

# Diferentes Métodos E Equipamentos De Amostragem De Solo Na Agricultura De Precisão: Uma Revisão

Augusto Alencar Tratsch Rossi

Graduando em Agronomia

UFSM - Unidade Santa Maria

Santa Maria – RS, Brasil

E-mail: [augustotr18@gmail.com](mailto:augustotr18@gmail.com)

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-5993-1450>

---

## Resumo

A amostragem de solo representa um dos pilares centrais da agricultura de precisão, pois fornece as informações necessárias para a compreensão da variabilidade espacial e para a definição de práticas de manejo mais eficientes. Contudo, a ausência de padronização metodológica, aliada à diversidade de equipamentos e estratégias disponíveis, ainda constitui um desafio para a confiabilidade e a comparabilidade dos resultados. Este estudo, de caráter qualitativo e baseado em revisão bibliográfica, teve como objetivo analisar criticamente os diferentes métodos e equipamentos de amostragem de solo utilizados na agricultura de precisão, destacando suas potencialidades, limitações e perspectivas de aplicação. Foram discutidos métodos tradicionais, como grades regulares, e estratégias modernas, como delineamentos adaptativos e zonas de manejo orientadas por sensores proximais, espectrorradiometria e imagens de sensoriamento remoto. Além disso, abordaram-se as implicações da densidade amostral, dos protocolos de penetrometria e da integração de plataformas digitais no processo de coleta. Os resultados da revisão evidenciam que, embora os métodos convencionais ainda sejam amplamente aplicados, a incorporação de tecnologias emergentes, como veículos aéreos não tripulados e redes de sensores sem fio, tende a ampliar a eficiência e a sustentabilidade das práticas agrícolas. Conclui-se que a consolidação da agricultura de precisão depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também da credibilidade institucional e da adoção de protocolos validados que assegurem a confiabilidade dos dados.

**Palavras-Chaves:** Agricultura de precisão; Amostragem de solo; Sensores proximais; Variabilidade espacial; Sustentabilidade.

Date of Submission: 12-08-2025

Date of Acceptance: 22-08-2025

---

## I. Introdução

A agricultura de precisão tem se consolidado como um dos principais caminhos para o aumento da produtividade agrícola de forma sustentável, ao integrar tecnologias que permitem compreender e manejar a variabilidade espacial do solo e das culturas. Nesse contexto, a amostragem de solo representa um dos pilares fundamentais, pois fornece as informações necessárias para diagnósticos consistentes de fertilidade e orienta a aplicação de insumos em taxas variáveis. A relevância dessa temática decorre do papel estratégico da amostragem na redução de custos de produção, no uso racional de fertilizantes e corretivos e na mitigação de impactos ambientais, justificando a necessidade de aprofundar estudos que sistematizem métodos e equipamentos disponíveis (Silva *et al.*, 2025).

Entretanto, ainda persiste uma problemática central: a escolha do método e do equipamento adequado de amostragem do solo não é trivial, visto que diferentes estratégias podem levar a resultados divergentes na interpretação da fertilidade e na formulação de recomendações. A literatura aponta que malhas amostrais muito amplas podem subestimar a variabilidade espacial, enquanto delineamentos excessivamente densos elevam custos e reduzem a viabilidade prática (Spliethoff *et al.*, 2020). Além disso, a incorporação de sensores proximais, espectrorradiômetros e plataformas de monitoramento remoto ainda carece de padronização metodológica e de protocolos de validação que assegurem comparabilidade entre estudos (Canal, 2021).

Essa problemática ganha relevância quando se considera que a falta de uniformidade nos protocolos de amostragem pode comprometer não apenas a eficiência da agricultura de precisão, mas também a credibilidade das recomendações junto aos produtores rurais. Em muitas situações, a adoção de práticas inovadoras depende da percepção de transparência e confiabilidade dos dados obtidos, o que exige esforços acadêmicos e técnicos no sentido de estabelecer diretrizes mais claras e metodologias de referência (Fadanelli, 2021). Assim, há uma

demanda crescente por revisões que organizem o conhecimento já produzido, identifiquem lacunas e apontem tendências futuras no uso de métodos e equipamentos de amostragem.

Outro ponto que justifica este estudo é a relação entre a qualidade da amostragem e a sustentabilidade agrícola. Ao garantir maior precisão na interpretação dos atributos do solo, reduzem-se desperdícios de insumos, aumenta-se a eficiência do uso da terra e minimizam-se riscos ambientais associados à lixiviação de nutrientes e contaminação de recursos hídricos (Machado *et al.*, 2019). Dessa forma, compreender os avanços recentes e os limites atuais das diferentes estratégias de amostragem é essencial não apenas para a prática agrícola, mas também para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas ao manejo sustentável dos recursos naturais.

