



LUIZ FERNANDO MENEGHETTI DE AVILA

**FERTILIZANTES NPK: APLICAÇÃO, PRODUÇÃO E
RELEVÂNCIA ECONÔMICA**

**LAVRAS - MG
2022**

LUIZ FERNANDO MENEGHETTI DE AVILA

FERTILIZANTES NPK: APLICAÇÃO, PRODUÇÃO E RELEVÂNCIA ECONÔMICA

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

**LAVRAS - MG
2022**

LUIZ FERNANDO MENEGHETTI DE AVILA

FERTILIZANTES NPK: APLICAÇÃO, PRODUÇÃO E RELEVÂNCIA ECONÔMICA

NPK FERTILIZERS: APPLICATION, PRODUCTION AND ECONOMIC RELEVANCE

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 14 de setembro de 2022.
Dr. Gilson Campani Junior - UFLA
Dra. Natalia Maira Braga Oliveira - UFLA
Dra. Renata de Aquino Brito Lima Corrêa – UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Junior
Orientador

LAVRAS – MG
2022

RESUMO

O processo de modernização da agricultura foi determinante para a consolidação do setor como um dos pilares da sustentação econômica brasileira. Dentre as tecnologias mais utilizadas na agricultura estão os fertilizantes, que têm como função repor aos solos os nutrientes que estão em falta, além de corrigir problemas, como a acidez. A utilização de fertilizantes tem por objetivo balancear a composição desses solos, garantindo que as plantas cresçam adequadamente. Dos diferentes tipos de fertilizantes, se destacam os fertilizantes minerais, pela alta concentração de nutrientes, pela rapidez na liberação dos mesmos e, também, pela maior precisão em seus teores. Entre os nutrientes, destacam-se o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K), conhecidos como macronutrientes principais e que são essenciais para o correto desenvolvimento das plantas. É a partir desses três nutrientes, que surgem as fórmulas químicas dos fertilizantes minerais conhecidos como NPK. Os fertilizantes NPK são compostos que possuem um ou mais desses macronutrientes presentes em sua composição, provindos de uma vasta gama de matérias-primas. O processo de produção de fertilizantes NPK, engloba toda uma cadeia produtiva, cujo complexo produtor envolve atividades que vão desde a extração da matéria-prima até a composição de formulações aplicadas diretamente na agricultura. A indústria de fertilizantes está fortemente relacionada ao agronegócio. O crescimento da população mundial criou uma demanda crescente na produção de alimentos. Como os recursos agrícolas são limitados e as áreas disponíveis para o plantio cada vez mais escassas, tornou-se necessária a elevação da produtividade através do uso de fertilizantes. O Brasil, embora um grande produtor e exportador de *commodities* agrícolas, apresenta solos pobres em nutrientes, dependendo, portanto, da aplicação de fertilizantes para garantir sua produção. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo trazer um panorama sobre fertilizantes NPK, bem como apresentar e discutir a importância desse tipo de fertilizantes dentro do mercado econômico mundial, e, principalmente, no mercado brasileiro. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi definida uma série de temas a serem abordados, criando uma linha de raciocínio natural, abordando o que são fertilizantes, seus tipos, suas características e suas aplicações, e finalmente, seu processo de obtenção e produção. A partir do presente trabalho, espera-se que o leitor compreenda os conceitos básicos sobre fertilizantes minerais, seus processos de produção e a importância econômica do mesmo dentro do mercado mundial e principalmente na economia brasileira.

Palavras-chave: agronegócio, fertilizantes minerais, NPK, cadeia produtiva, mercado econômico.

ABSTRACT

The process of modernization of agriculture was determinant for the consolidation of the sector as one of the pillars of economic support in Brazil. Among the most used technologies in agriculture are fertilizers, whose function is to replenish the soils with nutrients that are lacking, besides correcting soil problems such as acidity, for example. The use of fertilizers has the objective of balancing the composition of these soils, guaranteeing that the plants grow adequately. Of the different types of fertilizers, mineral fertilizers stand out, due to the high concentration of nutrients, the speed in releasing them, and also the greater precision in their levels. Among the nutrients, Nitrogen (N), Phosphorous (P), and Potassium (K) stand out, known as the main macro-nutrients and essential for the correct development of plants. It is from these three nutrients that the chemical formulas of the mineral fertilizers known as NPK arise. NPK fertilizers are compounds that have one or more of these macronutrients present in their composition, coming from a wide range of raw materials. The production process of NPK fertilizers encompasses an entire production chain, whose production complex involves activities ranging from the extraction of raw materials to the composition of formulations applied directly to agriculture. The fertilizer industry is strongly related to agribusiness. The growth of the world population has created a growing demand for food production. As agricultural resources are limited and the areas available for planting increasingly scarce, it has become necessary to increase productivity through the use of fertilizers. Brazil, although a large producer and exporter of agricultural commodities, presents poor soils in nutrients, depending, therefore, on the application of fertilizers to ensure its production. In this context, the present work aims to bring an overview of NPK fertilizers, as well as to present and discuss the importance of this type of fertilizers in the world economic market, and especially in the Brazilian market. For the development of this work, a series of themes was defined to be approached, creating a natural line of reasoning, describing what are fertilizers, their types, their characteristics and applications, and, finally, the process of obtaining and producing them. From this work, it is expected that the reader will understand the basic concepts about mineral fertilizers, their production processes, and also their economic importance in the world market, and especially in the Brazilian economy.

Keywords: agrobusiness, mineral fertilizers, NPK, production chain, economic market.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de fertilizantes por semeadura.	19
Figura 2 - Método de aplicação de fertilizantes a lanço.....	19
Figura 3 - Método de aplicação pneumática de fertilizantes.....	20
Figura 4 - Método de aplicação de fertilizantes por irrigação.....	21
Figura 5 - Método de aplicação por pulverização.	22
Figura 6 - Maiores consumidores de fertilizantes 2021.....	29
Figura 7 - Exportação de fertilizantes NPK por país no ano de 2021.....	29
Figura 8 - Principais Indicadores nacionais do setor de fertilizantes, em toneladas (1994-2021).	33
Figura 9 - "Market Share" das empresas produtoras de fertilizantes no Brasil em 2021.	34
Figura 10 - As 5 culturas que responderam a 84% da demanda nacional de fertilizantes em 2021.....	35
Figura 11 - Exemplo de um formulado 04-14-08.....	35
Figura 12 - Cadeia produtiva da indústria de fertilizantes.	39
Figura 13 - Esquema da produção industrial de amoníaco, com o processo de Haber-Bosch correspondendo à segunda metade da imagem.....	42
Figura 14 - Compatibilidade entre fertilizantes.....	56
Figura 15 - Fluxograma simplificado de mistura de fertilizantes.....	59
Figura 16 - Sonda de tubo duplo perfurado (calador).....	61
Figura 17 - Disposição dos locais de coleta com a sonda em BB.	62
Figura 18 - Esquema de pontos de amostragem a granel.....	62
Figura 19 - Quarteador do Tipo Jones.	63
Figura 20 - Durômetro.	65
Figura 21 - Destilador de nitrogênio tipo Kjeldahl.....	68
Figura 22 - Fotômetro de chama.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nutrientes minerais essenciais e benéficos para as plantas.	14
Tabela 2 - Brasil na classificação mundial de produção e exportação em 2021.	31
Tabela 3 - Fertilizantes minerais nitrogenados e concentração dos nutrientes.	44
Tabela 4 - Características dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil: teor de P ₂ O ₅ e solubilidade.	47
Tabela 5 - Composição química dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil.	50
Tabela 6 - Fertilizantes com micronutrientes comercializados no Brasil e suas garantias mínimas.	55
Tabela 7 - Tolerância físicas para materiais sólidos.	64
Tabela 8 - Garantias mínimas dos principais micronutrientes em fertilizantes minerais.	71
Tabela 9 - Limites máximos de metais pesados tóxicos admitidos para os fertilizantes.	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 Objetivos gerais	11
2.2 Objetivos específicos	11
3 FERTILIZANTES	12
3.1 Tipos de fertilizantes	14
3.1.1 Fertilizantes orgânicos	14
3.1.2 Fertilizantes minerais	16
3.1.3 Fertilizantes organominerais	17
3.2 Métodos de aplicação	18
3.2.1 Aplicação por semeadura	18
3.2.2 Adubação a lanço	19
3.2.3 Aplicação pneumática	20
3.2.4 Aplicação por irrigação	20
3.2.5 Adubação por pulverização	21
4 FERTILIZANTES NPK	23
4.1 Fertilizantes nitrogenados	23
4.2 Fertilizantes fosfatados	25
4.3 Fertilizantes potássicos	26
5 RELEVÂNCIA ECONÔMICA	28
5.1 Mercado mundial	28
5.2 Mercado brasileiro	30
6 PROCESSO PRODUTIVO DE FERTILIZANTES NPK	38
6.1 Processo de obtenção de fertilizantes nitrogenados básicos	40
6.2 Processo de obtenção de fertilizantes fosfatados básicos	44
6.3 Obtenção das matérias-primas de fertilizantes potássicos	47
6.4 Micronutrientes	50
6.5 Formulações NPK	55
6.6 Qualidade	60
6.6.1 Aspectos físicos	60
6.6.1.1 Granulometria	60

6.6.1.2 Dureza.....	64
6.6.1.3 Densidade.....	65
6.6.2 Aspectos químicos	66
6.6.2.1 Análise de nitrogênio.....	67
6.6.2.2 Análise de fósforo	68
6.6.2.3 Análise de potássio.....	69
6.6.2.4 Análise de micronutrientes.....	70
6.6.2.5 Análise de metais pesados	71
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Iniciado em meados da década de 1960, o processo de modernização da agricultura brasileira foi determinante para a consolidação do setor como um dos pilares da sustentação econômica nacional (ALVES et al., 2005). Para manter-se a par das inovações tecnológicas, o setor agrícola faz uso da integração de diferentes tecnologias para o aumento da produtividade, como a irrigação, o melhoramento genético de sementes, a utilização de máquinas e implementos de alto desempenho, a agricultura de precisão e os insumos químicos e biológicos (LOPES e GUILHERME, 2000; COELHO, 2005).

Dentre as tecnologias de uso mais difundido na agricultura estão os fertilizantes, que têm como função repor aos solos os nutrientes que estão em falta, pois a maioria dos solos não possui todos os nutrientes ou elementos necessários para o correto crescimento e desenvolvimento de plantas. É nessa deficiência que entra a utilização de fertilizantes para conseguir balancear a composição desses solos, garantindo que as plantas irão receber os nutrientes necessários para crescerem adequadamente.

O Brasil dispõe de um enorme potencial agrícola. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de grãos (arroz, cevada, soja, milho e trigo), tendo uma das estruturas de custos mais competitivas do mundo, atrás apenas de China, Estados Unidos e Índia, sendo responsável por 7,8% da produção total mundial, e o segundo maior exportador de grãos do mundo, com 19% (EMBRAPA, 2020). O agronegócio é responsável por parcela importante do Produto Interno Bruto (PIB), cerca 27,4% (MERCADO...,2022). As projeções de crescimento da população e sua urbanização, a alta procura por alimentos realizada por China e Índia e o apelo para utilização de biocombustíveis exigem que a produção agrícola continue se elevando para acompanhar a demanda. No entanto, a quantidade de terras disponíveis para a agricultura é limitada, criando a necessidade de que as terras cultiváveis aumentem sua produtividade. Esse aumento de produtividade vem ocorrendo por meio do uso de fertilizantes, aliado a outras tecnologias.

Fertilizantes são definidos como substâncias que, ao serem incorporadas ao solo, fornecem nutrientes que são necessários para o correto desenvolvimento das mais diversas culturas agrícolas (EMBRAPA,2020). Eles podem ser divididos em orgânicos e inorgânicos, sendo que os fertilizantes orgânicos são produto de natureza fundamentalmente orgânica, enquanto os fertilizantes inorgânicos, ou minerais como são usualmente chamados, são produto de natureza fundamentalmente mineral. A grande vantagem trazida pelos fertilizantes minerais é que estes proporcionam uma liberação mais rápida de nutrientes, acelerando o

processo de fertilização das plantas, quando comparado aos fertilizantes orgânicos. Os fertilizantes minerais são comumente aplicados via solo, visto que esta é a principal forma de absorção dos nutrientes pelas plantas.

Os nutrientes que os solos mais apresentam deficiências são nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), que originam a fórmula básica dos fertilizantes minerais, NPK, no qual, indica-se o percentual de nitrogênio na forma elementar, o teor percentual de fósforo na forma de pentóxido de fósforo, P_2O_5 , e o conteúdo percentual de potássio na forma de óxido de potássio, K_2O . Se o solo não dispuser de suficiente quantidade de qualquer dos nutrientes mencionados, há prejuízo no crescimento e no desenvolvimento da planta. Isso mostra a tamanha importância da comercialização e utilização de fertilizantes NPK.

Por ser um grande produtor agrícola, o Brasil é também um grande consumidor de fertilizantes, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. Apesar de ser um grande demandante, a produção interna de insumos para fertilizantes é insuficiente para atender ao consumo, e cerca de 85% dos fertilizantes utilizados provêm de importações. A alta dependência externa deixa o país vulnerável a flutuações de câmbio e preços e traz o risco de escassez de insumos básicos. Devido a isso, o governo desenvolveu o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF), com o objetivo de reduzir a dependência externa dos vários tipos de fertilizantes que o Brasil tem atualmente, passando de 85% para cerca de 50% (CALIGARIS et al., 2022).

Seguindo esse contexto, o trabalho de revisão bibliográfica sobre fertilizantes NPK se torna importante para um entendimento amplo e ao mesmo tempo aprofundado do assunto. Dentre os temas a serem abordados, destacam-se os conceitos básicos sobre fertilizantes NPK, sua aplicabilidade e produção, envolvendo toda a cadeia produtiva, desde os processos de obtenção de suas matérias-primas, métodos de produção industrial, formulações, qualidade e exigências, até chegarmos nos fertilizantes NPK finais comercializados. Além disso, é também de grande relevância apresentar e discutir a importância e influência dos fertilizantes NPK no mercado mundial, e, principalmente, brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho de revisão bibliográfica tem como objetivo trazer um panorama sobre fertilizantes NPK, bem como apresentar e discutir a importância e influência desses tipos de fertilizantes dentro do mercado econômico mundial, e, principalmente, no mercado brasileiro.

2.2 Objetivos específicos

- a) Abordar os conceitos básicos sobre fertilizantes, desde o que são e para que servem, até seus diferentes tipos e variedades.
- b) Descrever toda a cadeia produtiva de fertilizantes minerais NPK, englobando todos os seus processos, iniciando desde a extração mineral, processo de obtenção de suas matérias-primas, método de produção industrial, formulações, qualidade e exigências até chegarmos nos fertilizantes NPK comercializados.
- c) Apresentar e discutir a importância e influência desses tipos de fertilizantes no mercado mundial, e, principalmente, brasileiro.

3 FERTILIZANTES

Segundo Mazoyer et al. (2010), os adubos ou fertilizantes são substâncias minerais ou orgânicas, que quando incorporadas ao solo, fornecem nutrientes e outros compostos, agindo de modo análogo aos hormônios de crescimento, necessários para que as plantas consigam completar seu ciclo de vida. Os fertilizantes têm como função repor ao solo os elementos e nutrientes necessários, garantindo que as plantas irão crescer e se desenvolver adequadamente. São muito utilizados com a finalidade de manter ou mesmo ampliar o potencial produtivo. Sua participação é fundamental para o aumento do rendimento físico da agricultura, isto é, sua produtividade.

As culturas só poderão produzir plenamente em quantidade e qualidade se, para além de outras condições ambientais favoráveis, tiverem à sua disposição durante todo o período de crescimento diversos nutrientes, nas quantidades e proporções adequadas. As exigências quantitativas de nutrientes variam com a natureza da cultura e seu respectivo nível de produção.

Os nutrientes que o solo precisa apresentar para que as plantas possam crescer e se desenvolver adequadamente podem ser classificados como macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes (KULAIF, 1999), como demonstra a Tabela 1.

Os macronutrientes primários são os elementos consumidos em maiores quantidades pelas plantas e são considerados os nutrientes principais, são eles: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). O nitrogênio atua na forma estrutural da planta, fazendo parte da molécula dos compostos orgânicos do carbono, tais como os diversos aminoácidos formadores das proteínas, enzimas e coenzimas, além de ser constituinte das moléculas de clorofila e é fator primordial no aumento da produtividade agrícola (MALAVOLTA, 1980). O fósforo é responsável pelos processos vitais das plantas, pelo armazenamento e utilização de energia, promove o crescimento das raízes e a melhora da qualidade dos grãos, além de acelerar o amadurecimento dos frutos (MALAVOLTA, 1980). O potássio é responsável pelo equilíbrio de cargas no interior das células vegetais, chamada regulação osmótica. Além desta função, esse metal atua no processo de absorção iônica, sendo que sua principal função bioquímica é a ativação enzimática (FAQUIN, 2005)

Os macronutrientes secundários também são consumidos em altas quantidades pelas plantas, porém menos que os primários. São eles: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). O cálcio ajuda a transportar nutrientes dentro da planta e a sintetizar determinadas enzimas (FAQUIN, 2005). O magnésio é um importante componente da molécula de clorofila, é

essencial para as reações fotoquímicas e metabólicas das plantas e participa da ativação enzimática. Ele ajuda a sintetizar determinadas enzimas. Seu papel como cofator enzimático é importante na produção de ATP (CASTRO et al., 2001). Já o enxofre é um componente estrutural de alguns aminoácidos e vitaminas e é fundamental na composição celular de cloroplastos (FAQUIN, 2005).

Os micronutrientes, por sua vez, são nutrientes os quais são consumidos em menores quantidades, e são eles: boro (B), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), cobre (Cu), sódio (Na), cobalto (Co), cloro (Cl), molibdênio (Mo) e silício (Si). Cada um dos micronutrientes possuem seus respectivos benefícios que auxiliam a planta a se desenvolver adequadamente.

Se o solo não dispuser de suficiente quantidade de qualquer dos nutrientes mencionados, seja macro ou micronutrientes, mesmo aqueles minimamente necessários, há prejuízo no crescimento e no desenvolvimento da planta.

A capacidade para fornecer nutrientes minerais às plantas varia enormemente com o tipo de solo e, dentro deste, com o seu nível de fertilidade. Um solo naturalmente fértil e produtivo pode tornar-se praticamente estéril, por esgotamento de um ou mais dos seus nutrientes ou por degradação devido à fenômenos erosivos. Já um solo com uma fertilidade natural muito baixa pode tornar-se altamente produtivo após correção dos fatores limitantes, seja por carências ou por excessos, que impeçam o normal crescimento e desenvolvimento das plantas. Outros fatores que influenciam na fertilidade dos solos são as condições meteorológicas prevalentes na região do mesmo e o uso de técnicas incorretas de colheita realizadas em plantações anteriores. Logo, o uso correto de fertilizantes para corrigir essas adversidades é essencial. Porém, mais importante do que a aplicação em si dos fertilizantes, é o conhecimento sobre quais tipos de fertilizantes devem ser empregados, para que se possa extrair um melhor aproveitamento dos nutrientes necessários.

Tabela 1 - Nutrientes minerais essenciais e benéficos para as plantas.

Categoria	Nutriente	Símbolo	Forma Primária de Absorção	Forma principal das reservas no solo
Macronutrientes	Nitrogênio	N	Nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+)	Matéria orgânica
	Fósforo	P	Fosfato, HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-	Matéria orgânica, minerais
	Potássio	K	Íon potássio (K^+)	Minerais
	Cálcio	Ca	Íon cálcio (Ca^{2+})	Minerais
	Magnésio	Mg	Íon magnésio, (Mg^+)	Minerais
	Enxofre	S	Sulfato (SO_4^{2-})	Matéria orgânica, minerais
Micronutrientes	Cloro	Cl	Cloreto (Cl^-)	Minerais, chuvas
	Ferro	Fe	Ferro ferroso (Fe^{2+})	Minerais
	Boro	B	Ácido bórico (H_3BO_3)	Matéria orgânica
	Manganês	Mn	Íon manganês (Mn^{2+})	Minerais
	Zinco	Zn	Íon zinco (Zn^{2+})	Minerais
	Cobre	Cu	Íon cúprico (Cu^{2+})	Matéria orgânica, minerais
	Molibdênio	Mo	Molibdato (MoO_4^{2-})	Matéria orgânica, minerais
	Níquel	Ni	Íon níquel (Ni^{2+})	Minerais

Fonte: Adaptado de Reetz (2017).

3.1 Tipos de fertilizantes

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2020), os fertilizantes podem ser classificados como orgânicos, minerais e organominerais.

3.1.1 Fertilizantes orgânicos

Os fertilizantes orgânicos são definidos como produtos de natureza fundamentalmente orgânica, obtidos por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou

controlado, a partir de matérias-primas de origem vegetal ou animal (ZONTA; STAFANATO; PEREIRA, 2021).

Este tipo de fertilizante é dividido em grupos devido às diferentes maneiras, materiais e processos com os quais podem ser produzidos. São classificados como simples, mistos, compostos e biofertilizantes.

- a) Fertilizante orgânico simples: produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas.
- b) Fertilizante orgânico misto: produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas.
- c) Fertilizante orgânico composto: produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas.
- d) Biofertilizante: produto que contém princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante.

O uso de fertilizantes orgânicos traz diversos benefícios para a saúde do solo, como melhoramento na estrutura, agregação e armazenamento de água. Eles costumam ser ricos em microrganismos, o que confere dinamismo ao solo e pode contribuir para a produtividade a longo prazo.

