

UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CCET – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DQ – DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

MARIANA DE BARROS SOUZA

**DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO E A IMPLEMENTAÇÃO
DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS BIOATIVOS**

2026

São Carlos/SP

MARIANA DE BARROS SOUZA

DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO E A IMPLEMENTAÇÃO
DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS BIOATIVOS

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento
de Química da Universidade
Federal de São Carlos, para
obtenção do título de Bacharel
em Química

Orientador: Prof. Dr. Edenir Rodrigues Pereira Filho

2026

São Carlos/SP



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA (DQ)**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 4/2026/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIANA DE BARROS SOUZA

DINÂMICA DO FÓSFORO NO SOLO E A IMPLEMENTAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS BIOATIVOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 19 de junho de 2026

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Prof. Dr. Edenir Rodrigues Pereira Filho
Membro da Banca 1	Dr. Carlos Giovani Oliveira Bruziquesi
Membro da Banca 2	Dra. Raquel Cardoso Machado



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 22/06/2026, às 08:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2325099** e o código CRC **04353C54**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 2325099

Lista de Figuras

Figura 1 – Principais fases da história da agricultura.....	08
Figura 2 – Produção dos principais fertilizantes.....	18
Figura 3 – Esquema reacional da adsorção do fosfato no oxihidróxido de Fe.....	21
Figura 4 – Esquema reacional da formação do fósforo não-lábil.....	23
Figura 5 – Benefícios da PGPB para as plantas.....	24

“Por isso não desanimamos. Embora exteriormente estejamos a desgastar-nos, interiormente estamos sendo renovados dia após dia,”

2 Coríntios 4:16

RESUMO

O Brasil é um grande importador de fertilizantes minerais, entretanto, diante os desafios mundiais surge a necessidade do desenvolvimento de um mercado interno. O presente trabalho aborda questões econômicas e ambientais do uso excessivo desses e da industrialização da agricultura. Com isso, o desenvolvimento de fertilizantes modernos com aplicações microbiológicas e orgânicas vem contribuindo para o aumento da eficiência de absorção de nutrientes e questões de sustentabilidade. A dinâmica do fósforo no solo influencia diretamente na disponibilidade desse, sendo assim, são necessárias estratégias que aumentem a disponibilização do nutriente para as plantas. Nesse contexto, os fertilizantes de liberação lenta vêm se tornando uma alternativa promissora, aumentando a absorção ao longo do ciclo de vida da planta e possibilitando a substituição, ainda que parcial, dos fertilizantes tradicionais. Um exemplo desses insumos, é o organomineral bioativo, que agrega nutrição através da combinação orgânica e mineral, além da ativação microbiológica, por fungos e bactérias. Esse é um produto que ainda necessita de aperfeiçoamentos, entretanto, está em crescente visibilidade devido a sua propriedade de reaproveitar resíduos agroindustriais, contribuindo para uma economia circular.

Palavras-chaves: organominerais; fósforo; adsorção no solo; fertilizantes; microrganismos.

Phosphorus dynamics in soil and the implementation of bioactive organomineral fertilizers

ABSTRACT

Brazil is a major importer of mineral fertilizers; however, given the global challenges, there is a growing need to develop a domestic market. This study addresses the economic and environmental issues associated with the excessive use of these fertilizers and the industrialization of agriculture. In this context, the development of modern fertilizers with microbiological and organic applications has contributed to increasing nutrient absorption efficiency and promoting sustainability. The dynamics of phosphorus in the soil directly influence its availability; therefore, strategies that increase nutrient availability to plants are necessary. In this context, slow-release fertilizers have become a promising alternative, enhancing nutrient uptake throughout the crop life cycle and enabling the replacement, even if only partially, of traditional fertilizers. An example of these inputs is the bioactive organomineral fertilizer, which provides nutrition through the combination of organic and mineral components, in addition to microbiological activation by fungi and bacteria. This product still requires further improvements; however, it has gained increasing visibility due to its ability to reuse agro-industrial waste, contributing to a circular economy.

Keywords: organominerals; phosphorus; soil adsorption; fertilizers; microorganisms.

SUMÁRIO

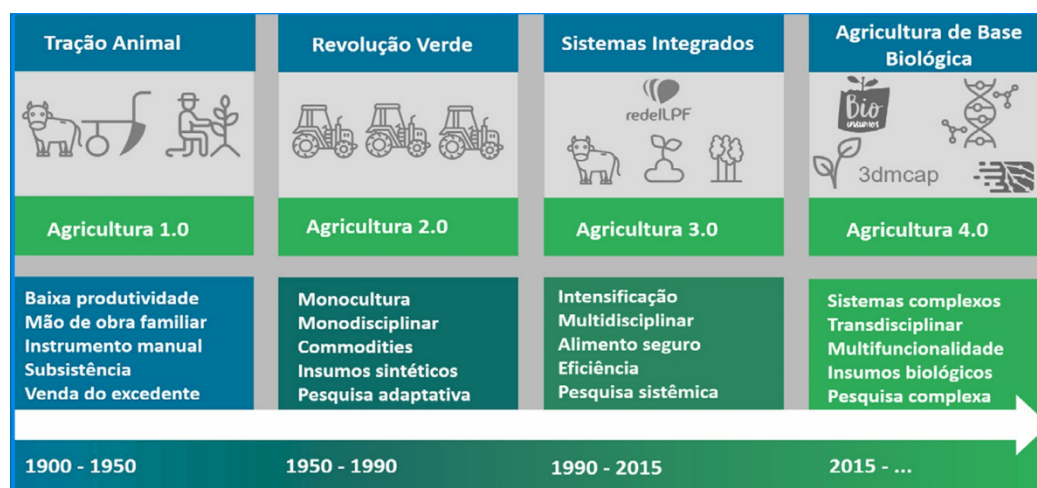
1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1. CONTEXTO HISTÓRICO.....	8
1.2. O PROCESSO HABER-BOSCH E A REVOLUÇÃO VERDE.....	10
1.3. O USO E DESENVOLVIMENTO DE FERTILIZANTES.....	11
2. OBJETIVOS.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. MACRO E MICRONUTRIENTES.....	17
3.2. O FÓSFORO NO SOLO E NA PLANTA.....	19
3.3. MICROBIOLOGIA ALIADA À QUÍMICA NA AGRICULTURA.....	23
3.4. FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS BIOATIVOS.....	26
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
5. REFERÊNCIAS.....	32

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO HISTÓRICO

De acordo com o *Department of Economic and Social Affairs Population* da Organização das Nações Unidas, estima-se que a população mundial deve atingir cerca de 9,6 bilhões de pessoas em 2050. (BRASIL, 2022). Com isso, há também uma demanda maior por alimentos para suprir as necessidades dessa população, sendo cada vez mais importante o desenvolvimento de técnicas agrícolas mais eficientes. Ao longo da história da agricultura, é possível observar diversas transformações que marcaram esse setor, o qual podem ser divididas em quatro fases principais, como mostra a Figura 1. (MASSRUHÁ, 2020).

Figura 1 – Principais fases da história da agricultura.



Fonte: Adaptado MASSRUHÁ et al. (2020, p. 28)

Após se estabelecerem em um território, o homem passou de um ser nômade para sedentário, fixando-se em um local e buscando uma nova forma de alimentação além da caça. Essas mudanças deram início a uma era de desenvolvimento da agricultura. No início do século XX, havia a agricultura 1.0 que era baseada na mão de obra familiar, uso de animais de tração e uma produção que

se destinava ao consumo próprio, sendo o excedente comercializado para a população externa. (MASSRUHÁ, 2020).

Com a Revolução Industrial, a população migrou para os centros urbanos, o que aumentou a demanda na produção de alimentos nos campos. A diminuição do número de trabalhadores levou à necessidade de evolução dos métodos agrícolas. Assim, por volta de 1960 houve uma modernização da agricultura por meio do uso de maquinários, agrotóxicos, fertilizantes químicos, inseticidas e fungicidas. Essas novas implementações foram chamadas de Revolução Verde, um marco da Agricultura 2.0, que resultou em um período de crescimento na produtividade e na monocultura. (ARRUDA, 2022). Esse movimento espalhou práticas agrícolas ocidentais ao redor do mundo, o que fez surgir um mercado global bilionário de fertilizantes. (BRASIL, 2022).

