

**AGRICULTURA DE
PRECISÃO APLICADA AO
MANEJO DA ADUBAÇÃO
FOSFATADA:
VARIABILIDADE ESPACIAL
DO FÓSFORO E
ESTRATÉGIAS PARA
AUMENTO DA EFICIÊNCIA
DE USO DO NUTRIENTE**

**PRECISION AGRICULTURE APPLIED TO PHOSPHATE FERTILIZATION
MANAGEMENT: SPATIAL VARIABILITY OF PHOSPHORUS AND STRATEGIES
TO INCREASE NUTRIENT USE EFFICIENCY**

Ciências Agrárias • 09/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/791518995](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/791518995)

Jose Furtado da Silva Neto¹

Natasha Taline dos Santos Trombela²

Francisco Rafael Santos da Conceição³

Matheus Vinicius Abadia Ventura⁴

Hellen Regina Fernandes Batista Ventura⁵

RESUMO

O fósforo é um dos nutrientes mais limitantes à produção agrícola nos solos tropicais brasileiros, devido à elevada fixação em formas pouco disponíveis às plantas. Este estudo analisa a aplicação da agricultura de precisão ao manejo da adubação fosfatada, com ênfase na variabilidade espacial do fósforo e nas estratégias para aumentar a eficiência de uso do nutriente. A pesquisa é qualitativa, descritiva e baseada em revisão bibliográfica de artigos científicos, dissertações, teses e documentos institucionais, com recorte principal entre 2000 e 2026. Os resultados evidenciam forte dependência espacial dos teores de fósforo dentro dos talhões, com alcances de 102 a 325 m em área de algodoeiro no cerrado goiano, e mostram que a correção localizada de regiões com menores teores proporcionou ganhos de até 500 kg ha⁻¹ de algodão em caroço. A forma de coleta das amostras também alterou expressivamente a recomendação fosfatada, variando de 1,94 a 7,14 t de fosfato monoamônico em uma área de 89,81 ha. A adubação a taxa variável reduziu em 11,4% e 7,6% as quantidades de fósforo aplicadas à soja e ao milho, respectivamente, com aumento de 14% e 21,9% na eficiência de uso. Conclui-se que a agricultura de precisão é uma ferramenta consistente para o manejo fosfatado quando associada à amostragem representativa e à interpretação criteriosa dos mapas de fertilidade.

Palavras-chave: Fósforo; Variabilidade espacial; Taxa variável; Amostragem de solo; Eficiência de uso de nutrientes.

ABSTRACT

Phosphorus is one of the nutrients that most limits agricultural production in Brazilian tropical soils because of its high fixation in forms poorly available to plants. This study analyzes the application of precision agriculture to phosphate fertilization management,

focusing on the spatial variability of phosphorus and strategies to increase nutrient use efficiency. The research is qualitative, descriptive, and based on a literature review of scientific articles, dissertations, theses, and institutional documents, mainly covering 2000 to 2026. The findings show strong spatial dependence of soil phosphorus contents within fields, with ranges from 102 to 325 mg kg⁻¹ in a cotton area in the Goiás savanna, and indicate that localized correction of areas with lower contents provided gains of up to 500 kg ha⁻¹ of seed cotton. Soil sampling procedures also substantially changed phosphate recommendations, ranging from 1.94 to 7.14 t of monoammonium phosphate in an 89.81 ha area. Variable-rate fertilization reduced phosphorus applications to soybean and maize by 11.4% and 7.6%, respectively, while increasing nutrient use efficiency by 14% and 21.9%. Precision agriculture is therefore a consistent tool for phosphate management when associated with representative sampling and careful interpretation of soil fertility maps.

Keywords: Phosphorus; Spatial variability; Variable rate; Soil sampling; Nutrient use efficiency.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das principais fornecedoras mundiais de alimentos, fibras e biocombustíveis, resultado que se apoiou fortemente na correção da acidez e na adubação dos solos tropicais. Grande parte dos solos cultivados no país é constituída por materiais intemperizados, ácidos, com baixa capacidade de troca de cátions, elevado poder de fixação de fósforo e baixos teores naturais de macronutrientes, o que torna o fornecimento de nutrientes uma condição indispensável

para a obtenção de produtividades economicamente viáveis (Bernardi et al., 2015).

Entre os nutrientes exigidos pelas culturas, o fósforo ocupa posição de destaque, tanto por sua participação em processos bioquímicos essenciais, como a fotossíntese, o metabolismo energético e a síntese de ácidos nucleicos, quanto pelo comportamento peculiar que apresenta nos solos tropicais. Nesses ambientes, a acidez elevada e a abundância de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio intensificam a adsorção e a precipitação do nutriente, de modo que apenas uma pequena fração do fertilizante aplicado é efetivamente aproveitada pelas plantas no ciclo em que é fornecido (Lourini, 2025).

Esse cenário assume contornos ainda mais relevantes quando se considera a dependência externa do país. A elevação do consumo de fertilizantes ocorreu em ritmo mais acelerado que a produção nacional, levando o Brasil a importar parcela expressiva do insumo utilizado nas lavouras (Bernardi et al., 2015). No caso específico do fósforo, estima-se que mais de 80% do nutriente empregado na agricultura brasileira seja proveniente do exterior, o que vincula a competitividade do setor produtivo a variáveis cambiais e geopolíticas sobre as quais o produtor rural não exerce controle (Lourini, 2025). Cabe destacar que as culturas da soja e do milho respondem por cerca de metade do consumo de fertilizantes no país (Cunha et al., 2014), de modo que oscilações no preço desses insumos repercutem diretamente sobre os principais sistemas de produção brasileiros.

Some-se a isso o fato de que a adubação, na maioria das propriedades, ainda é conduzida com base em valores médios. Na ausência de informações detalhadas sobre a fertilidade, muitos

produtores realizam a correção do solo sem critérios rigorosos quanto à localização, à dosagem e à época de aplicação dos fertilizantes, utilizando formulações e quantidades fixas para todo o talhão. Essa prática pode, ao longo do tempo, favorecer o desbalanço no fornecimento de nutrientes, uma vez que as adubações passam a ser realizadas de forma subdimensionada em algumas regiões da lavoura e superdimensionada em outras (Montezano; Corazza; Muraoka, 2006; Bernardi et al., 2015; Pereira, 2020).

A agricultura de precisão surge, nesse contexto, como uma postura gerencial que reconhece a existência da variabilidade espacial e temporal da lavoura e busca tratá-la de forma diferenciada, com o objetivo de obter retorno econômico e ambiental. Trata-se de um ciclo que se inicia na coleta de dados georreferenciados, avança para a análise e a interpretação dessas informações, resulta na geração de recomendações, culmina na aplicação em campo e se encerra com a avaliação dos resultados obtidos (Gebbers; Adamchuk, 2010; Bernardi et al., 2015). Mais do que um conjunto de máquinas, trata-se de uma postura gerencial que considera a variabilidade da lavoura para obter retorno econômico e ambiental (Inamasu; Bernardi, 2014). Entre as tecnologias disponíveis, a amostragem de solo em grades georreferenciadas, o mapeamento dos atributos químicos e a aplicação de corretivos e fertilizantes em taxas variáveis figuram entre as mais utilizadas pelos produtores brasileiros.

O fósforo apresenta características que o tornam particularmente interessante para o manejo localizado. Por possuir baixa mobilidade no solo e forte interação com a fração mineral, o nutriente tende a formar padrões espaciais bem definidos dentro do talhão, resultantes tanto de fatores intrínsecos de formação do solo quanto

de fatores extrínsecos, como o histórico de adubações, o modo de aplicação dos fertilizantes e o sistema de preparo adotado. Essa mesma baixa mobilidade faz com que erros de diagnóstico se propaguem por vários ciclos produtivos, já que a adubação fosfatada costuma ser dimensionada considerando o efeito residual do nutriente (Pereira, 2020; Nunes et al., 2011).