Uma das grandes vantagens do uso de adubos orgânicos é a disponibilização dos nutrientes, que ocorre de forma mais lenta e gradual, quando comparada com adubos minerais de alta solubilidade. O N e o P possuem uma liberação mais lenta dependendo da mineralização da matéria orgânica e, com isso, proporcionam disponibilidade ao longo do tempo, o que por vezes favorece o melhor aproveitamento pela planta. O K é disponibilizado de forma mais rápida que estes dois nutrientes, pois se encontra livre nos materiais orgânicos e sua liberação dependente apenas do rompimento da parede celular.

Essa liberação mais lenta de nutriente faz com que os fertilizantes orgânicos não sejam muito empregados em plantações cujos objetivos sejam altos rendimentos produtivos e de maneira rápida. Logo, são mais utilizados em plantações que não exijam rapidez e até mesmo produções de consumo próprio, ou serviços de jardinagem.

Vale ressaltar que este tipo de fertilizante não tem capacidade de substituir totalmente os insumos minerais na maioria dos casos. A substituição completa é difícil de ser alcançada, pois a densidade de nutrientes é menor, além de serem variável, tornando a sua aplicação mais complexa.

3.1.2 Fertilizantes minerais

Os fertilizantes minerais são definidos como produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes originários da extração mineral de rochas de potássio e fosfato ou produzido pela indústria química (ZONTA; STAFANATO; PEREIRA, 2021).

Assim como os fertilizantes orgânicos, os fertilizantes minerais também são classificados em grupos devido às diferentes maneiras, materiais e processos com os quais podem ser produzidos. Sendo classificados como simples, mistos ou complexos (ZONTA; STAFANATO; PEREIRA, 2021).

- a) Fertilizante mineral simples: produto formado, fundamentalmente, por um composto químico, contendo um ou mais nutrientes de plantas.
- b) Fertilizante mineral misto: produto resultante da mistura física de dois ou mais fertilizantes minerais.
- c) Fertilizante mineral complexo: produto formado de dois ou mais compostos químicos, resultante da reação química de seus componentes, contendo dois ou mais nutrientes.

A maior vantagem dos fertilizantes minerais é o fato deles possuírem uma concentração de nutrientes conhecida, possibilitando quantificar com maior exatidão a dose correta para atender às necessidades específicas das culturas agrícolas. Além de possuir rápida liberação de seus nutrientes e rápida absorção dos mesmos pelas plantas. Esses fatos fazem com que o uso desse tipo de fertilizante seja alto quando se tem o propósito de aumentar a produtividade à curto prazo.

Este tipo de fertilizante é composto majoritariamente pelos três nutrientes principais, os macronutrientes primários nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Eles fornecem à planta minerais diretamente assimiláveis e, portanto, têm uma ação mais rápida, sendo muito eficazes quando se tem como objetivo uma produtividade alta e à curto prazo. A combinação de diferentes fertilizantes minerais simples para a obtenção de mais de um dos nutrientes, usualmente, reconhecidas pela expressão de fórmula NPK.

3.1.3 Fertilizantes organominerais

Fertilizantes organominerais são produtos que combinam um componente mineral com um material orgânico. Para serem considerados organominerais, esses fertilizantes precisam apresentar, de acordo com a Legislação, IN 25 (Brasil, 2009), concentrações mínimas de nutrientes e de carbono (C) orgânico.

O principal componente orgânico utilizado na produção de fertilizantes organominerais até pouco tempo atrás era a turfa, de origem sedimentar. Entretanto, em função de novos conhecimentos, atualmente vem sendo empregado diferentes fontes orgânicas, como resíduos da agroindústria (setores sucroalcooleiros), esterco de bovinos de corte e leite, de suínos e de aves, que são atividades que geram grandes quantidades de rejeitos.

O fertilizante organomineral se caracteriza por apresentar potencial químico reativo relativamente inferior ao fertilizante mineral convencional, porém sua solubilização é gradativa no decorrer do período de desenvolvimento da cultura. Desse modo, sua eficiência agrônômica pode se tornar maior se comparado às fontes minerais solúveis (TEIXEIRA et al., 2011).

Os fertilizantes organominerais apresentam menores perdas de nutrientes seja por lixiviação e/ou volatilização, melhorando o aproveitamento pelas plantas, uma vez que o componente orgânico deste produto, seja proveniente da turfa, de dejetos animais, compostos orgânicos ou resíduos da agroindústria, ajuda a melhorar a capacidade de troca de cátions. Assim o fertilizante organomineral pode ser aplicado de uma só vez, enquanto para os fertilizantes minerais recomenda-se o fracionamento da aplicação com o objetivo de reduzir perdas e aumentar eficiência de uso.

Quanto às vantagens do fertilizante organomineral, espera-se uma redução significativa das perdas de N e maior eficiência na disponibilização do P, em função da presença de grandes quantidades de ânions orgânicos em sua composição.

A utilização de fertilizantes organominerais é uma tecnologia que vem ganhando bastante espaço na agricultura brasileira, visto que permite a reciclagem dos nutrientes contidos nos dejetos da produção de suínos e aves, por exemplo, associado ao enriquecimento de nutrientes na forma mineral. Permitindo, assim, produzir fórmulas comerciais específicas para cada cultura, aumentando a uniformidade nas concentrações e a disponibilidade de nutrientes, o que de certa forma influencia em menores demandas de aplicações no campo.

3.2 Métodos de aplicação

Existem diversas formas de aplicar o fertilizante, dos quais cinco se destacam no cenário agrícola: a aplicação na sementeira, a lanço, a pneumática, a irrigação e por pulverização.

3.2.1 Aplicação por sementeira

O fertilizante aplicado na sementeira, como o nome sugere, é aplicado em conjunto com a operação de plantio, sendo depositado no solo pouco abaixo das sementes. Nessa técnica, há a vantagem de que, quando a semente é aplicada ao solo, ela já tem disponível os nutrientes necessários, o que permite um desenvolvimento mais rápido na fase inicial. Nessa estratégia, o uso de equipamentos que fazem a distribuição de sementes e adubos de modo conjunto facilita o processo de adubação e sementeira.

Entretanto, a planta também necessitará de nutrientes durante todo seu ciclo de vida, e não apenas no momento do plantio. Dessa forma, mesmo aplicando uma grande quantidade de nutrientes na sementeira, será preciso realizar outras adubações pensando em uma melhor produtividade. Além disso, a adubação simultânea com o plantio pode reduzir a eficiência da plantadeira, uma vez que será necessário parar a máquina mais vezes para abastecê-la com fertilizantes do que com sementes.

A técnica de aplicação por sementeira é indicada principalmente para solos com necessidade de fósforo, um nutriente fundamental para o crescimento dos vegetais e que precisa ser depositado perto das raízes das plantas. Um exemplo de equipamento é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Aplicação de fertilizantes por sementeira.



Fonte: BRASMAX (2018).

3.2.2 Adubação a lanço

Na adubação a lanço é possível parcelar as doses de fertilizantes que são aplicadas na cultura ao longo do seu ciclo de vida. Isso pode ser realizado antes da germinação das sementes ou em cobertura, que é quando a planta já está em estágios mais avançados de desenvolvimento.

Nessa técnica, o fertilizante é depositado em discos giratórios, ilustrado na Figura 2, com pás, que espalham o produto na lavoura em uma faixa de terra predeterminada de modo superficial. A adubação a lanço tem sido a escolha de muitos agricultores, pois apresenta alto rendimento na operação, além de oferecer a possibilidade de parcelar a nutrição da planta durante seus estágios de desenvolvimento.

Figura 2 - Método de aplicação de fertilizantes a lanço.



Fonte: Diferencial... (2020).

No entanto, essa não é a técnica mais indicada em se tratando da adubação com fósforo, já que esse nutriente precisa ser depositado perto das raízes, o que não funciona tão bem em uma aplicação superficial.

3.2.3 Aplicação pneumática

Nessa técnica, o fertilizante é conduzido para as linhas individuais de plantio, por meio de tubulações e assistência de ar. Para isso, o agricultor deve depositar o adubo sólido no tanque da máquina e manobrar o equipamento pela lavoura (JACTO, 2018). Ao acionar a adubação, cada tubulação lança o fertilizante em uma linha individual, como exemplifica a Figura 3.

Figura 3 - Método de aplicação pneumática de fertilizantes.



Fonte: AGRIEXPO (2022).

Utilizado para culturas que apresentam espaçamento entre linhas de plantio mais elevado, como a cana-de-açúcar, nas quais a aplicação na linha se torna mais eficiente. Além disso, a aplicação pneumática também promove um aproveitamento melhor do produto, já que ele é depositado mais perto das raízes, o que favorece a absorção pelo solo e evita o desperdício.

3.2.4 Aplicação por irrigação

A adubação por irrigação, ou fertirrigação, como o próprio nome indica, consiste na diluição de uma fórmula líquida, a qual é aplicada na lavoura por meio dos pivôs de irrigação já instalados ou mesmo do sistema de irrigação por gotejamento. Ao trabalhar com adubação

por irrigação, é interessante que se dê uma atenção especial aos parâmetros de irrigação para conseguir a cobertura necessária para garantir um funcionamento adequado dos agroquímicos. O método é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Método de aplicação de fertilizantes por irrigação.



Fonte: Conheça... (2020).

3.2.5 Adubação por pulverização

Por fim, temos a adubação por pulverização, ainda pouco difundida no Brasil. Essa técnica também é conhecida como adubação foliar. O adubo é misturado à água e pulverizado diretamente sobre as folhas e não no solo, como ocorre com os fertilizantes sólidos. A absorção desse tipo de adubo se dá por meio das folhas (JACTO, 2018). A Figura 5 evidencia a aplicação por esse método.

A adubação foliar promove resultados melhores do que a adubação via solo quando é necessário suprir uma demanda nutricional da planta com mais rapidez ou em fases do crescimento da planta. Isso porque as folhas conseguem absorver os nutrientes de forma mais rápida, principalmente em se tratando dos micronutrientes, que são essenciais para que as plantas produzam com qualidade. Vale ressaltar que, embora essa estratégia tenha muitos benefícios, não é indicado que o agricultor deixe de utilizar outros tipos de aplicação via solo.

Figura 5 - Método de aplicação por pulverização.



Fonte: EQUIPA CENTER (2022).

4 FERTILIZANTES NPK

As deficiências mais comuns apresentadas pelos solos são de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), daí a fórmula básica dos fertilizantes NPK. Essas formulações são resultantes da combinação de diferentes fertilizantes minerais simples para fornecimento de dois ou mais nutrientes. Estes podem ser na forma de misturas de grânulos ou mistura granulada. A mistura de grânulos consiste na combinação física de diferentes fertilizantes minerais simples, que são misturados na propriedade. A mistura granulada dos diferentes nutrientes encontra-se toda nos mesmos grânulos, sendo estes prontos para uso.

Os fertilizantes NPK não necessariamente precisam conter os três nutrientes principais ao mesmo tempo, podendo ser apresentados nas formas N, P, K, NP, NK, PK e NPK, dependendo das carências que cada cultura e solo apresentem.

Neste tipo de fertilizante, a composição é definida por três números, que expressam, respectivamente, o percentual de nitrogênio na forma de N elementar, o percentual de fósforo na forma de pentóxido de fósforo, P_2O_5 , e o percentual de potássio na forma de óxido de potássio, K_2O . Por exemplo, a fórmula 04-30-10 apresenta 4% de N, 30% de P_2O_5 e 10% de K_2O , ou seja, a aplicação de 100 kg dessa fórmula adicionará ao solo 4 kg de N, 30 kg de P_2O_5 e 10 kg de K_2O .

4.1 Fertilizantes nitrogenados

O nitrogênio é um componente chave dos aminoácidos e das proteínas. Ele também faz parte da molécula de clorofila, que controla a fotossíntese, a reação de captura da energia solar pelas plantas. O N e o Mg são os únicos elementos da molécula da clorofila que vêm do solo. Nesse sentido é necessário um adequado suprimento de N para o processo da fotossíntese e para a produção de proteínas nas culturas, o que torna o nitrogênio essencial. Logo, os fertilizantes que são fornecedores de nitrogênio, são chamados de fertilizantes nitrogenados.

Os fertilizantes nitrogenados são produzidos em uma variedade de formulações, cada uma com diferentes propriedades e usos para os sistemas de produção das culturas. Todos esses essencialmente começam com a amônia anidra, que pode ser produzida a partir do ar e do gás natural pelo processo de Haber-Bosch, através da reação química do gás hidrogênio com o gás nitrogênio, sob alta temperatura e pressão (Equação 2, seção 5.1). Erisman et al. (2008) estimam que, na ausência de fertilizantes nitrogenados, haveria uma produção de

alimentos 48% inferior à atual. Além da aplicação direta do fertilizante amônia anidra, amônia é também usada como matéria-prima na produção de ureia, nitrato de amônio e outros fertilizantes nitrogenados, assim como na produção de MAP (fosfato monoamônico), DAP (fosfato diamônico) e outros fertilizantes multinutrientes.

Os fertilizantes nitrogenados convencionais, que predominam no mercado, contêm N na forma solúvel e prontamente disponível. Nestes fertilizantes, o nutriente encontra-se principalmente na forma amoniacal, nítrica e amídica, podendo fornecer também cálcio, magnésio e enxofre.

As diferentes formas de N, quando aplicadas ao solo, dão respostas muito semelhantes em termos de produtividade das culturas. A eficiência de alguns produtos pode ser reduzida em função das perdas por lixiviação de nitrato ou volatilização de amônia, sob certas condições de temperatura e umidade do solo. A maioria dos fertilizantes nitrogenados tende a ser rapidamente disponível e está sujeito a perdas antes do nitrogênio poder ser absorvido pela cultura

Dentre os fertilizantes utilizados, as fontes nitrogenadas são as mais susceptíveis às alterações climáticas, podendo, quando manejadas de forma inadequada, apresentarem expressivas perdas de nitrogênio (N) para o ambiente. Sob uma situação de primaveras úmidas em climas tropicais, o nitrogênio do solo pode ser perdido por lixiviação ou desnitrificação, o que torna necessário maior número de aplicações em cobertura de fertilizantes nitrogenados para reduzir as perdas e atender adequadamente as necessidades das culturas. Portanto, aplicações de fertilizantes nitrogenados no plantio e em coberturas pode ser uma forma adequada de manejar o N nessas situações.

Atualmente, a ureia, corresponde aproximadamente a 60% dos fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura. Este fertilizante pode ser utilizado de diversas formas como fonte de N para as culturas. Porém, seu uso mais comum é a aplicação sob a superfície ou incorporado ao solo. Entretanto, devido à sua alta solubilidade, a ureia pode também ser dissolvida em água e aplicada ao solo, adicionada à água de irrigação ou pulverizada sobre a folhagem das plantas.

Contudo, a ureia apresenta como grande desvantagem, expressivas perdas de N por volatilização da amônia (NH_3). Atualmente, uma das alternativas utilizadas para melhorar a eficiência da ureia e reduzir as perdas de N por volatilização é o uso de produtos de liberação controlada e estabilizados, conhecidos como “fertilizantes de eficiência aumentada”. Os fertilizantes de liberação controlada consistem no revestimento da ureia com polímeros e/ou enxofre (S), no qual o N vai sendo liberado de acordo com o desenvolvimento da planta. A

tecnologia mais utilizada, consiste no uso de aditivos juntamente à ureia que reduzem as perdas por lixiviação e especialmente por volatilização. A ureia contendo o inibidor da urease NBPT (N-butil tiofosfórico triamida) é o produto mais conhecido e utilizado.

4.2 Fertilizantes fosfatados

O fósforo também tem um papel vital na fotossíntese, funcionando na captura e transferência de energia para as ligações químicas. Os tecidos meristemáticos novos e que estão em crescimento nas plantas têm uma alta concentração de P. Os materiais genéticos, DNA e RNA, são construídos ao redor da estrutura de átomos de fósforo. Além disso, o P exerce um papel fundamental no metabolismo dos açúcares e amidos, todos críticos nos processos de divisão celular e crescimento (REETZ, 2017).

O fósforo em materiais fertilizantes é usualmente expresso na forma de óxido (P_2O_5). Apesar dessa forma em realidade não existir no material fertilizante, ela tem sido adotada como uma forma padrão para comparação entre fertilizantes fosfatados.

Dentre as formas de fontes de P disponíveis no mercado, os fertilizantes fosfatados totalmente acidulados ocupam posição de destaque, principalmente, em função do baixo custo por unidade do nutriente presente nestes produtos. Dentre estes, pode-se destacar os superfosfatos simples e triplo, assim como o MAP e o DAP.

Em análises de solos, a disponibilidade de P é medida pela solubilidade em soluções extratoras específicas (água, ácido cítrico, ácido fórmico, ácido clorídrico + ácido sulfúrico e resinas aniônicas) como uma indicação da taxa de transformação sob várias condições do solo.

Sob condições de agricultura intensiva em solos bem adubados, os fertilizantes fosfatados solúveis promovem respostas semelhantes em termos de produtividade por unidade de P_2O_5 “disponível”. Fósforo solúvel em água, entretanto, é superior para culturas de ciclo curto e sistema radicular limitado em solos deficientes em P.

Os fertilizantes sofrem uma série de reações no solo para serem transformados em uma forma disponível para as plantas (fosfato inorgânico). A maioria dos fertilizantes fosfatados modernos são prontamente solúveis, sendo tratados com ácido sulfúrico ou fosfórico para aumentar a solubilidade.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados e fosfatados juntos em faixa (a lanço) ou como produtos combinados, algumas vezes, apresentam vantagens para a utilização dos

nutrientes. A acidificação promovida pelo nitrogênio ajuda a prevenir que o fósforo seja fixado em formas não disponíveis. Formas gasosas de N podem ocorrer pela aplicação superficial de fosfato de diamônio (DAP) em solos neutros. A eficiência da utilização do fertilizante fosfatado depende das condições de clima, pH do solo, tipo de cultura, época e localização do fertilizante fosfatado.

4.3 Fertilizantes potássicos

O potássio é encontrado em todas as células vivas. Ele é encontrado em pequenas quantidades na solução do solo como cátion de K^+ (com carga positiva), e é absorvido pelas plantas nessa forma. Na planta, o K regula o fluxo de água e de outros materiais através das membranas celulares, e também ajuda a regular uma grande variedade de processos químicos e enzimáticos. O potássio por si só não forma composto químico nas plantas, mas atua no balanço iônico das cargas elétricas por se movimentar para dentro e para fora através das membranas celulares. Ao fazer isso, o K é essencial para a absorção de nutrientes e movimento através da planta, e na manutenção de seu balanço hídrico. Ele é então, essencial para a utilização de outros nutrientes e da água (REETZ, 2017). Muito do K usado por uma cultura em crescimento não é acumulado no grão, mas permanece nos resíduos das culturas (colmo, folhas e palha). Quando uma planta morre, o potássio é facilmente lixiviado do resíduo da cultura e pode até ser lixiviado do tecido vivo da planta sob fortes chuvas.

Os fertilizantes potássicos devem ser, geralmente, aplicados na época do plantio. Os íons de K^+ são adsorvidos no solo e então permanecem disponíveis, protegidos contra a lixiviação. Entretanto, dividir as aplicações é recomendável para algumas culturas em solos e climas onde são esperadas altas taxas de perdas por lixiviação.

De forma análoga ao P, os teores de potássio (K) nos fertilizantes são expressos sob a forma de K_2O (óxido de potássio). Todos os fertilizantes minerais potássicos convencionais possuem alta concentração desse elemento, são totalmente solúveis em água, compatíveis de serem misturados com a maioria dos fertilizantes comerciais e de ação rápida. A fórmula para converter a quantidade de K em equivalente de K_2O está demonstrada na Equação 1.

$$K \times 1,2 = K_2O \quad (1)$$

Na equação anterior, o coeficiente 1,2 é obtido através da razão entre o peso molecular do óxido de o peso molecular do potássio elementar.

O cloreto de potássio (KCl) é a fonte mais utilizada de K, uma vez que este é o produto que apresenta a maior concentração equivalente de K_2O , além de seu processo de produção ser, em relação aos demais fontes de K, o de menor custo. Contudo, cuidados devem ser tomados na utilização do KCl no que se refere à dose de K_2O aplicada, especialmente no plantio, para que não cause salinidade temporária no solo. Isso ocorre, devido ao fato de o KCl apresentar, dentre todos os fertilizantes minerais, o maior índice salino, em virtude de conter em sua composição mássica de 42% a 47% de cloro. Dessa forma, o sulfato de potássio (K_2SO_4) é frequentemente utilizado na adubação das culturas em substituição ao KCl quando o cloro (Cl) é indesejável.

5 RELEVÂNCIA ECONÔMICA

A indústria de fertilizantes está fortemente relacionada ao agronegócio. O crescimento da população mundial, que veio acompanhado pela elevação da renda em mercados emergentes e mudança na dieta das pessoas, criou uma demanda crescente na produção de alimentos. Além desses fatores, a tendência de substituição de combustíveis derivados do petróleo por biocombustíveis também vem pressionando a elevação da produção agrícola. Como os recursos agrícolas são limitados e as áreas disponíveis para o plantio cada vez mais escassas, o aumento da produção via expansão da fronteira agrícola já não é a melhor opção, tornando-se necessária a elevação do rendimento por hectare plantado (produtividade) (COSTA; SILVA,2012).

O aumento de produtividade pode ocorrer por meio da adoção de técnicas apropriadas de cultivo e manejo, como a utilização de agricultura de precisão, correta aplicação de fertilizantes, rotação de culturas, correção de acidez do solo, manejo integrado de pragas e uso de defensivos agrícolas.