A Agricultura 3.0 foi marcada pela implementação de ferramentas de precisão com o uso de máquinas e até animais com sensores embutidos e o emprego de imagens de satélites, viabilizando a criação de uma base de dados com informações sobre o solo, clima, características de plantas, colheitas ou aplicação de insumos. Com o desenvolvimento da pesquisa em ciências biológicas, os conhecimentos obtidos passaram a ser aplicados na tecnologia agrícola, empregando a genética, o uso da biomassa e da biotecnologia. (MASSRUHÁ, 2020).

A implementação da agricultura digital auxiliou na tomada de decisões, tornando a produção mais eficiente. Essa nova maneira de gestão, que se beneficiou da biotecnologia, levou à Agricultura 4.0. Entretanto, desde o início dos anos 2020 já se discute sobre uma nova fase, a Agricultura 5.0, com o uso da inteligência artificial e robôs agrícolas autônomos utilizados a favor desse mercado. (MASSRUHÁ, 2020).

Por volta de 1840, o químico alemão Justus von Liebig descobriu que nitrogênio, fósforo e potássio são elementos fundamentais para o crescimento das plantas e que podem ser aplicados ao solo a fim de regenerar sua fertilidade.

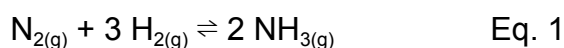
(ALLOSSO, s. d.). O surgimento dos fertilizantes minerais permitiu a industrialização da agricultura, que teve início na Europa e América do Norte e, em seguida, pelos demais países. (BRASIL, 2022). A indústria agrícola se adaptou rapidamente conforme a demanda populacional e faz uso de quase 70% da água doce mundial. No entanto, com a diminuição dos níveis das reservas disponíveis somada à falta de chuva em regiões secas, há uma necessidade crescente por uma gestão adequada dos recursos e um modo de produção mais sustentável. (AHMED, 2025).

Além do elevado consumo de água, outro problema hídrico causado pela industrialização da agricultura é a contaminação de lençóis freáticos e rios devido ao excesso do uso de fertilizantes químicos e minerais. Esses disponibilizam quantidades de nutrientes que não são totalmente absorvidos pela planta, o que contribui para a degradação ambiental. Sendo assim, é de extrema importância o desenvolvimento de novas tecnologias que aumentem a eficiência de absorção dos nutrientes, intensificando a produção das culturas, e minimização do impacto ambiental. (AHMED, 2025).

1.2. O PROCESSO HABER-BOSCH E A REVOLUÇÃO VERDE

Ao longo do século XX, a população sofreu um intenso crescimento passando de 1,6 bilhões de pessoas em 1900 para 6 bilhões nos anos 2000. Nesse período, foi desenvolvido um importante processo químico que impediu uma crise de fome mundial, mas também, colaborou com a morte de milhões, o processo Haber-Bosch. (DENT, 2017; RIBEIRO, 2013).

O método consiste na formação de amônia (NH_3) através da reação de nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2), em contato com um catalisador à base de ferro (Fe), à altas temperaturas e pressão (Equação 1). No entanto, essa síntese consome cerca de 2% da energia produzida, além de apresentar uma alta pegada de carbono devido à obtenção de H_2 por meio da reforma a vapor do gás metano ou da gaseificação do carvão. (ZHANG, 2019).



A técnica de extrair nitrogênio da atmosfera por alta pressão foi desenvolvida pelo químico alemão Fritz Haber. Mais tarde, o engenheiro Carl Bosch, da empresa química BASF, levou esse processo à escala industrial, produzindo 20 toneladas de amônia para a Alemanha durante a Primeira Guerra Mundial, que pode ser convertida em compostos de explosivos como TNT e nitroglicerina. (ALLOSSO, s. d.; RIBEIRO, 2013).

Por outro lado, até hoje o processo Haber-Bosch é utilizado para produzir a amônia que é direcionada para a síntese de fertilizantes nitrogenados. Com isso, o avanço permitiu um aumento de 7 a 8 vezes na produção de alimentos. (ZHANG, 2019). Se isso não tivesse acontecido, de acordo com o historiador Václav Smil, os campos agrícolas deveriam ocupar 50% das terras dos continentes livres ao invés de 15%, ou então, metade da população mundial provavelmente morreria de fome. O crescimento de produção obtido por tal progresso, contribuiu de forma global para o movimento da Revolução Verde. (ALLOSSO, s. d.).

A Revolução Verde trouxe um grande aumento na produção de alimentos através do melhoramento genético, que ocorreram primeiro no trigo e no arroz, e aumento do uso de fertilizantes e herbicidas que contribuíram para o aumento da produtividade de cereais culturas básicas, como a batata. Essa revolução auxiliou uma segurança alimentar para grande parte da população, que era necessária devido ao rápido crescimento demográfico. (SANDS, 2011).

Em contraponto, a Revolução Verde gerou diversos impactos mundiais pelo excesso do uso de fertilizantes, que contaminam rios e córregos, além de contribuir para a dependência de países menos desenvolvidos em relação à tecnologia e produtos dos mais industrializados. (ALLOSSO, s. d.).

1.3. O USO E DESENVOLVIMENTO DE FERTILIZANTES

Durante o século XX, o Brasil se destacou como um país agrícola passando de importador para grande exportador de produtos como café e açúcar. (ARRUDA, 2022). Isso se deu com a combinação da disponibilidade de recursos naturais no

país, como áreas agricultáveis e abundância de água, calor e luz, e do desenvolvimento tecnológico advindo da Revolução Verde, que trouxe o uso extenso de insumos externos. A implementação de fertilizantes e corretivos de solo tornou possível a exploração do bioma Cerrado, mas como ponto negativo refletiu em uma dependência da importação de fertilizantes já que a produção nacional não é suficiente para suprir a demanda. (EMBRAPA, 2020).

O Grupo de Trabalho Interministerial foi fundado com a finalidade de desenvolver o Plano Nacional de Fertilizantes (GTI-PNF) que tem como objetivo o aumento da produção de fertilizantes e a redução da dependência tecnológica das importações, visando diminuir impactos geopolíticos. Sendo assim, esse documento é uma referência para as próximas décadas visando o desenvolvimento do setor de fertilizantes e do agronegócio. (BRASIL, 2022).

Segundo o PNF, o Brasil é o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, sendo que mais de 80% do que é utilizado é proveniente de importação, o que indica uma alta dependência do mercado internacional e torna a economia do país vulnerável. Além do mais, o país é o quarto maior produtor e segundo maior exportador de grãos do mundo, de modo que, em 2020 o agronegócio foi responsável por 48% das exportações brasileiras e 17,3 milhões de empregos. (BRASIL, 2022).

O nutriente mais empregado pelo agricultor brasileiro é o potássio (38%), seguido pelo fósforo (33%) e nitrogênio (29%) (o chamado NPK), contudo, grande parte do que é aplicado é perdido, resultando em uma eficiência entre 50 e 70% para o potássio e nitrogênio e apenas de 15 a 50% para o fósforo. Um dos motivos para isso ocorrer se deve à tecnologia desenvolvida para esses fertilizantes não ser apropriada para o solo brasileiro, fazendo-se necessário o desenvolvimento de novos insumos que se adequem a esse sistema para o aproveitamento máximo do produto, diminuindo prejuízos desnecessários. Além do mais, visa-se a

sustentabilidade ambiental, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa e demais malefícios que o produto pode gerar. (BRASIL, 2022).

Na síntese de fertilizantes fosfatados químicos é muito comum o tratamento ácido da rocha fosfática, o que demanda alta energia de produção e gera subprodutos poluentes. O uso intensivo desses fertilizantes pode diminuir a biodiversidade, afetando as interações entre microrganismos, solo e planta, o que causa prejuízos à sustentabilidade agrícola e à produtividade das culturas. Com isso, estão em crescente desenvolvimento formulações de base biológica, sendo importante o estudo de materiais que aumentem essas interações e permitam a vida dos microrganismos inoculados. (FAVARO, 2022).

