

**INSTITUTO FEDERAL**  
**GOIANO**  
Câmpus Rio Verde

**AGRONOMIA**

**USO DE FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA  
AUMENTADA NA AGRICULTURA**

**FRANCIELE DE FREITAS SILVA**

**Rio Verde, GO**  
**2024**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE**

**AGRONOMIA**

**USO DE FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA  
AGRICULTURA**

**FRANCIELE DE FREITAS SILVA**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Castoldi

Rio Verde – GO

Abril 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

SSI586      Silva, Franciele de Freitas  
u      Uso de fertilizantes de eficiência aumentada na  
agricultura / Franciele de Freitas Silva; orientador  
Gustavo Castoldi. -- Rio Verde, 2024.  
41 p.

TCC (Graduação em Agronomia) -- Instituto Federal  
Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Adubação. 2. eficiência aprimorada. 3. adubos  
inteligentes . I. Castoldi, Gustavo, orient. II.  
Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:      Não      Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:      /      /

O documento está sujeito a registro de patente?      Sim      Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?      Sim      Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local

/ /  
Data

*Franciele de Freitas Silva*

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 2/2024 - DG-POLO/POLO/IFGOIANO

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos quatro dias do mês de abril de 2024, às 09:00 horas, reuniu-se, de forma online, a banca examinadora composta pelos membros: Prof. Dr. Gustavo Castoldi (orientador/ IF Goiano - Campus Rio Verde), Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (membro/IF Goiano - Campus Rio Verde) e Prof. Dr. José Milton Alves (membro/IF Goiano - Campus Rio Verde) para examinar o Trabalho de Curso intitulado "**Uso de fertilizantes de eficiência aumentada na agricultura**" da discente Franciele de Freitas Silva, matrícula nº 2019102200240627 do Curso de Bacharelado em Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida a estudante para a apresentação oral do TC e houve arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO da estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros avaliadores.

*(Assinado Eletronicamente)*

Gustavo Castoldi

Orientador

*(Assinado Eletronicamente)*

Carlos Ribeiro Rodrigues

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

José Milton Alves

Membro

**Observação:**

( ) O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- Jose Milton Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 15/04/2024 14:20:06.
- Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/04/2024 12:00:34.
- Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/04/2024 11:46:18.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/04/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 589853

Código de Autenticação: de92d7da5d



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Polo de Inovação

Rodovia Sul Goiana Km 01, None, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75.901-970

None

*À Deus,  
Ao meu pai (Valdeci) e meu irmão  
(Wagner),  
E em especial minha mãe, Francisca (In  
Memorian)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o apoio nesta jornada.

Teu amor incondicional e a Tua graça sustentaram-me e permitiram chegar até aqui.

À minha família, por seu amor incondicional, encorajamento e compreensão durante todos os momentos desafiadores e gratificantes que enfrentamos juntos.

Agradeço, em especial, à minha mãe Francisca Pereira de Freitas da Silva (*In memoriam*) que fez muito por mim ao longo da sua vida, sempre sonhava os meus sonhos comigo e que sem dúvidas era a pessoa mais orgulhosa das minhas conquistas.

Aos meus professores, pela orientação, conhecimento compartilhado e inspiração ao longo deste processo.

Aos professores e membros da banca examinadora, pela disposição em avaliar este trabalho e pelas sugestões construtivas que contribuíram para o seu aprimoramento.

Aos meus colegas de curso, pelas trocas de experiências, pelas conversas, incentivo e companheirismo que tornaram esta jornada mais leve e significativa.

Por fim, agradeço a todos os amigos, familiares e demais pessoas que de alguma forma contribuíram para este trabalho, mesmo que não mencionados nominalmente.

Meu mais profundo agradecimento a todos vocês.

## RESUMO

SILVA, Franciele de Freitas Silva. **USO DE FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA AGRICULTURA**. 2024. 41.p Monografia (Curso de Bacharelado de Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2024.

Os fertilizantes são importantes insumos agrícolas na produção vegetal e têm relação direta com o aumento e manutenção de altas produtividades. A eficiência das adubações está diretamente relacionada às características específicas dos adubos, ao seu uso consciente e à práticas de manejo que preservem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo. O estudo trata dos fertilizantes de eficiência aumentada nitrogenados, potássicos e fosfatados, destacando sua importância na agricultura contemporânea e as diversas estratégias e tecnologias para otimizar o uso de nutrientes. Com uma abordagem abrangente, são explorados os tipos, métodos de sua obtenção e as vantagens desses fertilizantes em termos de eficiência nutricional e sustentabilidade ambiental O estudo também analisa as tendências emergentes e perspectivas futuras das tecnologias inovadoras para fertilizantes.

**Palavras-chave:** Adubação, eficiência aprimorada, adubos inteligentes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	11
<b>2.1</b>	<b>Mercado de Fertilizantes: Perspectivas e Tendências</b> .....	11
<b>2.2</b>	<b>Fertilizantes Convencionais</b> .....	13
<b>2.3</b>	<b>Fertilizantes de Eficiência Aumentada</b> .....	16
2.3.1	Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada .....	18
2.3.1.2	Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura...	22
2.3.2	Fertilizantes fosfatados de eficiência aumentada .....	24
2.3.2.1	Fertilizantes fosfatados de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura.....	27
2.3.3	Fertilizantes potássicos de eficiência aumentada .....	29
2.3.3.1	Fertilizantes potássicos de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura.....	30
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	33
<b>4</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	34

# USO DE FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA AGRICULTURA

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem desempenhado papel crucial no impulsionamento da produtividade nas culturas agrícolas em escala global. Esse progresso é resultado não apenas do aprimoramento do manejo do solo, da utilização de genótipos melhorados e do controle eficiente de pragas e doenças (FREITAS, 2017), mas também do crescente interesse dos produtores no manejo do solo, dada sua influência direta na produtividade das culturas e nos custos associados aos fertilizantes.

O Brasil, ocupando a quarta posição entre os maiores consumidores de fertilizantes do mundo, destaca-se não apenas como um expressivo consumidor, mas também como o principal importador desse insumo. O potássio (K) é o principal nutriente aplicado no Brasil, representando 38% do total, seguido pelo fósforo (P) com 33%, e o nitrogênio (N) com 29%. As culturas de soja, milho e cana-de-açúcar figuram como protagonistas, correspondendo a mais de 72% do consumo total de fertilizantes no país (MAPA, 2022).

O mercado brasileiro de fertilizantes, que movimentou US\$ 8,24 bilhões em 2022, projeta uma expansão para US\$ 12,96 bilhões até 2028 (MORDOR, 2023). Esse cenário é acompanhado pelo desenvolvimento constante de novas tecnologias, cujo foco reside em maximizar a eficiência do uso de fertilizantes na agricultura. Essas tecnologias abrangem a aplicação de fertilizantes de baixa solubilidade, de liberação lenta ou controlada, ou ainda estabilizados com inibidores (FELIX & WALTER, 2021), visando minimizar as perdas ambientais (CHIOCHETA JÚNIOR, 2019).

Dentro desse contexto, os fertilizantes de eficiência aumentada emergem como uma inovação significativa no setor de fertilizantes. Essa análise explora o avanço tecnológico dos fertilizantes de eficiência aumentada no mercado agrícola, examinando sua eficácia e impacto em comparação com os fertilizantes convencionais. Com uma abordagem que explora as vantagens desses fertilizantes em termos de eficiência nutricional e sustentabilidade ambiental, o estudo também analisa as tendências emergentes, mercado e perspectivas futuras para essa tecnologia inovadora.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Mercado de Fertilizantes: Perspectivas e Tendências

O mercado de fertilizantes apresenta tendências promissoras impulsionadas pela busca por práticas agrícolas sustentáveis e eficientes. As projeções para o mercado global de fertilizantes indicam aumento expressivo, passando de estimadamente US\$ 212,59 bilhões em 2023 para US\$ 262,41 bilhões até 2028, crescendo a um crescimento anual composto (CAGR) de 4,30% durante o período (MORDOR INTELLIGENCE, 2024).

A demanda crescente está ligada à sustentabilidade agrícola, eficiência no uso de nutrientes, inovações tecnológicas, conscientização ambiental, expansão em mercados emergentes, colaborações entre indústria e instituições de pesquisa, regulamentações ambientais mais rigorosas e a customização de fertilizantes para atender necessidades específicas. Essas tendências refletem a busca global por soluções que otimizem a produção agrícola de maneira sustentável (GPCA, 2019).

Nos próximos anos a agricultura enfrentará desafios decorrentes da perspectiva de que em muitas regiões do mundo haverá uma diminuição no número de pessoas envolvidas na atividade agrícola, conforme apontado por Tavares e Harbeli (2011). Além disso, a necessidade de novas tecnologias surge como uma demanda urgente, visando obter maior produtividade em áreas menores e reduzir a necessidade de mão de obra, como discutido pelos mesmos autores.

Embora muitos países expressem a intenção de diminuir o uso de fertilizantes e aumentar a eficiência de uso dos nutrientes, implementar medidas eficazes ainda é um desafio (IFA, 2023). Entretanto, a perspectiva é de melhoria na eficiência do uso de fertilizantes, impulsionada pelo crescimento do uso de irrigação, fertilizantes solúveis em água e outros produtos especiais, como fertilizantes de liberação controlada, e fertilizantes nitrogenados estabilizados, impulsionado por vários fatores, incluindo regulamentações ambientais.

Na União Europeia, a estratégia visa reduzir a utilização de fertilizantes em pelo menos 20% e diminuir as perdas de nutrientes em pelo menos 50% até 2030. Essa tendência se reflete em medidas mais rígidas adotadas por alguns países, como a proibição da aplicação de ureia sem inibidores de urease ou incorporação no solo em até quatro horas. Em países como os Holanda e Nova Zelândia, as regras visam reduzir significativamente a poluição por N até 2030 (IFA, 2023).

Essa crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis tem impulsionado o mercado de fertilizantes, promovendo inovações e ajustes para atender a padrões mais rigorosos e

eficientes. Do ponto de vista tecnológico, os esforços de pesquisa estão concentrados no desenvolvimento de fertilizantes mais eficientes e sustentáveis, abrangendo estabilização de urease, nitrificação, controle de liberação e outras tecnologias. (INPI, 2023). Países líderes, como China, Estados Unidos, Coreia, Japão, Escritório Europeu de Patentes (EPO), Rússia, Brasil, Índia, Canadá e Austrália, estão na vanguarda desses desenvolvimentos, depositando patentes e impulsionando a inovação no setor de fertilizantes (INPI, 2023).

O desenvolvimento de novos fertilizantes nitrogenados com patentes depositadas tem sido mais frequentemente nos campos tecnológicos relativos ao aumento da eficiência dos fertilizantes (estabilização de urease e nitrificação, controle de liberação e outros) através de fertilizantes contendo ureia, compostos e aditivos para regular a urease e a nitrificação no solo; fertilizantes contendo sais de amônia ou a própria amônia e misturas de fertilizantes (POLIDORO, 2022; INPI, 2023).