5.1 Mercado mundial

A crescente necessidade de expansão das áreas de plantio no mundo implica aumento do consumo de fertilizantes, fazendo-se necessária a criação de novos estímulos para a produção desse insumo agrícola em larga escala global. O mercado mundial de fertilizantes vem revelando taxas crescentes na última década. Segundo dados da *International Fertilizer Industry Association* (IFA), o consumo mundial de fertilizantes no ano de 2021 foi de 200 milhões de toneladas de nutrientes. No período 2011-2021, o consumo cresceu 12%. No mundo, o consumo de fertilizantes está concentrado principalmente nos fertilizantes nitrogenados, que representaram cerca de 55% da demanda total por nutrientes, do qual os fosfatados foram responsáveis por cerca de 25% e os potássicos, 20%. A demanda por fertilizantes é altamente concentrada, sendo quatro países responsáveis por 64% do total consumido em 2021 (IFA, 2022).

A China, com quase 1,4 bilhão de habitantes, é o maior consumidor de nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A Índia é o segundo maior consumidor de N e P e o quarto de K em razão da baixa concentração de nutrientes no solo indiano. Os EUA, um dos principais fornecedores de alimentos, combustíveis e fibras do mundo, é o terceiro maior consumidor de N e o quarto de P e K. O Brasil, superpotência agrícola devido à abundância

de terras e água, é o quarto maior consumidor de N e o terceiro de P. Um panorama dessa classificação pode ser visto na Figura 6. Por possuir solos com deficiência de K, é o segundo maior consumidor do nutriente. Vale ressaltar que China, Índia e Brasil vêm apresentando taxas de crescimento para o consumo de fertilizantes de 4% a.a., superior à taxa mundial e à dos EUA.

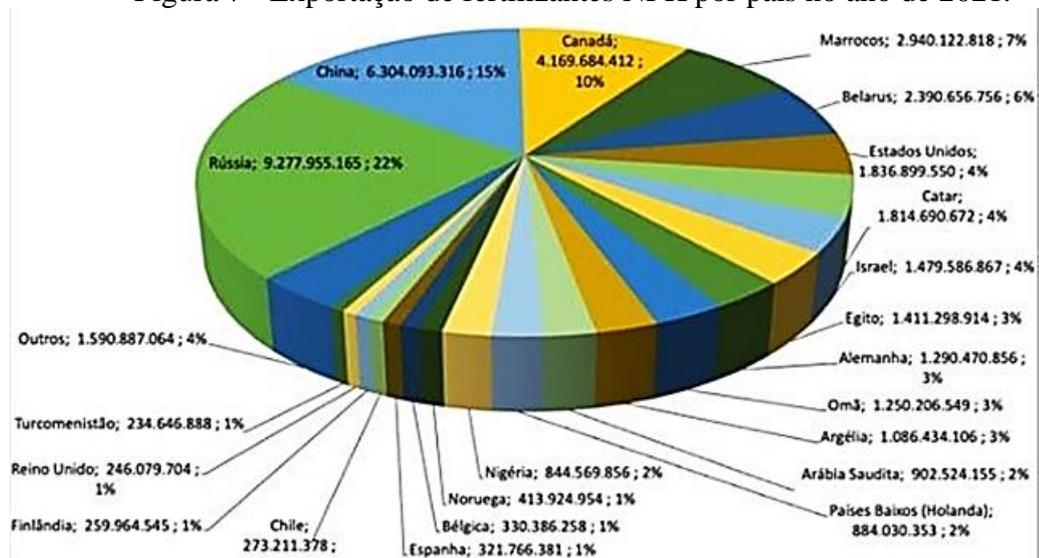
Figura 6 - Maiores consumidores de fertilizantes 2021.



Fonte: Outlook... (2021).

Já no quesito produção e exportação, os principais países exportadores de nutrientes são Rússia, Canadá e Estados Unidos, sendo a Rússia predominante nesse mercado. A China, Estados Unidos, Índia e a Rússia são os maiores produtores de nitrogenados. A Rússia também se destaca como importante produtora de potássicos, já o Brasil é grande produtor apenas de fertilizantes fosfatados (INACIO, 2013). A Figura 7 mostra os principais países exportadores de fertilizantes NPK no ano de 2021

Figura 7 - Exportação de fertilizantes NPK por país no ano de 2021.



Fonte: COMEXTAT (2021).

A pandemia de Covid-19 afetou os fluxos globais de comércio, dificultando a logística, entrega, exportação e importação de fertilizantes. Essas restrições foram mitigadas por decisões governamentais: em diversos países, as atividades econômicas relacionadas à cadeia de fertilizantes foram consideradas essenciais. Tal evento contribuiu para que os preços em dólar do insumo em 2020 ficassem, em média, 18% menores que no ano anterior (IFA, 2020).

De qualquer forma, a pandemia de Covid-19 demonstrou o risco de se depender fortemente da importação de produtos essenciais para a sustentação de um dos setores mais profícuos da economia nacional. Mais recentemente, esse temor voltou à tona, embora em menor escala, ao se discutir a imposição de sanções econômicas à Bielorrússia, um dos principais fornecedores de fertilizantes potássicos para o Brasil (BRASIL, 2021). Por outro lado, a China e, a Rússia, limitaram as exportações de fertilizantes em 2021/22, com o objetivo de garantirem o abastecimento local desses insumos e a manutenção de preços ao produtor rural interno para proteger as suas economias contra a falta de matéria-prima para produção de fertilizantes, garantindo a segurança alimentar e evitando a elevação dos preços dos alimentos. Essas medidas afetam a safra 2021/22 e ameaçam as safras seguintes de alimentos no Brasil. (Brasil, 2021)

5.2 Mercado brasileiro

O Brasil, embora um grande produtor e exportador de *commodities* agrícolas, apresenta solos pobres em nutrientes, dependendo, portanto, da aplicação de fertilizantes para garantir sua produção. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de grãos, atrás apenas de China, Estados Unidos e Índia, sendo responsável por 7,8% da produção total mundial, e o segundo maior exportador de grãos do mundo, com 19% (EMBRAPA, 2020). A Tabela 2 apresenta a posição do Brasil na classificação mundial de produção e exportação de alguns produtos agropecuários em 2021. Segundo dados da Secretaria de Comércio e Relações Internacionais do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), em 2021, o agronegócio brasileiro foi responsável por 48% do total das exportações brasileiras. No mesmo ano, o número de empregos relacionados ao agronegócio foi de 17,3 milhões, 20,1% do total (BARROS et al., 2021).

Tabela 2 - Brasil na classificação mundial de produção e exportação em 2021.

Principais Produtos	Produção	Exportação	Representação mundial em exportação
Soja	1°	1°	49,9%
Açúcar	1°	1°	30,3%
Café	1°	1°	25,5%
Carne de aves	2°	1°	20,9%
Carnes bovinas	2°	1°	14,4%
Milho	3°	2°	19,8%
Algodão	4°	2°	12,4%
Silvicultura	4°	2°	8,9%
Carne suína	5°	7°	4,8%
Arroz	9°	8°	2%

Fonte: Do autor (2022) com base em dados de Aragão e Contini (2021a).

Um dos maiores fatores que influenciam a produtividade da agricultura no Brasil e no mundo é o uso de fertilizantes químicos (COSTA; SILVA, 2012). Segundo Costa e Silva (2012), o insumo é responsável por cerca de metade da produtividade de uma safra agrícola. Nas palavras dos autores, “A agricultura é o motor do país, ou seja, sem fertilizante o Brasil potencialmente produzirá a metade do que produz hoje”.

No Brasil, em 2021, o agronegócio respondeu por 27,4% do Produto Interno Bruto (CEPEA, 2022). Conforme dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos, o Brasil é responsável por cerca de 8,5% do consumo global de fertilizantes, atrás da China, da Índia e dos EUA. A taxa de crescimento de consumo deste insumo foi de 4,3% a.a. nos últimos 20 anos, contra taxa mundial de 4,8% a.a. Um levantamento feito pela CNN Brasil apontou que, de 1998 até 2021, houve um aumento de 440% na importação de fertilizantes (GHIRALDELLI; FREUA, 2022). A Figura 8 evidencia os principais indicadores nacionais do setor de fertilizantes, no período de 1994 a 2021.

A produção de insumos para fertilizantes nitrogenados depende da oferta de amônia e enxofre que, por sua vez, são subprodutos derivados do petróleo e gás natural. Em relação ao potássio, o Brasil não possui tecnologias de ponta para que esses elementos químico-minerais se tornem de fácil acesso. No caso do fósforo, atualmente o insumo menos dependente das importações, há pouca qualidade na lavra, uma vez que a rocha fosfática brasileira é considerada ígnea (rochas magmáticas ou rochas eruptivas), tornando o Brasil cada vez mais

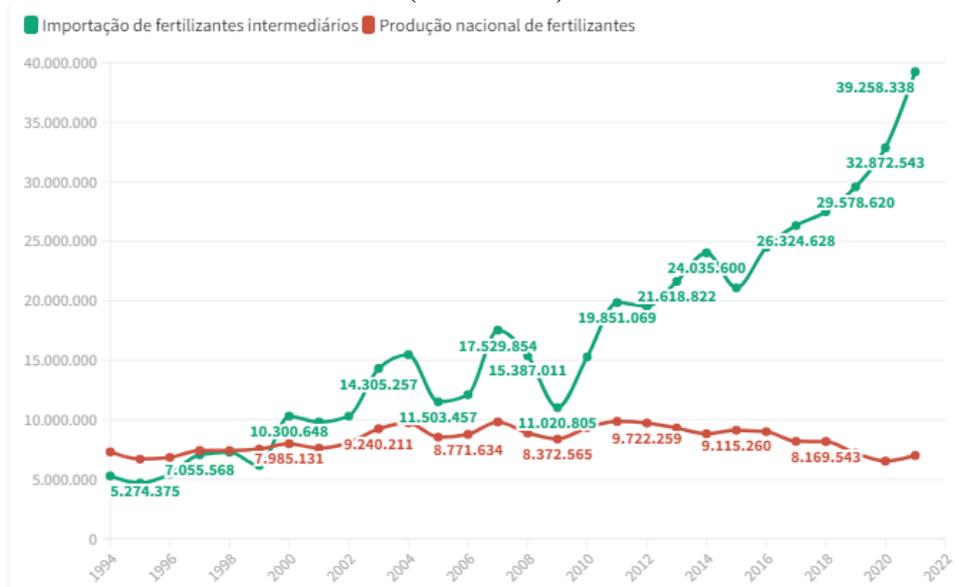
“dependente” dos produtos externos. Mais de 85% dos fertilizantes utilizados no país, no último ano, foram importados, de um mercado dominado por poucos fornecedores (ANDA, 2021). Das 45,8 milhões de toneladas utilizadas no país, 39,2 milhões vieram por meio de importação. Isso significa que a produção nacional foi de apenas 14,4% do consumido. O elevado nível de importação em um setor concentrado comercial e geograficamente, deixa a economia brasileira vulnerável às oscilações do mercado internacional de fertilizantes.

Dentre os principais fertilizantes importados está o cloreto de potássio – 96% do volume desse produto consumido no Brasil é importado. Por sua vez, apenas quatro países são responsáveis por quase 80% da produção mundial: Canadá (32%), Bielorrússia (18%), Rússia (18%) e China (12%). Em 2021, o Brasil importou cerca de 12,8 milhões de toneladas de cloreto de potássio, sendo que 32,6% vieram do Canadá, 28,2%, da Rússia e 18,7%, da Bielorrússia (MERCADO..., 2022).

Quanto aos nitrogenados, conforme a ANDA (2021), a Rússia é o segundo maior produtor do mundo (10%), ficando atrás da China (29%). Dentre os nitrogenados importados pelo Brasil, a ureia responde por mais de 72% do teor de N, e a Rússia é principal fornecedora dessa matéria-prima, correspondendo por 17% de toda a ureia importada nos últimos cinco anos (2017-2021). No caso do nitrato de amônio, o impacto é ainda mais intenso, pois quase todo o fertilizante (98%) importado pelo Brasil vem da Rússia (ANDA, 2021).

Para o fertilizante fosfatado, os maiores produtores mundiais de pentóxido de fósforo (P_2O_5) são a China (39%), Marrocos, Estados Unidos e Rússia. Dentre os fertilizantes importados, cerca de 74% do P_2O_5 são representados pelo MAP, e a Rússia foi o segundo maior fornecedor do fertilizante, responsável por cerca de 21% do fosfato importado nos últimos cinco anos.

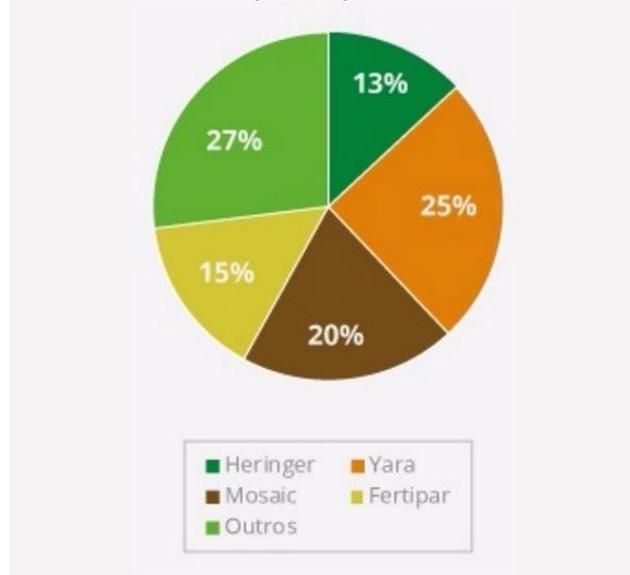
Figura 8 - Principais Indicadores nacionais do setor de fertilizantes, em toneladas (1994-2021).



Fonte: ANDA (2021).

Uma característica do mercado brasileiro de fertilizantes é sua estrutura altamente concentrada, sobretudo no segmento de extração de matérias-primas, que estão sob o controle de grandes grupos internacionais ligados ao agronegócio. Tal condição foi propiciada pela série de fusões e aquisições que ocorreram durante o processo de privatização do setor, na década de 90. No mercado interno, quatro empresas detêm, aproximadamente, 73% do mercado produtor de fertilizantes no Brasil (OUTOLOOK..., 2021). São elas Yara, Mosaic, Fertipar e Heringer, como mostra a Figura 9. A Yara é a que apresenta a maior participação, com 25% do “market share”, também chamada de fatia de mercado, que corresponde à relevância da empresa diante dos competidores da indústria em que ela atua. A Mosaic vem em segundo lugar, com quase 20% das entregas de fertilizantes no Brasil, que é considerado um mercado “chave” para a empresa. Em terceiro lugar aparece a Fertipar, com participação de 15%, seguida pela Heringer, com 13%. Os 27% restantes são divididos entre as demais empresas do setor.

Figura 9 - "Market Share" das empresas produtoras de fertilizantes no Brasil em 2021.



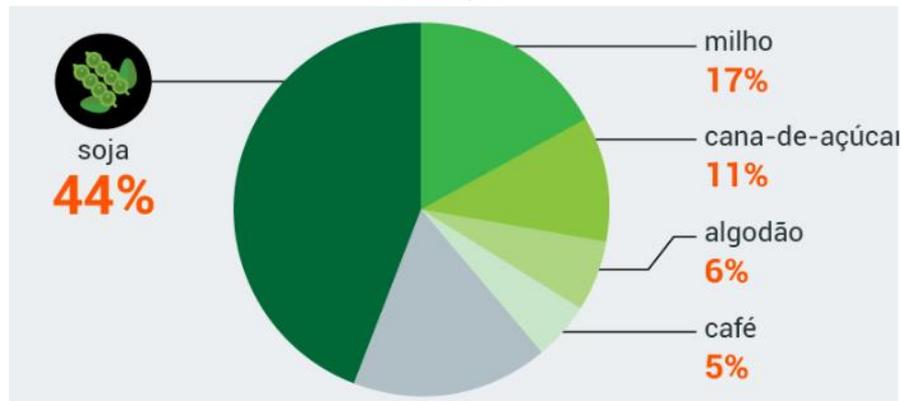
Fonte: Outlook... (2021).

Além das produtoras de fertilizantes básicos, no Brasil existem mais de 100 empresas que atuam no processo de granulação e mistura dos fertilizantes básicos, dando origem aos produtos finais da indústria de fertilizantes, que são chamadas de misturadoras. Este segmento apresenta-se bastante pulverizado e com atuação quase sempre regional, uma vez que as formulações produzidas nas misturadoras variam dependendo da região devido à fatores já citados (COSTA; SILVA, 2012).

Pelo fato de o mercado brasileiro ser fortemente sazonal, praticamente 70% das vendas de fertilizantes concentram-se no segundo semestre do ano, quando ocorre o plantio da safra de verão. Em épocas normais de equilíbrio climático, com o agricultor mais capitalizado, pode haver antecipação de parte das compras para o primeiro semestre (DIAS, 2006).

Soja, milho, cana-de-açúcar, algodão e café respondem cerca de 84% do consumo de fertilizantes no país, como mostra a Figura 10. Alimentos historicamente destinados ao abastecimento do mercado interno (como feijão e arroz) ainda apresentam grande margem para ganhos de produtividade agrícola, mas são mais suscetíveis à volatilidade dos preços de insumos agrícolas no mercado internacional.

Figura 10 - As 5 culturas que responderam a 84% da demanda nacional de fertilizantes em 2021.



Fonte: Outlook... (2021).

Segundo o ANDA (2022), ao longo de 2021, as entregas de fertilizantes ao consumidor somaram 45,855 milhões de toneladas de janeiro a dezembro, tendo uma alta de 13% ante a 2020 (40,564 milhões de toneladas). Segundo Trani & Trani (2011), as formulações mais encontradas no comércio para adubação de plantio são: 04-14-08, 08-28-16, 05-30-10, 05-30-15, 04-20-20 e 05-25-25. Essas formulações são as mais utilizadas, pois estão bastante ligadas à produção de culturas como soja e milho, que são as mais abundantes na agricultura brasileira. A Figura 11 ilustra um exemplo do formulado NPK 04-14-08.

Figura 11 - Exemplo de um formulado 04-14-08.

NPK 04-14-08



Fonte: Fertilizantes (2022).

O fato é que o Brasil se tornou um grande produtor de alimentos para o mundo e é classificado como um dos grandes atores para a segurança alimentar global. Porém, a produção agrícola cresceu dependente dos fertilizantes importados nesses últimos 20 anos.

Com os acontecimentos recentes, principalmente o conflito entre Rússia e Ucrânia, ficou clara a vulnerabilidade do nosso sistema produtivo com relação aos fertilizantes.

Como tentativa de diminuir essa alta necessidade nas importações, instituiu-se o Grupo de Trabalho Interministerial com a finalidade de desenvolver o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF). O PNF é um planejamento estratégico criado pelo Governo Federal com o objetivo de reduzir a dependência externa dos vários tipos de fertilizantes que o Brasil tem atualmente de 85% para cerca de 50% (CALIGARIS et al, 2022). O PNF foi oficializado por meio do Decreto nº 10.991, publicado em março de 2022, no Diário Oficial da União (BRASIL, 2022).

O plano conta com objetivos estratégicos, metas e ações de curto, médio e longo prazo até 2050. As diretrizes para concretizar o planejamento de maneira eficiente são a modernização, ampliação e reativação dos projetos de produção de fertilizantes que já existem no país; a melhoria do ambiente de negócios com o objetivo de atrair investimentos para o setor; a promoção de vantagens competitivas para o país dentro da cadeia de produção mundial de fertilizantes e a ampliação de investimentos em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor. Pode-se citar também a melhoria no processo de distribuição dos fertilizantes e insumos e adequação da infraestrutura para integrar os polos logísticos e viabilizar novos empreendimentos (BRASIL, 2022).

Deve-se ressaltar que, no processo de transferência das práticas e tecnologias de fertilização do solo, de países de clima temperado para países tropicais, verificou-se no Brasil a incorporação de uma tecnologia inadequada a solos da região, que são altamente intemperizados, de intensa atividade microbiana e ocorrente em regiões de elevada precipitação pluviométrica. (BRASIL, 2021)

Por causa desta inadequação tecnológica, grandes quantidades de nutrientes aplicados via fertilizantes são perdidas, fazendo com que a eficiência do uso desses insumos na agricultura brasileira esteja ainda muito abaixo do desejável: entre 50 a 70% para o nitrogênio, de 15 a 50% para fósforo e de 50 a 70% para o potássio (FINCK, 1992; RAO et al. 1992, CUNHA et al., 2014).

Por isso, o desenvolvimento e a validação de fontes de fertilizantes utilizando matérias-primas disponíveis no País, e daqueles que apresentem alta eficiência em sistemas de produção em ambiente tropical, podem representar uma grande contribuição ao setor. Outro impacto positivo do desenvolvimento tecnológico é o incremento da sustentabilidade ambiental que a inovação em fertilizantes pode causar, por exemplo, a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE), e outros impactos negativos que o uso de fertilizantes pode

causar no ambiente. Tais avanços que ajudarão o país a se consolidar e destacar como referência mundial em agronegócio de baixa emissão de carbono, princípios ESG (que correspondem às práticas ambientais, sociais e de governança de uma organização), contribuindo para o Brasil ser a maior potência agroambiental do mundo, de modo a cumprir metas mundiais de redução de GEE, bem como ajudar a melhorar ainda mais a imagem da agricultura brasileira no Brasil e no exterior.

De acordo com previsões do *Department of Economic and Social Affairs Population* da Organização das Nações Unidas (POPULATION..., 2019), a população mundial deve alcançar cerca de 9,6 bilhões de indivíduos em 2050, tornando imprescindível a utilização de mais terras cultiváveis, e com maior produtividade possível. Daí a importância do uso maciço de fertilizantes, agregado à implementação de novas fontes e tecnologias em nutrição de plantas e agrícolas, para permitir melhores padrões de produtividade por hectare cultivado.