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa é revisar e analisar criticamente os diferentes métodos e equipamentos de amostragem de solo aplicados à agricultura de precisão, destacando suas potencialidades, limitações e implicações práticas para a fertilidade do solo e o manejo sustentável.

## **II. Metodologia**

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo qualitativo de natureza exploratória, desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica sistemática e narrativa sobre métodos e equipamentos de amostragem de solo aplicados à agricultura de precisão. Esse delineamento foi escolhido pela sua capacidade de reunir, organizar e interpretar o conhecimento já produzido, possibilitando identificar diferentes abordagens metodológicas, avanços tecnológicos e limitações encontradas na prática agrícola (Gil, 2019).

A opção pelo enfoque qualitativo decorre da necessidade de compreender, de forma aprofundada, os contextos em que os métodos e equipamentos de amostragem de solo são aplicados, indo além da mensuração numérica e permitindo análises interpretativas sobre as contribuições relatadas na literatura científica. Tal perspectiva possibilita compreender a diversidade de técnicas empregadas, seus impactos na eficiência agrícola e os desafios relacionados à variabilidade espacial do solo (Minayo, 2012).

A revisão bibliográfica foi conduzida considerando a relevância do tema para a agricultura de precisão, uma vez que a qualidade da amostragem do solo influencia diretamente a interpretação de atributos químicos, físicos e biológicos. Segundo Lakatos e Marconi (2021), a revisão da literatura consiste em um processo sistemático de levantamento, seleção e análise crítica de materiais publicados, permitindo a consolidação de conhecimentos e a identificação de lacunas de pesquisa.

Para a construção do corpus desta pesquisa, foram selecionados trabalhos acadêmicos como artigos científicos, dissertações, teses e trabalhos apresentados em congressos, publicados entre 2018 e 2025. Esse recorte temporal foi definido de modo a privilegiar estudos atualizados, abrangendo os avanços tecnológicos recentes em sensoriamento remoto, geotecnologias, sensores de solo e sistemas de automação aplicados à amostragem (Pereira *et al.*, 2018).

Os critérios de inclusão envolveram: publicações disponíveis em texto completo, redigidas em português, inglês ou espanhol, que tratassem especificamente de métodos e equipamentos de amostragem de solo na agricultura de precisão. Foram excluídos capítulos de livros, textos opinativos, notícias e documentos não científicos, por não atenderem ao rigor acadêmico exigido em revisões desta natureza (Botelho; Cunha; Macedo, 2011).

O processo de busca e seleção dos trabalhos foi realizado em bases de dados reconhecidas no meio científico, como Scopus, Web of Science, SciELO, Google Scholar e periódicos especializados em Ciências Agrárias e Engenharia Agrícola. Essa escolha fundamenta-se na relevância das referidas plataformas na divulgação de estudos atualizados e na ampla cobertura de produções sobre agricultura de precisão e ciências do solo (Tranfield; Denyer; Smart, 2003).

Após o levantamento inicial, os títulos e resumos foram lidos e analisados criticamente, com o objetivo de verificar a pertinência em relação ao tema central do estudo. Posteriormente, os trabalhos selecionados foram lidos integralmente, permitindo identificar categorias temáticas relacionadas a estratégias de amostragem, equipamentos utilizados, limitações metodológicas e avanços tecnológicos (Sampaio; Mancini, 2007).

A análise dos dados seguiu os princípios da análise de conteúdo, método que possibilita a categorização das informações em unidades temáticas, visando interpretar os achados de forma sistemática e coerente. Esse procedimento foi adotado para garantir a consistência interpretativa da revisão e a identificação das principais contribuições científicas acerca da amostragem de solo na agricultura de precisão (Bardin, 2016).

Por se tratar de uma pesquisa de revisão bibliográfica, não houve a necessidade de submissão a Comitê de Ética em Pesquisa, visto que não se trabalhou com seres humanos ou experimentos diretos em campo. No entanto, foram observados princípios éticos relacionados à fidedignidade das fontes e à integridade acadêmica, respeitando os direitos autorais e realizando citações adequadas conforme as normas da ABNT (Silveira; Córdova, 2009).