Nesse sentido, este estudo aborda a agricultura de precisão aplicada ao manejo da adubação fosfatada, temática de grande relevância diante da necessidade de conciliar produtividade, racionalização de insumos e conservação ambiental. A discussão envolve desde a etapa de diagnóstico, que compreende a definição da malha amostral, da forma de coleta e da profundidade de amostragem, até as decisões de manejo relacionadas à fonte, à dose, ao local e à época de aplicação do nutriente.

A relevância deste trabalho para a comunidade científica relaciona-se à necessidade de reunir e sistematizar as evidências disponíveis sobre o tema, considerando que os estudos sobre agricultura de precisão frequentemente tratam a fertilidade do solo de forma ampla, sem aprofundar as particularidades do fósforo. Do ponto de vista prático, a organização dessas informações pode subsidiar decisões de produtores, consultores e técnicos que atuam na região do cerrado, onde a fixação do nutriente e o custo da adubação fosfatada assumem peso expressivo na composição dos custos de produção.

Diante desse contexto, formula-se o seguinte problema de pesquisa: de que forma as ferramentas de agricultura de precisão contribuem para o manejo da adubação fosfatada e para o aumento da eficiência de uso do fósforo? A partir dessa problematização, surgem

as seguintes questões norteadoras: como se manifesta a variabilidade espacial e vertical do fósforo nos solos agrícolas? Quais ferramentas de diagnóstico permitem caracterizar essa variabilidade? Quais resultados agronômicos e econômicos têm sido obtidos com a adubação fosfatada a taxa variável? Que estratégias de manejo podem ser associadas à agricultura de precisão para ampliar a eficiência de uso do nutriente?

Como hipótese, propõe-se que o emprego das ferramentas de agricultura de precisão no manejo da adubação fosfatada permita ajustar as doses às reais necessidades de cada porção do talhão, elevando a eficiência de uso do fósforo sem comprometer a produtividade das culturas. Admite-se, entretanto, que os resultados dependam da magnitude da variabilidade existente na área, da qualidade da amostragem realizada e da capacidade técnica de interpretar os dados gerados.

A justificativa deste estudo fundamenta-se na crescente necessidade de racionalizar o uso de fertilizantes fosfatados, insumo de custo elevado, de origem majoritariamente importada e de baixa eficiência de aproveitamento nos solos tropicais. Em culturas exigentes, como o algodoeiro, o custo com correção e adubação do solo pode alcançar 30% do custo total de produção (Carvalho; Ferreira; Staut, 2011). Aliar tecnologias de diagnóstico espacial a estratégias de manejo do nutriente representa, portanto, um caminho para reduzir custos, diminuir perdas e mitigar impactos ambientais associados ao acúmulo ou à transferência de fósforo para os corpos hídricos.

O objetivo geral deste estudo é analisar, com base na literatura científica, a aplicação da agricultura de precisão ao manejo da

adubação fosfatada. Como objetivos específicos, busca-se caracterizar a variabilidade espacial e vertical do fósforo no solo, descrever as ferramentas de diagnóstico empregadas na agricultura de precisão, avaliar os resultados agronômicos e econômicos obtidos com a adubação fosfatada a taxa variável, discutir as estratégias de manejo voltadas ao aumento da eficiência de uso do nutriente e identificar as principais limitações e lacunas relacionadas à adoção dessas tecnologias no contexto brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi de natureza qualitativa e de caráter descritivo, buscando fornecer um panorama sobre a aplicação da agricultura de precisão ao manejo da adubação fosfatada, com ênfase na variabilidade espacial do fósforo e nas estratégias voltadas ao aumento da eficiência de uso do nutriente. Quanto aos meios de aquisição de informação, o estudo foi conduzido por meio de pesquisa bibliográfica, modalidade que pode ser classificada, em relação às suas finalidades, como exploratória, descritiva, explicativa, metodológica, aplicada e intervencionista (Marconi; Lakatos, 2011). Gil (2012) destaca que a investigação se estrutura de acordo com a situação e o contexto em que se baseia a busca de resultados, desenvolvendo-se por meio dos recursos disponíveis e do uso de técnicas e métodos compatíveis com os procedimentos científicos.

Em um primeiro momento, destacou-se a importância da revisão de literatura, tanto por contribuir para o desenvolvimento científico quanto por oferecer uma síntese do estado do conhecimento sobre o manejo localizado da adubação fosfatada em determinado período. Em um segundo momento, considerou-se que outra função relevante da revisão é reunir informações atualizadas,

provenientes de diferentes fontes, auxiliando no aprofundamento do conhecimento e na formulação de novas pesquisas.

No que se refere aos procedimentos de busca, o levantamento foi realizado em bases de dados reconhecidas na área das ciências agrárias, como Scientific Electronic Library Online (SciELO) e Google Acadêmico, além do Portal de Periódicos da CAPES, dos repositórios institucionais de universidades e institutos federais brasileiros e das publicações técnicas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A busca contemplou o período de 2000 a 2026, com o objetivo de reunir produções recentes e relevantes sobre o tema, sendo também incluídos trabalhos anteriores considerados clássicos para a compreensão da dinâmica do fósforo no solo e da evolução da agricultura de precisão no Brasil.

Foram utilizados os descritores “Agricultura de precisão”, “Adubação fosfatada”, “Variabilidade espacial do fósforo”, “Taxa variável”, “Amostragem de solo” e “Eficiência de uso do fósforo”, bem como seus correspondentes em língua inglesa, tais como “Precision agriculture”, “Phosphorus fertilization”, “Spatial variability”, “Variable rate technology”, “Soil sampling” e “Phosphorus use efficiency”. Os termos foram combinados por meio dos operadores booleanos “AND” e “OR”, de modo a ampliar ou restringir os resultados conforme a necessidade de cada etapa da busca.

Durante o processo de levantamento, foram identificados aproximadamente 72 artigos científicos, 15 dissertações de mestrado, 6 teses de doutorado e 12 documentos técnicos e institucionais relacionados ao tema. Após a aplicação dos critérios de seleção, 42 trabalhos foram considerados aptos a compor a análise,

por apresentarem aderência ao objetivo da pesquisa e qualidade metodológica adequada.

Como critérios de inclusão, foram considerados artigos científicos completos, dissertações, teses, capítulos de livros técnicos e publicações institucionais disponíveis na íntegra, redigidos em português, inglês ou espanhol, que abordassem diretamente a variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo, a amostragem georreferenciada, a aplicação de fertilizantes em taxas variáveis, a dinâmica do fósforo em solos tropicais ou as tecnologias voltadas ao aumento da eficiência de uso desse nutriente. Foram incluídos também estudos que apresentassem avaliações econômicas do manejo localizado de corretivos e fertilizantes.

Já como critérios de exclusão, foram desconsiderados trabalhos duplicados nas diferentes bases consultadas, estudos publicados fora do recorte temporal estabelecido, resumos simples e expandidos de eventos científicos, editoriais, materiais de divulgação comercial e publicações sem acesso ao texto completo. Também foram excluídos estudos que tratavam da agricultura de precisão de forma genérica, sem relação com o manejo da fertilidade do solo, bem como pesquisas que abordavam a adubação fosfatada sem qualquer referência à variabilidade espacial ou à eficiência de uso do nutriente.

Após a etapa inicial de identificação, os títulos e resumos foram submetidos a leitura exploratória para verificação da pertinência temática. Em seguida, os estudos potencialmente elegíveis passaram por leitura integral, sendo avaliados quanto à aderência aos objetivos da pesquisa, à qualidade metodológica e à contribuição para a compreensão do manejo da adubação fosfatada

em agricultura de precisão. Dos aproximadamente 105 trabalhos inicialmente identificados, 63 foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão ou por se enquadrarem em algum dos critérios de exclusão, resultando em um conjunto final de 42 obras selecionadas.

Os dados obtidos foram analisados por meio da técnica de análise de conteúdo, o que possibilitou a organização, a categorização e a interpretação das informações coletadas. Os resultados foram agrupados em três eixos temáticos: o primeiro reunindo os estudos relacionados à variabilidade espacial do fósforo e às ferramentas de diagnóstico; o segundo abrangendo os trabalhos que avaliaram o desempenho agrônômico e econômico da adubação fosfatada a taxa variável; e o terceiro concentrando as pesquisas voltadas às estratégias de aumento da eficiência de uso do nutriente. Para facilitar a comparação entre os estudos, os principais achados foram sistematizados em uma tabela de síntese e em um quadro comparativo, ambos elaborados pelo autor a partir das obras revisadas.