Já para os fertilizantes fosfatados e potássicos, as principais buscas tecnológicas no setor ocorrem em termos de tecnologias relativas a correlação aos fertilizantes nitrogenados (especialmente na utilização de compostos de fosfato de amônio, tais como MAP e DAP); inserção de matriz orgânica na composição do fertilizante; aditivos; presença de micronutrientes (como boro, zinco, cobre); inovações relativas à forma do fertilizante (como fertilizantes na forma líquida); técnicas de granulação; tecnologias de revestimento e/ou encapsulamento; composições com propriedades de liberação modificada ou controlada; composições em que há presença de enxofre (muitas vezes na forma elementar ou no revestimento); tecnologia de polímeros; composições contendo microrganismos; presença de ácidos fúlvico e húmico; polifosfatos; nanotecnologia embarcada; micronização; fertilizantes potássicos a partir das fontes mais convencionais, como o cloreto e o sulfato de potássio; fertilizantes potássicos obtidos a partir de rochas vulcânicas; fertilizantes a partir de resíduos animais; fertilizantes oriundos de resíduos da cadeia sucroalcooleira; fertilizantes potássicos produzidos por meio de processos térmicos (POLIDORO, 2022; ANGELO et al., 2021; ASHRAF et al., 2022; DHEWA, 2015; INPI, 2023).

Diante desse cenário, o futuro do mercado de fertilizantes está intrinsecamente ligado ao avanço dessas tecnologias e à capacidade de atender às demandas crescentes por uma agricultura mais sustentável e produtiva.

## 2.2 Fertilizantes Convencionais

Os adubos ou fertilizantes são substâncias químicas, minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, que contêm um ou mais nutrientes essenciais para as plantas (BRASIL, 2014; ZONTA, STAFANATO, PEREIRA, 2021). Constituem um amplo portfólio destinado a atender às variadas necessidades agrícolas, selecionados com base nas especificidades da cultura, do solo e nos objetivos de cultivo. Estão disponíveis em diversas formas, como pós, grânulos, líquidos ou cristais.

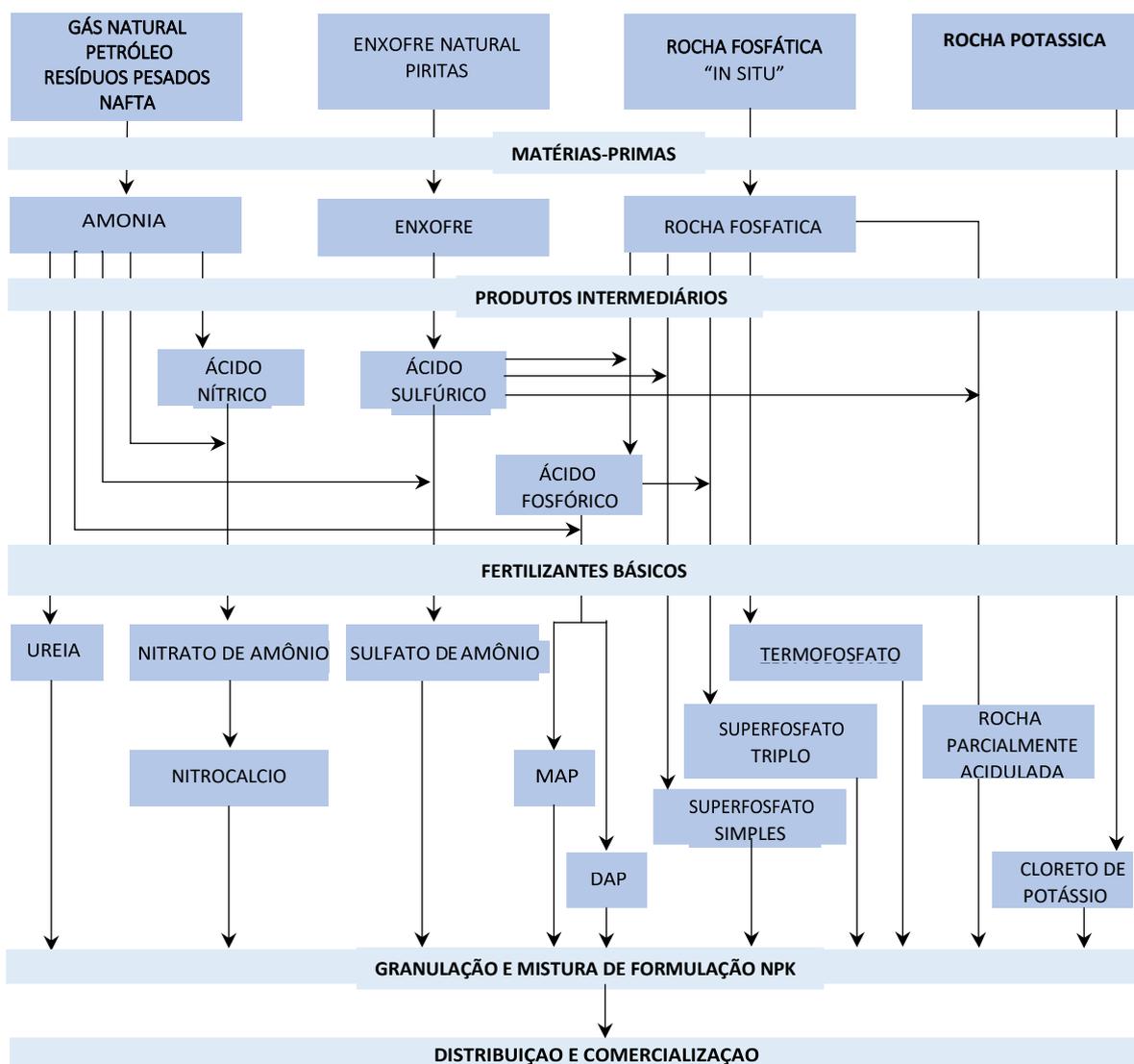
Os tipos mais comuns de fertilizantes convencionais são: ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio, nitrato de cálcio, fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP), superfosfato simples e o cloreto de potássio (KCl), entre outros (GUELFY, 2017; MAPA, 2016). Cada tipo de fertilizante apresenta características distintas, incluindo sua composição química e formas de apresentação, conforme a Tabela 1.

**Tabela 1.** Fertilizantes convencionais: composição química, características principais e obtenção.

FERTILIZANTE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (Mínima)	CARACTERÍSTICAS	OBTENÇÃO
Ureia	45% de N	Grânulos, pérolas ou pó; solúvel em água.	Reação da Amônia Anidra e Gás Carbônico sob pressão.
Nitrato de Amônio	32% de N	Grânulos solúveis em água.	Neutralização do Ácido Nítrico pela Amônia Anidra. Adição de calcário ou dolomita sobre Amônia Anidra e Ácido Nítrico.
Sulfato de Amônio	20% de N e 22% de S	Grânulos ou cristais solúveis em água.	Reação do Carbonato de Amônio com o gesso. A partir de gases de coqueria provenientes de unidades de fabricação de Ácido Sulfúrico.
Monoamônio Fosfato (MAP)	9 % de N; 48% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Grânulos solúveis em água.	Reação do Ácido Fosfórico com Amônia
(Diamônio Fosfato) (DAP)	17% N; 45% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Grânulos solúveis em água.	Reação do Ácido Fosfórico com Amônia.
Superfosfato Simples (SSP)	18% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 16% de Ca; 10% de S	Grânulos ou pó; solúvel em água.	Reação da rocha fosfática moída com Ácido Sulfúrico.
Superfosfato Triplo	41% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 10% de Ca	Grânulos ou pó; solúvel em água.	Reação da rocha fosfática moída com o Ácido Fosfórico.
Cloreto de Potássio (KCl)	50% de K <sub>2</sub> O	Cristais ou grânulos.	Por meio da reação do Ácido Cítrico com o Hidróxido de Potássio ou Carbonato de Potássio.

Fonte: (MAPA, 2016)

O processo de produção de fertilizantes convencionais é composto por diversas etapas, que se desdobram desde a extração da matéria-prima até a formulação final do produto, conforme a Figura 1.



**Figura 1.** Representação esquemática da cadeia produtiva dos fertilizantes convencionais. Fonte: Costa e Silva (2012).

A cadeia produtiva de todos os fertilizantes começa com a extração da matéria-prima, de acordo com o tipo de fertilizante a ser obtido (N, P, K entre outros) e dependendo da rota tecnológica adotada, pode ser mais ou menos solúveis (FERNANDES, LUZ & CASTILHOS, 2010). Os fertilizantes nitrogenados são, frequentemente, obtidos a partir do gás amônia, que é convertido em compostos nitrogenados como ureia, nitrato de amônio ou sulfato de amônio. Além desses fertilizantes, o N extraído também é utilizado na produção de MAP e o DAP, que também possuem em sua composição o P (COSTA & SILVA, 2012).

O P, por sua vez, é extraído de depósitos de rocha fosfática, geralmente, rica em fosfato de cálcio do grupo apatita, processado para produzir fertilizantes como o MAP, DAP, superfosfato simples e superfosfato triplo (ARAÚJO, 2021; FERNANDES, LUZ & CASTILHOS, 2010).

O K, geralmente é extraído em depósitos de minerais do grupo dos feldspatos e alguns do grupo da mica. A silvita (KCl) e a carnalita ((KMgCl<sub>3</sub>.6(H<sub>2</sub>O))) são largamente processadas como minerais de K. Outros, menos explorados, são os sulfatos langbeinita (KMg<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), polihalita (K<sub>2</sub>MgCa<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) e kainita (4KCl.4MgSO<sub>4</sub>.11H<sub>2</sub>O) (NASCIMENTO, MONTE & LOUREIRO, 2008). Esses minerais são convertidos em fertilizantes como o KCl e sulfato de potássio.

Após a extração e conversão da matéria-prima, ocorre a etapa de formulação, na qual as diferentes fontes de N, P e K são combinadas em proporções específicas, considerando as necessidades específicas das plantas e do solo. Aditivos podem ser incorporados nesse estágio para melhorar propriedades como estabilidade e solubilidade do fertilizante. Em seguida, a formulação passa pelo processo de granulação e processamento, resultando em grânulos, pérolas, pó ou outras formas adequadas para manuseio, armazenamento e aplicação no campo (COSTA & SILVA, 2012).

Os fertilizantes finalizados são embalados e distribuídos para fornecedores, distribuidores agrícolas ou diretamente para os agricultores. Cada etapa do processo exige cuidados específicos para garantir a qualidade do produto final e sua eficácia no campo. Práticas sustentáveis são cada vez mais consideradas para minimizar os impactos ambientais associados à produção de fertilizantes (COSTA & SILVA, 2012).

A escolha criteriosa e a aplicação adequada dos fertilizantes convencionais desempenha papel essencial na promoção do crescimento saudável das plantas e no aumento da produtividade agrícola. Ao selecionar os fertilizantes apropriados e aplicá-los de maneira eficiente, os agricultores podem garantir que as plantas recebam os nutrientes necessários para o seu desenvolvimento, resultando em culturas mais vigorosas e produtivas. No entanto, parte significativa dos nutrientes adicionados ao solo não é totalmente aproveitada pelas plantas, em função de perdas consideráveis por lixiviação, indisponibilização por adsorção específica e volatilização (ALCARDE; GUIDOLIN & LOPES, 1998).