Como abordado no trabalho de Majaron et al (2023), em muitos casos as quantidades de nutrientes liberadas pelos fertilizantes minerais acabam sendo tóxicas para os microrganismos inoculados. Sendo assim, é necessária uma proteção para preservar a viabilidade microbiana. Pensando nisso, métodos de encapsulamento vêm sendo desenvolvidos como forma de proteção, de modo que haja um controle na liberação de nutrientes, mantendo a eficiência de atividade do inóculo e fornecendo nutrientes para as plantas de maneira gradual. Também podem ser utilizados revestimentos duplos como fonte de energia para os microrganismos. (MAJARON, 2023).

Os fertilizantes de liberação lenta e de liberação controlada vêm sendo amplamente utilizados a fim de reduzir os impactos decorrentes da rápida disponibilização de nutrientes pelos fertilizantes convencionais. Enquanto o primeiro consiste em compostos que apresentam baixa solubilidade, fornecendo nutrição por meio da decomposição microbiana ou química, os de liberação controlada apresentam um revestimento polimérico tornando a liberação de nutrientes gradual. Sendo assim, esses fazem parte dos fertilizantes de liberação lenta. (LAWRENCIA, 2021).

A liberação controlada pode proporcionar diversos benefícios como a redução da perda de nutrientes por lixiviação ou volatilização (como é o caso do N), diminuir a taxa de aplicação de fertilizantes, resultando em uma vantagem econômica, e colabora para a segurança agrônômica, de modo que os nutrientes sejam disponibilizados em níveis não tóxicos. Porém, ainda são necessárias a padronização de métodos que determinem a taxa de liberação de nutrientes e o desenvolvimento de materiais de revestimento mais ecológicos, para que não favoreça a poluição. (LAWRENCIA, 2021).

O uso exacerbado dos fertilizantes convencionais leva a danos ambientais e ao desperdício econômico, devido à baixa eficiência na biodisponibilidade de nutrientes para as plantas. Com isso, surgiu a necessidade do desenvolvimento de alternativas como os fertilizantes orgânicos, biofertilizantes e nanofertilizantes a fim de substituir mesmo que parte do mercado dos fertilizantes tradicionais. (AHMED, 2025). Além disso, as técnicas de encapsulamento e inoculação microbiológica maximizam o potencial desses insumos.

O surgimento da nanotecnologia beneficiou diversas áreas, especialmente para o setor agrícola com a introdução de nanofertilizantes. Por se tratar de partículas inferiores a 100 nm, a relação área-volume é alta, o que favorece a diminuição da quantidade de aplicação, sendo mais econômico e fácil de transportar em grande escala. Demais vantagens são a absorção mais eficiente de nutrientes pelas plantas, diminuição do risco de poluição ambiental pela lixiviação, melhor taxa de difusão no solo, liberação lenta e controlada e o aumento da fertilidade que contribui para um ambiente microbiologicamente viável. (AHMED, 2025).

Outro método proveniente da nanotecnologia para a agricultura foi o nanoencapsulamento de biofertilizantes, que resultou na formação dos bionanofertilizantes. Eles têm a capacidade de melhorar o crescimento da planta favorecendo o desenvolvimento radicular e da área foliar. A combinação com microrganismos trouxe, não apenas uma nutrição mais eficiente, mas também

proteção da planta contra patógenos devido à inoculação. As redes micorrízicas, que auxiliam no transporte de nutrientes entre as raízes e o solo, podem ser integradas pelos bionanofertilizantes intensificando a absorção. (AHMED, 2025).

Mais uma inovação que vem ganhando espaço no mercado agroindustrial são os fertilizantes organominerais. Esses combinam matérias-primas minerais e orgânicas, como é o caso dos resíduos de outros processos industriais, o que é uma das principais vantagens da sua utilização. Essas matrizes vêm sendo cada vez mais utilizadas devido aos benefícios químicos, físicos e biológicos para o solo, contribuindo para o aumento e qualidade da produção agrícola. A fim de maximizar a liberação e absorção de nutrientes e aumentar a produção, também pode ser feita a combinação de microrganismos com esses fertilizantes. (FERRARO, 2024). Esse método integra nutrição e proteção para as plantas, contribuindo para a bioeconomia e economia circular. (GUIMARÃES, 2026).

Sendo o mercado agrícola um setor de grande influência socioeconômica, é importante a continuidade da pesquisa em fertilizantes especiais, técnicas e produtos que possam aprimorar e aumentar a produção, sem que haja mais prejuízos ambientais e sociais. Com os benefícios trazidos pelos fertilizantes e a necessidade de importação do produto, esse é um ramo que pode ser amplamente explorado por universidades, empresas e centros de pesquisa.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um panorama da evolução da agricultura no Brasil, destacando o processo de implementação e os tipos de fertilizantes e sua relevância no desenvolvimento do setor. No decorrer do texto foi realizada uma revisão bibliográfica sobre um dos macronutrientes essenciais ao crescimento vegetal, o P e sua disponibilidade no solo e como essa disponibilização pode ser melhorada. Além de apresentar a interação entre a microbiologia e a química na melhoria da eficiência dos fertilizantes, enfatizando o papel dos fertilizantes organominerais bioativos como alternativa sustentável e promissora para a agricultura contemporânea.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

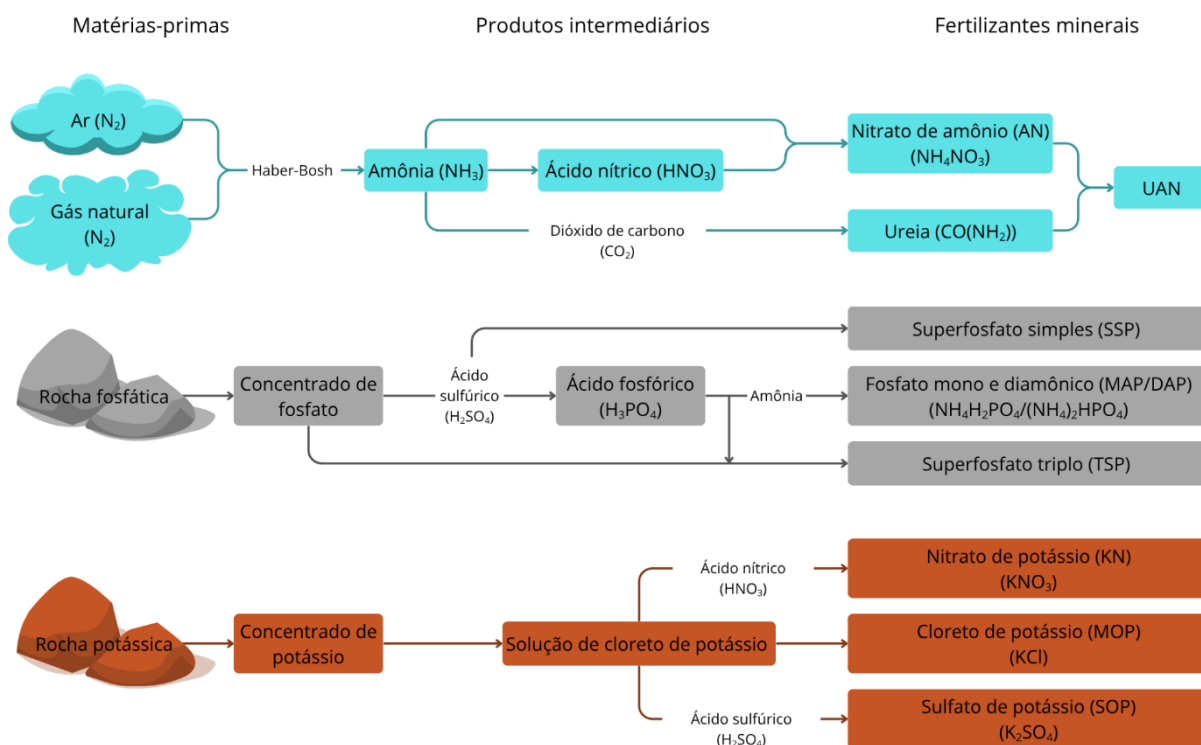
3.1. MACRO E MICRONUTRIENTES

O fertilizante é definido por um “produto de natureza mineral, natural ou sintética, fornecedor de um ou mais nutrientes vegetais, essenciais ou benéficos, que pode conter fração orgânica incorporada”. (BRASIL, 2004). Para que haja um crescimento saudável das plantas é necessário que o solo apresente porcentagens suficientes de nutrientes para o desenvolvimento. Esses nutrientes podem ser divididos em macronutrientes, aqueles que são necessários em maior concentração, e micronutrientes, que, apesar de serem importantes nutricionalmente, não são necessários em grandes quantidades (da ordem de mg/kg e µg/kg).