Assim, a metodologia adotada assegura rigor científico à investigação, ao mesmo tempo em que garante uma abordagem abrangente sobre os diferentes métodos e equipamentos de amostragem do solo

empregados na agricultura de precisão. A revisão bibliográfica qualitativa, nesse sentido, contribui não apenas para a consolidação do conhecimento existente, mas também para a indicação de lacunas que possam orientar pesquisas futuras (Flick, 2020).

### **III. Fundamentação Teórica**

#### **Métodos de Amostragem de Solo na Agricultura de Precisão**

A agricultura de precisão tem transformado profundamente o manejo agrícola ao permitir decisões mais assertivas, especialmente no que diz respeito à fertilidade do solo. Nesse contexto, os métodos de amostragem de solo se tornaram ferramentas fundamentais, pois a qualidade das informações geradas depende diretamente da representatividade das amostras coletadas (Molin; Amaral; Colaço, 2015). O processo de amostragem busca captar a variabilidade espacial e temporal do solo, algo que não é homogêneo mesmo em pequenas áreas. A correta caracterização dessa variabilidade é essencial para definir a taxa de aplicação de insumos e garantir que os mapas de fertilidade expressem a realidade do campo (Silva; Vieira, 2019).

Entre os métodos mais utilizados destaca-se a amostragem em grade, que consiste em dividir a área em células de dimensões pré-definidas e coletar amostras em cada ponto. Esse método, apesar de mais custoso, permite uma melhor caracterização espacial, sendo amplamente empregado em propriedades agrícolas de médio e grande porte (Oliveira et al., 2020). Outra estratégia comum é a amostragem dirigida ou por zonas de manejo, que utiliza informações prévias, como mapas de produtividade, imagens de satélite e condutividade elétrica, para direcionar a coleta. Esse método reduz custos em comparação à grade regular e aumenta a eficiência da análise, pois concentra esforços em áreas de maior variabilidade (Machado *et al.*, 2019).

A amostragem sistemática também é aplicada, caracterizada pela coleta em intervalos fixos, normalmente em linhas ou transectos. Embora seja de implementação simples, pode apresentar limitações caso a variabilidade do solo não seja bem distribuída ao longo dos pontos de coleta (Moraes, 2018). Mais recentemente, têm sido propostas metodologias inteligentes e hierárquicas de zoneamento, que utilizam algoritmos de geoprocessamento e estatística espacial para identificar regiões homogêneas. Essa abordagem tem ganhado espaço pela sua capacidade de integrar múltiplas variáveis e gerar zonas mais consistentes para amostragem (Melo, 2024).

O avanço das tecnologias de geoprocessamento trouxe contribuições significativas para a definição de estratégias de amostragem. Ferramentas de geoestatística, como a krigagem e o semivariograma, possibilitam estimar valores em áreas não amostradas, reduzindo a necessidade de um grande número de pontos de coleta sem comprometer a precisão do diagnóstico (Oliveira et al., 2020). Um dos desafios encontrados na aplicação prática dos métodos é a densidade amostral. A definição do número ideal de pontos está relacionada ao equilíbrio entre precisão e custo, sendo este um fator decisivo para agricultores. Pesquisas indicam que uma maior densidade amostral melhora a qualidade do mapeamento, mas deve ser ajustada à realidade econômica da propriedade (Canal, 2021).

A representatividade da amostra é outro aspecto crucial. Estudos demonstram que pequenas variações na posição de coleta podem alterar significativamente os resultados, principalmente em solos heterogêneos. Assim, a padronização dos procedimentos de campo é determinante para a confiabilidade dos mapas (Lins; Silva et al., 2004). A integração da espectrometria e sensoriamento proximal vem sendo explorada como alternativa à amostragem convencional. Esses métodos permitem leituras rápidas e não destrutivas do solo, reduzindo custos e tempo de análise, além de possibilitar maior detalhamento espacial dos atributos (Tavares et al., 2018).

No Brasil, pesquisas demonstram que a espectrorradiometria tem avançado como ferramenta de suporte à agricultura de precisão, permitindo associar informações espectrais a atributos químicos e físicos do solo. Essa prática amplia as possibilidades de amostragem indireta e minimiza a necessidade de coletas excessivas em campo (Filippini-Alba *et al.*, 2019). Apesar das inovações, a amostragem tradicional ainda se mantém como a base do diagnóstico de fertilidade, especialmente pelo seu reconhecimento nos laboratórios de análise de solos. Entretanto, sua integração com tecnologias emergentes tem possibilitado resultados mais consistentes e detalhados (Silva; Silva-Mann, 2023).