Além disso, o nutriente não absorvido pelas plantas pode passar por processos microbianos (nitrificação, desnitrificação e imobilização), químicos (troca, fixação,

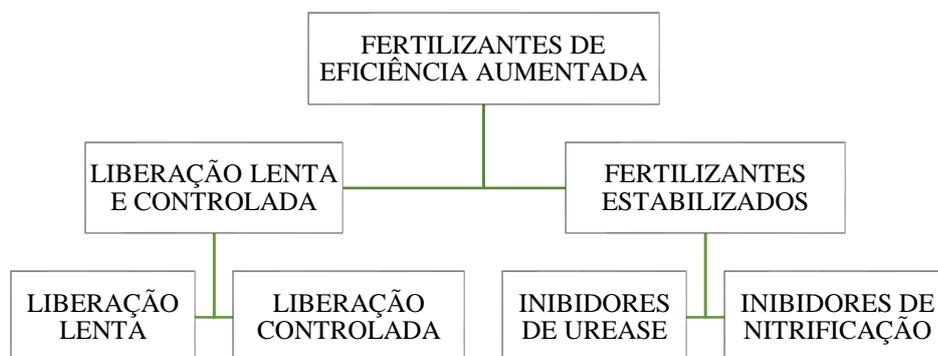
precipitação, hidrólise e volatilização) e físicos (lixiviação e escorrimento), que podem reduzir sua disponibilidade, conforme destacado por Borsari (2013).

As perdas de nutrientes também implicam que os agricultores não obtêm o máximo benefício dos fertilizantes convencionais, pois apenas uma fração do aplicado realmente chega às culturas, resultando em perdas econômicas devido à necessidade de mais aplicações de fertilizantes. Como resposta a esses desafios, tem sido desenvolvida uma nova geração de fertilizantes, visando melhorar a eficiência do uso de nutrientes e minimizar o impacto ambiental.

### 2.3 Fertilizantes de Eficiência Aumentada

Os fertilizantes de eficiência aumentada são fertilizantes com tecnologia incorporada que controla e/ou reduz a liberação de nutrientes ou estabilizam as reações de suas fontes no solo, aumentando sua disponibilidade para as plantas (POLIDORO, 2016). Esses fertilizantes são formulados com ingredientes especiais, como revestimentos, aditivos ou tratamentos químicos, que visam melhorar a liberação controlada dos nutrientes no solo. O objetivo é maximizar a absorção de nutrientes pelas plantas, reduzindo assim as perdas por lixiviação e volatilização, resultando em uma aplicação mais eficiente dos fertilizantes e, conseqüentemente, em benefícios econômicos e ambientais (GUELF, 2017; BORELLI, 2020).

Podem ser classificados em fertilizantes de liberação lenta e/ou controlada e os estabilizados, conforme a Figura 2. Os fertilizantes de liberação lenta e controlada se subdividem em liberação lenta e liberação controlada, enquanto os estabilizados compreendem os inibidores de urease e os inibidores de nitrificação (TIMILSENA et al., 2015; GUELF, 2017, BORELLI, 2020).



**Figura 2.** Representação esquemática das classes pertencentes aos fertilizantes de eficiência aumentada. Adaptada de VALDERRAMA e BUZZETTI (2017); BORELLI, (2020).

Os fertilizantes de liberação lenta são formulados para liberar nutrientes de maneira gradual ao longo do tempo, em resposta a fatores ambientais como temperatura, umidade do solo e atividade microbiana (POLIDORO, 2016). Conforme Trenkel (2010), o Comitê Europeu de Normalização estabelece que um fertilizante pode ser considerado de liberação lenta, se os seguintes critérios forem atendidos na temperatura de 25° C: não mais que 15% liberado em 24 horas; não mais que 75% liberado em 28 dias; e no mínimo 75% de liberação no prazo fixado pelo fabricante.

Os fertilizantes de liberação controlada são formulados com uma taxa de liberação do nutriente em um intervalo de tempo conhecido, onde o solo e condições ambientais pouco influenciam (POLIDORO, 2016). Consistem em fertilizantes minerais convencionais revestidos ou encapsulados por polímeros orgânicos termoplásticos, resinas ou materiais inorgânicos, como o enxofre (FREITAS, 2017). Devido ao seu revestimento físico, são menos suscetíveis a variações nos atributos do solo, como pH, temperatura, salinidade, potencial redox (Eh) e atividade microbiana (TRENKEL, 2010; SCIVITTARO et al., 2018).

Os fertilizantes de liberação controlada, apesar de suas vantagens, apresentam custo significativamente mais elevado devido ao uso de materiais de revestimento de alta tecnologia e processos mais complexos de fabricação. Nesse contexto, o custo final, considerando otimização da aplicação e redução de custos logísticos, emerge como fator preponderante na decisão do agricultor (BORSARI, 2013).

Os fertilizantes estabilizados por sua vez, abrangem todas as tecnologias que não influenciam na taxa de liberação, através de moléculas que controlam as reações das fontes de nutriente do fertilizante no solo, por meio de inibidores de urease e nitrificação (POLIDORO, 2016).

As tecnologias de eficiência aumentada funcionam de modo que a taxa sigmoideal de fornecimento de nutrientes para as plantas seja melhor sincronizada com a demanda da planta. Um dos principais enfoques desses fertilizantes é a redução considerável a exposição inicial do fertilizante às perdas do sistema solo-planta (CHALK et al., 2015). Aditivos são adicionados às fontes tradicionais e objetivam reduzir a volatilização, a lixiviação, a fixação e a emissão de óxido nitroso (dependendo da fonte N, P ou K), a fim de garantir uma utilização mais eficiente dos nutrientes aplicados (ALMEIDA, 2016; INPI, 2023).

Os processos complexos de produção dos fertilizantes de eficiência aumentada, no entanto, acabam gerando um elevado custo, de 2,5 a 8 vezes maior do que a dos fertilizantes convencionais (MESSA, 2022). Contudo, os fertilizantes de eficiência aumentada auxiliam na

redução de aplicações parceladas, custos com mão de obra, estresse e toxicidade aos cultivos e ainda possibilitam o fornecimento correto das formas iônicas preferidas pelas plantas, entre outras (MESSA, 2022).

### 2.3.1 Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada

O N desempenha papel fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas devido ao seu envolvimento em processos vitais como a fotossíntese e a regulação metabólica (TAIZ et al., 2017). Uma oferta adequada de N é essencial para garantir o desenvolvimento saudável e a produtividade das plantas. Os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada são formulados ou tratados com aditivos especiais para melhorar a utilização do N pelas plantas e reduzir as perdas para o meio ambiente.

Os fertilizantes nitrogenados estabilizados são aqueles em que é adicionado alguma substância capaz de inibir a transformação do N, ou seja, aumenta o tempo em que o N permanece em uma determinada espécie, seja ela ureia ou amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) (AAPFCO, 1997; FREITAS, 2017). Possuem substâncias que inibe a oxidação biológica do N de  $\text{NH}_4^+$  a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (inibidores da nitrificação) ou substância que inibe a atividade da enzima urease, retardando o processo de hidrólise da ureia, em condições adversas de clima, reduzindo a volatilização de amônia (inibidores da urease) (TRENKEL, 2010; FREITAS, 2017).

Os principais inibidores de reações químicas adicionados aos fertilizantes nitrogenados no mercado são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Principais compostos químicos utilizados como inibidores

<b>Categoria</b>	<b>Inibidores</b>
<b>Inibidores de Nitrificação</b>	Nitrapyrin (2-cloro-6-triclorometil piridina); AC (4-amino-1,2,4- triazol HCl; (2,4-diamino-6-triclorometil triazina; DCD/DDA (Dicianamida); DMPP (3,4-dimetilpirazol fosfato); Tioureia; AM (2-amino-4-cloro-6-metilpirimidina)
<b>Inibidores de Urease</b>	NBPT (N-(n-butil) triamida tiofosfórica), PPD/PPDA (Fenilfosforodiamidato), Hidroquinona, cobre, boro e catecol

Fonte: Adaptado (ALMEIDA, 2016; Guelfi, 2017).

Os inibidores têm a finalidade de reduzir as perdas de N por volatilização de amônia, proporcionando uma utilização mais eficaz desse nutriente. São adicionados ao fertilizante convencional, como é o caso da ureia, com o objetivo de diminuir a atividade da enzima urease, retardando a hidrólise da ureia, principal fonte mineral de N na atualidade (SCIVITTARO et

al., 2018). Um dos inibidores de urease mais utilizados em fertilizantes nitrogenados é o NBPT (N-(n-butil) triamida tiofosfórica), que inibe a hidrólise da ureia por um período de três a quatorze dias, dependendo das condições de umidade, pH, CTC, temperatura do solo e também da concentração do princípio ativo e dose utilizada no tratamento da ureia (FRAZÃO et al., 2014; ANGEL et al., 2015).

Essa tecnologia oferece vantagens significativas em situações de alto risco de perda de N por volatilização, especialmente em cenários com aplicação superficial de ureia, presença de resíduos vegetais e solo úmido, situações comuns na agricultura brasileira (ALMEIDA, 2016). O atraso na hidrólise da ureia proporciona a permanência do fertilizante na forma amídica (uréia) por um período mais longo, evitando a liberação imediata de amônia, um gás volátil (ALMEIDA, 2016). Essa estratégia permite que o fertilizante permaneça no solo por mais tempo sem iniciar o processo de volatilização, aguardando um evento chuvoso para a incorporação da ureia, resultando em redução significativa das perdas (ALMEIDA, 2016).

Além disso, aditivos químicos como hidroquinona, cobre, boro e enxofre destacam-se, junto com o NBPT, como moléculas ou elementos essenciais na estabilização do N, inibindo a atividade da urease no solo (GUELFY, 2017). Paralelamente, inibidores de nitrificação são empregados na formulação de fertilizantes nitrogenados, retardando a conversão do  $\text{NH}_4^+$  em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e temporariamente inibindo bactérias *Nitrosomonas* no processo de nitrificação, etapa intermediária da nitrificação (TRENKEL, 2010; ALMEIDA, 2016; SCIVITTARO et al, 2018).

Uma alternativa que tem sido estudada nos últimos tempo com capacidade inibidora de nitrificação é a combinação da ureia com a zeólita, podendo ser formulada com zeólitas naturais ou por meio do revestimento dos grânulos de ureia. A zeólita, um aluminossilicato com alta área superficial e capacidade de troca de cátions, é capaz de reter cátions trocáveis, como o  $\text{NH}_4^+$  (SCIVITTARO et al, 2018).

Alguns fertilizantes de eficiência aumentada são formulados especificamente para promover a liberação lenta ou controlada dos nutrientes. São os fertilizantes de liberação lenta e controlada que envolvem a presença de compostos que controlam quimicamente, fisicamente ou microbiologicamente as taxas de liberação dos nutrientes presentes (FREITAS, 2017)). Tais fertilizantes asseguram uma degradação gradual, resultando em um aporte mais racional e uniformemente distribuído ao longo do ciclo da cultura. Essa prática não apenas otimiza a eficiência no uso de nutrientes, mas também contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis (ALMEIDA, 2016).

Os fertilizantes de liberação lenta e controlada são classificados em dois grupos principais no mercado, dependendo do processo de produção: produtos de condensação de ureia-aldeídos, conhecidos como adubos de liberação lenta, e fertilizantes revestidos ou encapsulados, denominados fertilizantes de liberação controlada. Embora haja produtos como supergrânulos, sua relevância é regional e de menor importância global (FREITAS, 2017; TRENKEL, 2010).

Os materiais comumente utilizados para o revestimento dos grânulos de ureia para promover a liberação lenta dos nutrientes incluem fontes orgânicas de baixa solubilidade, como ureia formaldeído e isobutiledene-diureia (IBDU), esterco ou outros resíduos vegetais. Fontes inorgânicas, como enxofre e outros elementos, poliestireno, poliésteres, poliuretano, produtos à bases de petróleo (resinas), magnésio, fosfato de cálcio, gesso e polímeros sintéticos de diversas naturezas também são empregados para esse fim (TRENKEL, 2010; ALMEIDA, 2016; FREITAS, 2017).