Os macronutrientes são subdivididos em duas categorias, primários: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), mais limitantes no desenvolvimento da planta, e secundários: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S). Os micronutrientes são: boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), molibdênio (Mo), zinco (Zn), cobalto (Co), silício (Si), entre outros que sejam benéficos para a planta. (BRASIL, 2004).

De acordo com o *International Fertilizer Association* (IFA), o NPK são os principais nutrientes presentes nos fertilizantes industrializados, sendo China, Estados Unidos e Rússia os maiores produtores desses insumos. Os nitrogenados são obtidos principalmente pelo processo Haber-Bosh, sendo a ureia o mais produzido e consumido mundialmente. Os fosfatados são sintetizados a partir do tratamento ácido da rocha fosfática, que por sua vez é obtida pela mineração. E os potássicos são derivados do cloreto de potássio, que é processado e granulado para facilitar a absorção. É possível ver um esquema desses processos na Figura 2. (*International Fertilizer Association*).

Figura 2 – Produção dos principais fertilizantes.



Fonte: Adaptado de *International Fertilizer Association*.

O N pode ser absorvido pelas plantas na forma de NH_4^+ ou NO_3^- , sendo esta última geralmente a forma predominante em solos bem aerados. É um constituinte das vitaminas, participa dos sistemas energéticos e da estrutura dos aminoácidos, além de ser necessário para a síntese de clorofila, estando diretamente relacionado à fotossíntese. A absorção na forma de NH_4^+ traz maiores rendimentos, pois a forma NO_3^- precisa ser reduzida para ser assimilada pela planta, o que demanda energia da mesma. (DACHEN, 2007).

O P pode ser encontrado no solo de forma orgânica (Po), como fosfolipídios, ácidos nucleicos e fosfatos de inositol, sendo necessário a mineralização para a absorção pelas plantas, e na forma inorgânica (Pi) presentes na solução do solo em equilíbrio com o P adsorvido pelos colóides. Esse nutriente tem função em importantes processos vitais para a planta, constituindo moléculas de trifosfato de adenosina (ATP), proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos e substratos metabólicos,

além de estimular o rápido desenvolvimento e crescimento das raízes. (DACHEN, 2007).

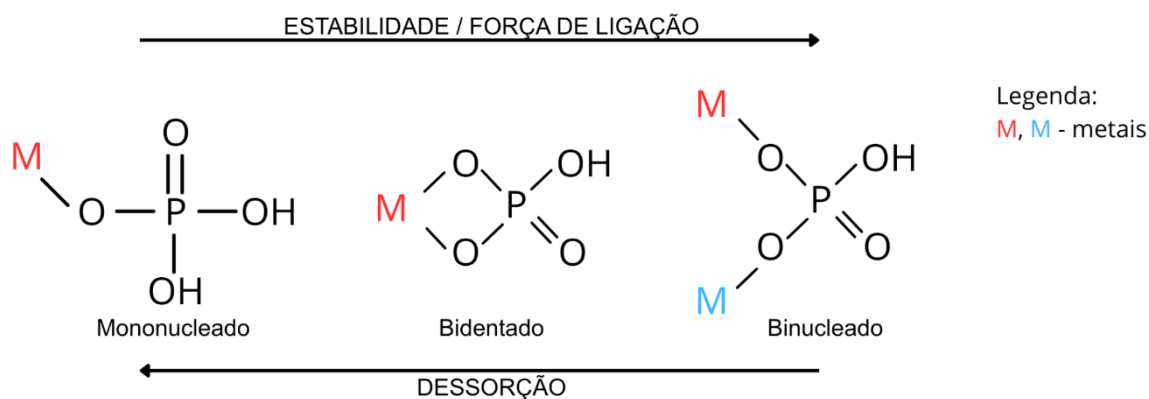
Assim como o NP, o K apresenta baixas concentrações nos solos tropicais intemperizados, estando presente em minerais primários, como feldspatos potássicos e micas, e minerais secundários, como argilas, em quantidades muito menores. Apresenta-se no solo nas formas trocável, não-trocável e solúvel em água, sendo o não-trocável uma reserva no solo e a forma iônica K^+ absorvida pelas plantas. O nutriente apresenta diversas funções vitais, tendo papel na fotossíntese, ativação de enzimas metabólicas e contribuindo para o potencial osmótico. (DACHEN, 2007).

3.2. O FÓSFORO NO SOLO E NA PLANTA

O P é um macronutriente primário que possui um importante papel biológico na planta, atuando na fotossíntese, respiração celular, armazenamento e transferência de energia, divisão celular e crescimento das células vegetais, sendo assim um dos mais limitantes para o desenvolvimento vegetacional. (OLIVEIRA-PAIVA, 2022). O P pode ser encontrado nas formas orgânicas e inorgânicas no solo, como em rochas, minerais, compostos metálicos ou animais, no entanto, muitas vezes de maneira indisponível para as plantas. (COSTA, 2024).

O fosfato pode agir como ligante monodentado (um oxigênio do fosfato ligado ao metal), bidentado (dois oxigênios do fosfato ligados ao metal) ou binucleado (dois oxigênios do fosfato ligados a dois metais), sendo a energia de ligação e estabilidade crescente, tornando mais difícil a dessorção do fosfato (Esquema 1). Com o passar do tempo, pode ocorrer a especificidade da ligação, resultando em compostos binucleados ou a retenção do fosfato na estrutura cristalina do mineral, estando, conseqüentemente, mais indisponível às plantas. (SANTOS, 2008).

Esquema 1



Fonte: Autoria própria.

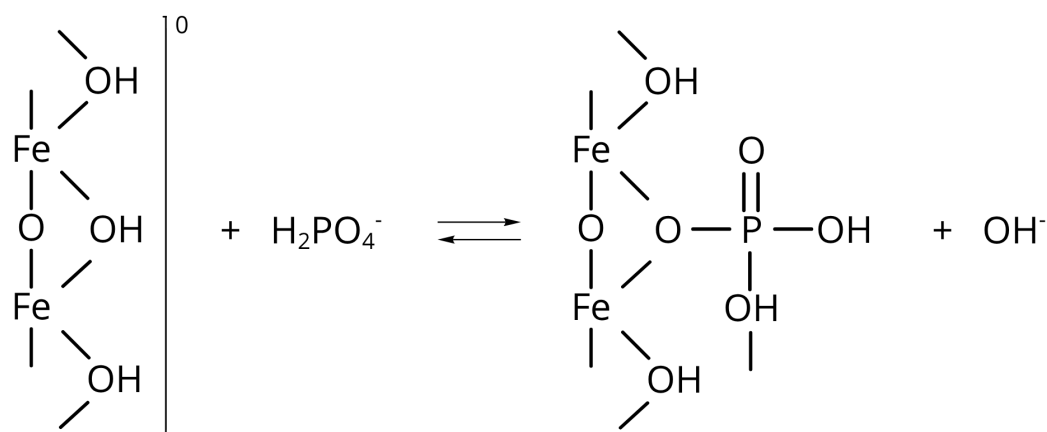
O fósforo absorvido pelas plantas é proveniente de derivados do ácido ortofosfórico (H_3PO_4) tendo o ânion monovalente (H_2PO_4^-) maior eficiência de absorção, seguido pelo ânion bivalente (HPO_4^{2-}). O pH exerce grande influência na proporção das espécies, com o aumento do pH há um crescimento na forma bivalente, sendo que em pH muito alcalino o maior teor de P é na forma PO_4^{3-} , que não é absorvido pelas plantas. (SANTOS, 2008; DECHEN, 2007).