Outro fator que merece destaque é a influência do sistema de cultivo sobre a variabilidade do solo. Áreas sob rotação de culturas, por exemplo, apresentam dinâmica diferenciada em relação a atributos químicos e físicos, exigindo estratégias específicas de amostragem para refletir adequadamente essas condições (Moraes, 2018). A escala da propriedade agrícola também impacta diretamente na escolha do método. Enquanto grandes áreas demandam técnicas mais automatizadas e baseadas em sensoriamento remoto, pequenas propriedades podem se beneficiar de métodos tradicionais combinados a ferramentas digitais acessíveis (Padilha, 2024).

Na prática agrícola, a decisão pelo método de amostragem está fortemente relacionada à finalidade do diagnóstico. Se o objetivo for um mapeamento de alta resolução, a grade amostral tende a ser mais indicada; já para intervenções rápidas, as zonas de manejo são mais eficientes em termos de custo-benefício (Machado *et al.*, 2019). Outro ponto recorrente nos estudos é a comparação entre métodos. Resultados mostram que a

amostragem em grade costuma apresentar maior detalhamento, mas a dirigida por zonas, quando bem delineada, pode alcançar resultados semelhantes com menor investimento (Oliveira et al., 2020).

A literatura recente reforça a importância da padronização metodológica para garantir a comparabilidade entre estudos e a consistência dos dados, sobretudo em pesquisas relacionadas ao mapeamento digital do solo. Essa padronização é fundamental para reduzir vieses de amostragem e possibilitar que resultados obtidos em diferentes regiões possam ser integrados em bancos de dados regionais e nacionais, ampliando a aplicabilidade científica. Além disso, constitui-se como base para subsidiar políticas públicas e estratégias de manejo agrícola sustentável, assegurando maior confiabilidade nas recomendações agrônômicas (Naka, 2019; McBratney et al., 2014; Melo, 2024; Oliveira et al., 2020).

Os métodos de amostragem de solo na agricultura de precisão devem ser compreendidos não apenas como ferramentas técnicas, mas como estratégias de gestão que impactam diretamente a sustentabilidade produtiva e econômica das propriedades. O aprimoramento constante dessas práticas é essencial para enfrentar os desafios da variabilidade espacial e promover uma agricultura mais eficiente e responsável (Fiorin et al., 2019).

### **Métodos de amostragem: grades, zonas e delineamentos adaptativos**

A escolha do método de amostragem de solo é um fator determinante para a qualidade dos dados em agricultura de precisão, pois influencia diretamente a capacidade de representar a variabilidade espacial dos atributos do solo. Ao longo dos anos, diferentes delineamentos têm sido aplicados, desde grades regulares até estratégias adaptativas guiadas por sensores e imagens, cada qual com vantagens e limitações (Valente et al., 2018).

O delineamento em grade regular, também conhecido como *grid sampling*, é um dos mais utilizados em pesquisas e aplicações comerciais. Consiste na distribuição sistemática de pontos de coleta em malhas de 0,5 a 2,0 ha, permitindo interpolar valores e gerar mapas de atributos do solo. Sua principal vantagem está na simplicidade e uniformidade da distribuição, o que facilita tanto o planejamento quanto a execução da coleta (Valente et al., 2018). Apesar de sua ampla aplicação, a grade regular apresenta limitações importantes. Em áreas com transições abruptas, a malha pode não captar contrastes relevantes, resultando em mapas suavizados que não representam a real heterogeneidade do solo. Além disso, em ambientes de baixa variabilidade, esse método pode gerar custos desnecessários, uma vez que a densidade de pontos excede as necessidades práticas do manejo (Moura et al., 2022).

Uma alternativa à grade regular é a amostragem baseada em zonas de manejo. Essa abordagem utiliza camadas auxiliares, como mapas de condutividade elétrica aparente (ECA), índices espectrais e informações topográficas, para identificar unidades homogêneas dentro da área. A partir dessas zonas, os pontos de coleta são concentrados em locais representativos, otimizando o uso de recursos e reduzindo custos (Martins, 2020).

Os mapas de condutividade elétrica aparente têm se mostrado particularmente eficientes na delimitação de zonas de manejo, já que apresentam correlação com atributos como textura, teor de argila e capacidade de retenção de água. Ao associar esse parâmetro a outras informações, como produtividade histórica e dados de relevo, torna-se possível construir zonas robustas para orientar a coleta (Corwin; Lesch, 2005; Martins, 2020). Além da ECA, camadas espectrais obtidas por sensores ópticos ou plataformas aéreas têm sido utilizadas para compor zonas de manejo. Índices de vegetação como NDVI e métricas derivadas de imagens RGB (ExG, GLI, TGI, VEG) ajudam a identificar estratos produtivos, que podem servir de base para definir pontos de amostragem direcionada (Naka, 2019; Silva; Elias; Rosário, 2022).