Os fertilizantes nitrogenados de liberação lenta conseguem estender a sua disponibilidade à planta por mais tempo do que os convencionais (ureia). Os principais compostos utilizados nos fertilizantes de liberação lenta são: Ureia-formaldeído (UF), ureia-isobutiraldeído / IBDU<sup>®</sup>, ureiaalcaldeído / ciclo-diureia (CDU<sup>®</sup>) (FREITAS, 2017).

A escolha do mecanismo de liberação depende da formulação específica do fertilizante e das condições de cultivo desejadas. Cada mecanismo visa fornecer uma liberação precisa e controlada dos nutrientes, otimizando a eficiência de absorção pelas plantas e minimizando perdas para o meio ambiente. No entanto, é bom ressaltar que as tecnologias de fertilizantes de liberação lenta ou controlada e de fertilizantes estabilizados têm sido usadas há muito tempo (FREITAS, 2017).

Os fertilizantes de liberação controlada podem ser divididos em três categorias: fertilizantes com enxofre elementar (S<sup>0</sup>), fertilizantes revestidos com S<sup>0</sup> e polímeros e fertilizantes revestidos somente com polímeros (GUELF, 2017). A taxa de liberação do N do interior dos grânulos dos fertilizantes de liberação controlada depende de fatores como o material, a espessura e a qualidade do revestimento, bem como algum fator de intemperismo como variações de temperatura, umidade do solo, forças mecânicas, agentes químicos, entre outros, agem sobre o revestimento rompendo-o (Freitas 2017, SCIVITTARO et al., 2018). A liberação do N ocorre pela penetração de água no grânulo, aumentando a pressão osmótica e promovendo a difusão do nutriente para o solo pelos poros do revestimento (TIMILSENA et al., 2015; GUELF, 2017; SCIVITTARO et al., 2018).

Os fertilizantes de liberação controlada ainda apresentam valor mais elevado no custo do produto, devido a matéria prima ser importada e exigir alguns processos de difícil execução, cujo preço fica dependente do valor do dólar (SOUZA & ROCHA, 2021) e que podem limitar o seu uso em maior escala (BORELLI, 2020).

A utilização de adubos nitrogenados de liberação controlada apresenta diversas vantagens que estão intrinsecamente ligadas à eficiência no uso de nutrientes, alinhada com as necessidades das plantas, o que minimiza perdas por lixiviação e volatilização (TRINDADE, 2021). Essa forma de liberação controlada também contribui significativamente para a redução da contaminação ambiental, favorecendo a sustentabilidade agrícola (SOUZA & ROCHA, 2021).

Por outro lado, os fertilizantes de liberação lenta e controlada podem promover um fornecimento inadequado para a planta. Rodella (2018) salientou também a possibilidade de deficiências nutricionais resultantes da redução das taxas de liberação dos nutrientes em condições de baixas temperaturas, umidade e atividade microbiana no solo. Além disso, as doses em diferentes culturas e sistemas de cultivo ainda necessitam de adequação, bem como o custo elevado em relação as fontes solúveis (ROSSA et al., 2011).

Apesar desses entraves, a adoção desses adubos resulta em uma redução na necessidade de aplicações frequentes, o que por sua vez pode diminuir os custos operacionais relacionados à mão-de-obra e às máquinas (STÜPP et al., 2015). A melhoria na eficiência do uso da água também é observada, uma vez que a menor lixiviação de nutrientes resulta em uma utilização mais eficiente desse recurso hídrico (RASHIDZADEH & OLAD, 2014). Esses benefícios combinados ressaltam a importância e os impactos positivos da utilização de adubos nitrogenados de liberação controlada na agricultura moderna.

Ademais, a capacidade de atender às necessidades nutricionais das plantas ao longo do tempo é uma das vantagens associadas aos fertilizantes de liberação controlada quando comparados aos fertilizantes convencionais, que muitas vezes liberam nutrientes de maneira mais rápida e podem resultar em perdas significativas. De acordo com BORSARI (2013), quando se utiliza fertilizante de liberação controlada há uma diminuição mínima de 20 a 30% da taxa de aplicação recomendada em comparação com o fertilizante convencional.

### **2.3.1.2 Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura**

Os fertilizantes de eficiência aumentada são uma inovação na gestão de nutrientes para diversas culturas agrícolas, promovendo práticas mais sustentáveis. A eficácia desses fertilizantes, em comparação com os convencionais, é variável e está sujeita ao tipo de fertilizante e às condições do solo. O dinamismo desse mercado é evidenciado pelo constante desenvolvimento de formulações e tecnologias (SANTOS, 2020).

Os fertilizantes nitrogenados podem ser direcionados a diferentes setores da produção agrícola. Na produção de grãos em larga escala, os inibidores são mais eficazes quando aplicados em concentrações relativamente pequenas em fertilizantes a granel. Já os fertilizantes nitrogenados de liberação lenta e controlada são mais adequados para empreendimentos hortícolas intensivos de alto valor, como viveiros de plantas, produção de grama, flores ou vegetais (CHALK et al. 2015). Essa preferência é atribuída aos custos de fabricação/comercialização relativamente elevados desses fertilizantes, juntamente com o menor volume de vendas em comparação com fertilizantes a granel. Essa escolha é crucial nessas culturas, onde a qualidade e a precisão na aplicação de nutrientes desempenham um papel fundamental no sucesso da produção.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, especialmente em uma única ocasião época/aplicação, resulta em concentrações elevadas desse elemento nos estágios iniciais de crescimento, com quantidades reduzidas nas fases subsequentes. Uma abordagem para aprimorar o manejo é a aplicação parcelada em várias etapas, o que pode aumentar a eficiência na absorção de nutrientes. No entanto, o parcelamento apresenta desafios, como aumento nos custos de energia e manutenção, dependência das condições meteorológicas e de campo, aumento do tráfego no campo e desafios na gestão dos trabalhadores, entre outros (BORSARI, 2013).

A capacidade de atender às necessidades nutricionais das plantas ao longo do tempo destaca-se como uma vantagem dos fertilizantes de liberação controlada em comparação com os convencionais. O uso desses fertilizantes minimiza as perdas significativas que muitas vezes ocorrem devido à liberação rápida de nutrientes, conforme apontado por BORSARI (2013), que destaca uma redução mínima de 20 a 30% na taxa de aplicação recomendada em comparação com os fertilizantes convencionais. Porém, ainda possuem algumas limitações como o valor do produto, comprovação da eficiência agrônômica e conscientizar a sociedade sobre a importância ambiental são fundamentais para ampliar a utilização (TIMILSEN et al., 2014).

Em contextos específicos, como na cultura do café, a aplicação de fertilizantes de liberação lenta durante o plantio tem se mostrado benéfica, promovendo o desenvolvimento das mudas e aumentando a capacidade fotossintética (MELO; REIS & SOARES, 2022; SANTOS, 2020). Estudos semelhantes com maracujazeiro "amarelo" e feijão-mungo ressaltam melhorias na qualidade das mudas ao empregar fertilizantes de liberação lenta (MENDONÇA et al., 2007; DINALLI et al., 2012).

É importante observar, no entanto, que cada cultura pode responder de maneira diferente. Em pesquisas com pimentão e berinjela, a resposta aos fertilizantes de liberação controlada variou, sendo a berinjela mais responsiva nos parâmetros morfológicos analisados (GOMES et al., 2017).

Na cultura da cana-de-açúcar, o uso de adubos de liberação lenta revestidos com polímeros de N e K permitiu uma redução significativa na dose recomendada, sem comprometer o crescimento e desenvolvimento da cultura (GEROMEL et al., 2019). Pesquisas recentes também apontam que a eficiência da adubação com fertilizantes de liberação controlada do N pode influenciar positivamente as características morfológicas e produtivas do milho segunda safra (ALVES et al., 2023).

Na cultura do milho, foram avaliados os efeitos da aplicação de doses de N utilizando fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia. Os resultados revelaram não apenas um aumento na quantidade de N disponível para o milho, mas também uma melhoria significativa na produtividade de grãos (FRAZÃO, 2014). No entanto, é importante observar que a eficácia pode variar dependendo das condições específicas do solo, do clima e do tipo de cultura. Em uma pesquisa sobre o efeito da liberação gradual de nutrientes na produção de milho e na dinâmica do N no solo, os fertilizantes com mecanismo de liberação gradual não apresentaram benefícios significativos quando comparados com fertilizantes minerais convencionais (CHIOCHETA JÚNIOR, 2019).

A disponibilidade de N nos fertilizantes de liberação lenta depende da decomposição das cadeias poliméricas, ocorrida pela atividade microbológica. Isso resulta na liberação de CO<sub>2</sub> e NH<sub>3</sub>. Os atributos do solo e os fatores ambientais, como teor de argila, pH, umidade e temperatura, exercem influência significativa nos processos de decomposição e liberação de N desses fertilizantes (JAHNS; EVEN; KALTWASSER, 2003; TIMILSENA et al., 2014; GUELFY, 2017).

A influência da decomposição das cadeias poliméricas, mediada pela atividade microbológica, é um fator determinante na liberação de N nos fertilizantes de liberação lenta.

A interação complexa entre os atributos do solo e os fatores ambientais, como teor de argila, pH, umidade e temperatura, exerce um papel significativo nesse processo (JAHNS; EVEN; KALTWASSER, 2003; TIMILSENA et al., 2014; GUELFY, 2017).

O revestimento da ureia com Cu e B pode reduzir em cerca de 50% as perdas por volatilização de amônia, em comparação com a ureia convencional (DOMINGHETTI et al., 2016). Outro material em estudo é a zeólita que atua como inibidora de nitrificação, podendo ser utilizada em combinação ou por meio de recobrimento da superfície dos grânulos de ureia. A inclusão de zeólita na ureia resulta na redução da concentração de  $\text{NH}_4^+$  na solução do solo, impedindo sua conversão em  $\text{NO}_3^-$ , mantendo-o em uma forma mais estável no solo e diminuindo as perdas de amônia para a atmosfera, o que melhora a eficiência da ureia como fertilizante (SCIVITTARO et al., 2018).

Os fertilizantes nitrogenados de eficiência aprimorada representam uma ferramenta valiosa na busca por uma agricultura mais produtiva, sustentável e resiliente. Sua aplicabilidade em diversas culturas é um reflexo de seu potencial para impulsionar a segurança alimentar global e promover o desenvolvimento agrícola. Investimentos contínuos e colaboração entre cientistas, agricultores e tomadores de decisão são fundamentais para maximizar os benefícios desses fertilizantes.

### **2.3.2 Fertilizantes fosfatados de eficiência aumentada**

O P, sendo um elemento essencial para o desenvolvimento das plantas, desempenha um papel crucial nos processos metabólicos e na síntese de DNA (TAIZ et al., 2017). Na agricultura, sua disponibilidade é essencial para garantir altos índices de produtividade. No entanto, a eficiência no uso de fertilizantes fosfatados enfrenta desafios consideráveis. Nesse contexto, os fertilizantes de eficiência aumentada surgem como uma solução promissora, buscando otimizar a absorção e utilização do fósforo pelas plantas, contribuindo para uma agricultura mais sustentável e produtiva.

Os fertilizantes fosfatados podem ser originários de rochas ígneas ou sedimentares. Devido à sua concentração geográfica em áreas específicas, a disponibilidade dessas rochas não é uniforme em todo o mundo. Cerca de 92% das reservas globais de rochas fosfáticas estão concentradas em nove países, incluindo Marrocos, China, Egito, Tunísia, Rússia, Argélia, Brasil, África do Sul e Arábia Saudita (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2024).