O solo tropical brasileiro, majoritariamente da classe Latossolo, apresenta um alto intemperismo. Devido a essa característica, se torna mais suscetível à lixiviação resultando em um empobrecimento de nutrientes e aumento de acidez. Para minimizar a falta de nutrientes, é necessária a aplicação de fertilizantes, no entanto, seu uso em excesso pode levar ao acúmulo de nutrientes, tendo como consequência outros problemas como a contaminação de lençóis freáticos e a eutrofização de águas. (SANTOS, 2008; COSTA, 2024).

Devido ao solo argiloso, há um aumento do caráter dreno-solo, com isso, o baixo teor de P disponível deve-se também à fixação do nutriente nos coloides do solo. De início, pode ocorrer a quimissorção do fosfato pelos oxihidróxidos de Al e Fe, havendo uma troca de ligantes OH^- e OH_2^+ da superfície dos óxidos pelo P da

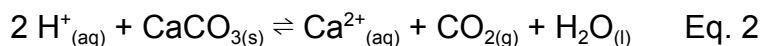
solução, como está representado na Figura 3, sendo uma ligação predominantemente covalente. Esse processo também pode ser chamado adsorção específica, e ocorre rapidamente devido à atração eletrostática inicial. (NOVAIS, 2007).

Figura 3 – Esquema reacional da adsorção do fosfato no oxihidróxido de Fe.



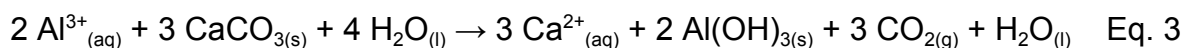
Fonte: Adaptado de NOVAIS et al. (2007, p. 487)

A presença de cátions no solo, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ ou Al^{3+} , apesar de serem importantes nutrientes para os vegetais, em teores tóxicos para as plantas podem indicar uma acidez excessiva do solo. Essa acidez causa baixa fertilidade e interfere negativamente na atividade dos microrganismos, sendo necessário realizar uma correção. Para isso, é realizada a calagem utilizando o calcário (CaCO_3 , MgCO_3), que consiste na troca catiônica entre o sal e o H^+ presente no solo, representada pela Equação 2. (SOUSA, 2007).

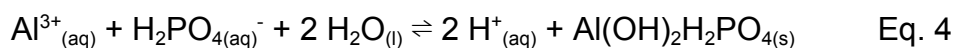


Em concentrações tóxicas, o Al pode causar na planta raízes mais grossas e diminuição das ramificações, resultando em prejuízos na absorção de água e nutrientes, dessa forma, os calcários podem reagir estabilizando o Al^{3+} em excesso (Equação 3). Quando realizada de forma adequada, a calagem pode neutralizar a acidez e o Al, disponibilizando Ca e Mg, e também aumentar a capacidade de troca

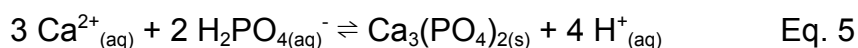
catiônica, o que diminui a lixiviação de bases, permitindo um maior crescimento da vegetação. (SOUSA, 2007).



Outra forma de fixação do fósforo no solo ocorre por precipitação que consiste na reação entre o íon fosfato com os íons de Fe^{+2} e Al^{3+} em solos mais ácidos e com Ca^{2+} em meio mais neutro, resultando em compostos pouco solúveis. Diferente da adsorção (bidimensional) a precipitação é um processo tridimensional, formando cristais em todas as direções e não se restringindo apenas na superfície. A reação entre os íons forma compostos sólidos que precipitam o P da solução do solo e liberam íons H^+ diminuindo o pH (Equação 4). (NOVAIS et al., 2007).



A calagem poder neutralizar os sítios de adsorção dos metais, evitando a reação do P entre Fe^{2+} ou Al^{3+} , no entanto, quando realizada de maneira incorreta pode haver uma supercalagem e o aumento do pH resulta em uma combinação do P com o Ca^{2+} (Equação 5), causando precipitação de fosfato de cálcio, esse processo foi chamado “retrogradação” por Malavolta em 1967. (NOVAIS et al., 2007).

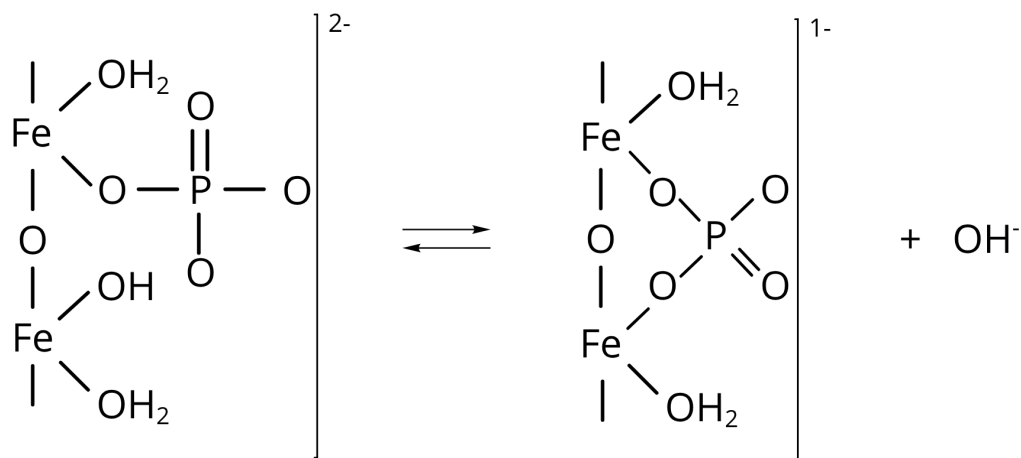


O aumento do pH torna a superfície dos coloides do solo negativamente carregados, isso faz com que haja uma repulsão dos íons do fosfato o que diminui a adsorção da espécie, tornando-os mais livres para a nutrição das plantas. Esse fator também interfere na solubilidade dos compostos fosfatados, de maneira que a solubilidade dos fosfatos de Fe e Al é maior em pH mais básico e a solubilidade de fosfatos de Ca são maiores em pH mais ácidos. (NOVAIS et al., 2007).

Os fertilizantes fosfatados que geralmente são comercializados, como fosfato monoamônico (MAP) ou superfosfatos, apresentam uma alta solubilidade. Essa alta liberação inicial de P no solo pode ser prejudicial a longo prazo, pois aproximadamente 90% do nutriente é adsorvido na primeira hora, gerando um

acúmulo no solo e elevando a possibilidade do nutriente ser lixiviado. A adsorção inicial é benéfica para a planta, pois retém o fosfato, no entanto, há um limite de absorção para a planta e com o envelhecimento da ligação fosfato-metal ocorre a transformação do fósforo lábil, mais disponível para as plantas, para não-lábil, menos disponível, de maneira que a ligação mononucleada passa a ser binucleada, como foi bem representada na Figura 4 por Novais et al (2007), o que torna mais difícil a dessorção.

Figura 4 – Esquema reacional da formação do fósforo não-lábil.



Fonte: Adaptado de NOVAIS et al. (2007, p. 498)

Com isso, uma alternativa atraente é o uso de fertilizantes de liberação lenta, onde a disponibilização de fosfato é controlada, sem haver acúmulo ou consumo desnecessário de produto, otimizando a fosfatação. Fertilizantes especiais, como os organominerais bioativos, têm sido primordiais para melhora de solubilização e absorção do nutriente.