Dessa forma, a metodologia adotada buscou garantir rigor científico e coerência com os objetivos propostos, contribuindo para a compreensão crítica do papel da agricultura de precisão no manejo da adubação fosfatada. Como perspectiva de trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de pesquisas de campo que avaliem, em diferentes classes de solo e sistemas de produção da região Centro-Oeste, a resposta das culturas à aplicação de fósforo em taxas variáveis, bem como estudos que analisem a viabilidade econômica dessas tecnologias em propriedades de diferentes portes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fósforo é um elemento essencial ao crescimento vegetal e à produtividade agrícola, participando de processos bioquímicos vitais, como a fotossíntese, o metabolismo energético e a síntese de ácidos nucleicos. Nos solos, o nutriente pode ser encontrado em formas orgânicas, associadas à matéria orgânica, à biomassa microbiana e às substâncias húmicas, e em formas inorgânicas, presentes na solução do solo, adsorvidas aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, precipitadas com alumínio, ferro ou cálcio, ou ainda ocluídas na estrutura cristalina dos minerais. Apenas a fração presente na solução encontra-se prontamente disponível às plantas, e sua concentração é bastante reduzida, situando-se, na maioria dos solos tropicais, abaixo de 0,2 miligrama por litro (Lourini, 2025; Novais; Smyth; Nunes, 2007).

Essa dinâmica explica por que a adubação fosfatada exige doses elevadas nos primeiros anos de cultivo e por que a eficiência agronômica das fontes solúveis tende a diminuir ao longo do tempo. Nos solos ácidos e oxídicos predominantes no cerrado brasileiro, o fósforo aplicado é rapidamente convertido em formas de menor labilidade, processo conhecido como retrogradação ou fixação. A consequência prática é que parcela expressiva do nutriente adicionado permanece no solo sem ser aproveitada no ciclo em que foi fornecida, constituindo o chamado legado de fósforo, cuja reincorporação ao sistema produtivo depende de estratégias específicas de manejo (Lourini, 2025).

Ao mesmo tempo, o fósforo apresenta baixa mobilidade no perfil, característica que faz com que sua distribuição no solo reflita, de maneira duradoura, o histórico de manejo da área. Diferentemente do nitrogênio, sujeito a perdas e transformações rápidas, o fósforo tende a permanecer próximo ao local de aplicação, o que gera

padrões espaciais bem definidos dentro do talhão e, ao mesmo tempo, gradientes acentuados em profundidade, sobretudo em sistemas conservacionistas de manejo do solo (Nunes et al., 2011).

É justamente essa combinação entre alto custo do insumo, baixa eficiência de aproveitamento e distribuição heterogênea no campo que justifica o interesse pela aplicação das ferramentas de agricultura de precisão ao manejo da adubação fosfatada. A agricultura de precisão pode ser definida como o uso de práticas agrícolas fundamentadas em tecnologias de informação para o tratamento da variabilidade espacial, compreendendo um ciclo que se inicia na coleta de dados e se encerra na avaliação dos resultados obtidos em campo (Bernardi et al., 2015). Definição semelhante já havia sido proposta por Swinton e Lowenberg-DeBoer (1998), que a caracterizaram como um conjunto de tecnologias e procedimentos voltados à otimização das lavouras, tendo como elemento central o gerenciamento da variabilidade espacial da produção e dos fatores nela envolvidos, e por Werner et al. (2007), que a associaram à máxima racionalização no uso dos insumos. No Brasil, a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão a caracteriza como um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva, com vistas ao aumento do retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização dos efeitos ao meio ambiente (Brasil, 2012).

Os dados de adoção indicam que essas tecnologias já ocupam espaço relevante no sistema produtivo nacional. Estimativas apontaram que entre 3 milhões e 4 milhões de hectares de lavouras anuais e cerca de 1,5 milhão de hectares de cana-de-açúcar vinham sendo trabalhados com ferramentas de agricultura de precisão voltadas ao mapeamento da fertilidade e à aplicação de corretivos e

fertilizantes a taxa variável (Resende et al., 2014). Levantamentos sobre o perfil dos adotantes mostraram, ainda, que a grande maioria dos produtores que utilizam essas tecnologias recorre à análise química do solo como principal ferramenta de diagnóstico, o que reforça a centralidade da amostragem em todo o processo (Bernardi et al., 2015).

Para organizar as evidências reunidas nesta revisão, apresenta-se a Tabela 1, que sistematiza os principais estudos analisados, indicando o local e a cultura avaliada, a estratégia empregada e o resultado de maior relevância para o manejo da adubação fosfatada. A construção desse recurso permite comparar trabalhos conduzidos em diferentes regiões, sistemas de produção e escalas, evidenciando tanto as convergências quanto as particularidades de cada situação.

Tabela 1. Síntese dos estudos revisados sobre agricultura de precisão aplicada ao manejo da adubação fosfatada

Estudo	Local e cultura	Estratégia avaliada	Principal resultado relacionado ao fósforo
Bernardi et al. (2015)	Revisão / sistema de produção de leite com alfafa	Ferramentas de agricultura de precisão no manejo da fertilidade e recomendação espacializada	Necessidade de fertilizante fosfatado variou de menos de 300 a cerca de 800 kg ha ⁻¹ dentro da mesma área
Dellamea (2008)	Rio Grande do Sul; soja e milho	Adubação a taxa variável por zonas de manejo e em lavouras comerciais	Redução de 11,4% e 7,6% na adubação fosfatada e aumento de 14% e 21,9% na eficiência de uso do P na soja e no milho

Sana et al. (2014)	Cristalina, GO; algodoeiro	Grade de 90 pontos (80 x 80 m) e faixas com doses crescentes de P	Dependência espacial com alcance de 102 a 325 m no solo e ganho de até 500 kg ha ⁻¹ de algodão em caroço
Breda (2011)	Região de Uberlândia, MG; área de 30 ha	Comparação de custos entre amostragem convencional e sistematizada	Custo com superfosfato simples 29,90% menor na agricultura de precisão, com custo total por hectare 7,56% maior
Pereira (2020)	Jandaia, GO; cana-de-açúcar	Quatro formas de coleta de solo em pontos georreferenciados	Consumo recomendado de fosfato monoamônico variou de 1,94 a 7,14 t na mesma área de 89,81 ha
Nunes et al. (2011)	Planaltina, DF; soja e milho	Fontes e modos de aplicação de P sob plantio direto e preparo convencional por 14 anos	Cerca de 76% do estoque de P de 0 a 30 cm concentrado nos primeiros 10 cm sob plantio direto
Lourini (2025)	Rio Verde, GO; três classes de solo, soja e milho	Fontes fosfatadas associadas a aditivos orgânicos e poliméricos	Aumento de 550 kg ha ⁻¹ na produtividade da soja com aditivo húmico associado ao fosfato monoamônico

Fonte: Elaborada pelo autor (2026), com base nas obras revisadas.

A Tabela 1 evidencia que, apesar da diversidade de culturas, regiões e abordagens metodológicas, os estudos convergem em um ponto central: o fósforo apresenta distribuição heterogênea nas lavouras e responde de maneira expressiva às decisões de amostragem, de dose e de modo de aplicação. Observa-se também que os ganhos relatados não decorrem apenas da tecnologia empregada, mas da qualidade da informação gerada e da capacidade de convertê-la em decisões de manejo, aspecto que será aprofundado nas seções seguintes.