No entanto, esses índices devem ser interpretados com cautela, pois podem ser influenciados por fatores não relacionados diretamente ao solo, como o dossel da cultura, a variação de umidade ou o estresse fisiológico temporário das plantas. Dessa forma, recomenda-se sempre a validação em campo, combinando dados espectrais com análises laboratoriais para garantir consistência (Silva; Elias; Rosário, 2022).

Os delineamentos adaptativos representam uma evolução metodológica importante. Diferentemente das grades fixas ou zonas pré-definidas, esses delineamentos ajustam os pontos de coleta de acordo com a variabilidade observada em dados preliminares, como espectros de reflectância difusa no visível e infravermelho próximo (Vis-NIR). Esse tipo de abordagem busca capturar de forma mais eficiente os contrastes físico-químicos do solo (Canal, 2021).

A espectrometria difusa, em especial, tem possibilitado protocolos de amostragem mais dinâmicos. Ao gerar informações quase em tempo real sobre a composição do solo, auxilia na seleção de pontos representativos e reduz a necessidade de um número excessivo de amostras. Essa tecnologia tem sido aplicada em solos tropicais brasileiros, com resultados promissores na identificação de variabilidade espacial (Tavares et al., 2018). Em áreas irrigadas ou de terras baixas, onde a dinâmica hídrica e a presença de ambientes hidromórficos são marcantes, delineamentos orientados por camadas espectrais e sensores proximais têm mostrado grande eficiência. Essas ferramentas ajudam a identificar zonas críticas de salinização ou sodificação, fundamentais para manejo localizado de corretivos (Filippini-Alba; Miguel; Araujo, 2023).

Os delineamentos adaptativos também se beneficiam da integração de diferentes fontes de informação. A sobreposição de mapas espectrais, topográficos e de produtividade histórica permite orientar a coleta para pontos de maior relevância, garantindo que a variabilidade seja melhor representada com menor número de amostras (Melo, 2024). Outro aspecto importante é a utilização de delineamentos hierárquicos, em que a área é inicialmente amostrada em baixa densidade e, em seguida, pontos adicionais são coletados em locais identificados como críticos ou de transição. Essa estratégia aumenta a eficiência, evitando gastos excessivos em regiões homogêneas (Melo, 2024).

A literatura recente também enfatiza a importância de protocolos de validação cruzada nos delineamentos adaptativos. Ao comparar os resultados de diferentes métodos de interpolação e delineamento, os pesquisadores conseguem avaliar a robustez do mapeamento, assegurando maior confiabilidade dos dados. Essa prática tem sido indicada como fundamental para reduzir incertezas e evitar distorções em mapas de atributos do solo (Canal, 2021; Brus et al., 2019; Libohova et al., 2019; McBratney; Mendonça-Santos; Minasny, 2003).

Na agricultura de precisão comercial, a decisão entre usar grades, zonas ou delineamentos adaptativos muitas vezes depende da relação custo-benefício. Em propriedades de grande escala, a grade pode ser inviável pelo alto custo, enquanto zonas e delineamentos adaptativos oferecem maior racionalidade econômica sem perder representatividade (Martins, 2020). Por outro lado, em áreas menores ou em experimentos científicos, a grade regular ainda é preferida pela sua padronização, o que facilita comparações entre diferentes estudos e regiões. Essa característica é essencial quando o objetivo é construir bancos de dados regionais e nacionais sobre atributos de solo (Naka, 2019).

A tendência atual é a integração de métodos, de modo que grades regulares possam ser utilizadas como base para calibração de modelos, enquanto zonas de manejo e delineamentos adaptativos complementam a coleta em pontos estratégicos. Esse arranjo híbrido tem se mostrado eficiente para unir padronização científica e eficiência operacional (Valente *et al.*, 2018; Martins, 2020). Dessa forma, os diferentes métodos de amostragem apresentam complementaridades que, quando bem exploradas, podem gerar mapas de alta resolução e recomendações mais precisas. O desafio está em adaptar essas metodologias às realidades de campo, garantindo a sustentabilidade econômica e ambiental da agricultura de precisão (Silva, 2025).