6 PROCESSO PRODUTIVO DE FERTILIZANTES NPK

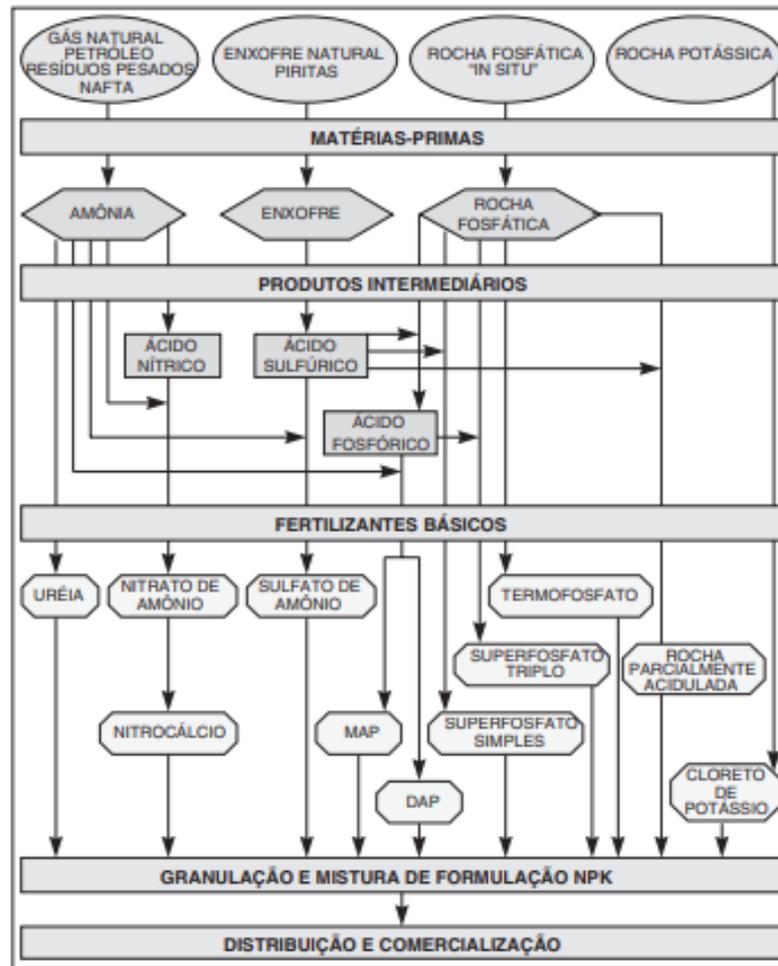
A produção de fertilizantes está diretamente ligada à produção agrícola e à disponibilidade de matérias-primas básicas produzidas a custos economicamente viáveis. A invenção dos fertilizantes minerais possibilitou a industrialização da agricultura, primeiramente na Europa e na América do Norte e, posteriormente, em países em desenvolvimento.

Do ponto de vista industrial, o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) são os mais importantes, originando a classificação usual dos produtos da indústria, segundo o elemento essencial contido, em fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. Os demais macros e micronutrientes, apesar da sua importância biológica, não têm tido valorização comercial significativa. Os produtos finais da indústria de fertilizantes utilizados pela agricultura podem suprir um ou mais dos três elementos citados, sendo avaliados em termos físicos pela quantidade e proporção de nutriente contido (NPK), e não pela massa total de material.

Segundo Tagliegna (2001) e Carvalho (2009), a indústria de fertilizantes pode ser dividida em três atividades distintas: produção de matérias-primas básicas e intermediárias, de fertilizantes básicos e de misturas. O funcionamento da cadeia, em linhas gerais, se dá da seguinte forma: na primeira atividade, as empresas obtêm as matérias-primas básicas, na segunda atividade as empresas produzem a partir dessas matérias-primas básicas e intermediárias, os fertilizantes básicos (nitrogenados, fosfatados e potássicos), e finalmente na terceira atividade, os fertilizantes básicos e as matérias-primas são adquiridos pelas misturadoras, que os utilizam na elaboração de formulações NPK nas dosagens adequadas a cada tipo de solo ou cultura agrícola (VALOR, 2008).

A Figura 12 reproduz, esquematicamente, toda a cadeia produtiva de fertilizantes minerais, cujo complexo produtor envolve atividades que vão desde a extração da matéria-prima até a composição de formulações aplicadas diretamente na agricultura.

Figura 12 - Cadeia produtiva da indústria de fertilizantes.



Fonte: Dias e Fernandes (2006).

Basicamente, a atuação no segmento de matérias-primas consiste na extração mineral das matérias-primas. No Brasil, a atuação desse setor não consegue suprir toda a demanda do país fazendo com que tenha de importar grande parte dos fertilizantes que são empregados em suas lavouras. O segmento extrativo mineral fornece as matérias-primas básicas dos fertilizantes, principalmente o gás natural, o rasf (resíduo asfáltico do petróleo) e a nafta, além da rocha fosfática, do enxofre e das rochas potássicas.

Na segunda atividade ocorre a produção de fertilizantes básicos a partir das matérias-primas ou então dos produtos intermediários formados a partir dessas matérias primas. Com base nesses insumos, obtêm-se então as matérias-primas intermediárias, sobretudo o ácido sulfúrico, o ácido fosfórico, a amônia anidra e os fertilizantes simples, dos quais resultam os fertilizantes básicos, como a ureia, o sulfato de amônio, o MAP, o superfosfato simples e o cloreto de potássio, que, por fim, originam os fertilizantes granulados e as misturas de formulação NPK, complexos.

A última etapa de produção dos fertilizantes consiste no processo de granulação e mistura dos fertilizantes básicos dando origem aos produtos finais da indústria de fertilizantes, que são os fertilizantes complexos e os fertilizantes mistos.

6.1 Processo de obtenção de fertilizantes nitrogenados básicos

Os fertilizantes nitrogenados têm em sua composição o nitrogênio como nutriente principal e são produzidos em uma variedade de formulações, cada uma com diferentes propriedades e usos para os sistemas de produção das culturas. Todos começam, essencialmente, com a amônia anidra (NH_3), que é a matéria-prima básica de todos os nitrogenados sintéticos.

Muito antes da Revolução Industrial, os agricultores já compreendiam as vantagens existentes em adubar os terrenos de cultivo. Na década de 1840, o químico alemão Justus von Liebig (1803 – 1873) tomou conhecimento da importância do gás nitrogênio na fertilização de terrenos agrícolas. Pelo fato de existirem poucos adubos naturais, era necessário encontrar um processo que captasse o nitrogênio atmosférico e o convertesse num composto que pudesse ser utilizado para a fertilização. No entanto, apesar de já se saber que o nitrogênio correspondia à maior parte do conteúdo da atmosfera terrestre, a química inorgânica ainda não tinha estabelecido um processo para o captar (RIBEIRO, 2013).

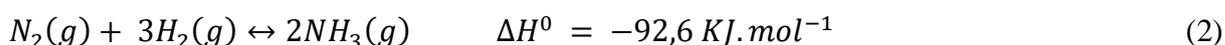
Em 1909, Fritz Haber estabeleceu as condições nas quais o nitrogênio, N_2 (g) e o hidrogênio, H_2 (g), poderiam combinar-se utilizando temperatura média de $500\text{ }^\circ\text{C}$, pressões muito elevadas ($\cong 250\text{ atm}$) e um catalisador de ferro oriundo da redução da magnetita (Fe_3O_4). Este processo produziu a amônia (NH_3).

Essa reação foi denominada de processo Haber-Bosch (AFTALION, 2001) O hidrogênio utilizado na síntese de Haber era obtido a partir do processo industrial “gás-água” desenvolvido por Carl Bosch e o nitrogênio pela destilação do ar líquido, seguido de resfriamento e compressão do ar. Nos dias de hoje, o hidrogênio é proveniente de fontes diversas, como do gás natural, da nafta, do óleo combustível ou de outros derivados de petróleo, através da reforma das frações leves dos mesmos. O gás natural é o mais usado e, também, é a melhor fonte de hidrogênio para a produção de fertilizantes nitrogenados.

A amônia anidra é estável quando armazenada e utilizada sob condições normais de estocagem e manuseio. Ela subsiste no estado líquido, sob baixas temperaturas ou pressões relativamente altas. Acima de $450\text{ }^\circ\text{C}$, pode se decompor liberando o nitrogênio e o hidrogênio, não ocorrendo polimerização.

Em 1910, Bosch recebeu instruções para industrializar o processo de obtenção de amoníaco e, em 1912, a primeira indústria piloto de obtenção de amoníaco pelo processo Haber-Bosch já produzia uma tonelada de amoníaco por dia (AFTALION, 2001). O processo de obtenção por este método permitiu sintetizar quase a totalidade de amoníaco necessário para a produção de fertilizantes.

A síntese do amoníaco pelo processo de Haber-Bosch pode ser resumida pela Equação 2.



Analisando a equação acima, podem extrair-se duas grandes conclusões:

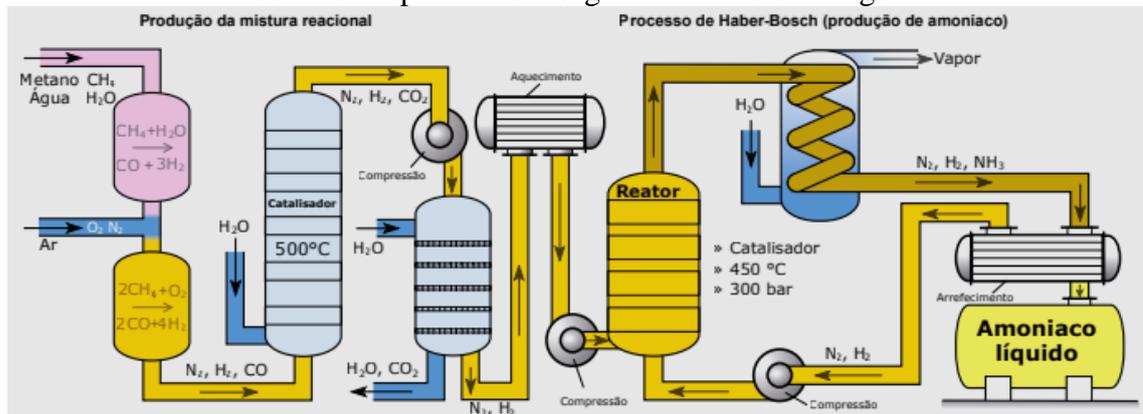
- a) como 1 mol de N_2 reage com 3 moles de H_2 para originar 2 moles de NH_3 , é possível maximizar a produção de amoníaco se a reação ocorrer a pressões elevadas;
- b) dada a natureza exotérmica da reação direta, quanto menor a temperatura do vaso reacional, maior será a produção de amoníaco.

A catálise deste processo deve ser feita com ferro, óxido de alumínio ou óxido de potássio, que permite que a reação seja realizada a uma temperatura mais baixa do que a que seria praticável. Além disso, a remoção da amônia assim que formada, assegura a manutenção de um equilíbrio, favorecendo a formação do produto (JONES, 1999).

A partir das conclusões acima, compreende-se que o processo de Haber-Bosch deve ser realizado a pressões elevadas e à temperatura mais baixa possível. Sendo que quanto menor a temperatura e quanto maior a pressão utilizada, maior a proporção de amônia produzida na mistura. Para a produção comercial, a reação é geralmente realizada a pressões variando de 200 a 400 atm e a temperaturas variando de 400 a 650 °C (LLOYD, 2011; STWERTKA, 2002).

O processo de remoção da amônia resulta dos diferentes pontos de ebulição dos componentes no vaso reacional. Como a amônia possui um ponto de ebulição mais elevado que o do nitrogênio e o do hidrogênio, é possível condensar apenas o amoníaco, reciclando o gás nitrogênio e o gás hidrogênio gasosos que ainda não reagiram. A esquematização do processo de Haber-Bosch é demonstrada na Figura 13.

Figura 13 - Esquema da produção industrial de amoníaco, com o processo de Haber-Bosch correspondendo à segunda metade da imagem.



Fonte: Adaptado de Sven (2013).

A amônia é também usada como matéria-prima na produção de ureia, nitrato de amônio e outros fertilizantes nitrogenados, assim como na produção de MAP, DAP e outros fertilizantes multinutrientes, como mostra a Figura 12. Dessa forma, a amônia dá aos agricultores uma ampla gama de fertilizantes nitrogenados para manejar o N e melhor atender as necessidades das culturas assim como as necessidades logísticas.

Alguns dos fertilizantes nitrogenados básicos mais comuns são descritos abaixo:

- Amônia anidra (NH_3) é o fertilizante nitrogenado comercial mais concentrado, com cerca de 82% de N.
- Aquamônia é produzida misturando amônia com água. Esta forma pode ser adicionada à água de irrigação como uma forma alternativa de aplicação e pode fornecer na faixa de 20 a 24% de N.
- Sulfato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] (21% de N) foi um dos primeiros fertilizantes de nitrogênio usados nas plantações. Sua alta solubilidade confere versatilidade no seu uso em diferentes aplicações agrícolas e industriais. O sulfato de amônio é feito a partir da reação química do ácido sulfúrico com a formação de cristais de amônia quente, que são secos e peneirados em diferentes tamanhos específicos de partículas, dependendo do uso. O sulfato de amônio é um subproduto do processo de fabricação do náilon ou de alguns produtos que contêm amônia ou ácido sulfúrico e que são transformados em sulfato de amônio para uso agrícola. Ele é frequentemente usado como um carreador para a aplicação de herbicidas, ajudando a aumentar a eficácia destes. Ele também contém 21% de S, tornando-o uma alternativa de uso quando se necessita fornecer este nutriente.

- d) Ureia (46% de N) é o fertilizante nitrogenado sólido mais usado no mundo. A produção de ureia envolve reação controlada do gás amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2) com temperatura e pressão elevadas. A ureia liquefeita é transformada em esferas com equipamento de granulação especializado ou endurecida em uma perola sólida enquanto cai de uma torre. Durante a produção de ureia, duas moléculas de ureia podem, inadvertidamente, combinar-se para formar um composto chamado biureto o qual pode causar danos quando pulverizado nas folhas das plantas. A maior parte do fertilizante ureia contém somente pequenas quantidades de biureto em decorrência do controle cuidadoso durante o processo de produção. A ureia é uma excelente fonte de N para atender as necessidades das plantas. Por ser prontamente dissolvida em água, quando aplicada à superfície do solo, movimenta-se com a água de chuva ou pela irrigação para dentro do solo. Dentro do solo, a ureia movimenta-se livremente com a água do solo até ser hidrolisada para formar NH_4^+ .
- e) Nitrato de amônio (NH_4NO_3) foi inicialmente produzido nos anos 1940 como produto de munição. Ele contém 33 a 34% de N. Nitrato de amônio é produzido como uma solução concentrada pela reação do gás amônia com ácido nítrico. A solução (95 a 99% de nitrato de amônio) é despejada de uma torre e solidifica na forma de pérolas, que podem ser usadas como fertilizante ou transformadas em nitrato de amônio granulado pela pulverização da solução concentrada em pequenos grânulos em um tambor rotativo. Uma vez que metade do nitrogênio está na forma de amônio, ele pode ser absorvido diretamente pelas raízes, ou gradualmente convertido à forma de nitrato e é imediatamente disponível para as plantas. Sua alta solubilidade o torna adequado para fertirrigação ou aplicação foliar.
- f) Fosfato Monoamônico (MAP) e Fosfato Diamônico (DAP) são obtidos da reação de neutralização do ácido fosfórico pela amônia. Possuem como vantagem a rápida absorção pelo solo e a disponibilização quase imediata dos nutrientes para as plantas. A diferença química entre esses dois fertilizantes é a quantidade de amônia no produto final. O DAP possui dois pesos moleculares de amônia, que são combinados com um mol de ácido fosfórico. Já o MAP combina um mol de cada composto. Isso faz com que o MAP resulte em garantias de 9 a 12% de nitrogênio e de 48 a 60% de fósforo, enquanto o DAP resulte em garantias de 17 e 18% de nitrogênio e de 44 a 52% de fósforo.

Os fertilizantes nitrogenados convencionais, que predominam no mercado brasileiro, contêm N na forma solúvel e prontamente disponível. Nestes fertilizantes, o nutriente

encontra-se principalmente na forma amoniacal, nítrica e amídica, podendo fornecer também cálcio, magnésio e enxofre, como demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Fertilizantes minerais nitrogenados e concentração dos nutrientes.

Fertilizante	N total %	N amoniacal %	N nítrico %	N amídico %	CaO %	S %
Amônia anidra	82	82	-	-	-	-
Aquamônia	16 – 21	16 – 21	-	-	-	-
Nitrato de Amônia	33 – 34	17	17	-	-	-
Nitrato de Cálcio	14	-	14	-	28	-
Sulfato de Amônia	20 – 21	20 – 21	-	-	-	24
Ureia	45 – 46	-	-	45 – 46	-	-
MAP	9 – 12	9 – 12	-	-	-	-
DAP	17 – 18	17 – 18	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Brasil (2016).

6.2 Processo de obtenção de fertilizantes fosfatados básicos

O fósforo é encontrado na natureza como fosfatos de rocha nas jazidas que ocorrem por todo o mundo. Essas jazidas são sedimentares, geralmente derivadas da vida animal, ou ígneas (metamórficas), decorrentes da atividade eruptiva dos vulcões. Em termos mundiais, a rocha fosfática é a única fonte de fósforo viável, estando contida nos depósitos de origens sedimentares (em torno de 85% da oferta mundial), ígneas (próximo de 15%).

As maiores reservas mundiais estão em países como Marrocos (60%), China (15%), Estados Unidos (4%), África do Sul (4%) e Jordânia (2%), que detêm 85% das 56 milhões de toneladas das reservas da rocha. Os três maiores produtores mundiais são os Estados Unidos, a Rússia e o Marrocos. O Brasil é o sétimo produtor mundial de fosfato e tem as maiores jazidas nos Estados de Minas Gerais (73,8%), Goiás (8,3%) e São Paulo (7,3%), junto às regiões próximas das cidades de Catalão (GO), Tapira (MG), Araxá (MG) e Jacupiranga (SP) (DIAS; FERNANDES, 2006).

No Brasil, cerca de 80% das jazidas fosfáticas naturais (fosfatos) são de origem ígnea com presença acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos, com baixo teor (é o conteúdo de fósforo de uma rocha ou concentrado), em geral expresso em (P₂O₅).

Esses fosfatos recebem a denominação de fosfato natural, rocha fosfatada ou mesmo concentrado fosfático, caso sejam passíveis de serem usados (aproveitados) quer diretamente como material fertilizante, quer como insumo básico da indústria de fósforo ou de seus compostos, tal qual se encontram na natureza ou após os minérios sofrerem concentração por meios físicos nas usinas de beneficiamento (KULAIF, 1999).

Rocha fosfática e enxofre são as matérias-primas básicas para a produção da maior parte dos fertilizantes fosfatados solúveis comercializados no Brasil e no mundo.

Muitos processos químicos diferentes usam fosfatos, e a mineração de fosfato proporciona uma das mais importantes fontes de fósforo para uso na síntese de fertilizantes químicos. Depósitos de fosfato são inorgânicos, mas são muitas vezes estabelecidos como resultado de atividade biológica no passado distante.

Os processos específicos utilizados para extrair o fosfato natural dependem das características geográficas da área em que os depósitos minerais estão localizados. O processo específico usado para a separação do fosfato de outros minerais varia de acordo com a composição exata do minério. Na maioria dos casos, a água é usada para transformar a rocha em lama mineral, a partir do qual uma combinação de triagem e filtragem de processos pode extrair o fosfato relativamente puro. O processo de separação pode exigir grandes quantidades de água, eletricidade ou produtos químicos adicionais.

A mineração da substância fosfática produz uma variedade de produtos finais. O ácido fosfórico também é produzido em grandes quantidades e, em conjunto com outros produtos de mineração de fosfato, tem muitos usos em química industrial.

Alguns dos fertilizantes fosfatados básicos mais comuns são descritos abaixo (REETZ, 2017.):

- a) Fosfato de rocha (FR). As reservas mundiais existem em antigos depósitos marinhos e o fosfato de rocha precisa ser processado para remoção de outros materiais. Fosfato de rocha não processado pode ser aplicado como uma fonte de nutrição de fósforo sob certas situações, mas a boa parte é processada para produção de outros fertilizantes fosfatados. Embora o FR possa ser aplicado diretamente, sua solubilidade em água é muito baixa para atender às necessidades da planta em crescimento. FR pode ser uma fonte efetiva de P se usado em solos ácidos (pH em água abaixo de 5,5). Atualmente, mais de 90% dos FR que são usados são processados para a obtenção de fertilizantes fosfatados solúveis pela reação do FR com ácidos, o que torna o produto agronomicamente e economicamente eficiente como uma fonte de nutriente para as culturas.

- b) Superfosfato simples (SSP) é produzido pela reação do fosfato de rocha com ácido sulfúrico. Ele foi o primeiro fertilizante mineral comercial e levou ao desenvolvimento das modernas indústrias de nutrientes de plantas. O fertilizante SSP é fonte de três nutrientes essenciais para as culturas, nas seguintes proporções: 7 a 9% de P (16 a 20% de P_2O_5); 18 a 21% de Ca e 11 a 12% de S.
- c) Superfosfato triplo (TSP) ou fosfato monocálcico foi um fertilizante fosfatado popular no início dos anos 1900, mas vem sendo substituído por outros fertilizantes em anos recentes. Ele é produzido pela reação do fosfato de rocha com ácido fosfórico. Ele apresenta a maior concentração de fósforo nos fertilizantes secos que não contém N, e o P é mais de 90% solúvel em água. É popular para culturas leguminosas onde fertilizantes nitrogenados não são necessários. Sua garantia varia de 42 a 48% de P_2O_5 .
- d) Fosfato de monoamônio ($NH_4H_2PO_4$), o MAP é a fonte mais concentrada de fósforo entre os fertilizantes sólidos. Contém 10 a 12% de N e 48 a 61% de P_2O_5 . Sua forma mais usual é 11-52-00. Quando fabricado com formas mais puras de ácido fosfórico, o MAP pode ser produzido na forma de pó (usualmente com 61% de P_2O_5) e usado em suspensões ou fertilizantes líquidos claros, ou aplicado via adubação foliar ou adicionado à água de irrigação.
- e) Fosfato de diamônio [$(NH_4)_2HPO_4$], o DAP, é o fertilizante fosfatado mais utilizado no mundo. O padrão do DAP é 18-46-00. Ele é popular porque tem uma concentração relativamente alta dos dois materiais fertilizantes comumente necessários e, também tem propriedades que o tornam fácil de manusear e armazenar. Sua alta solubilidade torna os nutrientes prontamente disponíveis para as plantas.