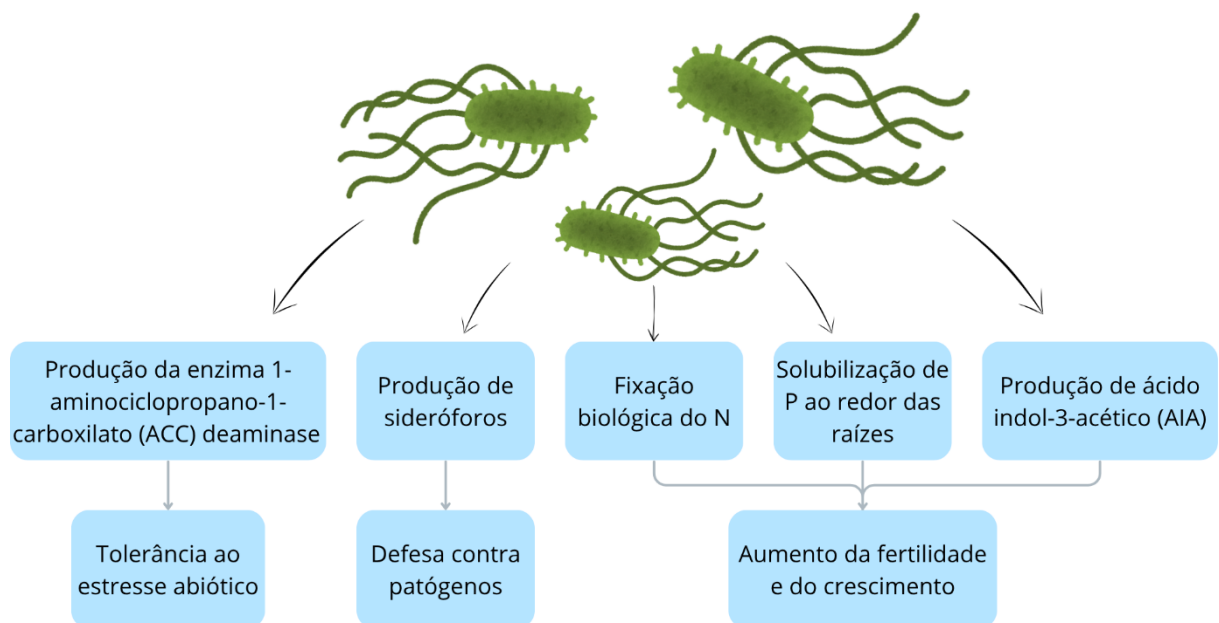
3.3. MICROBIOLOGIA ALIADA À QUÍMICA NA AGRICULTURA

Quando se trata da saúde do solo, os microrganismos desempenham um importante papel na nutrição do meio e, conseqüentemente, no desenvolvimento das plantas. A microbiota do solo pode agir na decomposição da matéria orgânica morta,

ciclagem dos nutrientes disponíveis, processos bioquímicos, fixação de nitrogênio, liberação de fósforo, entre outros processos que fornecem e drenam nutrientes para o desenvolvimento das plantas. (ANDREOLA; FERNANDES, 2007).

A rizosfera trata-se da região do solo que ocorre os processos mediados pelos microrganismos, essa interação pode ser neutra, benéfica ou prejudicial às plantas. A maioria das interações não causam interferências ao crescimento das plantas, sendo benéfica quando colaboram para esse desenvolvimento, atuando na solubilização de nutrientes, produção de reguladores biológicos, eliminação de patógenos e retirada de fitotóxicos. (FERRARO, 2024). As bactérias promotoras de crescimento de plantas, *plant growth-promoting bacteria* (PGPB), podem ser encontradas nessa região, sendo na superfície das raízes ou associadas a elas, e agem estimulando o crescimento das plantas (Figura 5). (SOUZA, 2015).

Figura 5 – Benefícios da PGPB para as plantas.



Fonte: Adaptado de SOUZA et al. (2015, p. 402)

Apesar das vantagens, o uso intenso de fertilizantes pode causar prejuízos ambientais, com isso, a inoculação de microrganismos vem contribuindo para minimizar o volume de aplicação e torná-los mais eficientes, visto que auxiliam na liberação e solubilização de nutrientes. (SOUZA, 2015). Uma das vantagens da inoculação é a maximização da absorção e liberação de P e K. (OLIVEIRA-PAIVA, 2022). Além da capacidade de estimular a atividade da microbiota, contribuindo para a saúde do solo, melhorando a aeração e aumentando a quantidade de matéria orgânica. (AHMED, 2025).

Uma alternativa promissora para o aumento da disponibilidade de P é a inoculação de microrganismos solubilizadores de fósforo (PSMs), que produzem ácidos orgânicos, como glicônico, cítrico e oxálico, liberação de enzimas fosfatases e fitases, e a secreção de prótons e sideróforos, que possibilitam a solubilização de compostos fosfáticos. Exemplos desses PSMs são bactérias do gênero *Bacillus* e fungos como *Aspergillus niger* e *Trichoderma harzianum*. (GUIMARÃES, 2026).

Em virtude de sua ação acidulante, o *Aspergillus niger* é altamente utilizado para a solubilização de rochas fosfáticas, podendo também reduzir as perdas de N pela volatilização da NH_3 , devido ao controle da acidez. (FAVARO, 2022; MAJARON, 2023). Os ácidos orgânicos produzidos pelo fungo competem com o fosfato pelos sítios de adsorção, uma vez que apresentam alta afinidade química por argilas, além de possuírem a capacidade de formar complexos com Fe^{2+} e Al^{3+} , o que aumenta a disponibilidade do nutriente no solo. (NASCIMENTO, 2021).

Quando incorporado nas formulações, o *Trichoderma harzianum* atua como bioestimulante e agente de controle biológico, podendo ser utilizado para inibir o crescimento de outros fungos, como o *Fusarium oxysporum*, causador da murcha de Fusarium em tomateiros, conforme observado por Favaro et al. (2022). Também é possível realizar a associação de microrganismos, combinando as ações de nutrição e proteção, entretanto, são necessários estudos que demonstrem a ausência de

competição entre as espécies e interferência em sua atividade metabólica. (FAVARO, 2022).

Outro ponto discutido no trabalho de Favaro et al. (2022), é em relação a formação de um grânulo para que seja feita a inoculação do microrganismo. Quando comparada a ação do *Aspergillus niger* sobre a rocha fosfática em pó e em grânulo, foi possível observar que a solubilização do P foi mais efetiva no sistema granular. Isso ocorre pois a interação entre o mineral e o microrganismo é aumentada no grânulo, enquanto em pó, as partículas da rocha estão mais dispersas, diminuindo a área superficial da ação dos ácidos orgânicos produzidos pelo fungo. Além disso, o grânulo age como uma proteção ao microrganismo, contribuindo para o aumento da sua viabilidade, que é uma condição relevante ao ser comercializado. (FAVARO, 2022).

Para que as bioformulações apresentem eficiência adequada, é necessário que o microrganismo seja inoculado em um material capaz de protegê-lo e manter sua viabilidade durante o armazenamento e aplicação do insumo. Esse material pode ser uma matriz orgânica ou inorgânica, sólida ou líquida, complementada por uma fonte nutritiva ao microrganismo. Exemplos de matrizes sólidas são a turfa, biochar e bagaço de cana, enquanto o amido ou o ácido húmico podem ser utilizados como suporte nutricional. Nos organominerais, a presença de resíduos orgânicos podem fornecer essa nutrição, devido a presença de Carbono orgânico. Além disso, também pode ser realizado o encapsulamento, a fim de proteger o inóculo e proporcionar maior estabilidade durante o transporte e armazenamento. (BALLA, 2022).

No entanto, essas formulações apresentam desafios relacionados à estabilidade, à viabilidade celular e ao armazenamento prolongado, sendo de grande importância a combinação de matérias quimicamente estáveis, atóxicas e facilmente disponíveis, de modo que mantenham uma umidade adequada. Além disso, é

preciso desenvolver meios adequados em relação aos custos de produção e manutenção da viabilidade microbiana em condições de campo. (BALLA, 2022).

