.; SHANG, J.; CHEN, J. M.; LIU, J.; QIAN, B.; MA, B.; MORRISON, M. J.; ZHANG, C.; LIU, Y.; SHI, Y.; PAN, H.; ZHOU, G. Assessment of portable chlorophyll meters for measuring crop leaf chlorophyll concentration. **Remote Sensing**, 11, n. 22, 19 November 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/22/2706>>. Acesso em: 09 Abril 2023.

DUAN, Q.; JIANG, S.; CHEN, F.; LI, Z.; MA, L.; SONG, Y.; YU, X.; CHEN, Y.; LIU, H.; YU, L. Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review. **Industrial Crops & Products**, 192, February 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669022015588?casa_token=AoWreDMTO_AAAAAA:mVNTst4d_ls17LVgI3kiFiW9nmg-Eie9MWt20liHbdQ2gVpqBO6noIsMiHMjri0BIp-krIjfqmM>. Acesso em: 18 Março 2023.

DUAN, Y.; SUN, G. Q.; ZHANG, J.; HOU, J. W.; LI, Y. F.; SHA, N.; YUN, L. N. Effect of controlled-release urea on tuber yield na nitrogen use efficiency of potato. **Journal North Agriculture**, 44, p. 25-30, 2016.

FERNANDES, F. M.; SORATTO, R. P.; FERNANDES, A. M.; SOUZA, E. F. C. Chlorophyll meter-based leaf nitrogen status to manage nitrogen in tropical potato production. **Agronomy Journal**, 113, n. 2, 7 January 2021. 1733-1746. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/agj2.20589>>. Acesso em: 99 Abril 2023.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. D.; SANTOS, L. A. (Eds.). **Nutrição mineral de plantas**. 2ª. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. 670 p.

FILHO, A. D. C.; LUMBRERAS, J. F.; SANTOS, R. D. D. **Os Solos do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2000. 36 p.

FILHO, D. F. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576 p.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: FUNEP, 2007. 576 p.

FOWLER, D.; COLYLE, M.; SKIBA, U.; SUTTON, M. A.; CAPE, J. N.; REIS, S.; SHEPPARD, L. J.; JENKINS, A.; GRIZZETTI, B.; GALLOWAY, J. N.; VITOUSEK, P.; LEACH, A.; BOUWMAN, A. F.; BUTTERBACH-BAHL, K.; DENTENER, F.; STEVEN, D. The global nitrogen cycle in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of The Royal Society B**, 368, 05 July 2013. 1-13. Disponível em: <<https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rstb.2013.0164>>. Acesso em: 16 Janeiro 2022.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 18, n. 12, 18 Julho 2014. 1262-1267. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tmZZ7mtKDyXmw8hTFSZ8sDP/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 15 Janeiro 2022.

FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V. B. (Eds.).

Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro. Brasília: Universidade Rural, 2013.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. (Eds.). **Milho do plantio à colheita.** 2ª ed. Viçosa: UFV, 2017. 382 p.

GOES, R. J.; RODRIGUES, R. A. F.; TAKASU, A. T.; ARF, O. Características Agronômicas e produtividade do milho sob fontes e doses de nitrogênio em cobertura no inverno. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 13, n. 3, 2013. 205-259. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/104521/1/Caracteristicas-agronomicas.pdf>>. Acesso em: 17 junho 2023.

GOOGLE **Google Finanças**, 2023. Disponível em: <<https://www.google.com/finance/quote/AUD-BRL>>. Acesso em: 08 Abril 2023.

GOOGLE **Google Finanças**, 2023. Disponível em: <<https://www.google.com/finance/quote/EUR-BRL>>. Acesso em: 08 Abril 2023.

GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, Y.; ZHANG, M.; LIU, Z.; TIAN, X.; ZHANG, S.; ZHAO, C.; LU, H. Modeling and Optimizing the Synthesis of Urea-formaldehyde Fertilizers and Analyses of Factors Affecting these Processes. **Scientific Reports**, 8, 14 March 2018. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-22698-8>>. Acesso em: 31 Março 2023.