A disponibilidade de P é medida pela solubilidade em soluções extratoras específicas (água, ácido cítrico, ácido fórmico, ácido clorídrico com ácido sulfúrico e resinas aniônicas) como uma indicação da taxa de transformação sob várias condições do solo. P solúvel em água, como o fosfato monocálcico por exemplo, é facilmente disponível para as plantas e assim permanece, após imobilização para outras formas. Esta transformação é retardada pela granulação e localização do fertilizante. P solúvel em ácido cítrico é moderadamente disponível para as plantas e é adequado para vários propósitos sob uma grande amplitude de condições de solos ácidos até neutros. P solúvel em ácido fórmico em fosfato de rocha reativo na forma de pó e P solúvel em ácido cítrico a 2% são lentamente disponíveis às plantas; sua reatividade (liberação do P solúvel) é melhorada onde os solos são mais quentes, úmidos e ácidos.

A taxa de utilização de P dos fertilizantes é usualmente de cerca de 15% no primeiro ano, mas somente 1-2% por ano em seguida, resultando que somente 2/3 é absorvido ao fim de 30 anos. A eficiência da utilização do fertilizante fosfatado depende das condições de clima, pH do solo, tipo de cultura, época e localização do fertilizante fosfatado (REETZ, 2017).

Como já mencionado, o fósforo em materiais fertilizantes é usualmente expresso na forma de óxido (P_2O_5). A fórmula para converter a quantidade de P em equivalente de P_2O_5 está representada na Equação 3. O coeficiente relaciona o peso molecular de cada um dos compostos.

$$P \times 2,29 = P_2O_5 \quad (3)$$

A Tabela 4 exibe algumas características dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil. Além do teor dos elementos químicos mais importantes, a tabela mostra uma forma de classificação baseada no percentual de P_2O_5 solúvel. Para os fertilizantes fosfatados insolúveis em água (termofosfatos, fosfatos naturais e fosfatos naturais reativos), os teores de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico a 2% é que são determinados. No caso dos fertilizantes solúveis em água, são considerados tanto os teores de P_2O_5 solúveis só em água, quanto os solúveis em solução aquosa de citrato neutro de amônio (CNA).

Tabela 4 - Características dos principais fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil: teor de P_2O_5 e solubilidade.

Fertilizante	P_2O_5 total (%)	P_2O_5 em Ac. Cítrico (%)	P_2O_5 em CNA+ H_2O (%)	P_2O_5 em H_2O (%)	Ca (%)	S (%)
SSP	19– 21	-	18	15	16	8
TSP	42- 48	-	41	36	10	-
MAP	48- 60	-	48	44	-	-
DAP	44- 52	-	45	38	-	-

Fonte: Adaptado de Reetz (2017).

6.3 Processo de obtenção de fertilizantes potássicos básicos

As reservas de sais de potássio encontram-se difundidas por todas as regiões do mundo. As principais são as da Ucrânia (50%), do Canadá (27%), do Reino Unido (11%), da Bielorrússia (5%), da Alemanha (4%), do Brasil (2%) e dos Estados Unidos (1%) (DIAS; FERNANDES, 2006). A produção concentra-se praticamente em seis países: Canadá (34%),

Rússia (16%), Bielorrússia (15%), Alemanha (12%), Israel (7%), Estados Unidos e Jordânia (4%, 2% de cada um), que juntos representam 88% do total mundial (DIAS; FERNANDES, 2006). Os demais produzem menos que um milhão de t/ano cada, incluindo o Brasil (1,3%) (DIAS; FERNANDES, 2006). No Brasil, a Companhia Vale do Rio Doce é a única empresa que produz potássio no país, em Taquari/Vassouras (SE). Hoje, os depósitos de potássio do país se resumem à mina explorada pela Vale do Rio Doce, estimados em trezentos milhões de toneladas de cloreto de potássio, e reservas amazônicas, de cerca de novecentos milhões de toneladas.

Os depósitos potássicos, para se tornarem fertilizantes, precisam ser beneficiados até a obtenção de produtos de mais alta concentração e solúveis em água. No entanto, ao contrário dos fertilizantes fosfatados, não requerem processos por tratamento com calor ou ácidos fortes para obtenção de produtos disponíveis para as plantas (DIAS; FERNANDES, 2006).

O potássio encontra-se em porcentagens elevadas em minerais como silvita, silvinita, carnalita e langbeinita. Por meio desses, pode-se chegar aos diversos fertilizantes potássicos existentes. Pela sua alta concentração e baixo custo, a maior parte do potássio utilizado na agricultura mundial está na forma de cloreto de potássio.

Para diminuir a dependência nacional do potássio utilizado na agricultura, pesquisadores de várias instituições do país vêm buscando opções para obtenção desse elemento com base em minerais contidos em rochas brasileiras. Os resultados mais satisfatórios até o momento têm sido encontrados pela moagem de rochas silicáticas que contêm o mineral flogopita (DIAS; FERNANDES, 2006).

Os fertilizantes potássicos são formados de depósitos geológicos salinos. Apesar de conterem baixos teores de K_2O , materiais não refinados podem ser usados diretamente. A maioria dos fertilizantes atualmente utilizados é material de alta concentração, solúvel em água e de ação rápida. A seguir, são descritos os principais (REETZ, 2017):

- a) Cloreto de potássio (KCl) (00-00-60): A maioria dos depósitos de K ocorre como KCl (silvita) misturado com NaCl (halita) no mineral silvinita. No processamento, o mineral é moído e o KCl e o NaCl são separados. O KCl tem 60 a 63% de K_2O (50 a 52% de K e 45 a 47% de Cl). É usualmente aplicado na superfície a lanço antes da aração, ou aplicado em sulcos, próximo a linha das sementes. Por causa do seu alto teor de sal, o KCl não deve ser colocado em contato direto com a semente. Ele dissolve prontamente na solução do solo liberando K^+ e Cl^- . O K se liga aos locais de troca de cátions na argila e na matéria orgânica do solo. A maior parte do fertilizante KCl é branca, porém alguns materiais contendo K são avermelhados devido à presença

de pequenas quantidades de óxido de ferro; mas ambos são idênticos para uso agrícola.

- b) Sulfato de potássio (K_2SO_4), também chamado de sulfato de potássio (SOP), tem 48 a 53% de K_2O , e 17 a 18% de S. O sulfato de potássio é encontrado em depósitos minerais misturado com outros minerais. Os componentes são separados pela lavagem com água. O K do sulfato de potássio funciona de modo semelhante ao KCl, mas é também uma fonte importante de enxofre onde o solo é deficiente nesse nutriente. O sulfato de potássio é menos solúvel do que o cloreto de potássio, e, assim, não é comumente usado na água de irrigação. Mas, o sulfato de potássio é algumas vezes aplicado como pulverização foliar se ambos, K e S, são necessários. É também usado para fornecer K para as plantas sensíveis ao Cl, como o fumo e batata inglesa.
- c) Sulfato de potássio e magnésio ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$) é também chamado de Langbeinita. Comercialmente, ele vem de minas abaixo do solo próximo a Carlsbad (Alemanha) e Novo México (EUA). A Langbeinita tem 21-22% de K_2O , 10-11% de Mg e 21-22% de S. É um fertilizante popular onde os três nutrientes são necessários, é solúvel em água, mas dissolve lentamente. De modo diferente de outros fertilizantes contendo Mg e S, ele tem um efeito neutro no pH do solo.
- d) Nitrato de potássio (KNO_3) ou salitre potássico é um fertilizante popular para culturas de alto valor que necessitam do N na forma de nitrato e, também, do K. É especialmente popular como fonte de K para culturas que são sensíveis ao Cl. Tem 13% de N e 44-46% de K_2O . Pode ser aplicado ao solo ou como tratamento foliar para estimular o desenvolvimento de frutos quando a atividade radicular está declinando. É, ainda, uma fonte comum de nutrientes para fertirrigação.

Vários resíduos industriais contendo K, têm sido desenvolvidos para uso como formas de fertilizantes de ação lenta, especialmente onde se deseja evitar perdas por lixiviação, como por exemplo a poeira de filtros. Os fertilizantes potássicos devem ser, na maioria das vezes, aplicados na época do plantio. Os íons de K^+ são adsorvidos no solo e então permanecem disponíveis, largamente protegidos contra a lixiviação. Entretanto, dividir as aplicações é recomendável para algumas culturas em solos e climas onde são esperadas altas taxas de perdas por lixiviação. A taxa de utilização de K nos fertilizantes é cerca de 50-60% durante o ano de aplicação (REETZ, 2017).

A composição dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil pode ser vista na Tabela 5, em que estão listados em ordem decrescente do teor de potássio, avaliado como o seu óxido, K_2O .

Tabela 5 - Composição química dos principais fertilizantes potássicos comercializados no Brasil.

Fertilizante	K₂O %	CaO %	MgO %	S %
Cloreto de Potássio	58-62	0-3	0-3	0-3
Sulfato de Potássio	48-52	0-2,5	0-2	15-19
Nitrato de Potássio	44	-	-	-
Sulfato de potássio e magnésio	20-22	-	18-19	20-22

Fonte: Adaptado de Reetz (2017).

6.4 Micronutrientes

A agricultura brasileira hoje é caracterizada pela produtividade, eficiência, lucratividade e sustentabilidade. Nesse contexto, o uso de micronutrientes em programas de adubação para as mais variadas culturas e condições de clima e solo passou a ser recomendado com maior frequência (REETZ, 2017).

Pesquisas têm demonstrado grandes ganhos em produtividade quando são utilizados micronutrientes nos programas de adubação para as diversas culturas (ZONTA; STAFANATO; PEREIRA, 2021). Desse modo, para sistemas de produção tecnificados, a adubação do solo com micronutrientes, principalmente zinco (Zn), cobre (Cu) e boro (B), é uma realidade, garantindo assim maiores produtividades e melhor qualidade do produto final.

Existem no mercado inúmeros produtos contendo micronutrientes para uso em diferentes formas de aplicação. No entanto, tais fontes diferem bastante quanto ao estado físico, reatividade química, custo e biodisponibilidade. Em geral, as fontes de micronutrientes são agrupadas em fontes inorgânicas, quelatos sintéticos, complexos orgânicos e óxidos silicatados (“fritas”).

As fontes inorgânicas incluem sais metálicos com sulfatos, cloretos e nitratos, que são solúveis em água, os óxidos, carbonatos e fosfatos, que são insolúveis em água e os oxissulfatos, que se constituem em subprodutos com maior ou menor grau de solubilidade em água, dependendo das quantidades de hidrogênio. A solubilidade em água é uma característica determinante para que o adubo apresente maior eficiência agrônômica em curto prazo, para aplicações localizadas em sulco e produtos na forma granulada, especialmente para culturas de ciclo curto.

Os quelatos sintéticos são formados pela combinação de um agente quelatizante com um metal através de ligações coordenadas. A estabilidade da ligação quelato-metal determina, geralmente, a disponibilidade do nutriente aplicado para as plantas. Os quelatos são geralmente bastante solúveis, mas, diferentemente dos sais simples, dissociam-se muito pouco em solução (LOPES, 1988), isto é, o ligante tende a permanecer ligado ao metal. Esse fato é a principal vantagem dos quelatos, pois permite que Cu, Fe, Mn e Zn permaneçam em solução em condições que normalmente se insolubilizariam, como acontece em soluções concentradas com reação neutra ou alcalina - pH 7,0 ou maior) e em solos calcários (VOLKWEISS, 1988). Esse é um aspecto da maior importância para a tomada de decisão quanto à fonte a ser aplicada e quando se pretende uma alta eficiência agronômica da aplicação via solo em áreas que, por qualquer motivo, estejam na faixa de pH acima de 6,0 e/ou saturação por bases acima de 70%, por exemplo. Apesar de apresentarem maior eficiência agronômica em alguns casos, os quelatos geralmente são mais caros que as fontes inorgânicas.

Um quelato eficiente é aquele no qual a taxa de substituição do micronutriente quelatizado por cátions do solo é baixa, mantendo, conseqüentemente, o nutriente aplicado nessa forma de quelato por tempo suficiente para ser absorvido pelas raízes das plantas (LOPES, 1991).

Os principais agentes quelatizantes utilizados na fabricação de fontes de micronutrientes são: ácido etilenodiaminotetraacético (EDTA), ácido N (hidroxietil) etilenodiaminotetraacético (HEDTA), ácido dietilenotriaminopentaacético (DTPA), ácido etilenodiamino (o-hidrofenil acético) (EDDHA), ácido nitrilo acético (NTA), ácido glucoheptônico e ácido cítrico. O mais comum é o EDTA.

Os complexos orgânicos são produzidos pela reação de sais metálicos com subprodutos orgânicos da indústria de polpa de madeira e outros. A estrutura química desses agentes complexantes, assim como o tipo de ligação química dos metais com os componentes orgânicos, ainda não é bem caracterizada.

Os óxidos silicatados, também conhecidos como “fritas” ou FTE (*Fritted Trace Elements*), são produtos cuja solubilidade é controlada pelo tamanho das partículas. São obtidos pela fusão de silicatos ou fosfatos com uma ou mais fontes de micronutrientes, a aproximadamente 1000 °C, seguido de resfriamento rápido com água, secagem e moagem (MORTVEDT; COX, 1985). Estes por serem insolúveis em água, apresentam maior eficiência quando aplicados na forma de pó fino, a lanço com incorporação, em solos de textura mais arenosa e sujeitos a altos índices pluviais e altas taxas de lixiviação. Existem disponíveis no mercado “fritas” com as mais variadas combinações de composição de

micronutrientes, passíveis de utilização para implementação das filosofias de segurança de prescrição e de restituição.

O comportamento dos micronutrientes no solo é influenciado por diversos fatores, tais como: textura e mineralogia do solo, matéria orgânica, pH, condições de oxirredução e interação entre os nutrientes, o que torna a dinâmica dos micronutrientes no solo complexa interferindo na sua disponibilidade para as plantas. Interações antagônicas entre os nutrientes no solo e na planta podem ocorrer e são comuns, podendo ocasionar desbalanço nutricional e deficiência de micronutrientes.

Um dos fatores que está diretamente relacionado com a eficiência de uso dos micronutrientes é a sua forma de aplicação, na qual a fonte do micronutriente, o tipo de solo, o pH, a solubilidade, a mobilidade do nutriente e a cultura devem ser considerados na tomada de decisão. Dentre os vários métodos de aplicação, destacam-se a adubação via solo, incluído adubação fluida e fertirrigação; adubação foliar; o tratamento de sementes e o tratamento de mudas (ABREU et al., 2007).

Assim, uma das formas mais utilizadas de aplicação de micronutrientes na agricultura é a sua associação (incorporado ou revestido) em misturas de grânulos NPK. A principal vantagem desse produto é que os micronutrientes podem ser misturados aos fertilizantes NPK obtendo fórmulas específicas que visam atender às recomendações tanto de NPK quanto de micronutrientes. Outra opção bastante eficiente que se encontra no mercado e que melhora a uniformidade de aplicação é o revestimento de fertilizantes NPK ou até mesmo de fertilizantes minerais simples, como a ureia. Esta pode ser revestida, por exemplo, com Cu, Zn e B em diferentes concentrações, proporcionando não somente uma adubação mais eficiente de micronutrientes, mas também melhorando a eficiência de uso do N.

Para que se consiga alcançar bons resultados, o manejo da adubação com micronutrientes deve ter, por parte do aplicador, maior cuidado do que em relação aos macronutrientes, principalmente devido à maior complexidade do comportamento dos micronutrientes no solo e na planta. Diante disso, o conhecimento da dinâmica dos micronutrientes no solo, das técnicas de diagnose, do manejo da adubação (fontes e métodos de aplicação) e do conhecimento do efeito residual dos adubos que contêm micronutrientes é de fundamental importância para a definição de doses e intervalos de reaplicação, constituindo importantes fatores para um uso mais eficiente deste insumo.

Os principais minerais e rochas fontes de micronutrientes no solo de acordo com o elemento são:

- a) Boro - O elemento está presente em diversos minerais, usualmente na forma de boratos ou borossilicatos, embora poucos tenham importância como fonte de B. A turmalina seria o mineral de maior relevância para os solos ácidos de regiões úmidas. Outros importantes minerais de boro são o bórax, a colemanita e a ulexita. Ao contrário dos demais micronutrientes, há maior concentração de B em granitos do que em basaltos. Comparativamente às rochas maciças, as rochas clásticas, calcárias, folhelhos e aquelas que contêm argilas marinhas são mais ricas em B, originando solos com maior disponibilidade do nutriente. Todavia, a principal fonte para as plantas nos solos agrícolas é a matéria orgânica (DANTAS, 1991; RAIJ; BATAGLIA, 1991).
- b) Cloro - O cloro e o boro são os micronutrientes de maior solubilidade e tendem a ser carregados pelas águas, acumulando-se nos oceanos. Cloretos de sódio, potássio, magnésio ou cálcio (ex: halita, silvinita, carnalita, taquidrita) são os principais minerais de cloro, os quais caracterizam-se pela elevada solubilidade e dificilmente permanecem como tais no solo (somente sob condições de aridez). Apesar disso, não têm sido detectadas deficiências em condições normais de cultivo (RAIJ; BATAGLIA, 1991). Em decorrência dessa situação, não existem muitos estudos e não há maiores preocupações quanto ao fornecimento desse micronutriente. O cloro está presente na água da chuva, além do mais, costuma ser adicionado indiretamente nas adubações, uma vez que o cloreto de potássio é largamente utilizado na agricultura como fonte de K.
- c) Cobre - Ocorre em minerais primários, frequentemente associado ao enxofre na forma de sulfetos, como a calcopirita, a calcocita e a bornita. Aparece como componente traço em minerais constituintes de rochas ígneas e em minerais secundários na forma de óxidos, carbonatos e silicatos. Normalmente, os minerais de cobre apresentam elevada solubilidade, razão pela qual não devem estar presentes em solos mais intemperizados. O cobre como elemento isolado caracteriza-se pela baixa solubilidade, sendo fortemente retido pela fase sólida do solo. À semelhança do que ocorre com os demais micronutrientes, o conteúdo total de Cu nos solos varia muito. A fração disponível pode ser insuficiente para o crescimento das culturas, mesmo em solos com maior riqueza do elemento (FERREIRA; CRUZ, 1991).
- d) Ferro - O ferro é importante constituinte da crosta terrestre (5% em peso) e está presente em todos os tipos de solo. As rochas ígneas (95% da crosta terrestre) são especialmente ricas, estando o elemento presente em minerais como olivina, augita, hornblenda e biotita. O ferro ocorre em solos também na forma de óxidos primários

como a hematita, ilmenita e magnetita. Com o intemperismo, os óxidos e hidróxidos de Fe acumulam-se no perfil e passam a ser abundantes nos solos altamente intemperizados. Apesar disso, a deficiência pode ocorrer, mesmo em solos com elevados conteúdos de Fe, pois pequena proporção permanece solúvel (BATAGLIA, 1991; BORKET et al., 2001a).

- e) Manganês - Após o ferro, o manganês é o elemento mais abundante na crosta terrestre e sua ocorrência geológica está bastante associada à do primeiro. Os teores de Mn nas rochas variam de 350 a 2.000 mg·kg⁻¹. As rochas ferro-magnesianas apresentam maior abundância do elemento. O Mn faz parte de diversos minerais, ligado principalmente ao oxigênio e silício. Os óxidos (ex: pirolusita e manganita) e sulfetos de manganês são as formas mais comuns nos solos. Durante o intemperismo, os compostos de Mn são oxidados, reprecipitados e concentrados na forma de minerais secundários. A disponibilidade do nutriente pode ser bastante variável, implicando em deficiência ou toxicidade às plantas, dependendo da solubilidade dos compostos de manganês presentes no solo (BORKET, 1991; RAIJ; BATAGLIA, 1991; BORKET et al., 2001a).
- f) Molibdênio - Em minerais, o molibdênio ocorre como sulfeto (molibdenita) ou na forma de óxidos (ilsemanita, povelita e ferrimolibdita). A maior parte do molibdênio presente no solo está em formas oclusas, no interior de minerais primários e secundários. O intemperismo desses minerais libera íons molibdato, cuja solubilidade aumenta em condições alcalinas, contrariamente ao que se observa com os outros micronutrientes metálicos (Cu, Fe, Mn e Zn). Os teores totais e disponíveis de Mo nos solos são normalmente inferiores aos dos demais micronutrientes (SANTOS, 1991; RAIJ; BATAGLIA, 1991).
- g) Zinco - Está presente em diversas rochas básicas e ácidas, situação condicionada, em parte, pelo fato de que a substituição isomórfica de Mg por Zn nos silicatos se dá com certa facilidade. Aparece como elemento acessório em minerais primários tais como olivina, hornblenda, augita, biotita e magnetita. Formas comuns de compostos que contém o elemento envolvem sulfetos (esfalerita), carbonatos, silicatos e fosfatos (SOUZA; FERRERIA, 1991; RAIJ; BATAGLIA, 1991).