3.4. FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS BIOATIVOS

Os fertilizantes têm grande auxílio nas plantações, no entanto, é preciso haver cautela na aplicação desse insumo, uma superdosagem pode acarretar danos como acúmulo de nutrientes e malefícios à microbiota do solo. Com isso vem sendo desenvolvidos fertilizantes de liberação lenta que consiste na liberação gradual de nutrientes selecionados. Um exemplo, são os fertilizantes organominerais bioativos.

Esses fertilizantes combinam nutrientes minerais, matéria orgânica e microrganismos promotores de crescimento, proporcionando nutrição, melhoria na estrutura do solo e aumento na atividade biológica. A utilização de resíduos orgânicos na produção desses insumos colabora não apenas para uma questão ambiental, mas também para a economia circular, promovendo um reaproveitamento e agregação de valor a materiais que seriam descartados. (GUIMARÃES, 2026).

Para que um fertilizante se enquadre como organomineral, é necessário que ele apresente quantidades suficientes dos componentes na formulação. De acordo com as normas descritas pelo MAPA, o teor mínimo de carbono orgânico deve ser de 8% em produto sólido e 3% para produto líquido, máximo de 20% de umidade para sólidos e no mínimo 5% de NPK, em que cada macronutriente seja, pelo menos, 1% da composição. (BRASIL, 2020).

Resíduos orgânicos promissores para a produção dos organominerais são esterco animal, subprodutos de processamento de alimentos e farinha animal. Contudo, é preciso a análise física, química e biológica e, caso necessário, o tratamento desses resíduos, pois podem apresentar riscos sanitários e restrições operacionais. Além disso, a diversidade nutritiva pode ser baixa e limitada, com isso, a combinação de fontes minerais amplia a variedade de nutrientes e a incorporação de microrganismos traz valor biológico. (GUIMARÃES, 2026).

A presença de matéria orgânica na formulação age na biodisponibilidade nutritiva de modo contínuo e regular. Os ânions orgânicos competem com o P pelos sítios de adsorção, assim como os ácidos produzidos pelos microrganismos, minimizando sua fixação no solo e contribuindo para a absorção pelas plantas. (FERRARO, 2024). Para serem usados como fonte de sustento, a matéria orgânica deve sofrer o processo de mineralização, que consiste na transformação bioquímica realizada por microrganismos, liberando N, P, K, Ca e Mg que podem atuar como nutrientes minerais. (MENEGALE, 2012).

Outra ação dos compostos orgânicos presentes no organomineral é devido a elevada área superficial, estrutura porosa e grupos funcionais capazes de adsorver nutrientes, reduzindo sua liberação imediata no solo e contribuindo para uma liberação lenta. Como consequência, há uma maior eficiência no aproveitamento dos nutrientes e redução das perdas por lixiviação, como ocorre com o P e N. (UDDIN, 2025).

Os compostos orgânicos do solo podem estar presentes na forma de ácidos húmicos e fúlvicos, ácidos orgânicos de baixa massa molecular, aminas ou compostos aromáticos, compondo a fração de C orgânico da solução do solo. A presença dos ácidos orgânicos é proveniente não apenas da metabolização microbiana, mas também da decomposição da matéria orgânica do solo e de resíduos de plantas. Esses compostos participam da complexação com metais como Fe e Al, redução da toxidez por Al, fonte de sustento para a microbiota, adsorção de íons e aumentam a mobilidade de nutrientes no solo. (PAVINATO, 2008).

O sistema de semeadura direta, que consiste em depositar sementes ou partes de plantas sem realizar arações ou gradagem, mantém os resíduos na superfície e ao se decomporem, liberam compostos orgânicos mais lentamente por estarem em menor contato com o solo e microrganismos. Consequentemente, esses compostos contribuem para a fertilidade do solo de maneira gradual através da disponibilização de nutrientes, como o P, complexação metálica e estímulo da vida

microbiana. Sendo assim, é possível considerar estratégias de disponibilização do fósforo presente na forma adsorvida no solo, em vez da adição do nutriente por meio da fertilização tradicional. (PAVINATO, 2008).

O trabalho de Guimarães et al. (2026) compara fertilizantes mineral e organomineral, com e sem a inoculação de *Trichoderma harzianum*. Em relação ao crescimento da planta, o efeito foi superior ao utilizar o fertilizante mineral, o que se deve à sua alta solubilidade, diferente do organomineral que tem como característica a liberação gradual de nutrientes. Quanto aos resultados com a incorporação do fungo, o desempenho para o organomineral foi mais evidente, enquanto, para o mineral, não houve contribuição significativa, possivelmente devido à grande disponibilidade inicial de nutrientes.

A liberação lenta é uma vantagem a médio e longo prazo do ponto de vista agrônomo, pois proporciona nutrientes de maneira gradativa. Porém, essa propriedade limita a resposta imediata quando comparada às fontes minerais, não sendo adequada para plantas de ciclo curto e que demandam maior nutrição inicial. Para contornar esse obstáculo, é necessária a aplicação de doses maiores do insumo ou o desenvolvimento de um fator de correção para ajustar a disponibilidade de nutrientes por esses fertilizantes e fornecer sustento adequado ao longo do ciclo. (GUIMARÃES, 2026).

De acordo com o Pauli (2023), o mercado de fertilizantes especiais está em constante crescimento, dentre eles os organominerais obteve um aumento de aproximadamente 20% nos últimos anos, tendo capacidade de reduzir a importação. Tais pesquisas foram impulsionadas pelos desafios mundiais vividos, como guerras e pandemia.

Apesar das diversas vantagens e crescente visibilidade, o mercado de fertilizantes organominerais bioativos ainda é pequeno comparado aos fertilizantes minerais e biofertilizantes. Entre os principais desafios está a variabilidade de matéria orgânica, a falta de informações sobre suas propriedades físico-químicas,

custos de produção e manejo de matérias primas e a necessidade de padronização de produtos. Além disso, o surgimento de novas técnicas devem atender aos critérios de qualidade e segurança, como limites para metais pesados, patógenos e características nutricionais, conforme exigido pelas regulamentações. Sendo assim, apesar de atrativo, esse é um mercado que ainda necessita ser amplamente estudado. (BOUHIA, 2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de ter uma economia baseada na agricultura e ser um grande exportador de grãos, o Brasil ainda é altamente dependente da importação de fertilizantes. Isso representa uma vulnerabilidade ao país frente ao cenário mundial dos últimos anos, tornando a importação mais cara, desafiadora e gerando uma necessidade de um mercado nacional.

Nesse contexto, o desenvolvimento de estratégias para suprir a dependência externa e a escassez nutritiva do solo tem sido cada vez mais relevante. Tecnologias como nanofertilizantes, organominerais, encapsulamento e ativação microbiológica vêm se mostrando eficientes, pois aumentam a eficiência de absorção e resultam em um menor impacto ambiental.

Além disso, o uso em excesso de fertilizantes minerais pode resultar em um acúmulo de nutrientes no solo, sendo prejudicial não apenas para o meio, mas também para rios e águas subterrâneas. Dessa maneira, os fertilizantes de liberação lenta vêm se destacando, uma vez que são capazes de aumentar a eficiência de absorção de forma mais sustentável e substituindo, ainda que parcialmente, a importação e uso dos fertilizantes tradicionais.

Nessa linha, esses insumos têm colaborado para um maior aproveitamento do P no solo. Embora apresente um importante papel vital para as plantas, a disponibilidade desse nutriente é baixa devido a adsorção nos complexos do solo. A incorporação de matéria orgânica ou inoculação de microrganismos produtores de ácidos orgânicos em formulações fertilizantes, diminuem essa adsorção tornando o P mais disponível, sem a necessidade da adição de maiores concentrações do nutriente.

A inoculação de bactérias e fungos vêm trazendo benefícios para os fertilizantes modernos. Além da função de impulsionar a nutrição, através do aumento da solubilidade das fontes minerais, a adição microbiológica também pode contribuir para a proteção de patógenos que afetam a saúde de diversas plantações

e estimular a microbiota do solo. No entanto, é necessário o estudo de matrizes que mantenham a viabilidade e eficiência de atividade do microrganismo.