HAZRA, G. Different Types of Eco-Friendly Fertilizers: An Overview. **Sustainability in Environment**, 1, n. 1, 2016. 54-70. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/268085799.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

HUMPHREYS, J.; LAN, R.; TAO, S. Development and Recent Progress on Ammonia Synthesis Catalysts for Haber–Bosch Process. **Advanced Energy & Sustainability Research**, 10 December 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/aesr.202000043>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

IGC. Supply and Demand. **International Grains Council**, 2023. Disponível em: <<https://www.igc.int/en/markets/marketinfo-sd.aspx>>. Acesso em: 14 May 2023.

INMET. [A601] Seropédica - Ecologia Agrícola - RJ. **Instituto Nacional de Meteorologia**, 2023. Disponível em: <<https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 15 Junho 2022.

JIANG, X. L.; CHEN, B. C.; ZHANG, M.; LI, C. L.; MA, L.; CHEN, J. Q. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 28, n. 1, p. 215-220, 2014

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal.** 3ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. 430 p.

KÖPPEN, W. **Climatologia:** con un estudio de los climas de la tierra. [S.l.]: Fondo de Cultura Económica, 1948. 479 p.

KUMAR, N.; SAMOTA, S. R.; VENKATESH, K.; TRIPATHI, S.C. Global trends in use of nano-fertilizers for crop production: Advantages and constraints – A review. **Soil and Tillage Research**, 228, April 2023. 105645. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198723000120?via%3Dihub>>. Acesso em: 31 Março 2023.

- LAM, S. K.; SUTER, H.; BAI, M.; WALKER, C.; MOSIER, A. R.; GRINSVEN, H. V.; CHEN, D. Decreasing ammonia loss from an Australian pasture with the use of enhanced efficiency fertilizers. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 283, 19 June 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880919301537?via%3Dihub>>. Acesso em: 06 Abril 2023.
- LAWRENCIA, D.; KIATWONG, S.; LOW, D. Y. S.; GOH, B. H.; GOH, J. K.; RUKTANONCHAI, U. R.; SOOTTITANTAWAT, A.; LEE, L. H.; TANG, S. Y. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. **Plants**, 10, 26 January 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/238>>. Acesso em: 31 Março 2023.
- LI, Y.; HU, M.; TENUTA, M.; MA, Z.; GUI, D.; LI, X.; ZENG, F.; GAO, X. Agronomic evaluation of polymer-coated urea and urease and nitrification inhibitors for cotton production under drip-fertigation in a dry climate. **Scientific Reports**, 10, 30 January 2020. 1-8. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-020-57655-x>>. Acesso em: 29 Dezembro 2021.
- LIU, S.; WANG, X.; YIN, X.; SAVOY, H. J.; MCCLURE, A.; ESSINGTON, M. E. Ammonia Volatilization Loss and Corn Nitrogen Nutrition and Productivity with Efficiency Enhanced UAN and Urea under No-tillage. **Scientific Reports**, 9, 9 April 2019. 6610-6622. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-019-42912-5>>. Acesso em: 19 Dezembro 2021.
- LOUARN, G.; BEDOUSSAC, L.; GAUDIO, N.; JOURNET, E.; MOREAU, D.; JENSEN, E. S.; JUSTES, E. Plant nitrogen nutrition status in intercrops - a review of concepts and methods. **European Journal of Agronomy**, 124, March 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030121000010?via%3Dihub>>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- MA, Q.; WANG, M.; ZHENG, G.; YAO, Y.; TAO, R.; ZHU, M.; DING, J.; LI, C.; GUO, W.; ZHU, X. Twice-split application of controlled-release nitrogen fertilizer met the nitrogen demand of winter wheat. **Field Crops Research**, 267, 15 June 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842902100109X?via%3Dihub>>. Acesso em: 09 Abril 2023.
- MAESTRELO, P. R.; BUZZETTI, S.; FILHO, M. C. M. T.; GARCIA, C. M. P.; RODRIGUES, M. A. C.; LINO, A. C. M.; ANDREOTTI, M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, 9, n. 2, 2014. 192-199. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/1190/119031262006.pdf>>. Acesso em: 10 Novembro 2021.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da Produção de Milho**. Embrapa milho e Sorgo. Sete Lagoas. 2006.
- MAITI, R.; RODRÍGUEZ, H. G.; KUMARI, C. A.; BEGUN, S.; RAJKUMAR, D. **Advances in Maize Science: Botany, Production, and Crop Improvement**. 1ª. ed. [S.l.]: Apple Academic Press, 2022. 273 p.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1ª. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres Ltda, 2006. 628 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. D. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed. rev. e atual. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARTÍNEZ-DALMAU, J.; BERBEL, J.; ORDÓÑEZ-FERNÁNDEZ, R. Nitrogen Fertilization. A Review of the Risks Associated with the Inefficiency of Its Use and Policy Responses. **Sustainability**, n. 13, 18 May 2021. 5625. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5625>>. Acesso em: 09 Outubro 2022.