As maiores reservas mundiais são de origem sedimentar, representando 95% do total (SASABUCHI et al., 2023). No entanto, as rochas ígneas ocorrem de forma significativa no Brasil, Canadá, Finlândia, Rússia e África do Sul (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2024). As reservas de rochas fosfáticas do Brasil em 2024 foram estimadas em 1.600 Mt, ocupando o 7º lugar no ranking mundial (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2024). No ranking mundial de reservas de rochas de origem ígnea o país ocupa em terceiro lugar (SASABUCHI et al., 2023).

Cerca de 90% dos fertilizantes fosfáticos são obtidos por métodos químicos, refletindo a abordagem dominante na indústria (ARAÚJO, 2021). No entanto, esse processo, além de gerar resíduos consideráveis, tem um impacto ambiental significativo e depende de reservas limitadas de fosfato, prevendo-se seu esgotamento nas próximas décadas (ARAÚJO, 2021).

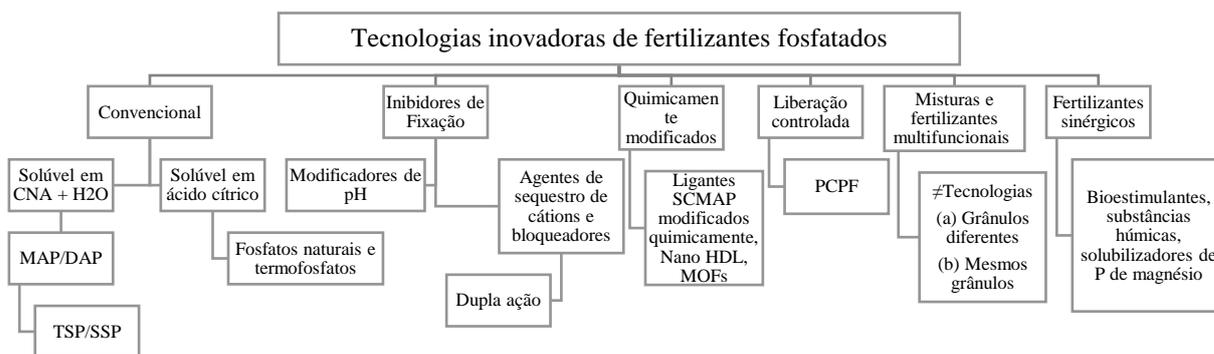
A fixação do P pelo solo também é um desafio adicional, dificultando sua manutenção em forma solúvel e, portanto, dificultando a absorção pelas plantas (YAMADA & ABDALLA; TINDAL; 2007). Em solos ácidos, o P pode ser retido pelas argilas ou precipitado por elementos como alumínio e ferro, enquanto solos alcalinos apresentam indisponibilidade devido à presença de cálcio e magnésio (YAMADA & ABDALLA; TINDAL; 2007).

Dentre as estratégias para aumentar o aproveitamento da adubação fosfatada destaca-se o uso de fertilizantes de eficiência aumentada. As tecnologias têm sido avaliadas ou usadas comercialmente com o objetivo de aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados, tanto em fertilizantes formulados (NPK), quanto em fosfatos isolados (BENITES, 2015). Contudo, esse conceito tem sido menos explorado no contexto dos fertilizantes fosfatados (CAMPO & NEGÓCIO, 2018).

Para otimização dos fertilizantes, destaca-se o emprego de aditivos ou revestimentos no processo industrial, como a associação de fontes orgânicas e aditivos minerais aos fertilizantes fosfatados para aumentar sua eficiência, além dos compostos de revestimento com ação de liberação lenta ou controlada dos nutrientes (SOUZA, 2012; BENITES, 2015; RIBEIRO et al., 2021). Paralelamente, há o desenvolvimento de fertilizantes inteligentes baseados na utilização de microorganismos (biofertilizantes) e/ou nanomateriais (nanofertilizantes), junto com formulações baseadas em bactérias ou enzimas (CALABI-FLOODY et al., 2018). Essas estratégias inovadoras não apenas visam aumentar a eficiência dos fertilizantes, mas também promover práticas agrícolas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

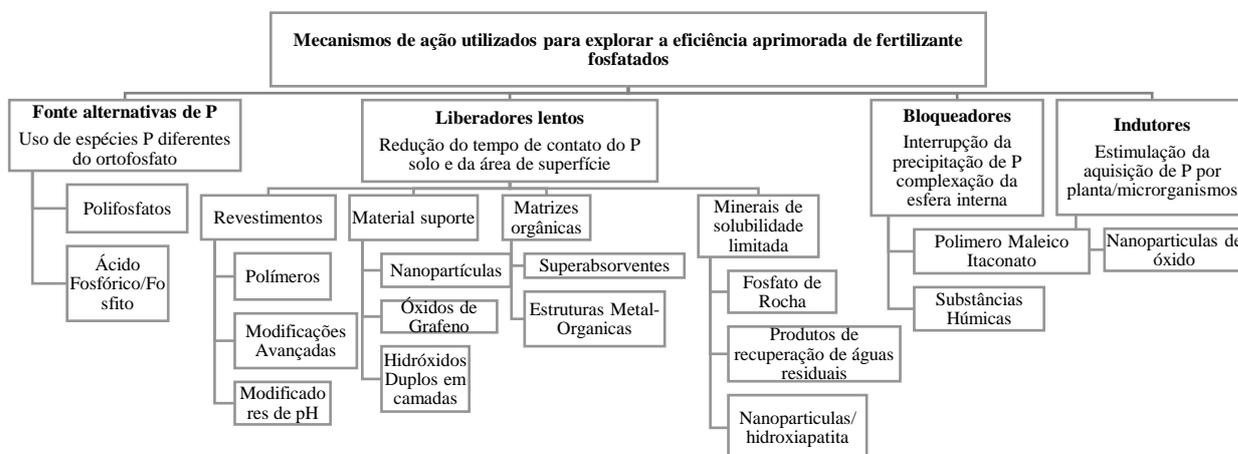
De acordo com Guelfi et al. (2022), as tecnologias para fertilizantes fosfatados podem ser classificadas em grupos conforme as tecnologias utilizadas em seus processos produtivos: (1) fertilizantes convencionais, (2) fertilizantes inibidores de fixação, (3) fertilizantes

quimicamente modificados, (4) fertilizantes de liberação controlada, (5) misturas e fertilizantes multifuncionais e (6) fertilizantes sinérgicos, Figura 3. Conforme Guelfi et al., (2022), os preços dos fertilizantes tendem a estar na seguinte ordem crescente: convencional < inibidor de fixação ≤ fertilizante sinérgico ≤ blendas < liberação controlada ≤ quimicamente modificado ≤ multifuncional.



**Figura 3.** Classificação dos fertilizantes fosfatados. Abreviaturas: CNA + H<sub>2</sub>O: citrato de amônio neutro + água; MAP: fosfato monoamônico; DAP: fosfato diamônico; TSP: superfosfato triplo; SSP: superfosfato simples; SCMAP: MAP revestido com enxofre (S<sup>0</sup>); HDL: hidróxidos duplos lamelares; Nano: nanopartículas; MOFs: estruturas metal-orgânicas; PCPF: fertilizantes fosfatados revestidos com polímero. Fonte: Guelfi et al., 2022.

Na literatura também é relatado que os fertilizantes fosfatados podem ser divididos de acordo com os mecanismos de ação em quatro grupos: liberadores lento, bloqueadores de fixação, indutores de resposta bioquímica e fontes alternativas de P (WEEKS & HETTIARACHCHI, 2019). Ainda de acordo com esses autores, a maioria dos produtos atualmente no mercado ou em desenvolvimento se enquadram conforme a Figura 4.



**Figura 4.** Mecanismos de ação de fertilizantes fosfatados eficientes.

Fonte: Weeks & Hettiarachchi (2019)

Existem diferentes métodos de revestimento para fertilizantes fosfatados, cada um com características específicas (CHIAREGATO et al., 2022). Esses processos envolvem a aplicação de uma camada protetora sobre os grânulos do fertilizante. O MAP é frequentemente utilizado para grânulos de liberação controlada, nos quais são envolvidos por um material que restringe o movimento da água para o produto e retarda a difusão do P para a solução do solo (WEEKS & HETTIARACHCHI, 2019).

Uma técnica amplamente empregada em fertilizantes fosfatados de eficiência aumentada é o encapsulamento/recobrimento por matriz polimérica, enxofre e minerais, que cria uma camada protetora ao redor dos grânulos de fertilizantes, também definidos como matrizes para carrear ativos (PRASAD, 2017; GUELFY, 2018; GAZOLA, 2013). Essa camada externa protege o fertilizante da umidade, das alterações climáticas e de reações indesejadas no solo, controlando a liberação de nutrientes ao longo do tempo (ARANTES, 2022; ANGELO et al., 2021; GUELFY, 2018).

Além de polímeros de revestimento ou tecnologias relacionadas, também pode-se utilizar de zeólitas modificadas com rocha fosfática, para aumentar a eficiência do uso desses fertilizantes (BERNADI et al. 2008). Outra possibilidade é o uso de microrganismos para a disponibilização de nutrientes para as plantas, processo conhecido como biossolubilização, em que bactérias e fungos atuam na solubilização de nutrientes encontrados no solo e nos minerais de rochas (ARAÚJO, 2021).

Diante desses desafios, a busca por alternativas é crucial. A limitação das reservas de fosfato, os impactos ambientais e os problemas de fixação no solo destacam a urgência em adotar tecnologias inovadoras, como aditivos, polímeros de revestimento e ou compostos de liberação lenta ou controlada dos nutrientes, bem como outras tecnologias relacionadas (BERNADI, et al. 2008; BENITES, 2015; RIBEIRO et al. 2021). Essas abordagens visam otimizar a eficiência da fertilização fosfatada, tornando-se essenciais para a produtividade agrícola sustentável.

### **2.3.2.1 Fertilizantes fosfatados de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura**

A utilização de tecnologias associadas aos fertilizantes fosfatados é importante para aumentar a sua eficiência de uso pelas plantas, mitigar problemas com adsorção específica de P no solo por cátions e argilas, a fim, sobretudo, de aumentar o P disponível na solução do solo para posterior absorção pelas plantas (RIBEIRO et al. 2021). Recentemente, os fertilizantes

fosfatados de eficiência aprimorada têm recebido destaque devido à sua capacidade de maximizar a utilização de P pelas plantas, resultando em benefícios significativos.

Estudos têm demonstrado os benefícios dos fertilizantes fosfatados de eficiência aprimorada em diversas culturas, incluindo milho, trigo, arroz, soja e muitas outras (MARTINS & COELHO, 2022; YU, KEITEL & DIJKSTRA, 2021; PELA et al., 2019). Essas pesquisas indicam que esses fertilizantes não apenas aumentam a produtividade das culturas, mas também contribuem para a melhoria da qualidade dos produtos agrícolas.

O uso de fósforo polimerizado vem sendo apresentado como uma nova opção na redução da adsorção do P pelos colóides do solo (FIGUEIREDO et al., 2012). A associação de revestimento e outros nutrientes tem apresentado resultados promissores. Por exemplo, o revestimento de grânulos de fertilizantes fosfatados com polímeros e magnésio (Mg) é uma tecnologia que pode melhorar a eficiência do uso de P e mitigar problemas de baixo fornecimento de Mg (GUELFY, 2018). Os aditivos, no fertilizante fosfatado, atuam na dinâmica de liberação e fluxo difusivo do P inibindo o processo de fixação imediata pelo solo auxiliando para que o nutriente esteja disponível para as plantas durante o seu ciclo (BONISSONI, 2018).