3.1. Variabilidade Espacial do Fósforo e Ferramentas de Diagnóstico

As propriedades do solo podem variar espacialmente desde o interior de um mesmo talhão até a escala regional, em função de fatores intrínsecos, ligados aos processos de formação do solo, e de fatores extrínsecos, associados às práticas de manejo, à adubação e à rotação de culturas (Cambardella; Karlen, 1999). Essas variações precisam ser monitoradas e quantificadas para que se compreendam os efeitos do uso da terra e dos sistemas de gestão adotados, sendo a análise química do solo o recurso mais empregado no Brasil para essa finalidade (Bernardi et al., 2015). Por meio de extratores químicos, procura-se determinar o grau de suficiência ou de deficiência dos elementos no solo e quantificar condições adversas ao desenvolvimento das plantas (Raij, 1991), interpretando-se os resultados segundo tabelas regionais de recomendação de corretivos e fertilizantes (Ribeiro; Guimarães; Alvarez V., 1999).

A magnitude dessa variabilidade foi demonstrada por Sana et al. (2014) em experimento conduzido na Fazenda Pamplona, em

Cristalina, Goiás, em área de 57,6 hectares cultivada sob plantio direto com sucessão de soja, milho e algodão. Os autores estabeleceram uma grade de 90 pontos espaçados em 80 por 80 metros, georreferenciados com receptor de sinal de satélite, e verificaram que todas as variáveis estudadas apresentaram de moderada a forte variabilidade e dependência espacial, tanto no solo quanto na planta. Os alcances de dependência espacial dos nutrientes medidos no solo variaram de 102 a 325 metros, enquanto os teores foliares apresentaram alcances entre 173 e 480 metros, indicando que a escala de variação do solo é mais restrita que a da resposta vegetal.

Esse resultado é relevante do ponto de vista prático, pois define a escala em que a informação precisa ser coletada. Se o alcance da dependência espacial de um atributo é de aproximadamente 100 metros, grades amostrais mais amplas tendem a não capturar a estrutura de variação existente, produzindo mapas que apenas suavizam as diferenças reais do talhão. A determinação do espaçamento ideal da grade tem sido, justamente, uma das maiores dificuldades nos estudos de variabilidade espacial das propriedades dos solos, uma vez que o tamanho da malha relaciona-se tanto com a acurácia da amostragem quanto com o custo do serviço (Lark, 2002; Bernardi et al., 2015).

Levantamentos sobre a prática adotada no Brasil indicaram que a maioria dos usuários de agricultura de precisão trabalha com grades que preveem a coleta de uma amostra a cada 3 a 5 hectares. Em muitas situações, essa densidade não é suficiente para gerar um mapa com qualidade adequada à aplicação de fertilizantes; ainda assim, é preferível dispor de uma amostra a cada 5 hectares do que de uma a cada 20 hectares, como ocorre em boa parte das lavouras

conduzidas de forma convencional (Bernardi et al., 2015). Trabalhos sobre densidade amostral confirmam que a redução do número de pontos compromete a representação dos atributos químicos e, por consequência, as recomendações de adubação e calagem geradas a partir dos mapas (Caon et al., 2013). Malhas mais adensadas, contudo, elevam o custo do serviço, o que constitui uma das principais limitações práticas à adoção da tecnologia (Anchieta, 2012). O desafio consiste, portanto, em conciliar viabilidade econômica e representatividade, uma vez que a amostragem precisa retratar as diferentes escalas de variabilidade espacial dos atributos do solo (Bottega et al., 2013).

Definida a malha, o passo seguinte consiste no tratamento estatístico dos dados. A geoestatística tem por objetivo caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e estimar suas inter-relações no espaço e no tempo. A partir dos modelos ajustados aos semivariogramas, os dados são interpolados pela técnica da krigagem, gerando superfícies contínuas que dão origem aos mapas temáticos. O método da krigagem estima valores desconhecidos considerando o quanto a variação da distância influencia o comportamento dos dados, diferentemente de outros interpoladores, amplamente utilizados no meio comercial, que desconsideram essa dependência (Grego; Oliveira; Vieira, 2014; Bernardi et al., 2015). Estabelecida a dependência geoespacial dos atributos, torna-se possível mapear a área e aplicar os insumos em taxas variáveis (Dalchiavon et al., 2012).

Um aspecto frequentemente negligenciado, porém determinante para o fósforo, é a forma de coleta das subamostras que compõem cada ponto georreferenciado. Como o nutriente costuma ser aplicado no sulco de semeadura e apresenta baixa mobilidade, a

linha de plantio concentra teores muito superiores aos observados na entrelinha. Trabalhos anteriores sobre o tema já apontavam que amostras retiradas ao longo da linha tendem a superestimar os teores de fósforo e potássio, enquanto amostras coletadas exclusivamente na entrelinha tendem a subestimá-los e, ao mesmo tempo, superestimar os teores de cálcio e magnésio (Vitti; Mazza, 2002; Cardoso, 2013).

Pereira (2020) quantificou esse efeito em condições de campo, em área de 89,81 hectares da usina Destilaria Nova União, no município de Jandaia, Goiás, cultivada com cana-de-açúcar. O autor comparou quatro formas de coleta – na linha e nas entrelinhas, na linha e em uma entrelinha, somente na entrelinha e somente na linha – tomando como referência a análise convencional utilizada pela usina, que classificou o teor de fósforo da área como baixo. As coletas realizadas na linha e nas entrelinhas, somente na entrelinha e somente na linha resultaram em teores baixos, próximos ao padrão, ao passo que a coleta na linha e em uma única entrelinha indicou teores entre médio e bom, distanciando-se do resultado de referência.

O reflexo dessa diferença na recomendação foi expressivo. Mantida a mesma dose máxima de 80 quilogramas por hectare de fosfato monoamônico, a área a ser adubada e a dose média variaram conforme a forma de coleta, de modo que o consumo total de fertilizante foi de 6,68 toneladas para a coleta na linha e nas entrelinhas, 7,14 toneladas para a coleta somente na entrelinha, 6,17 toneladas para a coleta somente na linha e apenas 1,94 tonelada para a coleta na linha e em uma entrelinha (Pereira, 2020). Em outras palavras, uma decisão aparentemente operacional produziu,

na mesma área e no mesmo momento, recomendações que diferiram em quase quatro vezes.

A gravidade desse erro é amplificada pelo fato de a adubação fosfatada ser dimensionada para atender a dois, três ou mais anos de produção, aproveitando o efeito residual do nutriente. Um equívoco na estimativa dos teores de fósforo, portanto, não se corrige na safra seguinte: ele se propaga por todo o período de residualidade, podendo acarretar prejuízos econômicos por subadubação ou desperdício por aplicação excessiva (Pereira, 2020). Por essa razão, o autor concluiu que a coleta realizada na linha e nas entrelinhas foi a que melhor representou os teores de nutrientes no solo, proporcionando recomendações mais equilibradas.

À variabilidade horizontal soma-se a variabilidade vertical, igualmente decisiva para a definição da profundidade de amostragem. Nunes et al. (2011) avaliaram, em experimento de longa duração conduzido em Planaltina, Distrito Federal, a distribuição do fósforo em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos com soja e milho, que recebeu 80 quilogramas por hectare por ano de pentóxido de fósforo, na forma de superfosfato triplo ou de fosfato natural reativo, aplicados no sulco de semeadura ou a lanço, sob preparo convencional ou plantio direto.

Os autores observaram que, no sistema plantio direto, a adubação fosfatada alterou os teores do nutriente apenas até 10 centímetros de profundidade, enquanto no preparo convencional o efeito estendeu-se até 20 centímetros, profundidade correspondente ao revolvimento realizado pelo arado. No plantio direto, cerca de 76% do estoque de fósforo extraível presente na camada de 0 a 30 centímetros concentrou-se nos primeiros 10 centímetros,

independentemente da fonte e do modo de aplicação, ao passo que, no preparo convencional, essa proporção foi de aproximadamente 53% (Nunes et al., 2011).

O modo de aplicação também deixou marcas nítidas no perfil. Na camada de 0 a 2,5 centímetros do plantio direto, os teores de fósforo foram cerca de 80% maiores nos tratamentos que receberam o fertilizante a lanço, enquanto na camada de 5 a 10 centímetros os teores foram aproximadamente 50% maiores nos tratamentos adubados no sulco. Resultados semelhantes de estratificação em sistemas conservacionistas já haviam sido descritos por Rheinheimer e Anghinoni (2001), que verificaram elevado gradiente de fósforo entre camadas sob plantio direto e distribuição mais uniforme sob preparo convencional.