MARTINS, I. S.; CAZETTA, J. O.; FUKUDA, A. J. F. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, Julho 2014. p. 271-279. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pat/a/BH4LGMvhtYfvz5yjJ5Sg8sF/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 10 Novembro 2021.

MEHMOOD, A.; NIAZI, M. B. K.; HUSSAIN, A.; BEIG, B.; JAHAN, Z.; ZAFAR, N.; ZIA, M. Slow-release urea fertilizer from sulfur, gypsum, and starch-coated formulations. **Journal of Plant Nutrition**, 42, 30 April 2019. 1218-1229. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2019.1609502?scroll=top&needAccess=true&role=tab>>. Acesso em: 02 Abril 2023.

MILAGRES, C. D. C.; FONTES, P. C. R.; ABREU, J. A. A.; SILVA, J. M.; FIGUEIREDO, M. N. Plant growth stage and leaf part to diagnose sweet corn nitrogen status using chlorophyll sensor and scanner image analysis. **Journal of Plant Nutrition**, 44, n. 18, 6 May 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01904167.2021.1921197>>. Acesso em: 09 Abril 2023.

NADARAJAN, S.; SUKUMARAN, S. Chemistry and toxicology behind chemical fertilizers. In: LEWU, F. B.; VOLOVA, T.; THOMAS S.; RAKHIMOL, K. R. **Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture**. [S.l.]: Academic Press, v. 1, 2021. Cap. 12, p. 195 - 229.

NERVIS, F. V.; GAI, V. F. Fontes de nitrogênio em grama Tifton 85. **Cultivando o Saber**, 6, n. 1, 2013. 191 - 201. Disponível em: <<https://cultivandosaber.fag.edu.br/index.php/cultivando/article/view/507>>. Acesso em: 30 Abril 2023.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. ; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. 1ª. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OSORIO, H. G.; KHALAJABADI, S. S. Volatilización del nitrógeno a partir de diferentes fuentes fertilizantes en la etapa de crecimiento vegetativo del café. **Cenicafé**, 63, n. 1, 2012. 132-143. Disponível em: <<https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/518>>. Acesso em: 19 Fevereiro 2023.

PAHALVI, H. N.; RAFIYA, L.; RASHID, S.; NISAR, B.; KAMILI, A. N. Chemical Fertilizers and Their Impact on Soil Health. In: DAR, G. H.; BHAT, R. A.; MEHMOOD, M. A.; HAKEEM, K. R. **Microbiota and Biofertilizers, Vol 2**. [S.l.]: Springer, v. 2, 2021. Cap. 1, p. 1-20.