Um estudo de campo comparou cinco tratamentos, revelando que o DAP de liberação controlada (CRDAP) teve rendimento e eficiência do uso de P significativamente maiores que o DAP convencional (CDAP). O CRDAP combinado com o extrato de *Paecilomyces variotii* (ZNC) aumentou o suprimento de P disponível no solo, promoveu melhor crescimento das raízes e aumentou a taxa fotossintética. Assim, o composto CRDAP-ZNC pode ser uma tecnologia promissora para aumentar o rendimento das culturas e a eficiência de uso de P, além de melhorar a resposta das culturas às mudanças climáticas (CHEN et al., 2023).

Em outro estudo, os resultados mostraram que as características morfológicas do milho e da soja, bem como os teores foliares de P e boro da soja não foram influenciados pela adubação. A adubação fosfatada aumentou a produtividade da soja. O MAP revestido com policote foi mais eficiente que o MAP (fertilizante convencional) para produzir maiores rendimentos de milho e soja e maior eficiência agrônômica no uso de P (PELA et al., 2019).

Aliado a tendência de eficiência de uso de nutrientes, o emprego combinado de microrganismos solubilizadores de fosfato e fertilizantes químicos fosfatados também tem sido avaliado (ETESAMI, 2020). Os principais microrganismos são os fungos micorrízicos arbusculares e as rizobactérias promotoras de crescimento de plantas, que possuem a capacidade de solubilizar o fosfato inorgânico e mineralizar o fosfato orgânico, tornando-o disponível para as plantas (EMBRAPA, 2016; ETESAMI, 2020).

Em um estudo, os pesquisadores utilizaram o MAP (Monoamônio Fosfato) revestido com substâncias húmicas, polímeros e microrganismos, aplicado na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup>. Observaram que o fertilizante revestido não aumentou a massa de matéria seca de plantas de soja; no entanto, a adubação com o fertilizante revestido com microrganismo aumentou a produtividade da cultura da soja (MARTINS JÚNIOR & COELHO, 2022). Essa integração entre a aplicação de microrganismos e fertilizantes químicos otimiza a disponibilidade de P no solo e melhorar a produtividade das culturas, representando uma abordagem promissora para a agricultura sustentável.

Já em relação a nanotecnologia, os nanomateriais à base de P como potencial fertilizante fosfatado tem sido avaliado para o desenvolvimento agrícola sustentável. De acordo com Zhu et al. (2023), as pesquisas indicam que o uso de nanomateriais à base de P pode aprimorar o crescimento fisiológico das plantas, seus pigmentos fotossintéticos, o sistema antioxidante, o metabolismo, a absorção de nutrientes, a secreção da rizosfera e a ativação de nutrientes do solo. Ainda de acordo com os autores, os estudos concentram-se principalmente em fosfato de cálcio, zeólito e quitosana, todos contendo P, além de fertilizantes de liberação lenta mais ainda há necessidade de estudos dos usos mais amplos desses nanomateriais.

Os fertilizantes fosfatados de eficiência aprimorada representam uma inovação significativa na gestão de nutrientes para diversas culturas agrícolas. Embora promissores, é crucial reconhecer que a eficácia desses fertilizantes pode variar em função das características do solo e das práticas agrícolas locais. Pesquisas contínuas são essenciais para entender melhor essas nuances e desenvolver estratégias específicas para otimizar a aplicação desses fertilizantes em diferentes contextos agrícolas.

### **2.3.3 Fertilizantes potássicos de eficiência aumentada**

O K é vital para o crescimento das plantas, regendo processos fundamentais como a regulação osmótica e ativação enzimática (TAIZ et al., 2017). No entanto, apesar da importância desse nutriente, as culturas utilizam apenas cerca de 50–60% do K aplicado (BEING et al., 2022). Diante disso, as tecnologias associadas aos fertilizantes potássicos têm como objetivo maximizar a eficiência de absorção e utilização desse nutriente pelas plantas. Essas tecnologias incluem métodos de formulação que garantem uma liberação gradual e controlada do potássio, permitindo uma absorção mais eficaz ao longo do ciclo de crescimento das plantas.

A evolução dos fertilizantes potássicos tem sido impulsionada por inovações em revestimento, microgranulação, nanotecnologia, aditivos e estimuladores (RISEH et al., 2023; ANGELO et al., 2021). Os fertilizantes potássicos revestidos destacam-se pela liberação controlada de nutrientes, com estudos respaldando sua eficácia na absorção de K pelas plantas (YANG et al., 2017; LI et al., 2020, FERRARINI et al., 2020). Além disso, técnicas como microgranulação e nanotecnologia têm demonstrado benefícios notáveis (ANGELO et al., 2021).

Os fertilizantes de eficiência aumentada, desenvolvidos a partir de polímeros derivados do petróleo, enfrentam limitações devido aos seus efeitos no solo e no meio ambiente. A maioria desses polímeros não é facilmente biodegradável após a completa liberação de nutrientes, criando uma nova fonte de poluição do solo (FERTAHY et al., 2021). Para superar tais obstáculos econômicos e ambientais, a pesquisa está direcionando seu foco para os biopolímeros (FERTAHY et al., 2021; ANGELO et al., 2021).

Visando a sustentabilidade, revestimentos orgânicos à base de biopolímeros e biomassa para fertilizantes de liberação controlada e lenta representam uma nova geração de produtos (RISEH ET AL., 2023; ANGELO et al., 2021). Essa abordagem promissora não só oferece uma solução para os problemas ambientais associados aos polímeros derivados do petróleo, mas também contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis e ecologicamente conscientes.

Além disso, formulações de matrizes eficientes em termos de liberação de nutrientes e biodegradabilidade, a partir de materiais como o fertilizante nitrato de potássio ( $KNO_3$ ) encapsulado com argila quitosana e montmorilonita (ANGELO et al., 2021), quitosana-argila (MESSA et al., 2016), e uso de zeólita e quitosana (FERRINI, 2020) tem sido desenvolvida para a liberação sustentada de fertilizantes potássicos.

### **2.3.3.1 Fertilizantes potássicos de eficiência aumentada e sua aplicabilidade na agricultura**

Rychter et al. (2016) e Ferrarini et al (2020), avaliaram as propriedades da zeólita como fertilizante e as propriedades de um filme polimérico biodegradável a base de quitosana para liberação do K. Os resultados indicaram a viabilidade de obtenção de um fertilizante a base de K, com liberação lenta, garantindo à planta uma adequada manutenção do nutriente no período essencial do seu crescimento.

Outro estudo avaliou as propriedades de materiais de origem natural formado por quitosana-argila para encapsulamento e liberação sustentada do fertilizante nitrato de potássio,

onde o perfil de liberação comprovou que os íons são liberados das microesferas para o meio de forma lenta e contínua por difusão através do polímero (MESSA et al., 2016).

Já Ribeiro et al. (2022), avaliaram a lixiviação, disponibilidade e recuperação de K em colunas de solo, após a aplicação de KCl convencional, KCl revestido com aditivos e polímeros ou KCl compactado e revestido com aditivos e polímeros. Constataram que as fontes revestidas apresentaram menor dureza de grânulos e maior lixiviação de K em relação ao KCl convencional, porém os teores de K foram maiores para KCl revestido com aditivos e polímeros na camada de 0-10 cm do solo em comparação ao KCl convencional.

Bley et al. (2020), destacaram que a proteção física do revestimento e a liberação gradual dos nutrientes na solução do solo reduzem a perda de lixiviação de K para o solo de textura franco-arenosa. No entanto, o uso de fertilizante KCl revestido em solo franco-arenoso com baixos níveis de K deve ser feito em taxas mais altas do que o KCl comum, pois, em solos com baixos teores de K não foi capaz de atender às demandas de K da fase inicial das plantas ou deve ser combinado com uma fonte de K imediatamente disponível.

Li et al. (2020) examinaram o efeito da aplicação de fertilizante potássico convencional (KCl) e de liberação controlada na produtividade do milho e na concentração de K no solo. O KCl convencional aumentou inicialmente a concentração de K no solo, mas essa concentração diminuiu rapidamente ao longo do tempo. Em contrapartida, a fonte de liberação controlada resultou em menores concentrações de K imediatamente após a aplicação, porém, ao longo do tempo, aumentou a disponibilidade de K no solo de forma mais sustentada. Os pesquisadores sugeriram que a combinação dessas duas fontes promoveu condições ideais, mantendo altas concentrações de K no solo durante todo o ciclo da cultura. Consequentemente, essa combinação aumentou a produtividade do milho em mais de 15% em comparação com a aplicação isolada de KCl ou da fonte de liberação controlada.

Sokal et al. (2021) conduziram um estudo em sistema de plantio direto para investigar os efeitos da aplicação de diferentes fontes de K e suas combinações na eficiência agrônômica econômica da cultura do milho. A combinação de 60% de KCl com 40% de KCl revestido com polímero, em relação à dose recomendada, resultou em uma maior margem bruta de lucro. No entanto, os fertilizantes e suas combinações não influenciaram significativamente o teor de clorofila foliar, diâmetro de colmo, altura de inserção de espiga, componentes de rendimento, produtividade ou eficiência de uso do nutriente na cultura do milho.

A utilização de fontes mais eficientes de K pode prolongar a disponibilidade desse nutriente no solo, influenciando o crescimento das plantas. Em um estudo realizado por Tian et

al. (2017), foi examinado o impacto de uma fonte de K de maior eficiência na disponibilidade do nutriente no solo, bem como na fisiologia e produtividade das plantas de algodão, em comparação com fontes convencionais, como KCl e sulfato de potássio. Os resultados demonstraram que a fonte de fertilizante mais eficiente proporcionou uma disponibilidade prolongada de K no solo, resultando em maior taxa de fotossíntese líquida e, conseqüentemente, um rendimento de plantas de algodão de 7-9% superior em comparação com as fontes convencionais.

Em outro estudo foram investigados os efeitos da fertilização com KCl revestido com polímero (PCPC) na produtividade do algodão, seus componentes de produção, qualidade da fibra, eficiência de uso de K e senescência foliar em condições salinas. Yang et al. (2017), observaram que o uso de PCPC resultou em melhorias significativas no teor de K disponível no solo, na qualidade das fibras e nos índices fotossintéticos das folhas em comparação com fertilizantes de K convencionais. A combinação de PCPC com  $K_2SO_4$  numa proporção de K de 7:3 demonstrou capacidade para retardar a senescência foliar, aumentar tanto a produtividade quanto a qualidade da fibra, além de melhorar a eficiência no uso do K, resultando em benefícios econômicos no cultivo de algodão.

Em síntese, a eficácia dos fertilizantes de eficiência aumentada se mostra promissora, mas sua aplicabilidade e resultados podem variar consideravelmente entre diferentes culturas e condições ambientais. A contínua pesquisa e desenvolvimento nessa área são essenciais para aprimorar as formulações e tecnologias, consolidando esses fertilizantes como parte integrante de práticas agrícolas sustentáveis.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os fertilizantes de eficiência aumentada representam ferramentas valiosas e promissoras para a agricultura atual. Eles oferecem benefícios em termos de eficiência nutricional, redução de impactos ambientais e aumento da produtividade agrícola. No entanto, ainda há espaço para evolução e aprimoramento contínuo nessa área.