A implicação prática dessas constatações é direta: a camada amostrada precisa corresponder àquela efetivamente alterada pela adubação. Nunes et al. (2011) demonstraram que a correlação entre o teor de fósforo e o rendimento de grãos de soja não foi significativa quando se considerou uniformemente a camada de 0 a 20 centímetros nos dois sistemas, mas tornou-se significativa quando os teores foram obtidos até 20 centímetros no preparo convencional e até 10 centímetros no plantio direto. A padronização automática da profundidade de 0 a 20 centímetros, comum nos serviços de amostragem, pode, portanto, diluir a informação e reduzir a capacidade preditiva da análise em áreas manejadas sob semeadura direta.

Além da amostragem convencional, a agricultura de precisão dispõe de sensores capazes de ampliar a densidade de informação a custos menores. A condutividade elétrica aparente do solo é uma medida

que integra textura e disponibilidade de água, atributos que afetam a produtividade, e pode auxiliar na interpretação das variações de rendimento das culturas e na delimitação de zonas de manejo (Bernardi et al., 2015). Sana et al. (2014) verificaram, na área de algodoeiro em Cristalina, correlações significativas entre a condutividade elétrica aparente e diversos atributos do solo, especialmente aqueles ligados ao pH e aos cátions trocáveis na superfície.

Cabe destacar, entretanto, uma limitação importante para o tema deste trabalho: no mesmo estudo, os teores de fósforo determinados por Mehlich-1 e por resina não apresentaram correlações relevantes com a condutividade elétrica aparente nem com os teores foliares do nutriente (Sana et al., 2014). Isso significa que, embora os sensores sejam úteis para estratificar a área e orientar a distribuição dos pontos de coleta, o diagnóstico do fósforo permanece dependente da análise química do solo. Os sensores, nesse caso, atuam como ferramenta auxiliar de delimitação de regiões homogêneas, e não como substitutos da amostragem, conforme já ponderado por Bernardi et al. (2015) ao discutirem o uso combinado de sensores, imagens de satélite e amostragem dirigida.

3.2. Adubação Fosfatada a Taxa Variável: Desempenho Agrônômico e Econômico

A tecnologia de aplicação em taxa variável de insumos é realizada a partir de amostras de solo georreferenciadas coletadas nas grades de amostragem que, após a análise geoestatística, servem de base para a elaboração dos mapas de fertilidade. Com base nos mapas de atributos químicos, entre eles o teor de fósforo, a capacidade de troca de cátions e a saturação por bases, são elaborados mapas de

prescrição que determinam quantidades distintas de corretivos e fertilizantes para diferentes partes do talhão, de acordo com a mudança na condição de fertilidade de um local para outro (Bernardi et al., 2015; Resende et al., 2014).

A amplitude dessas prescrições costuma surpreender quem está habituado ao manejo pela média. Bernardi et al. (2015) apresentaram exemplo de recomendação espacializada de adubação fosfatada em sistema de produção com pastagem de alfafa, no qual o mapa elaborado por krigagem dos pontos georreferenciados indicou áreas cuja necessidade de fertilizante fosfatado, na forma de superfosfato simples, variava de menos de 300 quilogramas por hectare a cerca de 800 quilogramas por hectare dentro da mesma área. Os autores demonstraram, ainda, que essas diferenças se refletem diretamente no custo de produção e no retorno econômico do sistema quando espacializados.

Uma das formas de operacionalizar esse manejo consiste na divisão da lavoura em zonas ou classes de manejo, entendidas como subáreas relativamente homogêneas quanto aos fatores que condicionam a produtividade. Essa divisão pode ser definida a partir de mapas de produtividade, de atributos do solo, de dados de sensores ou da combinação dessas fontes, e mostra-se eficiente para orientar a aplicação localizada de insumos (Molin, 2002; Bernardi et al., 2015). A estratégia de zonas de manejo é particularmente adequada a produtores que ainda não dispõem de equipamentos com controle ponto a ponto, pois permite variar as doses por regiões da lavoura com o maquinário disponível na propriedade.

3.2.1. Desempenho Agronômico

Os resultados agronômicos da adubação fosfatada a taxa variável foram documentados de forma detalhada por Dellamea (2008), em dissertação conduzida no Rio Grande do Sul. No primeiro estudo de caso, realizado em uma pequena propriedade de 19 hectares no município de Silveira Martins, o autor determinou a variabilidade espacial dos atributos do solo por meio de uma grade de 100 por 100 metros, confeccionou mapas de produtividade e aplicou os insumos em doses diferenciadas por zonas de manejo, utilizando apenas os recursos tecnológicos disponíveis na propriedade.

Nessa área, os teores de fósforo e de potássio apresentaram variabilidade espacial nos dois anos amostrados, e a fertilização a taxa variável por zonas foi eficiente em reduzir essa variabilidade, promovendo correção total dos teores de potássio e correção parcial dos teores de fósforo na camada analisada. O manejo localizado proporcionou economia de 17% na quantidade total de insumos e incremento médio de 8% na produtividade da soja, resultando em retorno econômico bruto de 72,05 reais por hectare e em aumento de 29% na eficiência em relação ao manejo tradicional (Dellamea, 2008).

No segundo estudo, o autor avaliou 138 hectares cultivados com soja e 96 hectares com milho, distribuídos em seis áreas de produtores vinculados a um projeto de agricultura de precisão na região do Alto Jacuí. Nessas lavouras, conduzidas com colheita georreferenciada e distribuidor de insumos a taxa variável, a aplicação localizada proporcionou redução média de 33,1% e 36,8% nas quantidades totais de fertilizantes utilizados nas culturas da soja e do milho, respectivamente, acompanhada de incremento de 10% e 14% na produtividade (Dellamea, 2008).

Quando analisados especificamente os nutrientes contidos nos fertilizantes, a agricultura de precisão permitiu reduzir em 11,4% e 7,6% a adubação fosfatada nas culturas da soja e do milho, com aumento correspondente de 14% e 21,9% na eficiência de uso do fósforo. Considerada a relação entre quilogramas de grãos produzidos e quilogramas de fertilizante aplicado, a eficiência global do uso de fertilizantes cresceu 47,2% na soja e 55,1% no milho em relação ao manejo tradicionalmente adotado pelos produtores (Dellamea, 2008). Esses números indicam que o ganho de eficiência decorre menos da redução indiscriminada das doses e mais da realocação do insumo para as regiões da lavoura em que ele produz maior resposta.

Essa interpretação é reforçada pelos resultados de Sana et al. (2014) com o algodoeiro no cerrado goiano. Na safra 2010/2011, os teores de nutrientes no solo e nas folhas não se correlacionaram com a produtividade da lavoura, o que os autores atribuíram ao fato de as plantas já se encontrarem bem nutridas, de modo que outros fatores, como a distribuição da umidade no terreno, o clima e a ocorrência de pragas e doenças, exerceram influência maior sobre o rendimento.

Na safra 2011/2012, contudo, quando foram aplicadas faixas com doses crescentes de fósforo, de 0 a 300 quilogramas por hectare de pentóxido de fósforo, observou-se resposta linear e crescente da produtividade de algodão em caroço, com ganhos de até 500 quilogramas por hectare e coeficiente de determinação de 0,93. Segundo os autores, esse aumento demonstra que a variabilidade de fósforo na área é alta e que a correção dos pontos em que o teor do nutriente é menor permite crescimento da produtividade, ainda

que outros fatores interfiram na magnitude da resposta (Sana et al., 2014).

A conclusão desse trabalho é particularmente instrutiva para o manejo localizado: os teores de nutrientes no solo e nas folhas nem sempre explicam a produtividade obtida, exceto quando teores baixos são elevados por doses crescentes de fertilizantes, como no caso do fósforo estudado (Sana et al., 2014). Em outras palavras, o retorno da aplicação localizada tende a se concentrar nas regiões deficientes do talhão, o que reforça a lógica de investir a informação e o insumo onde existe limitação efetiva.