Na Tabela 6 são mostradas as formas e garantias de alguns micronutrientes que são comercializados no Brasil.

Tabela 6 - Fertilizantes com micronutrientes comercializados no Brasil e suas garantias mínimas.

Micronutriente Fertilizante	% B	% Cu	% Zn	% Fe	% Mn	% Mo
Boráx	11	-	-	-	-	-
Ácido Bórico	17	-	-	-	-	-
Sulfato de Cobre	-	13	-	-	-	-
Nitrato de Cobre	-	22	-	-	-	-
Fosfato ferroso	-	-	29	-	-	-
Sulfato férrico	-	-	23	-	-	-
Sulfato Manganoso	-	-	-	26	-	-
Óxido de manganoso	-	-	-	41	-	-
Molibdato de amônia	-	-	-	-	54	-
Molibdato de sódio	-	-	-	-	39	-
Sulfato de zinco	-	-	-	-	-	20
Óxido de zinco	-	-	-	-	-	50

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

6.5 Formulações NPK

Os nutrientes podem ser aplicados separadamente com o uso de fertilizantes simples ou em conjunto com misturas que constituem as fórmulas de fertilizantes. Embora possam ser produzidas fórmulas na propriedade, geralmente são utilizados produtos prontos da indústria e das misturadoras, que proporcionam boa uniformidade, especialmente em relação à granulometria dos seus componentes.

A combinação de diferentes fertilizantes minerais simples para o fornecimento de dois ou mais nutrientes, geralmente três, são reconhecidos pela expressão da fórmula NPK. Esta pode ser na forma de misturas de grânulos ou mistura granulada.

A mistura de grânulos geralmente consiste em reunir diversos ingredientes para atender às necessidades de N, P e K na formulação desejada (DIAS; FERNANDES, 2006) e pode apresentar ou não micronutrientes. A mistura granulada dos diferentes nutrientes encontra-se toda nos mesmos grânulos, sendo estes prontos para uso.

Para que se possa misturar diferentes fertilizantes, atenção tem que ser dada à sua compatibilidade. A associação ou mistura de dois ou mais materiais incompatíveis entre si do

ponto de vista químico, físico e físico-químico, ocasionará deterioração de suas propriedades, podendo comprometer a qualidade, eficiência e a aplicação do produto final.

Quanto ao aspecto físico, a compatibilidade granulométrica (tamanho das partículas) dos diferentes componentes da fórmula é de grande importância para a eficiência da adubação, uma vez que a associação de fertilizantes com granulometria variada poderá ocasionar segregação, que consiste basicamente na separação das partículas que compõem a mistura dos fertilizantes, por ordem de tamanho. A partir da segregação ocorrerá uma distribuição irregular dos nutrientes no campo, reduzindo a eficiência da adubação, causando prejuízos ao desenvolvimento da cultura. Em relação aos aspectos químicos e físico-químicos, cuidados também devem ser tomados para não ocasionar reações químicas adversas que poderão resultar em perda de nutrientes, como a solubilidade, a salinidade, o empedramento e a higroscopicidade. A Figura 14 mostra a compatibilidade entre os principais fertilizantes e corretivos de acidez, utilizados em formulações comerciais, destinadas à aplicação no solo.

Figura 14 - Compatibilidade entre fertilizantes.

Adubos orgânicos		Legenda	
C	Nitrato de sódio	C	Compatíveis: podem ser misturados
C C	Nitrato de potássio	CL	Compatibilidade limitada: podem ser misturados pouco antes da aplicação ou em proporções limitadas
C C C	Nitrocálcio	I	Incompatíveis: não podem ser misturados
C C C C	Nitrato de amônio		
C C C C C	Sulfato de amônio		
C C C I I C	Ureia		
C C C C C C C	Farinha de ossos		
C C C C C C C C	Fosfatos naturais		
C C C C C C C CL C C	Superfosfato simples		
C C C C C C C CL C C C	Superfosfato triplo		
C C C C C C C C C C C	MAP		
C C C C C C C C C C CL CL C	DAP		
CL C CL I I I I I I I I I I I I	Escórias		
CL C CL I I I I I I I I I I I I C	Termofosfato		
C C C C C C C C C C C C C C CL CL	Cloreto de potássio		
C C C C C C C C C C C C C C CL CL C	Sulfato de potássio		
C C C C C C C C C C C C C C I I C C	Sulfato de potássio e magnésio		
CL C CL I I I I I I I I I I I I C C CL CL I	Cal virgem, hidrat., calcários calcin.		
CL C CL I I I I I I I I I I I I C C CL CL C C	Calcários		

Fonte: Comissão (2004).

As formulações de fertilizantes são produzidas nas indústrias obedecendo às quantidades de matérias-primas necessárias para fornecerem os nutrientes que serão garantidos no registro do produto. As formulações, para serem comercializadas, devem obedecer às normas preconizadas pela Legislação de Fertilizantes e terem o seu respectivo registro no órgão oficial (BRASIL, 2013). Como já mencionado, os nutrientes são garantidos em percentagem de nitrogênio (N), de fósforo (P₂O₅) e de potássio (K₂O). Nas formulações podem ser adicionados os micronutrientes com suas garantias. As formulações de fertilizantes

são produzidas, geralmente, para cada 1.000 quilos. Por exemplo, a fórmula 04-14-08 apresenta 4% de N, 14% de P_2O_5 e 8% de K_2O , ou seja, a aplicação de 1000 kg dessa fórmula adicionará ao solo 40 kg de N, 140 kg de equivalente em P_2O_5 e 80 kg de equivalente em K_2O .

Vale ressaltar que, para as mesmas formulações, podem ser usadas diferentes matérias-primas com garantias iniciais diferentes, resultando nas mesmas garantias finais exigidas.

Dando um exemplo simples que engloba também o uso dos três nutrientes principais, suponhamos o fechamento de uma formulação NPK tal como 04-14-08, onde como matérias-primas disponíveis estão o sulfato de amônia, o superfosfato simples (SSP), o superfosfato triplo (TSP) e cloreto de potássio. O cloreto de potássio fornece cerca de 60% de K_2O solúvel equivalente em água em sua composição, sendo representado como 00-00-60. Já o sulfato de amônio possui um teor de nitrogênio de 21%, sendo representado como 21-00-00. O SSP e o TSP são as fontes que disponibilizam fósforo, com garantia de 19% e 45% de P_2O_5 equivalente, sendo representados por 00-19-00 e 00-45-00, respectivamente. A fim de exemplificar o cálculo, pode-se realizar o fechamento para uma produção de 1000 Kg dessa formulação.

O cálculo é feito separadamente por nutriente, levando sempre em consideração todas as matérias-primas que influenciam em cada um deles. Nesse caso, sulfato é a única fonte de nitrogênio, o KCl é fonte de potássio e o SSP e TSP são as fontes de fósforo. Existe uma fórmula para o cálculo da mistura de fertilizantes, baseada em um balanço de massa e proposta por Malavolta (1981), que está descrita pela Equação 4.

$$QFM = \frac{(QTM \times \%NM)}{\%NF} \quad (4)$$

em que:

QFM = quantidade do fertilizante na mistura em kg;

QTM = quantidade total da mistura, ou seja, 1000 kg;

%NM = porcentagem do nutriente na mistura;

%NF = porcentagem do nutriente no fertilizante.

Primeiramente, fazendo o cálculo para o nitrogênio, se em 1000 kg de sulfato de amônia tem disponível 21% N; logo, para se atingir um objetivo de 4% na mistura, são necessários 190,47 kg de sulfato de amônia, como evidencia a Equação 5.

$$QFM = \frac{QTM (1000 \text{ kg}) \times \%NM (4\%)}{\%NF (21\%)} = 190,47 \text{ kg de Sulfato de Amônia} \quad (5)$$

O mesmo cálculo é feito para os demais macronutrientes. Para o KCl, se em 1000 kg de KCl, 60% é de K₂O solúvel; então, para se alcançar os 8% necessários na mistura, são necessários 133,33 kg de cloreto de potássio, conforme mostrado na equação (6).

$$QFM = \frac{1000 \text{ kg} \times 8\%}{60\%} = 133,33 \text{ kg de Cloreto de Potássio} \quad (6)$$

Já para o teor de P₂O₅, o cálculo não é tão simples, pois o composto é proveniente de duas fontes distintas. Para se resolver é preciso utilizar o método de substituição de equações.

Primeiro, precisa-se descobrir a quantidade que falta para completar a mistura, que no caso é a soma da quantidade de TSP e de SSP. Isso é feito subtraindo as quantidades já encontradas dos outros nutrientes do total da mistura, como mostra a Equação 7.

$$SSP + TSP = 1000 \text{ kg de mistura} - 190,47 \text{ kg sulfato} - 133,33 \text{ kg KCl} = 676,2 \text{ kg} \quad (7)$$

Em seguida, escreve-se uma nova equação (Equação 8) que leva em consideração os teores de cada uma das matérias-primas restantes:

$$(19\% \times SSP) + (45\% \times TSP) = 14\% \times 1000 \quad (8)$$

Na equação 8, 19 é a porcentagem de P₂O₅ do superfosfato simples, 45 é a porcentagem de P₂O₅ do superfosfato triplo e o número 140 refere-se ao resultado da multiplicação de 14% da fórmula por 1000 kg do fertilizante.

Com isso, obtemos as Equações 7 e 8 com duas incógnitas “TSP” e “SSP”. Isolando o termo “SSP” na Equação 7 e substituindo-o na Equação 8, obtêm-se a Equação 9.

$$19\% \times (676,2 - TSP) + 45\% \times TSP = 140 \quad (9)$$

Resolvendo a Equação 9 é possível obter a quantidade de TSP. Para encontrar a quantidade de SSP, basta substituir o resultado encontrado na Equação 8. No final, foi obtido que para se alcançar um teor na mistura de 14% de P_2O_5 , são necessários 44,31 kg de superfosfato triplo (45%) e 631,89 kg de superfosfato simples (19%).

Para conferência, basta somar todos os valores encontrados e o resultado deve ser igual à quantidade de mistura, no caso 1000 kg.

A dosagem de cada componente nutricional usada no processo de formulação varia com muitos fatores, dependendo da operação a ser realizada, da cultura, das condições de fertilidade do solo em questão e da expectativa de produção. Após a formulação, o produto é ensacado e transportado até o produtor final.

Este segmento apresenta-se bastante pulverizado e com atuação quase sempre regional, uma vez que as formulações produzidas nas misturadoras variam dependendo da região pelos fatores anteriormente citados. O suprimento de fertilizantes intermediários pelas misturadoras pode ser feito através das unidades produtoras de fertilizantes instaladas no próprio país ou então a partir dos portos, por onde chegam fertilizantes intermediários e matérias-primas importadas de outros países. No início, como a maior parte dos insumos tinha origem externa, as misturadoras se localizavam próximas aos portos (CARVALHO, 2010).

A operação de mistura para a formulação dos fertilizantes é bem simples. Há a entrada das matérias-primas, em batelada, sejam elas macronutrientes ou micronutrientes, em quantidades de acordo com as formulações, variando com a exigência de cada cliente. Depois é feita a mistura dessas matérias-primas nos chamados misturadores, os quais são tanques equipados com agitadores, que realizam a mistura dessas matérias-primas até atingir uma certa conformidade da mistura. Os produtos finais são, então, alocados em embalagens adequadas e transportados aos clientes por via rodoviária. Um pequeno fluxograma ilustrando essa dinâmica pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma simplificado de mistura de fertilizantes.



Fonte: Heringer (2016).

6.6 Qualidade

Segundo Alcarde et al. (1989), as características de qualidade dos fertilizantes minerais podem ser classificadas quanto à sua natureza em: características de natureza física, química e físico-química. Um aspecto relevante na produção é o processo de qualidade, erros nos pontos críticos de controle são determinantes na qualidade final do produto.

O Ministério da Agricultura define os pontos críticos de controle como sendo (BRASIL,1998):

“Qualquer ponto, operação, procedimento, etapas do processo de fabricação ou preparação do produto, onde se aplicam medidas preventivas de controle sobre um ou mais fatores. Com o objetivo de prevenir e reduzir os limites aceitáveis, eliminar os perigos para a saúde, para a perda da qualidade e a fraude econômica.”

Dentro da indústria de fertilizantes não é diferente, sendo o controle desses pontos primordiais para a qualidade do produto final, garantindo que não ocorram falhas no processo produtivo bem como elevando a eficiência do produto.

A inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, são regidos pelas disposições da Lei nº 6.894, de 16/12/1980, alterada pela Lei 12.890/2013 (BRASIL,2013).

6.6.1 Aspectos físicos

As características de natureza física dos fertilizantes minerais são: o estado físico, a granulometria, dureza e densidade. Segundo a ANDA (1988) (p.2), os fertilizantes podem ser encontrados em três estados, sendo eles o estado sólido, líquido e gasoso.

A forma sólida é a predominante usada no Brasil. O uso de fertilizantes fluidos, soluções e suspensões, é relativamente recente no país, mas vem mostrando um ritmo crescente de consumo. Quanto ao estado gasoso, o único fertilizante assim empregado em aplicação direta é a amônia anidra; mas, no Brasil, praticamente não é usada, pois exige cuidados rigorosos e tecnologia.

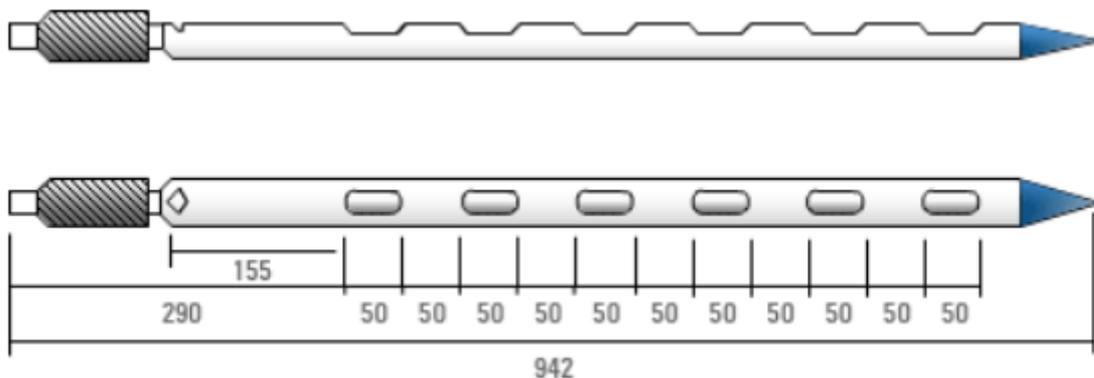
6.6.1.1 Granulometria

De acordo com Rodella et al. (2000), o tamanho das partículas influencia diretamente na absorção dos nutrientes, no seu efeito na lavoura e no funcionamento de maquinários envolvidos no processo de adubação. Desta forma, é essencial a realização do processo de granulometria, que deverá seguir os parâmetros estabelecidos pelo MAPA (que dispõe que a qualidade física de fertilizantes é determinada pela composição química e pela forma como é produzido e armazenado) (BRASIL, 2018).

A influência do tamanho das partículas nas características dos fertilizantes fundamenta-se no fato de que a subdivisão de um material aumenta sua superfície de exposição por unidade de massa. Como consequência, todos os fenômenos que dependem do contato, como velocidade de dissolução, absorção de umidade atmosférica ou higroscopicidade são intensificados ou reduzidos em função do tamanho.

Para fazer a análise granulométrica é necessário fazer a amostragem e o quarteamento da amostra. A amostragem é feita de acordo com a instrução normativa nº39 (BRASIL, 2018), que diz que a sonda utilizada deve ser de tubo duplo perfurado com ponta cônica, usualmente conhecida como calador, conforme ilustrado na Figura 16.

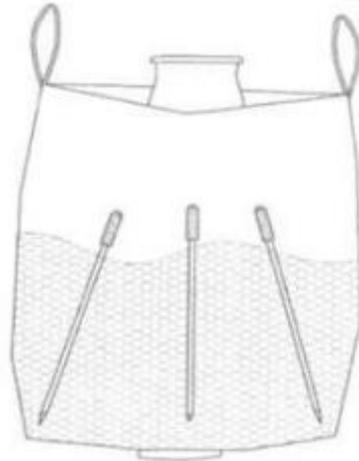
Figura 16 - Sonda de tubo duplo perfurado (calador).



Fonte: HERINGER (2022).

Para a coleta de amostras em big-bag (BB), a sonda deverá ser inserida na amostra totalmente fechada. A abertura da mesma deverá ser realizada somente no ponto da coleta do produto. Após a coleta, a sonda deverá ser fechada e a amostra retirada e acondicionada nas embalagens de coleta. O produto a ser amostrado deve ser coletado em três pontos do BB conforme a Figura 17.

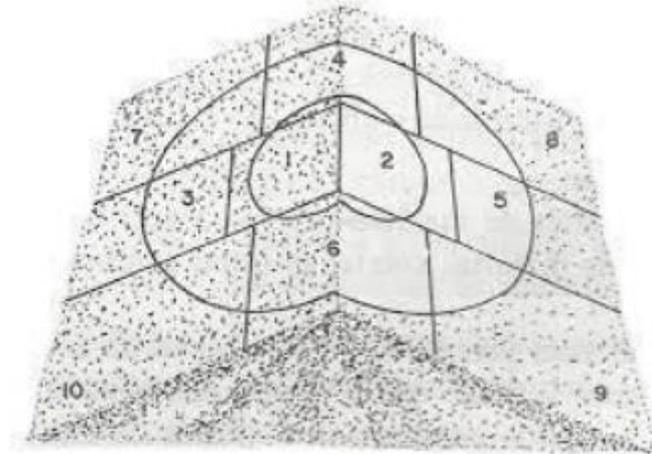
Figura 17 - Disposição dos locais de coleta com a sonda em BB.



Fonte: HERINGER (2022).

Para a amostragem de fertilizantes armazenados a granel, deve-se coletar uma amostra em dez pontos alternados para que seja representativa. Esses pontos de amostragem estão ilustrados na Figura 18, que demonstra como coletar amostras na base, meio e topo do total.

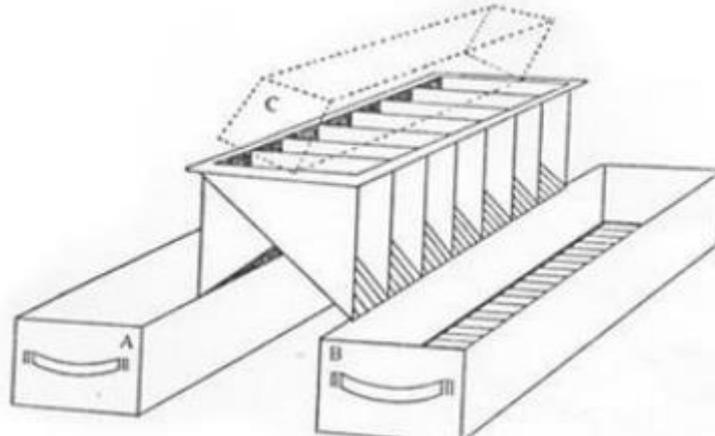
Figura 18 - Esquema de pontos de amostragem a granel.



Fonte: APROSOJA (2022).

O volume obtido com a amostragem deverá ser homogeneizado e dividido em amostras iguais e representativas, sendo uma delas encaminhada para análise e a outra ficando como contraprova por um período de um ano para eventuais reclamações. Para dividir a amostra em tamanhos iguais é utilizado um quarteador do tipo Jones, que garante amostras similares, identificado na Figura 19.

Figura 19 - Quarteador do Tipo Jones.



Fonte: HERINGER (2022).

Após o procedimento de quarteamento, deve-se realizar uma análise granulométrica, para verificar se o fertilizante segue as propriedades físicas recomendadas pelo MAPA. Os valores de garantia granulométrica estão dispostos na tabela abaixo e estão de acordo com a IN 39 de 08/08/2018 do MAPA (BRASIL, 2018).

O principal equipamento da análise de granulometria são as peneiras, que devem ter malhas de 4,8 mm, 2,0 mm e 1,00 mm, devendo apresentar tampa e fundo, além de estarem limpas e secas.

Inicialmente, a amostra deve ser transferida para um vasilhame previamente pesado, de modo a aferir a massa da amostra em balança semianalítica, anotando o valor total e, logo em seguida, transferir o material para o conjunto de peneiras encaixadas uma sobre as outras em ordem crescente e com o fundo encaixado. Com isso, dá-se início ao processo de peneiramento da amostra entre 2 e 5 minutos com o conjunto tampado, com a ajuda de um agitador de peneiras.

Para determinar a garantia granulométrica, pesa-se cada peneira e o fundo, calculando-se as frações retidas pela seguinte equação:

$$\% \text{ MALHA } 4,8 \text{ mm} = (R1) / G$$

$$\% \text{ MALHA } 2,0 \text{ mm} = (R2) / G$$

$$\% \text{ MALHA } 1,0 \text{ mm} = (R3) / G$$

$$\% \text{ FUNDO} = (R4) / G$$

onde: G= massa total da amostra analisada

R1= massa da fração retida na 1° peneira;

R2= massa da fração retida na 2° peneira;

R3= massa da fração retida na 3° peneira;

R4= massa da fração retida no fundo;

% MALHA 4,8 mm = fração de partículas com diâmetro maior do que 4,8 mm;

% MALHA 2,0 mm = fração de partículas com diâmetro maior do que 2,0 mm;

% MALHA 1,0 mm = fração de partículas com diâmetro maior do que 1,0 mm;

% FUNDO = fração de partículas com diâmetro menor do que 1,0 mm;

Os valores da garantia devem seguir as especificações apresentadas na Tabela 7 que estão de acordo com o MAPA (BRASIL, 2018).