Portanto, grades, zonas e delineamentos adaptativos não devem ser vistos como concorrentes, mas como estratégias complementares. A escolha entre eles depende do objetivo, do contexto produtivo e da disponibilidade de recursos, sendo a integração metodológica o caminho mais promissor para avanços futuros no mapeamento e manejo do solo (Melo, 2024).

### **Densidade amostral, penetrometria e efeitos de malha**

A densidade amostral representa um dos fatores críticos no delineamento de experimentos de agricultura de precisão. Quando a malha de amostragem é excessivamente espaçada, ocorre aumento significativo do erro de interpolação, com distorções na representação espacial de atributos químicos e físicos do solo. Essas distorções comprometem tanto a geração de mapas temáticos quanto as recomendações de manejo localizadas, sobretudo em áreas de elevada variabilidade espacial (Splithoff *et al.*, 2020).

O tamanho da malha deve ser compatível com a escala da variabilidade do atributo estudado. Estudos têm demonstrado que atributos de rápida flutuação, como fósforo e potássio, requerem malhas mais densas que aqueles com maior estabilidade espacial, como a matéria orgânica. Dessa forma, a escolha inadequada da densidade pode implicar tanto em custos desnecessários quanto em decisões agronômicas equivocadas (Brus; Heuvelink; Marchant, 2019).

A interpolação espacial, amplamente utilizada na agricultura de precisão, é altamente sensível ao espaçamento amostral. Métodos como krigagem ordinária e regressões espaciais dependem de modelos de semivariograma que refletem a estrutura de dependência espacial dos dados. Grades mal dimensionadas podem gerar modelos semivariográficos inconsistentes e mapas pouco representativos, comprometendo o processo de recomendação a taxas variáveis (Libohova *et al.*, 2019).

No contexto da penetrometria, a densidade da malha também exerce influência direta. A resistência mecânica do solo à penetração apresenta alta variabilidade, associada a fatores como teor de água, textura e densidade do solo. Assim, um número insuficiente de pontos compromete a detecção de áreas compactadas, levando a sub ou superestimação da necessidade de subsolagem (Rauber *et al.*, 2024). Além da densidade, a padronização dos protocolos de coleta é essencial. A resistência do solo à penetração é altamente dependente do estado de umidade no momento da avaliação. A realização de leituras em condições muito secas tende a superestimar a compactação, enquanto leituras em solos excessivamente úmidos podem mascarar problemas estruturais. Dessa forma, recomenda-se que campanhas de penetrometria sejam realizadas em condições intermediárias de umidade (Grillo *et al.*, 2024).

Outro ponto crítico é o histórico de tráfego de máquinas agrícolas. Passagens repetitivas de tratores e colhedoras aumentam a densidade do solo e elevam temporariamente os valores de resistência à penetração. Caso as coletas sejam realizadas logo após operações mecanizadas, há risco de superdiagnóstico da

compactação. Por isso, recomenda-se estabelecer períodos de repouso do solo antes da realização das campanhas (Reichert *et al.*, 2016). Os efeitos da densidade amostral também se manifestam na comparabilidade temporal de dados. Em projetos de monitoramento, quando a malha inicial é pouco densa, há menor robustez para comparar séries históricas e detectar tendências de compactação ou mudanças na fertilidade. Por essa razão, a padronização da malha e a repetição dos pontos de coleta ao longo dos anos são fundamentais (Corá; Beraldo, 2006).

No caso da penetrometria automatizada, sensores acoplados a máquinas ou sistemas embarcados oferecem maior resolução espacial. Entretanto, ainda assim é necessário validar os resultados por meio de amostragens manuais pontuais, a fim de corrigir eventuais desvios gerados por variações de umidade ou velocidade de deslocamento dos sensores (Molin; Tavares; Amaral, 2017). A escolha da densidade de malha deve, portanto, equilibrar custo e precisão. Malhas extremamente densas, como de 0,25 ha, elevam sobremaneira os custos operacionais, sem necessariamente gerar benefícios proporcionais à tomada de decisão. Por outro lado, malhas muito abertas, como 4 ha, são incapazes de captar a heterogeneidade de ambientes agrícolas complexos. Nesse sentido, a faixa recomendada de 0,5 a 2 ha tem se mostrado adequada para a maioria dos atributos (Valente *et al.*, 2018).