Cabe registrar que a resposta em produtividade também depende do sistema de cultivo adotado. Nunes et al. (2011) verificaram que, apesar da forte estratificação do fósforo nas camadas superficiais, o rendimento de grãos de soja no décimo quarto ano de cultivo não foi alterado pela fonte do fertilizante nem pelo modo de aplicação, e sim pelo sistema de cultivo: o plantio direto produziu 15,5%, ou 543 quilogramas por hectare, mais grãos que o preparo convencional. Os autores associaram esse desempenho à maior disponibilidade do nutriente no plantio direto, confirmada pelo maior teor foliar de fósforo no florescimento pleno, e ao menor requerimento de fósforo necessário para elevar em uma unidade o teor extraível do solo nesse sistema.

3.2.2. Desempenho Econômico

Um dos questionamentos mais frequentes sobre a adoção da agricultura de precisão refere-se aos custos da amostragem e das análises de solo, uma vez que a utilização de grades aumenta consideravelmente a necessidade de mão de obra e o número de

amostras a serem coletadas, impactando o custo final do serviço (Chitolina et al., 2009). Levantamentos de preços praticados por empresas prestadoras de serviços georreferenciados indicaram custos que variaram, conforme o tamanho da área e a dimensão da malha, de 26,50 a 36,60 reais por hectare, considerando coleta, análise e elaboração dos mapas de fertilidade (Coelho, 2005).

Esses valores, contudo, precisam ser interpretados à luz do período de utilização da informação. Dependendo do sistema de produção e da rotação adotada, a coleta, a análise e a elaboração dos mapas de fertilidade são atividades realizadas a cada três ou até cinco anos, enquanto mapas topográficos e informações pedológicas podem ser utilizados por prazos ainda mais longos. Assim, o custo anual deve considerar a depreciação do investimento: um gasto de 36,60 reais por hectare realizado a cada quatro anos corresponde a uma depreciação anual de 9,15 reais por hectare (Chitolina et al., 2009).

A comparação direta entre os dois sistemas de manejo foi realizada por Breda (2011), em área de 30 hectares situada a cerca de 50 quilômetros do município de Uberlândia, Minas Gerais. O autor comparou o custo de correção e adubação obtido a partir da amostragem convencional, conduzida em caminhamento em ziguezague, com o custo obtido a partir da amostragem sistematizada e da geração de mapas de fertilidade, utilizando as mesmas recomendações técnicas e os mesmos preços de insumos para os dois métodos.

Os resultados mostraram comportamento distinto conforme o insumo considerado. Na agricultura de precisão, o custo com calcário foi, em média, 44,97% superior ao obtido pela agricultura convencional, e o custo com cloreto de potássio foi 33,22% superior.

Em contrapartida, o custo com superfosfato simples foi 29,90% inferior ao verificado no método convencional. O custo total por hectare da agricultura de precisão foi, em média, 7,56% superior ao do manejo convencional, correspondendo a 884,48 reais por hectare contra valores entre 806,46 e 828,66 reais por hectare no manejo tradicional (Breda, 2011).

A leitura desses números exige cautela. A redução observada no gasto com o fertilizante fosfatado decorreu do fato de os mapas terem identificado áreas com teores de fósforo classificados como bons, nas quais não houve recomendação de adubação fosfatada, e áreas com disponibilidade média, que receberam doses reduzidas. O aumento no custo do calcário e do cloreto de potássio, por sua vez, resultou do reconhecimento de manchas com maior necessidade desses insumos, que no manejo convencional receberiam doses inferiores às requeridas (Breda, 2011). Trata-se, portanto, de uma redistribuição de investimentos entre as manchas de fertilidade, e não necessariamente de um custo adicional improdutivo.

É importante considerar, ainda, que o retorno econômico da agricultura de precisão está diretamente relacionado à natureza e à extensão da variabilidade do meio biofísico em que ela é aplicada. Se o meio é uniforme, não haverá diferença de retorno entre a agricultura de precisão e a convencional; entretanto, à medida que aumenta a heterogeneidade, o retorno tende a crescer. O segundo condicionante é a capacidade humana de manejar essa variabilidade, pois o retorno pode não se concretizar se a decisão agronômica estiver equivocada ou se o equipamento não estiver adequadamente calibrado (Chitolina et al., 2009).

Esse entendimento explica por que os resultados econômicos relatados na literatura variam tanto. Enquanto Breda (2011) encontrou custo total superior na agricultura de precisão em área de 30 hectares, Dellamea (2008) obteve retorno de 143,34 reais por hectare na cultura da soja e de 312,44 reais por hectare na cultura do milho, com incremento médio de 31,3% e 62,8% quando considerados os recursos financeiros aplicados em fertilizantes. Análises internacionais indicaram, ainda, que em 68% dos casos avaliados os sistemas com uso de agricultura de precisão foram mais rentáveis que os sistemas de cultivo convencional (Griffin; Lowenberg-DeBoer, 2005; Bernardi et al., 2015).

Vale destacar que o valor econômico da agricultura de precisão provém das informações coletadas no campo, e não do uso das tecnologias em si. As ferramentas disponíveis geram dados que precisam ser analisados e convertidos em informações práticas, capazes de influenciar as decisões de manejo do solo e das culturas; os ganhos, portanto, resultam das decisões tomadas e não da simples aquisição dos equipamentos (Coelho, 2003; Breda, 2011). Esse é o aspecto que diferencia essas inovações da agricultura tradicional, na qual o valor decorre diretamente do uso de uma nova cultivar ou de um novo defensivo.

Para sintetizar as diferenças entre as duas abordagens no que diz respeito especificamente ao fósforo, apresenta-se o Quadro 1, que reúne os principais aspectos discutidos até aqui, contrapondo o manejo convencional e o manejo conduzido com ferramentas de agricultura de precisão.

Quadro 1. Comparativo entre o manejo convencional e a agricultura de precisão na adubação fosfatada

Aspecto	Manejo convencional	Agricultura de precisão
Unidade de decisão	Talhão tratado como ambiente homogêneo, com dose única definida pela média	Talhão dividido em manchas de fertilidade ou zonas de manejo, com doses diferenciadas
Amostragem	Amostras simples coletadas em caminhamento em ziguezague, sem georreferenciamento	Pontos georreferenciados distribuídos em grade, com registro da posição de cada amostra
Tratamento dos dados	Interpretação direta do laudo laboratorial	Análise geoestatística, ajuste de semivariogramas e interpolação por krigagem
Produto gerado	Recomendação única para toda a área	Mapas de fertilidade e mapas de prescrição por porção do talhão
Aplicação	Dose fixa em toda a área	Aplicação em taxa variável, por zonas ou ponto a ponto
Risco predominant e	Sub e superdimensionamento simultâneos em diferentes partes da lavoura	Erros de amostragem e de calibração dos equipamentos propagados para todo o mapa
Custo de diagnóstico	Reduzido, por envolver poucas amostras por área	Mais elevado, diluído ao longo de três a cinco anos de uso da informação
Condicionant e do retorno	Depende principalmente do preço dos insumos e da produtividade obtida	Depende da magnitude da variabilidade da área e da capacidade técnica de interpretar os dados

Fonte: Elaborado pelo autor (2026), com base nas obras revisadas.

O Quadro 1 evidencia que a diferença entre as duas abordagens não reside apenas na tecnologia empregada, mas na quantidade e na qualidade da informação que sustenta a decisão. Observa-se, também, que a agricultura de precisão exige investimentos iniciais mais elevados em diagnóstico e capacitação, cujo retorno depende da existência de variabilidade expressiva na área e da correta interpretação dos dados gerados.