Tabela 7 - Tolerância físicas para materiais sólidos.

Natureza Física	Especificação de Natureza Física	Garantia Granulométrica	
		Peneira	Partículas Passantes
Sólido	Granulado e Mistura de Grânulos	4,8 mm (ABNT 4)	95 % mínimo
		2 mm (ABNT 10)	40% máximo
	Microgranulados	1 mm (ABNT 18)	5% máximo
		2,8 mm (ABNT 7)	90% mínimo
	Pó	1 mm (ABNT 18)	10% máximo
		2 mm (ABNT 10)	100%
		0,84 mm (ABNT 20)	70% mínimo
	Farelado	0,3 mm (ABNT 50)	50% mínimo
		4,8 mm (ABNT 4)	90% mínimo
		2,8 mm (ABNT 7)	80% mínimo
Pastilha	0,5 mm (ABNT 35)	30% mínimo	
	Frações moldadas de formatos e tamanho variáveis		

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

6.6.1.2 Dureza

Rodella (2000) define a dureza como outro fator físico, que visa medir a resistência dos grãos de fertilizantes comercializados na forma de grânulos, ou seja, é um método que mede a capacidade de suportar uma determinada carga sem que o grão se quebre. A IN N° 39 (BRASIL, 2018) determina que para o teste de dureza dos grãos seja utilizado um equipamento chamado durômetro, exemplificado na Figura 20, que aplica uma força em Kgf

ou N sobre o grão até que o quebre. Para fazer a análise de dureza, deve-se escolher 12 grãos que ficam retidos na peneira de malha 2,0 mm e de tamanhos similares. Deve-se então anotar a dureza de cada grão e realizar o cálculo de média desprezando a maior e a menor dureza encontrada.

Figura 20 - Durômetro.



Fonte: Durômetro... (2022).

A resistência da partícula difere de um fertilizante para outro por conta da sua composição química. Desta forma, é necessário realizar o teste em todos os fertilizantes chegados na fábrica, independente da proporção de NPK. Como cada matéria-prima tem uma resistência, é essencial conhecê-la para definir a melhor forma de armazenamento e transporte ou manuseio, pois a fragilidade de algumas partículas pode provocar a quebra do grão gerando pó e tamanhos desuniformes que irão afetar o seu desempenho agrônômico (REIS; SILVA, 2012).

6.6.1.3 Densidade

O local de armazenamento da matéria-prima depende de vários pontos, como a natureza do nutriente, sua volatilidade e um outro fator é a sua densidade, medida que relaciona massa e volume. Conhecendo a densidade é possível determinar as proporções do espaço necessário e assim definir se o material será guardado/ensacado/carregado em sacos (*bags*) ou caixas (*box*), garantindo que suas características não sejam prejudicadas por um armazenamento incorreto.

Conhecer a densidade também é uma característica física importante para o processo de produção, pois a partir dela é possível determinar o local de armazenamento de acordo com o espaço ocupado por cada volume, assim como a quantidade de *big bags* que deverá ser

utilizada em cada carregamento e qual o tipo/tamanho de veículo deverá realizar o transporte dos adubos até o destino final.

6.6.2 Aspectos químicos

Os aspectos químicos levam em conta o número de nutrientes, a forma química dos nutrientes e a concentração de nutrientes e de produtos indesejados.

O número de nutrientes se refere ao fato de que o fertilizante pode conter um, dois ou vários macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes. Já a forma química dos nutrientes é importante se ter conhecimento, pois ela influencia na solubilização e disponibilização no solo dos nutrientes às plantas. O potássio, por exemplo, é o caso mais simples, pois ele é encontrado apenas na forma iônica, K^+ , fornecida sobretudo através de KCl e mais raramente por K_2SO_4 , $KMg(SO_4)_2$ e KNO_3 . Como esses sais são solúveis em água, o comportamento no solo do potássio é praticamente invariável com relação à fonte empregada. Já o nitrogênio pode ser aplicado ao solo em diferentes formas: amoniacal, NH_4^+ e NH_3 ; nítrica, NO_3^- ; amídica, NH_2 ; cianamídica, e proteica. Além do mais, essas formas, uma vez presentes no solo, sofrem transformações acentuadas em um espaço de tempo relativamente curto. Com relação ao fósforo ele é aplicado basicamente como espécies protonadas do íon fosfato: $H_2PO_4^-$ ou HPO_4^{2-} ou até mesmo H_3PO_4 . A concentração total dessas formas no solo vai depender estritamente da solubilidade da fonte empregada.

Os fertilizantes minerais exibem uma vantagem bastante atraente do ponto de vista econômico, que é apresentarem elevadas concentrações de nutrientes, resultando em menores custos de armazenamento, transporte e aplicação por unidade de massa de nutriente. O emprego de fertilizantes mais concentrados pode trazer problemas com relação a macronutrientes secundários e micronutrientes. A concentração dos nutrientes no fertilizante mineral deve estar em acordo com o que foi especificado e garantido pelo fabricante. Este pode se constituir em um ponto crítico de checagem na relação entre o agricultor, usuário de fertilizante e o fornecedor do produto.

Compostos indesejáveis são compostos tipicamente citados como nocivos às plantas e presentes nos fertilizantes, como o biureto, formado na produção da ureia, os íons tiocianato e perclorato e a dicianodiamida.

As garantias legais referem-se à concentração de cada nutriente em um fertilizante, seja simples ou uma formulação. As garantias são indicadas pela empresa produtora. Cabe ao MAPA verificar se os fertilizantes realmente contêm os teores garantidos de nutrientes.

Há uma tolerância legal para o estabelecimento de garantias. O limite de tolerância incide sobre os nutrientes considerados na forma individual e na somatória dos mesmos. Individualmente, a tolerância para os macronutrientes N, P₂O₅ e K₂O varia de 10 a 15% dependendo da concentração na formulação. Para os macronutrientes secundários (Ca, Mg e S) e os micronutrientes, quando em misturas, a tolerância é de 30%. Já na somatória NPK a tolerância é menor, pois o índice não pode ultrapassar 5% (GALDINO, 2003).

Em decorrência do não cumprimento das garantias, a empresa pode sofrer punições como multa ou até o fechamento em caso grave de erro. Sendo, então, o processo de fiscalização arquivado e instaurando-se sindicância para apuração de responsabilidade, segundo o Decreto n° 8.059, 26 de julho de 2013 (BRASIL, 2013).

Nesse sentido, para se garantir a qualidade do produto final, são feitas análises químicas dos principais nutrientes como teor de nitrogênio, fósforo e potássio, assim como análises de certos micronutrientes e de metais pesados.

6.6.2.1 Análise de nitrogênio

Para se analisar o teor de nitrogênio em uma amostra de fertilizantes NPK, utiliza-se o macrométodo ou micrométodo da liga de Raney. O macrométodo fundamenta-se na amonificação de todas as formas não amoniacais de nitrogênio, seguida da destilação alcalina da amônia, que é recebida em uma solução de ácido bórico. O borato de amônio formado é titulado com solução ácida padronizada. Esse método é aplicável aos fertilizantes minerais, exceto a nitrofosfatos contendo enxofre não sulfato (MAPA, 2017). Já o micrométodo fundamenta-se da mesma forma na amonificação, porém, esse método é mais aplicável a fertilizantes contendo formas minerais de nitrogênio solúveis em água, como a amoniacal e nítrica e, também, a amídica da ureia, que são as mais comumente utilizadas nas formulações de fertilizantes minerais. Essa técnica não é aplicável a produtos contendo formas insolúveis em água como ureiaformaldeído (MAPA, 2017). Ambos os métodos são realizados em um conjunto macrodigestor e destilador tipo Kjeldahl equipados com reguladores de potência, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Destilador de nitrogênio tipo Kjeldahl.



Fonte: Destilador... (2022).

6.6.2.2 Análise de fósforo

Dentre os nutrientes vegetais contidos nos fertilizantes, o fósforo é o que se apresenta em maior número de formas químicas diferentes. Mesmo quando oriundo de uma mesma fonte, tem comportamento variável em função do solo, clima, cultura (planta), forma de aplicação e outros fatores secundários, o que não ocorre com outros nutrientes (ALCARDE, 1979).

Para tentar simular a absorção dos nutrientes dos fertilizantes fosfatados, pesquisadores propuseram “extratores químicos” (KORNDÖRFER, 2004; ALCARDE, 1979), sendo os principais extratores estudados:

- a) Água: solubiliza com eficiência o ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato monocalcico ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$), os fosfatos de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ e $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) e o polifosfato de amônio ($(\text{NH}_4)_3\text{HP}_2\text{O}_7$); solubiliza muito pouco o fosfato dicálcico (CaHPO_4) e praticamente insolúvel nas demais formas de fósforo presentes nos fertilizantes (KORNDÖRFER, 2004).
- b) Solução de citrato neutro de amônio ($\text{C}_3\text{H}_4(\text{OH})(\text{COO}^-)_3$ ou Citr^{3-}): foi proposto com objetivo de avaliar o fosfato dicálcico contido no superfosfato; porém solubiliza com eficiência as demais formas de fósforo, exceto o fosfato tricálcico (apatitas) (KORNDÖRFER, 2004).
- c) Solução de ácido cítrico 2% ($\text{C}_3\text{H}_4(\text{OH})(\text{COOH})_3$ ou H_3Citr): proposta para avaliar o fósforo contido nas escórias básicas e solubiliza praticamente todas as formas de fósforo contidas nos fertilizantes, com exceção dos fosfatos de ferro e de alumínio das apatitas (KORNDÖRFER, 2004).

- d) Solução de ácido fórmico 2% (HCOOH): possui ação solubilizante semelhante à da solução de Ácido Cítrico 2%, porém solubiliza com mais eficiência certos tipos de apatitas (KORNDÖRFER, 2004). A análise do teor de fósforo em amostras de fertilizantes é feita mais comumente através do método colorimétrico e espectrofotométrico de determinação do fósforo, baseado na formação do ácido fosfovánadomolibdico (VOGEL, 2002). Neste método, a determinação do fósforo é feita na forma de íon ortofosfato (H_2PO_4^- e HPO_4^{2-}) reagindo com vanadato de amônio (NH_4VO_3) e o molibdato de amônio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) com formação do complexo ácido molibdovanadofosfórico – $20 \text{H}_3\text{PO}_4\cdot\text{NH}_4\text{VO}_3\cdot 16\text{MoO}_3$, que tem cor amarela brilhante e sua absorvância é medida em 400 nm (PRESSINOTI; CARTER, 1987).

6.6.2.3 Análise de potássio

A determinação do potássio em fertilizantes tem constituído um problema que apresenta certa dificuldade, quando se considera a precisão, a exatidão e a rapidez dos métodos propostos, pois em alguns desses métodos, no momento da análise, os cátions de sódio e magnésio interferem positivamente quando suas concentrações são iguais ou superiores às de potássio (SCHALL; HAGELBERG, 1952).

Dentre os métodos estudados, merecem menção especial o baseado na fotometria de chama (FORD, 1958; HORWITZ, 1960) e o fundamentado no uso de tetrafenilborato de sódio como reativo precipitante do potássio (HORWITZ, 1960; CATANI; PEREZ, 1965).

Enquanto a determinação do potássio em solos e em plantas pode ser executada por fotometria de chama com rapidez e precisão satisfatórias (CATANI, 1965), a determinação do citado elemento em fertilizantes, pelo mesmo método, carece ainda de estudos (BURRIEL-MARTI; RAMIREZ, 1960). Isso porque a concentração de outros íons, como amônio, sódio, cálcio, cloreto, fosfato, sulfato, nitrato etc. na solução em que se pretende determinar o potássio, pode ser elevada, provocando interferências.

O método de fotometria de chama consiste na solubilização do potássio com água quente e medida da sua emissão em fotômetro de chama, sendo o teor expresso como óxido de potássio (K_2O). Para esse método utiliza-se um fotômetro de chama digital como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Fotômetro de chama.



Fonte: Fotômetro (2022).

6.6.2.4 Análise de micronutrientes

A adubação com micronutrientes para as culturas é uma prática bastante comum e essencial para a obtenção de altas produtividades. Diversos produtos que contêm esses elementos são comercializados no Brasil; no entanto, alguns deles têm sido contestados quanto à capacidade de disponibilizar os micronutrientes às plantas.

A legislação brasileira de fertilizantes define as fontes de micronutrientes que podem ser utilizadas na agricultura, com suas respectivas garantias mínimas (BRASIL, 1982). Dentre essas fontes, algumas são solúveis em água, como os sulfatos, cloretos e quelatos, enquanto outras são insolúveis em água, mas aproveitáveis pelas plantas quando aplicadas no solo: é o caso dos óxidos e fritas, dentre outros. O termo 'fritas', de acordo com Malavolta (1981), vem do inglês "*frited trace elements*" (elementos traços fritos), sendo também conhecido como FTE. Em sua produção, os micronutrientes, juntamente com sílica, são fundidos a 1.300 °C. Ao sair do forno, o produto é resfriado rapidamente, gerando cristais borossilicatados que, em seguida, são moídos finamente.

Alcarde e Rodella (1993) alertaram que a legislação em vigor, ao exigir a garantia pelo teor total, abre um precedente que permite a comercialização de fertilizantes com micronutrientes que não se apresentam nas formas químicas rotuladas e previstas na legislação (BRASIL, 1982). Um exemplo disso seria a utilização de resíduos metálicos e subprodutos industriais de eficiência agrônômica ainda não comprovada como matéria-prima. Esses materiais provavelmente contêm grandes quantidades de metais pesados indesejáveis, os quais podem poluir os solos e afetar a qualidade dos produtos agrícolas. Malavolta (1994)

cita exemplos da utilização de resíduos industriais na agricultura sem a preocupação com a disponibilidade de elementos químicos para as plantas.

Os métodos oficiais de análise de fertilizantes com micronutrientes levam em consideração a natureza do fertilizante para definir o procedimento a ser utilizado na extração do teor total desses elementos: se for material inorgânico diferente de frita, utiliza-se apenas um ataque com HCl concentrado. Porém, se o material a ser analisado for do tipo fritas, o ataque com este ácido não é suficiente para extrair os micronutrientes presentes, sendo necessário o ataque com os ácidos perclórico e fluorídrico (BRASIL, 1983).

Na Tabela 8 são mostradas as garantias mínimas de alguns dos principais micronutrientes utilizados em fertilizantes minerais NPK.

Tabela 8 - Garantias mínimas dos principais micronutrientes em fertilizantes minerais.

Nutriente	Teor Mínimo (%)
Boro (B)	0,01
Cloro (Cl)	0,1
Cobalto (Co)	0,005
Cobre (Cu)	0,02
Ferro (Fe)	0,02
Manganês (Mn)	0,02
Molibdênio (Mo)	0,005
Níquel (Ni)	0,005
Zinco (Zn)	0,1
Silício (Si)	0,05

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

6.6.2.5 Análise de metais pesados

Insumos agrícolas ou subprodutos usados com finalidade corretiva ou nutricional na agricultura podem ser também uma fonte de contaminação com metais pesados.

Metais pesados é um termo coletivo aplicado a um grupo de metais ou metalóides com uma densidade atômica maior que 6 g/cm³ (ALLOWAY e AYRES, 1997). Eles são absolutamente não-degradáveis e acumulam-se nos elementos do meio ambiente manifestando sua toxicidade (MANAHAN, 2001).

A alteração do teor natural de metais pesados nos solos pela aplicação de fertilizantes tende a ser observada após décadas (MCBRIDE; SPIERS, 2001). Entretanto, é necessário

avaliar o potencial de risco do uso de fertilizantes além de outras fontes de metais pesados, tais quais pulverizações com agroquímicos como sais de Zn, arsenatos de Cu e Pb, irrigação com água proveniente de rios que recebem grande carga poluidora, uso de lodo de esgoto, uso de composto de lixo urbano e esterco animal (TILLER, 1989).

A preocupação com metais pesados provenientes de fertilizantes minerais tradicionais ou de fonte alternativas, como lodos de tratamento biológico e demais resíduos industriais, relaciona-se sobretudo com a adubação de plantas empregadas diretamente na alimentação humana, como hortaliças e grãos (ALCARDE; RODELLA, 2003). Essa preocupação leva em consideração elementos essenciais como Fe, Cu, Zn e Mn, mas principalmente os elementos não essenciais às plantas como o Pb, Cr e Cd, que oferecem risco à saúde humana (CERCLA, 2002).

A análise de metais pesados é fundamental para determinar os níveis de elementos como cádmio, chumbo, níquel e cromo, que em maiores teores constituem elementos potencialmente tóxicos em materiais químicos e orgânicos.

Por meio da análise de metais pesados é possível saber a composição desses metais presentes em diferentes materiais, por exemplo, no solo, para constatação de eventuais contaminações ambientais.

Nos corretivos de acidez, como o calcário, a análise de metais pesados é empregada para indicar eventuais contaminações, especialmente por cádmio e chumbo, no processo industrial de beneficiamento do calcário agrícola.

A análise, além de definir os níveis de metais potencialmente contaminantes no adubo, ajuda a definir medidas corretivas nos processos de fabricação e manipulação de corretivos de acidez, fertilizantes químicos e orgânicos.

A presença de altos níveis de metais potencialmente tóxicos, constatada por meio da análise de metais pesados, possibilita a tomada de providências necessárias no sentido de evitar, ou mesmo remediar essa contaminação, especialmente no solo. A presença destes metais no lençol freático pode comprometer abastecimentos hídricos, provocando severos impactos ambientais.

Segundo Mortvedt (1987), as rochas fosfatadas usadas na produção dos fertilizantes são as maiores fontes de contaminação com Cd em solos agrícolas (MULLA et al., 1980). Fertilizantes fosfatados contêm metais pesados da rocha que os originou ou dos ingredientes usados na industrialização do fertilizante. Metais pesados podem persistir no solo, por causa da sua baixa mobilidade, ou serem absorvidos pelas plantas e ingressarem na cadeia alimentar (CAMELO et al., 1990; ABDEL-HALEEM et al., 2001).

A Tabela 9 exibe os limites máximos de metais pesados permitidos para fertilizantes minerais.

Tabela 9 - Limites máximos de metais pesados tóxicos admitidos para os fertilizantes.

Metais Pesados	Valor máximo admitido (mg/kg) na massa total do fertilizante
Arsênio (As)	10
Cadmio (Cd)	20
Chumbo (Pb)	100
Cromo (Cr)	200
Mercúrio (Hg)	0,2

Fonte: Do autor (2022) com base em dados de Brasil (2006).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto, os fertilizantes são produtos que fornecem nutrientes quando incorporados ao solo e auxiliam no adequado crescimento e desenvolvimento das plantas, podendo ser de origem orgânica ou mineral.

Dentre seus tipos, destacam-se os fertilizantes minerais por apresentarem concentrações conhecidas e elevadas de nutrientes, possuem menores custos de armazenamento, transporte e aplicação. Além disso, esse tipo de fertilizantes apresenta rápida liberação e rápida absorção de seus nutrientes, o que os tornam bastante atraentes e vantajosos do ponto de vista econômico, pois faz com que o seu uso seja elevado quando se tem o propósito de aumentar a produtividade à curto prazo.

Os fertilizantes minerais fornecem os mais diversos nutrientes, porém são compostos majoritariamente pelos três nutrientes principais, os macronutrientes primários nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). A combinação de diferentes fertilizantes minerais simples para a obtenção de mais de um desses nutrientes, é reconhecida pela expressão de fórmula NPK.

O crescimento da população criou uma demanda crescente na produção de alimentos, pressionando a elevação da produção agrícola no mundo. Devido aos recursos agrícolas serem limitados e as áreas disponíveis para o plantio estarem cada vez mais escassas, a melhor opção, para a elevação da produtividade é o uso desse tipo de fertilizante. O que torna o conhecimento desse assunto, muito importante.

No mercado mundial, o consumo de fertilizantes cresceu 12% na última década. A China é a maior consumidora, seguida de Índia, Estados Unidos e Brasil. No quesito produção e exportação, os principais países exportadores de nutrientes são Rússia, Canadá e Estados Unidos

O Brasil é responsável por cerca de 8,5% do consumo global de fertilizantes. Porém mais de 85% dos fertilizantes utilizados no país, são importados. Esse elevado nível de importação, deixa a economia brasileira vulnerável às oscilações do mercado internacional de fertilizantes.

Dentre as mais diversas culturas produzidas no país, soja, milho, cana-de-açúcar, algodão e café respondem cerca de 84% do consumo de fertilizantes no país.

Como tentativa de diminuir essa alta necessidade nas importações, desenvolveu-se o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF) que tem como objetivo reduzir de 85% para cerca de 50% a dependência externa de fertilizantes minerais básicos.

A produção do setor de fertilizantes depende da disponibilidade de matérias-primas básicas produzidas a custos economicamente viáveis. Cada um dos fertilizantes básicos possui uma forma diferente de obtenção a partir das matérias-primas básicas e intermediárias, cada uma com seus devidos procedimentos.

Os fertilizantes nitrogenados básicos são produzidos a partir da amônia anidra (NH_3), que é a matéria-prima básica de todos os nitrogenados sintéticos. A síntese da amônia, é realizada pelo processo Haber- Bosch, tendo como fonte de hidrogênio, o gás natural, como a mais utilizada.

Os fertilizantes fosfatados básicos, são obtidos inicialmente pela extração mineral da rocha fosfática e enxofre, que são as matérias-primas básicas para a produção da maior parte dos fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil e no mundo.

Os fertilizantes potássicos básicos, assim como os fosfatados, também se originam a partir da extração mineral. As rochas potássicas, para se tornarem fertilizantes, precisam ser beneficiados até a obtenção de produtos de mais alta concentração e solúveis em água.