Embora os fertilizantes de eficiência aumentada já ofereçam vantagens claras, como melhor uso de nutrientes e redução de perdas, ainda há desafios a serem superados, como a acessibilidade econômica para os agricultores e a adaptação a diferentes condições agrícolas e culturais.

Em resumo, é uma tecnologia promissora que vale a pena ser adotada e continuamente aprimorada. À medida que avançamos na pesquisa e desenvolvimento desses fertilizantes, podemos maximizar seu potencial e contribuir ainda mais para uma agricultura sustentável e eficiente.

#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGEL, R. E., TOWEY, B.D.; GRANVES, E. Degradation of the urease inhibitor NBPT as affected by soil pH. **Soil Science Society American Journal**. 79:1674-1683.2015. doi:10.2136/sssaj2015.05.0169.

ALCARDE, J.C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A.S. Os adubos e a eficiência das adubações. Boletim Técnico. 3 ed. São Paulo – ANDA, 1998, p.1-35.

ALMEIDA, L.V.B.; MARINHO, C.S.; MUNIZ, R.A.; CARVALHO, A.J.C. Disponibilidade de nutrientes e crescimento de porta-enxertos de citros fertilizados com fertilizantes convencionais e de liberação lenta. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v.34, n.1. 2012.

ALMEIDA, R.E.M. Fertilizantes de eficiência aumentada: uso de ureia de liberação controlada ou com inibidores em sistemas agrícolas sustentáveis. Embrapa Pesca e Aquicultura, 28 p. 2016. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1056527/1/CNPASA2016doc28.pdf>. Acesso em 02 jan. 2024.

ALVES, J.V.M.; FALEIROS, L.M.; REZENDE, C.F.A. Fertilizantes de liberação controlada e seus efeitos no milho. **Agrarian**, v.16, n.56, 2023. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v16i56.16772>.

ANGELO, L.M.; FRANÇA, D.; FAEZ, R. Biodegradation and viability of chitosan-based microencapsulated fertilizers. **Carbohydrate Polymers**, v.257, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117635>.

ARAÚJO, N.C.S. Biossolubilização e desempenho agronômico de fosfatos naturais do grupo Bambuí. 2021. Monografia – Universidade Federal de Catalão. 2021.

ASHRAF, U.; ZAFAR, S.; GHAFAR, R.; SHER, A.; MAHMOOD, S.; NOREEN, Z.; MAHAM, M.M.; SADDIQUE, M.; ASHRAF, A. **Chapter 7 - Impact of nano chitosan-NPK fertilizer on field crops**, ed:Kumar, S.; Madihally, S. V. In: Nanomaterial-Plant Interactions, Role of Chitosan and Chitosan-Based Nanomaterials in Plant Sciences, Academic Press, 2022, p. 165-183.

ASSOCIATION OF AMERICAN PLANT FOOD CONTROL OFFICIALS - AAPFCO. Official documents 57. West Lafayette: AAPFCO, 1997.

BEIG, B.; NIAZI, M.B.K.; SHER, F.; JAHAN, Z.; MALIK, U.S.; KHAN, M. D.; AMÉRICO-PINHEIRO, J.H.P.; VO, D.N. Nanotechnology-based controlled release of sustainable fertilizers. A review. Uma revisão. **Environmental Chemistry Letter**, v. 20 , p.2709–2726, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01409-w>.

BENITES, V.M.A importância da pesquisa na avaliação da eficiência das tecnologias em fertilizantes fosfatados no Brasil. Boletim Informativo da SBCS. 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/135594/1/2015-101.pdf>. Acesso em: 19 jan 2024.

BERANDI, A.C.C.; MONTE, M.B.M.; PAIVA, P.R.P.; WERNECK, C.G.; HAIM, P.G.; POLIDORO, J.C. Potencial de uso de zeólitas na agropecuária. Embrapa Pecuária Sudeste – São Carlos, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/49218/1/Documentos85.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BLEY, H.; GIANELLO, C.; SANTOS, L. DA S.; SELAU, LPR. Liberação de nutrientes, nutrição de plantas e lixiviação de potássio de fertilizante revestido com polímero. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 41, 2017.

BONISSONI, K. Tecnologia Kimcoat completa 10 anos. *Revista Cultivar*, 2018. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/tecnologia-kimcoat-completa-10-anos>. Acesso em: 05 jan. 2024.

BORELLI, L. M. **Fertilizantes de eficiência aprimorada – perspectivas e potencial de uso de biopolímeros como matrizes de liberação lenta ou controlada**. 2020, p.56. Monografia (Engenharia Agrônoma). Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2020.

BORSARI, F. Fertilizantes inteligentes. *Agro DBO*, v. 1, n.1, p. 54-57, 2013.

CALABI-FLOODY, M.; MEDINA, J.; RUMPEL, C.; CONDRON, L.M.; HERNANDEZ, M.; DUMONT, M.; MORA, M.L.L. Chapter threee – smart fertilizers as a strategy for sustainable agriculture. *Advances in Agronomy*, v.147, p. 119-157, 2018. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.10.003>.

CAMPO & NEGÓCIO. **Importância dos fertilizantes fosfatados e sua eficiência agrônoma**. 2018. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/importancia-dos-fertilizantes-fosfatados-e-sua-eficiencia-agronomica/>. Acesso em: 25 jan. 2024.

CASTRO, N.R.; SILVA, A.F.; GILIO, L. Desempenho e inter-relações do setor de fertilizantes: uma análise segundo a ótica de insumo produto. *Planejamento e Políticas Públicas*, n. 56, 2021. Disponível em: [//ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/991](http://ipea.gov.br/ppp/index.php/PPP/article/view/991). Acesso em: 13 dez. 2023.

CHALK, P. M.; CRASWELL, E. POLIDORO, J. C.; CHEN, D. Fate and efficiency of 15N-labelled slow-and controlled-release fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. n.102, v.2. 2015. Doi: [10.1007/s10705-015-9697-2](https://doi.org/10.1007/s10705-015-9697-2).

CHEN, Q.; QU, Z.; ZHANG, Z.; MA, G.; ZHU, M.; DAN, j.; WANG, j.; ZHANG, S.; DING, X.; ZHANG, M.; LU, P.; LIU, Z. Coated diammonium phosphate combined with Paecilomyces variotii extracts improves root architecture, enhances spring low temperature tolerance, and increases wheat yield, *Soil and Tillage Research*, v.227, 2023.

CHIOCHETTA JÚNIOR, J.C.; **Efeito de liberação gradual de nutrientes na dinâmica do nitrogênio no solo e na produção da cultura do milho**. 2019, f.79. Dissertação (Mestrado em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação) –Escola Superior Agrária de Bragança - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Bragança, 2019.

CHIAREGATO, C. G.; FRANÇA, D.; MESSA, L.L.; PEREIRA, T. S.; FAEZ, R. A review of advances over 20 years on polysaccharide-based polymers applied as enhanced efficiency fertilizers, **Carbohydrate Polymers**, v. 279, 2022.

CRUZ, D.F.; SANTOS, R.B.; GUIMARÃES, G.G.F.; POLITO, W.L.; RIBERIRO, C. Liberação controlada de fertilizante fosfatado a partir de revestimento polimérico à base de óleo de mamona. Embrapa Pecuária Sudeste, Embrapa Instrumentação. In: ANAIS DA 9ª JORNADA CIENTÍFICA. Anais.... São Carlos – SP, Embrapa São Carlos. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167039/1/p-24-Liberacao-controlada-de-fertilizante-fosfatado.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2024.

DHEWA, T. Nanotechnology applications in agriculture: na update. **Octa Journal of Environmental Research**, v.3(2), p.204-211, 2015.

DINALLI, R.P.; CASTILHO, R.M.M.; GAZOLA, R.N. Utilização de adubos de liberação lenta na produção de mudas de *Vigna radiata* L. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.21, n.1, p.10-15, 2012.

EMBRAPA. **Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. (Documentos 208).

ETESAMI, H. Enhanced Phosphorus Fertilizer Use Efficiency with Microorganisms. In: Meena, R. (eds) **Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production**. Springer, Singapore, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_8)

INPI – INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. **Radar Tecnológico de Fertilizantes**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial – INPI. 121 p., 2023.

FELIX, F.C.; WLATER, L.S. Fertilizante de liberação controlada reduz perdas nas mudas. **Campos & Negócios**. 2021. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/fertilizante-de-liberacao-controlada-reduz-perdas-nas-mudas/>. Acessado em 07 de dezembro de 2023.

FERNANDES, F. R. C.; LUZ, A. B.; CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 380 p., 2010.

FERRARINI, S.F.; BONETTI, B.; HAMMERSCHMITT, M.E.; GALLI, C.F.; PIRES, M.J.R. Encapsulamento de zeólita fertilizante utilizando biopolímero. In:AZEVEDO, E.M. **A química nas áreas natural, tecnológica e sustentável**. Ponta Grossa: Atenas, 2020, p.124-134.

FERREIRA, W.A.; BOTELHO, S.M.; VILAR, R.R.L. **Composição química dos subprodutos da agroindústria do dendê**. Belém, PA: EMBRAPA-CPATU: Palmas, doc. 119, 1998, p.1-18.

FERTAHI, S. MOHAMED, I.; ZEROUAL, Y., OUKARROUM, A., BARAKAT, A. Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers, **Journal of Controlled Release**, v, 330, p. 341-361, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.12.026>.

FIGUEIREDO, C. C.; BARBOSA, D. V.; OLIVEIRA, S. A.; FAGIOLI, M.; SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 446-452, 2012.

FRAZÃO, J.J.; SILVA, Á.R.; SILVA, V.L. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1262–1267, 2014.

FREITAS, T. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada na cultura do cafeeiro: eficiência e custos**. 2017. 96f. Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2017.

GEROMEL, M.E.; PEREIRA, C. E.; KIKUTI, A.L.P.; KIKUTI, H.; SILVA, J.R. Adubos de liberação lenta em cana-de-açúcar. **Scientia Plena**. v.15, n.6. 2019. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.060201>.

GEROMEL, M.E; PEREIRA, C.E; KIKUTI, A.L.P.; SILVA, J.R. Adubos de liberação lenta em cana-de-açúcar. **Scientia Plena**. v. 15, n.6. 2019. Doi: 10.14808/sci.plena.2019.060201.

GPCA. Gulf Petrochemicals & Chemicals Association. CGC Fertilizers Market Outlook: **Challenges and opportunities for GCC fertilizer producers. Executive Summary**. GPCA: Dubai, United Arab Emirates, p.19, 2019. Disponível em: <https://www.gpca.org.ae/2019/11/05/gcc-fertilizer-market-outlook-challenges-and-opportunities-for-gcc-fertilizer-producers/>. Acesso em: 19 jan 2023.

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

GUELFY, D.; NUNES, A.P.P.; SARKIS, L.F.; OLIVEIRA, D.P. Innovative Phosphate Fertilizer Technologies to Improve Phosphorus Use Efficiency in Agriculture. **Sustainability**, 14, 2022, p.14266. <https://doi.org/10.3390/su142114266>

IFA - International Fertilizer Association – IFA. **Medium-term Fertilizer Outlook 2023 – 2027**. Disponível em: [https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/07/2023\\_IFA\\_medium\\_term\\_outlook\\_public\\_summary.pdf](https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/07/2023_IFA_medium_term_outlook_public_summary.pdf). Acesso em: 11 de dezembro de 2023.