3.3. Estratégias para Aumento da Eficiência de Uso do Fósforo

O mapeamento da variabilidade e a aplicação em taxa variável respondem à pergunta sobre quanto fósforo aplicar em cada porção da lavoura, mas não esgotam o problema da eficiência de uso do nutriente. Isso porque, uma vez depositado no solo, o fósforo passa a ser governado por processos de adsorção, precipitação, mineralização e imobilização que determinam quanto do que foi aplicado permanecerá acessível às raízes (Lourini, 2025). Não por acaso, as taxas de eficiência de utilização dos nutrientes aplicados são reconhecidamente baixas nos sistemas agrícolas (Baligar; Fagéria; He, 2001). O manejo eficiente, portanto, combina a decisão espacial com decisões relativas à fonte, à dose, ao local e ao momento de aplicação, princípios reunidos no conceito conhecido como manejo inteligente do fósforo.

A escolha da fonte constitui o primeiro desses componentes. Fertilizantes de elevada solubilidade em água são os mais utilizados na agricultura mundial em razão de sua maior eficiência agronômica; entretanto, quando adicionados a solos tropicais ácidos e de alta capacidade de fixação, são rapidamente convertidos em formas indisponíveis às plantas, o que pode reduzir sua eficiência ao longo do tempo. As fontes naturais reativas, por sua vez, promovem

solubilização gradual do nutriente, limitando a adsorção específica pelas argilas (Nunes et al., 2011).

Os resultados de Nunes et al. (2011) ilustram como essas fontes se comportam de forma distinta no perfil. Após 14 anos de cultivo, o superfosfato triplo proporcionou maiores teores de fósforo extraível que o fosfato natural reativo até 20 centímetros no preparo convencional e até 10 centímetros no plantio direto, o que se explica pela dissolução rápida da fonte solúvel frente à liberação paulatina da fonte de baixa solubilidade. Ainda assim, o rendimento de grãos de soja no último ano avaliado não diferiu entre as fontes, indicando que, em condições de adubação continuada, ambas foram capazes de suprir a demanda da cultura.

O local de aplicação é o segundo componente e apresenta relação direta com o tema da amostragem discutido anteriormente. Os modos de aplicação mais utilizados na produção de grãos são a lança na superfície, com ou sem incorporação, no sulco de semeadura e em faixas (Sousa; Lobato; Rein, 2004). No cerrado, o manejo mais comum consiste na aplicação de fontes solúveis no sulco de semeadura, prática que reduz o contato do fertilizante com a massa de solo e, conseqüentemente, a exposição do nutriente à fixação, embora amplie o gradiente vertical no perfil (Nunes et al., 2011).

A aplicação superficial, por sua vez, apresenta vantagens operacionais relevantes em sistemas que se beneficiam de maior rapidez no plantio, pois permite semear apenas com sementes ou com quantidade reduzida de fertilizante, aumentando a velocidade de trabalho das semeadoras. Nunes et al. (2011) demonstraram que, mesmo sob plantio direto, existe capacidade expressiva de

redistribuição do fósforo no perfil: dos 570 quilogramas por hectare de pentóxido de fósforo residuais no solo nos tratamentos adubados no sulco, cerca de 40% haviam sido absorvidos pelas plantas e devolvidos à superfície por meio dos resíduos vegetais, evidenciando o papel da ciclagem na dinâmica do nutriente.

O terceiro componente diz respeito às tecnologias aplicadas aos próprios fertilizantes. Lourini (2025) avaliou o efeito de aditivos orgânicos e poliméricos aplicados a fontes fosfatadas em três classes de solo contrastantes: Latossolo Vermelho-Amarelo acriférrico, Neossolo Quartzarênico órtico típico e Nitossolo Vermelho eutrófico típico. Por meio de experimentos de incubação, com coletas realizadas dos 30 aos 360 dias, e de fracionamento sequencial do fósforo, a autora identificou que a dinâmica do nutriente varia de maneira expressiva entre solos, fontes e aditivos.

No Latossolo, rico em óxidos de ferro e alumínio, observou-se forte imobilização inicial, com o fósforo ocluso atuando como reserva secundária; nesse ambiente, a associação do fosfato monoamônico a um dos aditivos reduziu a precipitação em formas insolúveis e manteve maiores teores de fósforo em solução e na fração lábil entre 90 e 180 dias. No Neossolo Quartzarênico, de baixa capacidade de troca de cátions, os aditivos elevaram o fósforo em solução aos 30 dias, mas o nutriente foi rapidamente convertido em formas não lábeis e ocluídas, de modo que, a partir dos 90 dias, o superfosfato triplo sem aditivos manteve maior disponibilidade, indicando que nesse solo o manejo deve priorizar fontes de liberação lenta e aplicações parceladas (Lourini, 2025).

Nos experimentos de campo conduzidos pela mesma autora, o uso de aditivo à base de substâncias húmicas associado ao fosfato

monoamônico aumentou a produtividade de grãos de soja em 550 quilogramas por hectare e elevou a eficiência agronômica do fósforo, especialmente quando o fertilizante foi aplicado em linha. Já no milho, o fosfato monoamônico revestido por polímero reduziu o crescimento inicial das plantas e não alterou a produtividade final, em razão do estresse climático ocorrido durante o ciclo, o que evidencia a importância de alinhar a tecnologia de fertilizantes ao contexto climático e à sensibilidade de cada cultura (Lourini, 2025).

A leitura conjunta desses resultados com os da agricultura de precisão sugere uma complementaridade produtiva. Enquanto o mapeamento da variabilidade indica onde e quanto aplicar, o conhecimento sobre a dinâmica do fósforo em cada classe de solo indica qual fonte utilizar, de que maneira posicioná-la e em que momento fornecê-la. Em propriedades que apresentam mais de uma classe de solo dentro do mesmo talhão, situação comum em áreas extensas do cerrado, a delimitação de zonas de manejo pode servir de base não apenas para variar a dose, mas também para diferenciar a estratégia de adubação adotada em cada região.

Deve-se considerar, adicionalmente, que a eficiência de uso do fósforo é influenciada pelo sistema de manejo do solo. Nunes et al. (2011) observaram que o requerimento de fósforo necessário para elevar em uma unidade o teor extraível foi expressivamente menor no plantio direto que no preparo convencional, resultado atribuído ao menor revolvimento, que reduz a passagem do nutriente para formas adsorvidas de elevada estabilidade, e ao acúmulo de matéria orgânica, que atua elevando a disponibilidade do fósforo no solo. O manejo conservacionista, portanto, constitui em si uma estratégia de aumento da eficiência de uso do nutriente.

Apesar dos avanços descritos, permanecem lacunas relevantes. Ainda são necessárias avaliações de médio e longo prazo sobre os efeitos das aplicações a taxa variável na variabilidade espacial e temporal do solo e na produtividade das culturas. Persiste, também, a carência de técnicos e operadores capacitados para o planejamento e a aplicação desses insumos, o que exige intensificar a transferência de conhecimento por meio de publicações técnicas, cursos, dias de campo e assistência técnica qualificada (Bernardi et al., 2015).

Do ponto de vista metodológico, as grades de amostragem fixas e padronizadas, além de mais caras e laboriosas, podem não fornecer as informações necessárias. O uso de sensores para delimitar regiões homogêneas e, a partir desses limites, estabelecer pontos de amostragem dirigidos, associado ao conhecimento pedológico da área, representa um caminho promissor para reduzir custos sem comprometer a qualidade do diagnóstico (Bernardi et al., 2015). No caso específico do fósforo, contudo, a impossibilidade de estimar o nutriente por sensoriamento reforça que essa estratégia deve ser compreendida como forma de otimizar a amostragem, e não de substituí-la.

Por fim, observa-se que a discussão sobre eficiência de uso do fósforo transcende a esfera técnica. Considerando que a maior parte do nutriente utilizado no país é importada e que suas reservas mundiais concentram-se em poucos países, o uso racional desse insumo relaciona-se diretamente à segurança alimentar e à redução da vulnerabilidade externa do setor produtivo nacional (Lourini, 2025). Nesse sentido, as ferramentas de agricultura de precisão, associadas às tecnologias de fertilizantes e às práticas conservacionistas de manejo do solo, compõem um conjunto de

estratégias convergentes para um mesmo objetivo: extrair mais produtividade de cada quilograma de fósforo aplicado.