O impacto da densidade amostral na interpolação também é mediado pelo método estatístico empregado. Modelos geoestatísticos tendem a demandar maior densidade que métodos determinísticos, como o inverso da distância ponderada (IDW), para alcançar níveis similares de acurácia. Contudo, os geoestatísticos oferecem maior robustez em áreas com transições abruptas, justificando a adoção de malhas mais finas em cenários desse tipo (Goovaerts, 1997). Em solos tropicais, a variabilidade de atributos como a resistência mecânica é particularmente elevada, devido ao intenso intemperismo e à grande diversidade de classes texturais. Isso reforça a necessidade de malhas mais densas nesses ambientes, principalmente em áreas de Cerrado e Amazônia, onde a expansão agrícola pressiona o uso sustentável do solo (Tavares *et al.*, 2018).

Outro desafio é a definição de malhas adaptativas. Nessas abordagens, regiões mais heterogêneas recebem maior densidade de pontos, enquanto áreas homogêneas são representadas por menos coletas. Essa estratégia permite otimizar o custo sem perder resolução onde ela é mais necessária. Entretanto, a adoção exige camadas auxiliares de alta qualidade, como condutividade elétrica aparente e índices espectrais, para definir corretamente as zonas (Martins, 2020). A penetrometria, quando integrada a outras ferramentas de diagnóstico, amplia o potencial de detecção de camadas compactadas. Ao combinar mapas de resistência à penetração com dados de rendimento e condutividade elétrica, é possível refinar as zonas de manejo e definir intervenções localizadas de preparo de solo, reduzindo impactos ambientais e custos (Filippini-Alba; Miguel; Araujo, 2023).

Um aspecto frequentemente negligenciado é a influência das operações de coleta sobre a própria estrutura do solo. A retirada de amostras indeformadas, por exemplo, pode alterar temporariamente a densidade local, interferindo em medições subsequentes de resistência à penetração. Por isso, recomenda-se espaçar as atividades de coleta ou adotar métodos não destrutivos de diagnóstico (Moraes, 2018). O erro associado à densidade amostral também impacta o zoneamento de recomendação. Quando as malhas não são representativas, o delineamento de zonas de manejo pode ser enviesado, resultando em aplicações incorretas de fertilizantes ou corretivos. Isso reforça a necessidade de calibração contínua entre os mapas gerados e a resposta das culturas (Padilha, 2024).

Adicionalmente, a malha de amostragem exerce efeitos na confiabilidade de bancos de dados regionais. Estudos de fertilidade do solo em larga escala, utilizados para formulação de políticas públicas, dependem de séries históricas comparáveis. Uma padronização mínima de malhas e protocolos é, portanto, indispensável para consolidar informações representativas em escalas maiores (Naka, 2019). Por fim, é importante destacar que a decisão sobre densidade e padrão de malha deve considerar não apenas critérios estatísticos, mas também operacionais e econômicos. A integração de técnicas tradicionais com sensores de alta resolução, drones e plataformas digitais desponta como alternativa promissora para conciliar custo, precisão e sustentabilidade (Ali *et al.*, 2025).

Assim, a densidade amostral, a penetrometria e os efeitos da malha configuram um tripé metodológico que, quando bem manejado, garante confiabilidade ao mapeamento do solo e eficiência ao manejo localizado. A adoção de práticas padronizadas, validadas cientificamente e ajustadas à realidade operacional do campo, constitui o caminho mais seguro para consolidar a agricultura de precisão no Brasil e no mundo (Machado *et al.*, 2019).

### **Equipamentos: sondas, coletores, sensores proximais e plataformas**

A coleta convencional de solo permanece como a base da agricultura de precisão, utilizando principalmente o trado holandês e sondas manuais. Esses equipamentos permitem a retirada de subamostras em profundidades padronizadas, geralmente 0–10 cm e 0–20 cm, garantindo rastreabilidade com auxílio de receptores GNSS. Apesar da simplicidade, trata-se de uma abordagem robusta, capaz de assegurar homogeneidade entre pontos de coleta quando bem conduzida (Machado *et al.*, 2019). Com a mecanização das

operações de campo, surgiram os coletores acoplados a quadriciclos e tratores, que aumentam a eficiência e reduzem a variabilidade introduzida pelo operador humano. Esses sistemas possibilitam maior volume de amostras em menor tempo, além de padronizar a profundidade e a quantidade de solo coletado. Tal padronização é fundamental para a comparabilidade temporal de dados e para a confiabilidade dos mapas gerados (Costa *et al.*, 2021).