Após obtenção dos fertilizantes básicos, é papel das misturadoras a devida granulação e mistura dos fertilizantes básicos dando origem aos produtos finais da indústria de fertilizantes. Atendendo sempre às especificações exigidas e também às exigências de controle de qualidade, que abrange os aspectos físicos e químicos desses materiais. Sempre buscando a melhor qualidade.

Portanto, pode-se concluir que os fertilizantes possuem uma grande importância nos dias de hoje, de tal forma, que seu uso se tornou indispensável em meio as produções agrícolas, em virtude dos grandes benefícios que eles oferecem para as mais variadas culturas, auxiliando não só no crescimento das plantas, fornecendo os nutrientes adequados, suprimindo as deficiências do solo e mantendo a sua fertilidade, como também sendo primordiais no aumento da sua capacidade produtiva, viabilizando a ampliação da produtividade por hectare de solo.

Por essa razão, não é incomum dizer que os fertilizantes são responsáveis por grande parte dos alimentos produzidos no mundo. Por isso, um estudo mais aprofundado sobre o assunto é de extrema importância para se conhecer tanto sobre seus mais variados tipos, características e vantagens, como também sobre sua enorme relevância e influência em meio aos mercados econômicos do mundo todo, influenciando diretamente no mercado de importações e exportações dos principais potenciais econômicas.

Quanto a perspectivas para o futuro, espera-se um contínuo aumento do consumo de fertilizantes NPK por todo o mundo, por conta do crescente aumento de demanda de produção

agrícola, causado pelo constante crescimento populacional, simultaneamente com a limitação de áreas disponíveis para o plantio que tendem a ficar cada vez mais escassas.

No Brasil, por outro lado, mesmo com a tendência de aumento do consumo, espera-se uma redução nas importações de fertilizantes minerais básicos, visto que o Plano Nacional de Fertilizantes estará em vigência nas próximas décadas.

REFERÊNCIAS

ABDEL-HALEEM, A.S.; SCROON, A.; EL-BAHI, S.M.; ZOHNY, E. *Heavy metals and rare earth elements in phosphate fertilizer components using instrumental neutron activation analysis*. *Applied Radiation and Isotopes*, v.55, p.569-573, 2001.

Abonadora remolcada Thema VG-NS. **AGRIEXPO**, 2022. Disponível em: < <https://www.agriexpo.online/es/prod/sfoggia-agriculture-division-srl/product-170225-3228.html> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; dos SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. *In*: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 645-736.

AFTALION, F. **A history of the international chemical industry**. 2 Ed. Philadelphia, PA: Chemical Heritage Press, 2001, ISBN: 978-0-94-190129-1.

ALCARDE, J. C. **Metodologia de análise de fertilizantes e corretivos**. Piracicaba, SP: Esalq/Fealq, 1979.

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Caracterização de fertilizantes simples contendo zinco. **Sci.Agric.**, v. 50, n. 1, p. 121-126, 1993. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0103-90161993000100017> >. Acesso em: 13 ago. 2022.

ALCARDE, J.C.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. *In*: CURI, N. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 291-334.

ALLOWAY, B. J; AYRES, D. C. **Chemical Principles of Environmental Pollution**. 2^ª ed. United Kindon: Blackie Academic e Professional, 1997.

ALVES, E.; CONTINI, E.; HAINZELIN, E. Transformações da agricultura brasileira e pesquisa agropecuária. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 22, n. 1, p. 37-51, 2005. Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/AI-SEDE/36784/1/v22n1p37.pdf> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

Amostragem de fertilizantes. **HERINGER**, 2022. Disponível em: < http://www.heringer.com.br/heringer/web/conteudo_pti.asp?conta=45&tipo=29615&idioma=0 >. Acesso em: 12 ago. 2022.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Pesquisa Setorial**. Brasil: ANDA, 2022.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Setor de fertilizantes**: anuário estatístico 2020. São Paulo: ANDA, 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Associação nacional para difusão de adubos e corretivos agrícolas**. São Paulo: ANDA, 1988.

APROSOJA. Análise de fertilizantes. 2022. Disponível em: <
<http://www.aprosoja.com.br/storage/site/files/ANALISE-DE-FERTILIZANTES.PDF> >.
 Acesso em: 12 ago. 2022.

BARROS, G. S. C. et al. **Boletim mercado de trabalho do agronegócio brasileiro**. Piracicaba: Cepea, 2021. 4º trimestre 2020.

BATAGLIA, O.C. Micronutrientes no solo: ferro. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.159-172.

BORKERT, C.M. Micronutrientes no solo: manganês. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.173-190.

BORKERT, C.M.; PAVAN, M.A.; BATAGLIA, O.C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. *In*: FERREIRA, M.E. et al. (Eds.) **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001a. p.151-185.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Secretaria de Defesa Agropecuária: Instrução Normativa nº 46**, de 22 de novembro de 2016. Brasília: MAPA, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Análises de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília: Laboratório Nacional de Referência Vegetal (LANARV)/ Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 1983. 104p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes destinados à agricultura: legislação e fiscalização**. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, Divisão de Corretivos e Fertilizantes, 1982. 88p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa, Nº. 27, de 05 de junho de 2006**. Brasília: MAPA, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 25, de 23 de julho de 2009**. Brasília: MAPA, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa, Nº. 39, de 08 de agosto de 2018**. Brasília: MAPA, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Defesa agropecuária: portaria MA - 46**, de 10/02/1998. Governo do Estado de São Paulo: MAPA, 1998.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022**. Brasília: MAPA, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Secretaria de Defesa Agropecuária: lei nº 6.894**, de 16 de dezembro de 1980. Brasília: MAPA, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Secretaria de Defesa Agropecuária**: decreto nº 8.059, de 26 de julho de 2013. Brasília: MAPA, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio**: Brasil 2019/20 a 2029/30 - projeções de longo prazo. Brasília, DF: MAPA, 2020.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF 2050). Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégico (SAE), 2021.

Semeadura: quais os cuidados necessários. **BRASMAX**, 2018. Disponível em: < <https://www.brasmaxgenetica.com.br/blog/semeadura-os-cuidados-necessarios/> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

BURRIEL-MARTI, F.; RAMIREZ MUÑOZ, J. *Flame photometry*. 2 ed. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1960. 531 pp.

CALIGARIS, B. et al. A importância do Plano Nacional de Fertilizantes para o futuro do agronegócio e do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, n. 1, 2022. Disponível em: < <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1142514/1/A-importancia-do-PNF.pdf> >. Acesso em: 20 ago. 2022.

CAMELO, L.G.L.; MIGUEZ, S.R.; MARBÁN, L. *Heavy metals input with phosphate fertilizers used in Argentina*. **The Science of the Total Environment**, v.204, p.245-250, 1990. Disponível em: < >. Acesso em: 14 de ago. 2022.

CARVALHO, L. B. Estudo de localização de fábricas misturadoras de adubo na região Centro-Oeste brasileira utilizando um modelo de programação linear. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharias de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CARVALHO, P. P. **Mapeamento das unidades misturadoras de fertilizantes no estado no estado de Minas Gerais**. 2010. 14 p. Trabalho apresentado para o Grupo ESALQ-LOG do Departamento de Economia, Administração e Sociologia, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CASTRO, C. R. T. et al. Efeitos do Sombreamento na Composição Mineral de Gramíneas Forrageiras Tropicais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 6, p. 1959-1968, 2001. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1516-35982001000800001> >. Acesso em: 25 jul. 2022.

CATANI, R. A. **A determinação do potássio pelos métodos do cobaltihexanitrato e de fotometria de chama, sua aplicação e estudo do potássio nos solos do Estado de São Paulo**. Tese de Concurso para provimento efetivo da 10.ª Cadeira Química Analítica. Piracicaba, São Paulo, 1994.

CATANI, R. A.; GALLO, J. R.; GARGANTINI, H. **Amostragem de solo, métodos de análise, interpretação e indicações gerais para fins de fertilidade**. Campinas, São Paulo: Instituto Agrônomo de Campinas, 1955, 28 pp.

CATANI, R. A.; PEREZ, J. T. **Determinação do potássio pelo método do tetrafenilborato**. 1965.

CERCLA: priority list of hazardous substances. **ATSDR**, 2002. Disponível em: < <https://www.atsdr.cdc.gov/> >. Acesso em: 18 jul. 2022.

COELHO, A. M. **Agricultura de Precisão**: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Agricultura, Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendações de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.

COMO FAZER a escolha certa de fertilizantes. **Revista Cultivar**, 2020. Disponível em: < <https://revistacultivar.com.br/noticias/como-fazer-a-escolha-correta-de-fertilizantes> >. Acesso em: 21 ago. 2022.

CONHEÇA as vantagens da técnica de fertirrigação e saiba como fazer. **GLOBO RURAL**, 2020. Disponível em: < <https://globorural.globo.com/Publicidade/Yara-Brasil/noticia/2020/12/conheca-vantagens-da-tecnica-de-fertirrigacao-e-saiba-como-fazer.html> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

COSTA, L. M.; SILVA, M. F. O. A indústria química e o setor de fertilizantes. *In*: **BNDES 60 anos**: perspectivas setoriais. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012. p. 12-60.

CUNHA, J. F. da. et al. **Balanco de nutrientes na agricultura brasileira**: 2009 a 2012. Informações Agronômicas (BRASIL) Número 145, 2014.

DANTAS, J.P. Micronutrientes no solo: boro. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.113-130.

DIAS, V. P., FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES**, 2006. Disponível em: < <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital> >. Acesso em: 16 ago. 2022.

DESTILADOR de nitrogênio tipo Kjeldhal. **TECNAL**, 2022. Disponível em: < https://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/8997_destilador_de_nitrogenio >. Acesso em: 12 ago. 2022.

DIFERENCIAL tecnológico exclusivo para adubação a lanco reduz em até 15% custos com fertilizantes. **Show Rural**, 2020. Disponível em: < <https://showrural.com.br/inovacao/diferencial-tecnologico-exclusivo-para-adubacao-a-lanco-reduz-em-ate-15-custos-com-fertilizantes/> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

DURÔMETRO digital para grãos. **CIANOTEC**, 2022. Disponível em: < <https://cianotec.com.br/product/durometro-digital-para-graos/> >. Acesso em 12 ago. 2022.

EMBRAPA. **Nota técnica sobre o Plano Nacional de Fertilizantes**: pontos críticos: maio de 2020. Brasília, DF: EMBRAPA, 2020.

ERISMAN, J. W. et al. *How a century of ammonia synthesis changed the world*. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 636- 639, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1038/ngeo325> >. Acesso em: 01 ago. 2022.

Evolução do consume aparente de N, P e K e total de NPK no Brasil. **NPCT**, 2022. Disponível em: < <https://www.npct.com.br/> >. Acesso em: 14 ago. 2022.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Especialização (Solos e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Micronutrientes no solo: cobre. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.131-157.

FERTILIZANTES. **Reino Vegetal**, 2022. Disponível em: < <https://www.reinovegetal.com.br/fertilizantes/npk-04-14-08-1-kg> >. Acesso em: 21 ago. 2022.

Fertilizantes foliares: o que são, cuidados e quando aplicar. **EQUIPA CENTER**, 2022. Disponível em: < <https://blog.equipacenter.com.br/fertilizantes-foliares/> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

FERTIPAR. 2022. Disponível em: < www.fertipar.com.br > Acesso em: 19 ago. 2022.

FINCK, A. *World fertilizer use manual*. Paris: IFA, 1992.

FORD, O. W. Report on potassium in fertilizers. **Journal of the Association of Official Agricultural Chemists**, v. 41, p. 533-538, 1958.

FOTÔMETRO de chamas B-462. **AGROADS**, 2022. Disponível em: < https://www.agroads.com.br/fotometro-de-chamas-b-462_72653.html >. Acesso em: 12 ago. 2022.

GALDINO. C. P. **Comparação de métodos analíticos de fósforo e potássio em fertilizantes**. Monografia (Graduação) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2003.

GHIRALDELLI, G.; FREUA, S. Importação de fertilizantes pelo Brasil aumenta 440% de 1998 a 2021. **CNN**, 2022. Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/business/importacao-de-fertilizantes-pelo-brasil-aumenta-440-de-1998-a-2021/> >. Acesso em: 15 ago. 2022.

HERINGER. 2016. Disponível em: < http://www.heringer.com.br/heringer/index_pt.htm >. Acesso em: 16 ago. 2022.

HORWITZ, W. **Official Agricultural Chemists**. 9 ed. Washington: Association of Official Agricultural Chemists, 1960. 832pp.
Importação de fertilizantes NPK por país no ano de 2021. **AVICULTURA**, 2021. Disponível em: < <https://www.aviculturaindustrial.com.br/imprensa/governo-federal-lanca-plano-nacional-de-fertilizantes-para-reduzir-importacao/20220314-081340-r356> >. Acesso em: 18 ago. 2022.

INACIO, S. R. F. **Produção e comercialização de insumos para produção de fertilizantes: um panorama mundial e os paradigmas do Brasil.** Trabalho para o Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial – ESALQ-LOG da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

JACTO. **Como aplicar fertilizante:** aprenda a garantir a uniformidade. 2018. Disponível em: < <https://blog.jacto.com.br/como-aplicar-fertilizante-aprenda-a-garantir-a-uniformidade/>> Acesso em: 29 jul. 2022.

IFA. INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **Public summary:** short-term fertilizer outlook 2020-2021. Paris: IFA, 2020.

JONES, A. **Access to chemistry.** Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry, 1999. ISBN: 0-85404-564-3.

KORNDÖRFER, G. H. **Apostila do Instituto de Ciências Agrárias.** Disciplina: Adubos e Adubação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

KULAIF Y. **A nova configuração da indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil.** Rio de Janeiro: CTEM/CNPq, 1999.

KYÖSTI, A.; KARIKALLIO, H. Consumption Pattern and Competition in the World Fertilizer Markets. *In:* XIX SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL FOOD AND AGRIBUSINESS MANAGEMENT ASSOCIATION, 19., 20 e 21 de junho de 2009, Budapeste, Hungria. **Anais [...]** Budapeste, 2009.

LLOYD, L. **Handbook of industrial catalysts.** New York: Springer, 2011.

LOPES, A. S. Micronutrientes: filosofias de aplicação, fontes, eficiência agrônômica e preparo de fertilizantes. *In:* FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.). **Simpósio sobre micronutrientes na agricultura.** Jaboticabal, Piracicaba: POTAFOS/ CNPq, 1988. p. 357-390.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas:** aspectos agrônômicos. 3 ed. São Paulo: ANDA, 2000.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas.** São Paulo, Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola:** adubos e adubação. 3 ed. São Paulo-SP: Agrônômica Ceres, 1981. 596p.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas:** princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MANAHAN, S. E. **Fundamentals of environmental chemistry.** 2 ed. New York: Lewis Publishers, 2001.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. Biomassa, solo e fertilidade. *In: MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea.*** São Paulo: EDUNESP, 2010. p. 77-87.

MCBRIDE, M.B.; SPIERS, G. *Trace elements content of selected fertilizers and dairy manures as determined by ICP-MS. **Communications in Soil Science and Plant Analysis***, v. 32, p. 139- 156, 2001. Disponível em: < <https://doi.org/10.1081/CSS-100102999> >. Acesso em: 15 ago. 2022.

MERCADO de Trabalho do Agronegócio. **CEPEA**, 2022. Disponível em: < <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> >. Acesso em: 18 ago. 2022.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos.** Brasília: MAPA, 2017. 240 p.

MORTVEDT, J. J.; COX, F. R. *Production, marketing and use of calcium, magnesium and micronutrient fertilizers. In: ENGELSTAD, O. P. (ed.) **Fertilizer technology and use.*** 3 ed. Madison: Soil Science Society of America, 1985. p.455- 481.

MORTVEDT, J. J. *Cadmium levels in soils and plants from some long-term soil fertility experiments in United States of America. **Journal of Environmental Quality***, v. 16, p. 137-142, 1987. Disponível em: < <https://doi.org/10.2134/jeq1987.00472425001600020008x> >. Acesso em: 14 ago. 2022.

MULLA, D. J.; PAGE, A. L.; GANGE, T. J. *Cadmium accumulations and bioavailability in soils from long-term phosphorus fertilization. **Journal of Environmental Quality***, v. 9, p. 408-412, 1980. Disponível em: < <https://doi.org/10.2134/jeq1980.00472425000900030016x> >. Acesso em: 14 ago. 2022.

NASCIMENTO, L. Balança comercial do agronegócio soma US\$ 100,81 bilhões em 2020: China foi o principal destino dos produtos exportados pelo Brasil. **Agência Brasil**, 2021. Disponível em: < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-01/balanca-comercial-do-agronegocio-somaus-10081-bilhoes-em-2020> >. Acesso em: 27 ago. 2022.

NRIAGU, J. O.; PACYNA, J. M. *Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils with trace metals. **Nature***, v. 333, p. 134-139, 1988. Disponível em: < <https://www.nature.com/articles/333134a0> >. Acesso em: 14 ago. 2022.

OUTLOOK Globalfert 2021. **GLOBALFERT**, 2021a. Disponível em: < <https://globalfert.com.br/ogf-dinamico/parte2/cap08> >. Acesso em: 05 ago. 2022.

PIB do agronegócio cresceu abaixo das projeções. **CNA**, 2022. Disponível em: < <https://cnabrasil.org.br/publicacoes/pib-do-agronegocio-cresceu-abaixo-das-projecoes> >. Acesso em: 31 mar. 2022.

POPULATION division. **United Nations**, 2019. Disponível em: < <https://population.un.org/wpp/> >. Acesso em: 21 ago. de 2022.

PRESSINOTI, Q. H. C.; CARTER, J. M. **Apostila do curso para analistas de fertilizantes**. São Paulo: CEFER, 1987.

PRINCIPAIS empresas produtoras de fertilizantes no mundo. **GLOBALFERT**, 2019. Disponível em: < <https://www.globalfert.com.br/boletins/principais-empresas-produtoras-de-fertilizantes-no-mundo> >. Acesso em: 21 ago. 2022.

Publicações. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2020. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes> >. Acesso em: 20 ago. 2022.

RAIJ, B. van. Geoquímica de micronutrientes. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.99-111.

RAIJ, B. van; BATAGLIA, O.C. Análise química do solo. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p.333-355.

RAO, A.C.S. et al. *Considerations in estimating Nitrogen Recovery Efficiency by the difference and isotopic dilution methods*. **Fertilizer Research**, v. 33, p. 209–217, 1992. Disponível em: < <https://www.semanticscholar.org/paper/Considerations-in-estimating-Nitrogen-Recovery-by-Rao-Smith/af2d0125ff9db649f634ebfa73ad01954f3c12e8> >. Acesso em: 18 ago. 2022.

RIBEIRO, D. Processo de Haber-Bosch. **Revista de Ciência Elementar**, 1(01):0029. 2013. Disponível em: < <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2013/031/> >. Acesso em: 15 ago. 2022.

REETZ, H. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, 2017.

REIS, R. A. J.; SILVA, D. R. G. **Avaliação das características físicas e físico-químicas de fertilizantes nitrogenados e fosfatados revestidos por polímeros**. 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i6.29542>>. Acesso em: 26 ago. 2022.

NRI, R. A.; SILVA, D. R. G. Avaliação das características físicas e físico-químicas de fertilizantes nitrogenados e fosfatados revestidos por polímeros. **Magistra**, v. 24, p. 145-150. 2012.

RODELLA, A. A.; ALCARDE, J. C.; DIAS, A. P. **Requisitos de qualidade física e química de fertilizantes minerais**. Piracicaba: IPEF, 2000.

SANTOS, O.S. Micronutrientes no solo: molibdênio. *In*: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.191-217.

SCHALL, E. D.; HAGELBERG, R. R. *Application of flame photometry to the determination of potash in fertilizers*. **Journal of the Association of Official Agricultural Chemists**, v. 35, n. 3, p. 757-764, 1952.

- SOUZA, E.C.A.; FERREIRA, M.E. Micronutrientes no solo: zinco. *In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Eds.) Micronutrientes na agricultura*. Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1991. p.219-242.
- STWERTKA, A. *A guide to the elements*. 2 Ed. New York: Oxford University Press, 2002.
- SVEN. **Wikimedia**, 2013 Disponível em: <
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Haber-Bosch.svg> >. Acesso em: 24 jul. 2022.
- TAGLIALEGNA, G. H. F.; PAES LEME, M. F.; SOUZA, E. L. L. **Concentration of the brasilian fertilizer industry and companies strategies**. Sidney: IAMA Congress, 2001.
- TEIXEIRA, W. G. et al. Produção de matéria seca, teor e acúmulo de nutrientes em plantas de milho submetidos a adubação mineral e organomineral. *In: CONGRESSO*. 2011.
- TILLER, K.G. *Heavy metals in soils and their environmental significance*. *In: Advances in soil science*. New York: SpringerVerlag, 1989. p. 113-114.
- TRANI, P. E.; TRANI, A. L. **Fertilizantes: cálculo de fórmulas comerciais**. Campinas: Instituto Agrônomico (IAC), 2011.
- VALOR. **Análise setorial: Indústria de Fertilizantes**. São Paulo, 2008.
- VOGEL, A. I. **Análise química quantitativa**. 6 Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.
- VOLKWEISS, S. J. Fontes e métodos de aplicação. *In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.). Simpósio sobre micronutrientes na agricultura*. Jaboticabal, Piracicaba: POTAFOS/CNPq, 1988. p. 391-412.
- WIETHÖLTER, S. (Coord. Geral). **Manual de adubação e calagem: para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre, RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo e Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004.
- ZONTA, E.; STEFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. **Embrapa**, 2021. Disponível em: <
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134679/1/cap14-livro-RecomendacaoCalagemAdubacao-AnaLuciaBorges-AINFO.pdf> >. Acesso em: 16 jul. 2022.