PAN, B. ; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 232, 16 September 2016. 283-289. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880916304224>>. Acesso em: 08 Abril 2023.

PEREIRA, H. S.; LEÃO, A. F.; VERGINASSI, A.; CARNEIRO, M. A. C. Ammonia Volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa,

v. 33, n. 6, Novembro 2009. 1685-1694. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/1802/180215871017.pdf>>. Acesso em: 11 Novembro 2021.

PINZÓN-SANDOVAL, E. H.; BALAGUERA-LÓPEZ, H. E.; ALMANZA-MERCHÁN, P. J. Evaluation of SPAD Index for Estimating Nitrogen and Magnesium Contents in Three Blueberry Varieties (*Vaccinium corymbosum* L.) on the Andean Tropics. **Horticulturae**, 9, n. 2, 17 February 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2311-7524/9/2/269>>. Acesso em: 9 Abril 2023.

PRADO, R. D. M. **Mineral nutrition of tropical plants**. 1ª. ed. Jaboticabal: Springer, 2021. 339 p.

PURNOMO, C. W.; SAPUTRA, H. Manufacturing of slow and controlled release fertilizer. In: LEWU, F. B.; VOLOVA, T.; THOMAS, S.; RAKHIMOL, R. K. **Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture**. 1ª. ed. [S.l.]: Academic Press, v. 1, 2021. Cap. 6, p. 256.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2022.

RAJAN, M.; SHAHENA, S.; CHANDRAN, V.; MATHEW, L.. Controlled release of fertilizers - Concept, reality, and mechanism. In: LEWU, F. B.; VOLOVA, T.; THOMAS, S.; RAKHIMOL, R. K. **Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture**. 1ª. ed. [S.l.]: Academic Press, v. I, 2021. Cap. 3, p. 41 - 56.

RAJI, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAKHIMOL, R. K.; THOMAS, S.; KALARIKKAL, N.; JAYACHANDRAN, K. Nanotechnology in controlled-release fertilizers. In: LEWU, F. B.; VOLOVA, T.; THOMAS, S.; RAKHIMOL, R. K. **Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture**. [S.l.]: Academic Press, v. 1, 2021. Cap. 10, p. 169 - 181.

ROBERTSON, G. P.; VITOUSEK, P. M. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. **Annual review of environment and resources**, 34, n. 1, 28 July 2009. 94-125. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev.environ.032108.105046>>. Acesso em: 16 out. 2022.

ROCHA, R. N. C.; GALVÃO, J. C. C.; TEIXEIRA, P. C.; MIRANDA, G. V.; AGNES, E. L.; PEREIRA, P. R. G.; LEITE, U. T. Relação do índice spad, determinado pelo clorofilômetro, com teor de nitrogênio na folha e rendimento de grãos em três genótipos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 4, n. 2, 2005. 161-171. Disponível em: <<http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/137/965>>. Acesso em: 20 Novembro 2021.

RUI, Y.; RUARK, M. D.; ANDRASKI, T. W.; BUNDY, L. G. Assessing the Benefit of Polymer-Coated Urea for Corn Production on Irrigated Sandy Soils. **Agronomy, Soils, and Environmental Quality**, 3, n. 2, 7 February 2019. 473 - 481. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2018.02.0091>>. Acesso em: 9 Abril 2023.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, 33, Jan 2003. 65-70. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/cr/a/J6ztdjBwxXsZ5BfyfvVWCXw/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 17 Junho 2023.

SANTOS, C. F.; PINTO, S. I. C.; CARVALHO, L. E.; RAMALHO, P. O. R. Avaliação de fertilizantes de eficiência aumentada aplicados em cobertura sem incorporação nos parâmetros morfológicos e produtivos na cultura do café. **ForScience**, Formiga, 8, n. 1, Abril 2020. Disponível em: <<http://www.forscience.ifmg.edu.br/forscience/index.php/forscience/article/view/347/287>>. Acesso em: 16 Janeiro 2022.