4. CONCLUSÃO

Diante do que foi estudado, foi possível compreender que a agricultura de precisão constitui uma ferramenta consistente para o manejo da adubação fosfatada, especialmente em solos tropicais, nos quais a fixação do nutriente e o custo elevado do insumo tornam a racionalização do seu uso uma necessidade técnica e econômica.

A questão norteadora deste estudo, compreender de que forma as ferramentas de agricultura de precisão contribuem para o manejo da adubação fosfatada e para o aumento da eficiência de uso do fósforo, foi respondida ao se verificar que essas tecnologias atuam em duas frentes complementares. Na etapa de diagnóstico, permitem identificar, por meio da amostragem georreferenciada e da análise geoestatística, os padrões de distribuição do nutriente que o manejo pela média desconsidera. Na etapa de intervenção, possibilitam ajustar as doses às reais necessidades de cada porção do talhão, realocando o insumo para as regiões em que ele produz maior resposta.

Em relação aos objetivos propostos, constatou-se que o fósforo apresenta variabilidade tanto horizontal quanto vertical. No sentido horizontal, os estudos revisados demonstraram forte dependência espacial dos teores dentro de um mesmo talhão, com alcances que definem a escala em que a informação precisa ser coletada. No sentido vertical, evidenciou-se que o sistema de preparo e o modo de aplicação determinam a profundidade efetivamente alterada

pela adubação, o que tem implicação direta sobre a camada que deve ser amostrada.

Verificou-se, igualmente, que a forma de coleta das subamostras exerce influência decisiva sobre a recomendação fosfatada, a ponto de produzir, em uma mesma área e no mesmo momento, prescrições que diferiram em quase quatro vezes. Esse achado merece destaque porque contraria a percepção corrente de que a precisão do manejo decorre principalmente do equipamento utilizado: nas condições revisadas, o maior risco de erro concentrou-se na etapa mais simples e menos onerosa de todo o processo, que é a coleta da amostra.

Quanto ao desempenho da adubação fosfatada a taxa variável, os resultados analisados indicaram redução das quantidades de fertilizante aplicadas, aumento da eficiência de uso do nutriente e ganhos de produtividade nas culturas avaliadas, com resposta mais expressiva nas regiões da lavoura que apresentavam teores baixos do nutriente. Do ponto de vista econômico, observou-se que os resultados variam conforme a magnitude da variabilidade presente na área, de modo que o retorno tende a ser tanto maior quanto mais heterogêneo for o ambiente de produção.

Observou-se, ainda, que o aumento da eficiência de uso do fósforo não depende apenas da decisão espacial. As escolhas relativas à fonte, ao local e ao momento de aplicação, o emprego de fertilizantes de eficiência aumentada e a adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo mostraram-se igualmente determinantes, atuando de forma complementar às ferramentas de agricultura de precisão.

Entre as limitações identificadas, destacam-se o custo da amostragem em grades adensadas, a carência de profissionais capacitados para o planejamento e a interpretação dos mapas, a impossibilidade de estimar o fósforo por meio de sensores e a escassez de avaliações de médio e longo prazo sobre os efeitos das aplicações localizadas. Essas lacunas indicam que a consolidação dessas tecnologias depende tanto de avanços técnicos quanto de investimentos em formação e assistência técnica.

Assim, conclui-se que a agricultura de precisão aplicada ao manejo da adubação fosfatada representa um caminho consistente para conciliar produtividade, redução de custos e conservação ambiental, desde que sustentada por uma amostragem representativa, por interpretação criteriosa dos dados e por decisões agronômicas tecnicamente fundamentadas. Mais do que substituir o manejo convencional, essas ferramentas propõem uma mudança na forma de enxergar a lavoura, reconhecendo-a como um conjunto de ambientes distintos, e não como uma unidade homogênea. Os resultados deste trabalho contribuem para ampliar a compreensão sobre o tema e reforçam a importância de investir em pesquisa, capacitação e assistência técnica voltadas ao uso racional do fósforo na agricultura brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANCHIETA, L. **Amostragem de solo em agricultura de precisão: particularidades e recomendações**. 2012. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BALIGAR, V. C.; FAGÉRIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7/8, p. 921-950, 2001.

BERNARDI, A. C. C. *et al.* Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Adoção da agricultura de precisão no Brasil. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.

BOTTEGA, E. L. *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Principais conceitos e expressões utilizados na agricultura de precisão**. Brasília, DF: Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão, 2012.

BREDA, L. D. **Análise de custo de correção e adubação do solo em função dos métodos de amostragem convencional e para agricultura de precisão**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 5-14, 1999.

CAON, D. *et al.* Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 629-639, 2013.

CARDOSO, J. A. **Amostragem de solo na determinação da variabilidade dos atributos de fertilidade em áreas de reforma de cana-de-açúcar, Goiatuba, GO.** 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CARVALHO, M. C. S.; FERREIRA, G. B.; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In: FREIRE, E. C. (ed.). **Algodão no cerrado do Brasil.** 2. ed. Aparecida de Goiânia: Mundial Gráfica, 2011. p. 677-752.

CHITOLINA, J. C. *et al.* Amostragem de solo para análises de fertilidade, de manejo e de contaminação. In: SILVA, F. C. (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. p. 25-55.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. In: CURI, N. *et al.* (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p. 249-290.

_____. **Potencial de utilização das técnicas de agricultura de precisão na recuperação de fertilidade dos solos sob pastagens degradadas.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 8 p. (Boletim Técnico, 68).

CUNHA, J. F. *et al.* Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 145, p. 1-13, 2014.

DALCHIAVON, F. C. *et al.* Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

DELLAMEA, R. B. C. **Eficiência da adubação a taxa variável em áreas manejadas com agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83.

GRIFFIN, T. W.; LOWENBERG-DEBOER, J. Worldwide adoption and profitability of precision agriculture: implications for Brazil. **Revista de Política Agrícola**, v. 14, p. 20-38, 2005.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33.

LARK, R. M. Optimized spatial sampling of soil for estimation of the variogram by maximum likelihood. **Geoderma**, v. 105, p. 49-80, 2002.

LOURINI, S. H. **Manejo de adubação fosfatada com fertilizantes de eficiência aumentada**. 2025. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, *Campus* Rio Verde, Rio Verde, 2025.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2011.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, p. 83-92, 2002.

_____. Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais** [...]. Piracicaba: Esalq/USP, 2004. p. 2-3.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 839-847, 2006.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

NUNES, R. S. *et al.* Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 877-888, 2011.

PEREIRA, A. V. **Efeito da forma de coleta do solo na recomendação da adubação em agricultura de precisão.** 2020. Trabalho de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, *Campus* Rio Verde, Rio Verde, 2020.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991.

RESENDE, A. V. *et al.* Agricultura de precisão no Brasil: avanços e impactos no manejo e na conservação do solo, na sustentabilidade e na segurança alimentar. In: LEITE, L. F. C. *et al.* (ed.). **Agricultura conservacionista no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 468-488.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 151-160, 2001.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

SANA, R. S. *et al.* Produtividade do algodoeiro em função da variabilidade espacial de atributos do solo e adubação fosfatada no cerrado. In: BERNARDI, A. C. C. *et al.* (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 322-330.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

SWINTON, S. M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 11, n. 4, p. 439-446, 1998.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Potafos, 2002. 16 p. (Encarte Técnico, 97).

WERNER, V. *et al.* Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 658-663, 2007.

¹ Discente do Curso de Agronomia do Centro Universitário UniBRAS Rio Verde. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Engenheira Agrônoma, Mestre em Ciências Agrárias - Agronomia pelo Instituto Federal Goiano campus Rio Verde. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Engenheiro Agrônomo, Mestre em Olericultura pelo Instituto Federal Goiano campus Morrinhos e Docente do Curso do Centro Universitário UniBRAS, Rio Verde. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciências Agrárias - Agronomia pelo Instituto Federal Goiano campus Rio Verde e Docente do Curso de Agronomia do Centro Universitário UniBRAS Rio Verde. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Engenheira Agrônoma, Mestre em Bioenergia e Grãos pelo Instituto Federal Goiano campus Rio Verde e Docente do Curso de Agronomia do Centro Universitário UniBRAS Rio Verde. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)