LI, Z.; LIU, Z.; ZHANG, M.; LI, C.; LI, YC; WAN, Y.; MARTIN, CG Efeitos de longo prazo do cloreto de potássio de liberação controlada no potássio disponível no solo, absorção de nutrientes e rendimento de plantas de milho. **Pesquisa de Solo e Cultivo**, v.196, p.1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104438>.

NASCIMENTO, M; MONTE, M. B. M.; LOUREIRO, F. E. L. Agrominerais – Potássio. In: LUZ, A. B.; LINS, F. F. (eds.). **Rochas & Minerais Industriais: Uso e especificações**. 2ª ed. Rio de Janeiro:CETEM/MCT, 2008. p. 175-203.

MANFROI, C. Fertilizantes em 2022: mercado, manejo, plano nacional e importação. **SIAGRIERP**, 2022. Disponível em: <https://www.siagri.com.br/fertilizantes-em-2022-mercado-manejo-plano-nacional-e-importacao/>. Acesso em: 12 dez. 2023.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. Estatísticas do Setor. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/estatisticas-do-setor>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Instrução Normativa MAPA**, n.46, 2016. Disponível em: [https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-46-2016\\_332894.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/instrucao-normativa-46-2016_332894.html). Acesso em: 12 jan. 2024.

MARTINS JÚNIOR, A.A.; COELHO, M. A. O. Influência da adubação com fertilizante fosfatado revestido, na produtividade da cultura de soja. **Revista Perquisere**, v.19, n.2, 2022, p.87-94.

MELO, A.S.; REIS, I. R.; SOARES, D.A. Influência do Adubo de Liberação Lenta em Relação ao Convencional no Desempenho Morfológico de Mudanças de Café. **Revista Brasileira de Gestão e Engenharia**. v.13, p.1-9, 2022.

MENDONÇA, A. K. M. **Revisão sobre mistura de fertilizantes, geração e alternativas de minimização de finos**. 2023. 24 f. Monografia – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/38481/1/Revis%c3%a3oSobreMistura.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MENDONÇA, V.; TOSTA, M. S.; MACHADO, J. R.; GOULART JÚNIOR, A.R.; TOSTA, J.S.; BISCARO, G.A. Fertilização de liberação lenta na formação de mudas de maracujazeiro “amarelo”. **Ciências e Agrotecnologia**. v.31, n.2. 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000200012>.

MESSA, L.L. **Desenvolvimento de fertilizantes de eficiência aprimorada: uso de biopolímeros como matrizes para liberação de nutrientes**. 2022, 140 f. Tese (Doutorado – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos) - Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2022.

MESSA, L.L.; FROES, J.D.; SOUZA, C.F.; FAEZ, R. Híbridos de quitosana-argila para encapsulamento e liberação sustentada do fertilizante nitrato de potássio. **Química Nova**, .39 (10), P.1215–1220, 2016. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160133>.

MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho e análise de participação do mercado brasileiro de fertilizantes – Tendências e previsões de crescimento até 2028. **Mordor Intelligence**, © 2023. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/brazil-fertilizers-market>. Acesso em. 22 nov. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de fertilizantes de liberação controlada e análise de ações - Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2430). **Mordor Intelligence**, © 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/controlled-release-fertilizer-market>. Acesso em. 05 Jan. 2024.

MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de fertilizantes e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2023 – 2028)  
Source: **Mordor Intelligence**, © 2024. Disponível em:

<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/fertilizers-market>. Acesso em. 30 Jan. 2024.

PRASAD R.; BHATTACHARYYA, A.; NGUYEN, Q.D. Nanotechnology in Sustainable Agriculture: Recent Developments, Challenges, and Perspectives. **Frontiers Microbiology**, v.8, 2017. Doi: 10.3389/fmicb.2017.01014.

PELA, A.; BENTO, R.U.; CRISPIM, L.B.R.; REIS, R.A. Enhanced efficiency of phosphorus fertilizers in soybean and maize. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.10, 2019, p.1638-1642.

POLIDORO, J.C. Nutrientes para a agricultura - condicionantes e tendências do uso de fertilizantes no Brasil. In: **Plataforma Visão de futuro do Agro**. 2022. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/10180/80318395/Nutrientes+para+a+agricultura+-+condicionantes+e+tend%C3%A2ncias+do+uso+de+fertilizantes+no+Brasil+-+mega+4.pdf/a0ec44e4-ad89-b18c-0182-af01c502149f>> Acesso em: 10 jan. 2024.

POLIDORO, J.C. Fertilizante de eficiência aumentada: Estado da Arte e Perspectiva Futuras. FERTBIO 2016. **Rede FertBio**, Goiânia, 2016. Disponível em: <https://www.sbcs.org.br/fertbio2016/palestrantes/palestras/Jose%20Carlos%20Polidoro.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2024.

RIBEIRO, B. N.; COELHO, A. P.; SOUZA, J. R. DE .; GISSI, L. DE .; & LEMOS, L. B. Leaching and availability of potassium in soil affected by conventional and coated fertilizer sources. *Revista Brasileira De Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.26(12), 2022, p.924–929. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n12p924-929>

RIBEIRO, V.G.S.; SOUZA, C.H.E.; MACHADO, M.M.; GONÇALVES, L.L.; NETO. M. M.; SANTOS, E.S.; SANTOS, H.T. Agronomic Efficiency of phosphorus fertilizers with associate technology in soy crop in cerrado soil. **Journal of Agricultural Science**, v.13, n.10, 2021.

RODELLA, A. A. **Requisitos de qualidade dos fertilizantes minerais**. . Piracicaba: IPNI - International Plant Nutrition Institute. . Acesso em: 19 abr. 2024. , 2018.

ROSSA, U. B.; ANGELO, A. C.; NOGUEIRA, A. C.; REISSMANN, C. B. Fertilizante de liberação lenta no crescimento de mudas de *Araucaria angustifolia* e *Ocotea odorifera*. **Revista Floresta**, Curitiba, v.41, n.3, p. 491-500, 2011.

RYCHTER, P.; KOT, M.; BAJER, K.; ROGACZ, D.; SISKOVÁ, A.; KAPUSNIAK, J. Utilization of starch films plasticized with urea as fertilizer for improvement of plant growth. **Carbohydrate Polymers**, v.137, p. 127-138, 2016.

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**, v. 8, n. 1, e00347, 2020. Doi: 10.29069/forscience.2020v8n1.e347.

SASABUCHI, I. T. M.; KRIEGER, K. S.; NUNES, R. S.; FERREIRA, A. C.; XAVIER, G. T. M.; URZEDO, A. L.; CARVALHO, W. A.; FADINI, P. S. Sustentabilidade no uso de fósforo:

uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil **Química Nova**, v. 46, n. 2, p. 185–198, fev. 2023.

SCIVITTARO, W.B.; VEÇOZZI, T.A.; JARDIM, T.M.; SILEIRA, A.D.; PARFITT, J.M.B.; TREPTOW, R.C.B.; SILVEIRA, C.M.; SOUSA, R.O. Eficiência Agronômica de novos fertilizantes nitrogenados na cultura do arroz irrigado. Circular Técnica 196. EMBRAPA-Pelotas. 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189273/1/CIRCULAR-196.pdf>. Acesso em: 13 jan 2024.

SOKAL, T.F.; ROSA, E.F.F.; KASEKER, J.F.; CARLOS, S.S.; BERETA, S.F.; SANTOS, M.C.; NOHATTO, M.A. Avaliação agronômica e econômica do uso de fertilizantes potássicos na cultura do milho. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 10, n. 1, 2021. DOI: 10.21206/rbas.v10i1.10525. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/rbas/article/view/10525>. Acesso em: 29 jan. 2024.

SOUZA, R.N.; ROCHA, R.R. Fertilizante de liberação controlada evita perdas de N. **Campo & Negócios**. 2021. Disponível em: <https://revistacamponenegocios.com.br/fertilizante-de-liberacao-controlada-evita-perdas-de-n/>. Acessado em 07 de dezembro de 2023.

STÜPP, A.M.; NAVROSKI, M.C.; FELIPPE, D.; KNISS, D.D.C.; AMÂNCIO, J.C.; SILVA, M.A.; PEREIRA, M.O. Crescimento de mudas de Mimosa scabrella Benth em diferentes tamanhos de recipientes e função de doses de fertilizantes. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 3, n. 2. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/enflo/article/view/18613>. Acesso em: 7 de dezembro de 2023.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 6ed., p.1-888, 2017.

TAVARES, M.F.F.; HARBELI, C. O mercado de fertilizantes no Brasil e as influências mundiais. **ESPM**, Central de Casos. 2011. Disponível em: [https://centraldecases.espm.br/wp-content/uploads/2020/08/o\\_mercado\\_de\\_fertilizantes\\_no\\_brasil\\_e\\_as\\_influencias\\_mundiais.pdf](https://centraldecases.espm.br/wp-content/uploads/2020/08/o_mercado_de_fertilizantes_no_brasil_e_as_influencias_mundiais.pdf). Acesso em: 12 dez. 2023.

TIAN, XF; LI, CL; ZHANG, M.; LU, YY; GUO, YL; LIU, LF. Efeitos do fertilizante potássico de liberação controlada no potássio disponível, desempenho fotossintético e rendimento do algodão. **Jornal de Nutrição de Plantas e Ciência do Solo**, v.180, p.505-515, 2017. <https://doi.org/10.1002/jpln.201700005>

TIMILSENA, Y.P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of Science Food Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2015.

TINDALL T. **Informações recentes para otimização da produção agrícola**. In: YAMADA, T; ABDALLA, S. R. Tecnologias emergentes para os fertilizantes fosfatados. Informações Agronômicas. International Plant Nutrition Institute – INPI: Piracicaba- SP, n.117, 2007.

TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: na option for enhancing nutriente efficiency in agriculture. 2nd ed. International Fertilizer Industry Association, pg. 163, 2010.

TRINDADE, D. A. R. **Fertilizante de liberação controlada na produção de porta-enxerto de citrumelo “swingle”**. 2021. 39f. Monografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros. 2021. Disponível em: <<https://www.ica.ufmg.br/tcc/2020/TCC-DaniloAparecidoRodriguesTrindade.pdf>>. Acesso em 07 de dezembro de 2023.

YANG, X.; LI, C.; ZHANG, Q.; LIU, Z.; GENG, J.; ZHANG, M. Effects of polymer-coated potassium chloride on cotton yield, leaf senescence and soil potassium. **Field Crops Research**, v.212, 2017, p. 145-152.

YU, X.; KEITEL, C.; DIJKSTRA, F.A. Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops. **Global Food Security**, v. 29, 2021.

WEEKS, J.J, JR.; HETTIARACHCHI, G.M. A Review of the Latest in Phosphorus Fertilizer Technology: Possibilities and Pragmatism. **Journal of Environmental Quality**, v.48, 2019, 1300-1313. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0067>.

U.S. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2024**. U.S. Geological Survey, 212 p. 2024 Disponível em: <https://doi.org/10.3133/mcs2024>. Acesso em : 10 mar. 2024.

ZHU, G.; SUN, Y.; SHAKOOR, N.; ZHAO, W.; WANG, Q.; WANG, Q.; IMRAN, A.; LI, M.; LI, Y.; JIANG, Y.; ADEEL, M.; RUI, Y. Phosphorus-based nanomaterials as a potential phosphate fertilizer for sustainable agricultural development. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 205, 2023.

ZONTA, E.; STAFANTO, J. B.; PEREIRA, M. G. **Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais**. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banan, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. 2ª edição. BORGES, A. L. Brasília, DF: Embrapa, 2021.