SANTOS, H. G. D.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1107206/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>>. Acesso em: 03 Outubro 2021.

SANTOS, W. D. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; PACHECO, E. P.; BARROS, I.; FERNANDES, M. F.; BATISTA, J. N.; BENDER, E. P.; SOUZA, H. N.; JANTALIA, C. P. Ammonia volatilization and yield of corn fertilized with different nitrogen sources in the Brazilian semiarid. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 55, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/pab/a/bTsB65g88bSdbrX977fPQCB/?format=html&lang=en>>. Acesso em: 01 Abril 2023.

SHAHENA, S.; RAJAN, M.; CHANDRAN, V.; MATHEW, L. Conventional methods of fertilizer release. In: LEWU, F. B.; VOLOVA, T.; THOMAS S.; RAKHIMOL, K. R. **Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture**. 1ª. ed. [S.l.]: Academic Press, v. I, 2021. Cap. 1, p. 256.

SHOJI, S. Innovative use of controlled availability fertilizers with high performance for intensive agriculture and environmental conservation. **Science in China Series C: Life Sciences**, 48, September 2005. 912 - 920. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03187129>>. Acesso em: 16 abr. 2023.

SILVA, F. C. D. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª revista e ampliada. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. S.; TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, Botucatu, 1, n. 1, Maio 2021. 30-41. Disponível em: <<https://energia.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4254/2805>>. Acesso em: 17 Junho 2023. Edição Especial.

SILVA, T. H. D. **Desempenho Agrônômico do milho cultivado sob diferentes manejos de adubação nitrogenada**. Universidade Federal da Fronteira Sul. Chapecó, p. 54. 2022.

SILVEIRA, D. C.; BONETTI, L. P.; TRAGNAGO, J. L.; NETO, N.; MONTEIRO, V. Caracterização agromorfológica de variedades de milho crioulo (*Zea mays* L.) Na região noroeste do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 1, 2015. 01-11. Disponível em: <<http://gcm.gastronomia.ufrj.br/wp-content/uploads/2019/11/Milho-Crioulo.pdf>>. Acesso em: 11 Novembro 2021.

SILVEIRA, P. M. D.; GONZADA, A. C. D. O.; SARMENTO, P. H. L. **Passa a Passo para o Uso do Clorofilômetro Portátil na Quantificação do Nitrogênio a Ser Aplicado em Cobertura no Feijoeiro**. EMBRAPA. Santo Antônio de Goiás, p. 4. 2017.