Em suma, os fertilizantes organominerais bioativos vêm ganhando visibilidade no mercado, visto que combinam resíduos orgânicos, fontes minerais e microrganismos, contribuindo para um avanço agronômico e uma economia circular. No entanto, ainda é necessário maiores estudos sobre o uso e disponibilidade de resíduos orgânicos voltados para essa indústria. E, devido a resposta mais lenta, ainda vem sendo aprimoradas técnicas de aplicação desse produto, porém já podem ser vistos resultados satisfatórios.

5. REFERÊNCIAS

ALLOSSO, D. **Green Revolution**. In: ALLOSSO, D. *American Environmental History*. Minnesota: Minnesota Libraries Publishing Project, [s.d.]. Disponível em: American Environmental History – Green Revolution

ANDREOLA, F.; FERNANDES, S. A. P. A microbiota do solo na agricultura orgânica e no manejo das culturas. **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2007. p. 21–37.

ARRUDA, E. L.; ANTUNES, L.F.S.; SILVA, C. G; VAZ, A. F. S. **O contexto histórico da agricultura no Brasil e o despertar dos movimentos agroecológicos visando sistemas agrícolas mais sustentáveis**. Research, Society and Development, v. 11, n.13, 2022.

AHMED, A. R.; MOHAMED, H. I. **Nanofertilizers: smart solutions for sustainable agriculture and the global water crisis**. Springer, Germany, 2025.

BALLA, A.; SILINI, A.; CHERIF-SILINI, H.; CHENARI BOUKET, A.; ALENEZI, F.N.; BELBAHRI, L. **Recent Advances in Encapsulation Techniques of Plant Growth-Promoting Microorganisms and Their Prospects in the Sustainable Agriculture**. Appl. Sci. 2022, 12, 9020.

BRASIL. Decreto nº 4.954, de 14 de Janeiro de 2004. Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. (Redação dada pelo Decreto nº 8.384, de 2014). Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução Normativa SDA nº 61, de 8 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e organominerais destinados à agricultura. Brasília, DF: MAPA, 2020. Disponível em: in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf

BRASIL. Presidência da República. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2022–2050**. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos-estrategicos/documentos/planos/plano-nacional-fertilizantes>>

BOUHIA, Y., HAFIDI, M., OUHDOUCH, Y. et al. **Conversão de resíduos em fertilizantes organominerais: tendências tecnológicas atuais e perspectivas**. Rev Environ Sci Biotechnol 21 , 425–446, 2022.

COSTA, K. S. Q.; OLIVEIRA, C.F.; MELO, M. P.; VAZ, C. F.; MELO, N. C.; MORAES, F. K. C. **Fósforo no sistema solo-planta: uma revisão.** Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 22, n. 6, p. 1-24, 2024.

DACHEN, A. R., NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. Ed. 1. **Fertilidade do Solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2007. cap. 3, p. 91-128.

DENT, D., Cocking, E. **Establishing symbiotic nitrogen fixation in cereals and other non-legume crops: The Greener Nitrogen Revolution.** *Agric & Food Secur* 6, 7 (2017).

EMBRAPA. **Trajetória da agricultura brasileira.** 2020. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/en/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>>

FAVARO, C. P.; KLAIC, R.; BETTIOL, W.; RIBEIRO, C.; FARINAS, C. S. **Bio-based composite granules with simultaneous biocontrol and phosphorus fertilization roles: Outcomes from a lab-scale *in vitro* assessment.** *Biotechnology Progress.* São Carlos, SP. v. 38. 2022.

FERRARO, A.C. **FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS E BACTÉRIAS PROMOTORAS DE CRESCIMENTO DE PLANTAS NA CULTURA DO CAFÉ - Produção de mudas e implantação da lavoura.** Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. 2024.

GUIMARÃES, G. G. F., BELTRAME, A. B., VISCONTI, A., GIROTO, A. S., BORGES, R., FARINAS, C. S., RIBEIRO, C. **Dual Function Organomineral Formulations: Fertilization and Carrier for *Trichoderma harzianum* in Banana Plants.** *ACS Agric. Sci. Technol.* 2026, 6, 404-411.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **Como são produzidos os fertilizantes.** Disponível em: <<https://www.fertilizer.org/about-fertilizers/nitrogen-phosphorus-potassium/>>

LAWRENCIA, D.; WONG, S.K.; LOW, D.Y.S.; GOH, B.H.; GOH, J.K.; RUKTANONCHAI, U.R.; Soottitantawat, A.; LEE, L.H.; TANG, S.Y. **Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release.** *Plants*, 2021, 10, 238.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; JUNIOR, A. L.; EVANGELISTA, S. R. M. **A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente.** 2020. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1126214/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap1.pdf>>

MAJARON, V. F.; SILVA, M. G. da; PFEIFER, M.; BORTOLETTO-SANTOS, R.; VELLOSO, C. C. V.; KLAIC, R.; POLITO, W.L.; RIBEIRO, S. J. L.; BERNARDI, A. C. C.; FARINAS, C. S.; RIBEIRO, C. **Interaction of *Aspergillus niger* in**

double-coated urea granules reduces greenhouse gas emissions from N fertilization. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, v. 23, p. 3751–3760, 2023.

MENEGALE, V. L. C.; LEÃO, A. L.; FILHO, H. G.; MENEGALE, M. L. C. **RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA ENRIQUECIMENTO DE FERTILIZANTE ORGÂNICO.** Energ. Agric., Botucatu, vol. 27, n.2, 2012, p.113-12G.

NASCIMENTO, J. M.; NETTO, J. A. F. V.; VALADARES, R. V.; MENDES, G. O.; SILVA, I. R.; VERGÜTZ, L.; COSTA, M. D. **Aspergillus niger as a key to unlock fixed phosphorus in highly weathered soils.** Soil Biology and Biochemistry, v. 156, 2021. 108190.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. Ed. 1. **Fertilidade do Solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2007. cap. 8, p. 276-374.

OLIVEIRA-PAIVA, C. A.; ALVES, V. M. C.; GOMES, E. A.; SOUSA, S. M. de; LANA, U. G. de P.; MARRIEL, I. E. Microrganismos solubilizadores de fósforo e potássio na cultura da soja. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. de F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (ed.) **Bioinsumos na cultura da soja.** Brasília, DF: Embrapa, 2022. cap. 9. p. 163–179.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. **Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 911–920, 2008.

PAULI, G. **Fertilizantes Organominerais para aplicação via solo.** In: ABISOLO – Associação Brasileira das Indústrias de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal. Campinas: 2023.

RIBEIRO, D. **Processo de Haber-Bosch.** Revista de Ciência Elementar, v. 1, num. 1, 2013.

SANDS, D. C.; MORRIS, C. E.; DRATZ, E. A.; PILGERAM, A. **Elevating optimal human nutrition to a central goal of plant breeding and production of plant-based foods.** Plant Sci. 2009 Nov;177(5):377-89. doi: 10.1016/j.plantsci.2009.07.011. PMID: 20467463; PMCID: PMC2866137.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. **Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto.** Ciência Rural, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

SOUSA, D. M. G., MIRANDA, L.N., OLIVEIRA, S. A. Acidez no solo. In: NOVAIS, R. F. et al. Ed. 1. **Fertilidade do Solo.** Viçosa, MG: SBCS, 2007. cap. 5, p. 205-268.

SOUZA, R. ; AMBROSINI, A.; PASSAGLIA, L. M. P. **Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils.** Genetics and Molecular Biology, 38, 4, 401-419, 2015.

UDDIN, Md. K.; SAHA, B. K.; WONG, V. N. L.; PATTI, A. F. **Organo-mineral fertilizer to sustain soil health and crop yield for reducing environmental impact: a comprehensive review**. European Journal of Agronomy, v. 162, 2025, 127433.

Zhang, S.; Zhao, Y.; Shi, R.; Waterhouse, G. I.N.; Zhang, T. **Photocatalytic ammonia synthesis: Recent progress and future**, EnergyChem, Volume 1, Issue 2, 2019, 100013, ISSN 2589-7780.