- SIMS, J. T.; VASILAS, B. L.; GARTLEY, K. L.; MILLIKEN, B.; GREEN, V. Evaluation of Soil and Plant Nitrogen Tests for Maize on Manured Soils of the Atlantic Coastal Plain. **Agronomy Journal**, March 1995. 213-222. Disponível em: <<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1995.00021962008700020013x>>. Acesso em: 20 November 2021.
- SOLAIMALAI, A.; ANANTHARAJU, P.; IRULANDI, S.; THERADIMANI, M. **Maize Crop: Improvement, Production, Protection and Post Harvest Technology**. 1^a. ed. [S.l.]: Narendra Publishing House, 2021. 687 p.
- SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; LAMPERT, T. A. M. D. C. E. V. D. N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, 41, n. 4, Outubro 2010. 511-518. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rca/a/v7DkYFhkgwmZFqrT6XjWSgR/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 29 Junho 2023.
- SOUSA, R.; CARVALHO, M.; SILVA, M. D.; GOMES, S.; GUIMARÃES, W. Leituras de clorofila e teores de N em fases fenológicas do milho. **Colloquium Agrariae**, 11, n. 1, Janeiro 2016. 57-63. Disponível em: <<https://revistas.unoeste.br/index.php/ca/article/view/1272>>. Acesso em: 25 Junho 2023.
- SOUZA, E. D. F. C. D.; SORATTO, R. P. Efeito de fontes e doses de nitrogênio em cobertura, no milho safrinha, em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 5, n. 3, 2006. 395-405. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Emerson-Souza/publication/237752122_Efeito_de_Fontes_e_Doses_de_Nitrogenio_em_Cobertura_no_Milho_Safrinha_em_Plantio_Direto/links/542947e10cf26120b7b5b371/Efeito-de-Fontes-e-Doses-de-Nitrogenio-em-Cobertura-no-Milho-Sa>. Acesso em: 18 Junho 2023.
- SOUZA, S. R. D.; FERNANDES, M. S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. D.; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2^a. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2018. Cap. 9, p. 670.
- STANKOWSKI, S.; HURY, G.; JURGIEL-MAŁECKA, G.; GIBCYŃSKA, M.; KOWALEWSKA, R. The Effect of Nitrogen Fertilizers on Chemical Composition of Spring Triticale Grain. **Acta Scientiarum Polonorum. Agricultura**, 14, n. 4, 2015. 73 - 80. Disponível em: <<https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-dc9e98f4-a54e-44ed-8d02-cae192b5ade9>>. Acesso em: 30 Abril 2023.
- STEVENSON, F. J. (Ed.). **Nitrogen in Agricultural Soils**. Madison: American Society of Agronomy, Inc., 1982.
- SUBRAMANIAN, K. S.; MANIKANDAN, A.; THIRUNAVUKKARASU, M.; RAHALE, C. S. Nano-fertilizers for Balanced Crop Nutrition. In: RAI, M., RIBEIRO, C.; MATTOSO, L.; DURAN, N. **Nanotechnologies in Food and Agriculture**. [S.l.]: Springer, 2015. Cap. 3, p. 69-80.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6^a. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35, Abril 2011. 493-502. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sLFYvMczLq4rf95RKL6YdTJ/?format=html>>. Acesso em: 15 Janeiro 2022.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 95, 10 July 2014. 1131-1142. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.6812>>. Acesso em: 30 Dezembro 2021.

TRENKEL, M. E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2^a. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

USDA. World Agricultural Production. **United State Department of Agriculture**, May 2023. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 14 May 2023.

VEJAN, P.; KHADIRAN, T.; ABDULLAH, R.; AHMAD, N. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. **Journal of Controlled Release**, 339, 10 November 2021. 321-334. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168365921005320?via%3Dihub>>. Acesso em: 31 Março 2023.

VELHO, J. P.; ZARDIN, P. B.; JOBIM, C. C.; HAYGERT-VELHO, I. M. P.; ALESSIO, D. R. M.; GIOTTO, E.; CONCEIÇÃO, G. M.; GEHRKE, C. R. Meta-analysis of corn plants, green fodder (ensilage), and silages of different types of maize hybrids used in experimental conditions in Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, 41, n. 1, Janeiro 2020. 237-254. Disponível em: <<https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/36209>>. Acesso em: 17 Junho 2023.

YOUSEFTABAR, S.; FALLAH, A.; DANESHIYAN, J. Effect of split application of nitrogen fertilizer on growth and yield of hybrid rice (GRH1). **Advances in Environmental Biology**, 6, n. 9, 2012. 2485 - 2589. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=024c4bd9f5159ad26219e4de895750fd8719f49e>>. Acesso em: 9 Abril 2023.

ZHANG, G.; ZHAO, D.; LIU, S.; LIAO, Y.; HAN, J. Can controlled-release urea replace the split application of normal urea in China? A meta-analysis based on crop grain yield and nitrogen use efficiency. **Field Crops Research**, 275, 1 January 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429021002896?via%3Dihub>>. Acesso em: 09 Abril 2023.

ZHU, B. G.; Effect of controlled release nitrogen fertilizer on soil nitrate nitrogen and plant total nitrogen and yield of corn. **Chinese Agricultural Science Bulletin**, v. 30, n. 6, p. 220-223, 2014.