Os sensores proximais, em especial os de condutividade elétrica aparente (ECa), têm revolucionado o mapeamento da variabilidade do solo. Tanto os sistemas baseados em contato (coultter) quanto os indutivos (EM) permitem a obtenção de malhas densas de informação espacial a baixo custo. No entanto, exigem calibração local, uma vez que a resposta da ECa varia conforme textura, umidade e teor de sais do solo (Martins, 2020). Outro grupo importante de sensores proximais são os espectrorradiômetros de campo, que operam em faixas NIR/vis-NIR. Esses equipamentos permitem inferir propriedades químicas do solo, como carbono orgânico e fósforo disponível, a partir da resposta espectral. Contudo, seu uso em campo demanda coleta simultânea de amostras para validação, garantindo que os modelos calibrados reflitam a realidade local (Filippini-Alba; Miguel; Araujo, 2023).

A integração entre sensores proximais e amostragem convencional tem permitido otimizar custos. Em muitos casos, zonas de manejo derivadas das camadas de ECa ou espectrorradiometria são utilizadas para direcionar a coleta química, reduzindo o número de pontos sem comprometer a qualidade da informação. Essa abordagem híbrida vem ganhando destaque em áreas de grande extensão, como lavouras de soja e milho no Cerrado brasileiro (Helguera; Lollato; Patrignani, 2022).

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) e aeronaves remotamente pilotadas (ARP) também se consolidou como prática complementar. Equipados com câmeras RGB e multispectrais, esses sistemas permitem a identificação de padrões de vegetação e resposta ao manejo. Assim, são amplamente utilizados para estratificar áreas de amostragem e validar a eficácia de práticas agrícolas, como aplicação de corretivos e fertilizantes (Assis; Pederiva, 2023). Além disso, imagens multiespectrais obtidas por drones contribuem para a detecção de zonas críticas de estresse hídrico ou nutricional. A combinação de índices como NDVI e GNDVI com dados de solo auxilia a definir pontos de coleta mais representativos, especialmente em áreas heterogêneas. Isso fortalece o caráter adaptativo dos delineamentos amostrais (Terra, 2020).

As redes de sensores sem fio (RSSF) emergem como inovação para monitoramento contínuo de variáveis edáficas. Esses sistemas, compostos por sensores instalados em diferentes profundidades, enviam dados em tempo real sobre temperatura, umidade e condutividade elétrica. Apesar do alto potencial, ainda enfrentam desafios relacionados a manutenção e calibração em campo (Helfer *et al.*, 2019). Modelos recentes, como o sistema Tellus, têm explorado a integração de séries temporais de sensores em solo com algoritmos de inferência de fertilidade. Essa abordagem permite reduzir a frequência de coletas físicas, tornando o monitoramento mais dinâmico e menos oneroso. No entanto, a dependência de calibração local continua sendo um fator limitante para ampla adoção (Silva, 2023).

A aplicação de plataformas digitais integradas aos sensores de campo representa outro avanço relevante. Softwares de gestão agrícola já permitem visualizar, em tempo real, os dados coletados por sondas, drones e RSSF, fornecendo relatórios automáticos e mapas de recomendação. Essa convergência tecnológica favorece a tomada de decisão baseada em evidências (Suto, 2022).

Em ambientes florestais, a lógica de eficiência amostral também é um tema central. O método de Bitterlich, baseado em probabilidade proporcional à área basal das árvores, demonstra como princípios de amostragem podem ser adaptados para contextos complexos. Essa experiência oferece paralelos conceituais para a estratificação de áreas agrícolas heterogêneas (Muendane; Macôo; Matusse, 2022).

A comparação entre ferramentas manuais, sensores proximais e plataformas digitais mostra que cada uma tem vantagens e limitações. Enquanto o trado manual é acessível e confiável, os sensores oferecem escalabilidade e resolução. A escolha, portanto, deve ser guiada pelo objetivo da análise, disponibilidade de recursos e nível de heterogeneidade do sistema produtivo (Machado *et al.*, 2019).

Outro aspecto a considerar é a necessidade de protocolos de calibração cruzada entre os diferentes equipamentos. Sem essa padronização, os dados coletados por sondas, drones e sensores podem apresentar inconsistências, comprometendo a integração e a interpretação final. Isso reforça a relevância de práticas de validação contínua em projetos de agricultura de precisão (Martins, 2020). Em síntese, a diversidade de equipamentos disponíveis para coleta e monitoramento do solo reflete o avanço tecnológico da agricultura de precisão. A complementaridade entre sondas, coletores mecanizados, sensores proximais, plataformas aéreas e redes sem fio amplia as possibilidades de diagnóstico, desde que acompanhada de protocolos de calibração, validação e gestão integrada dos dados. Essa integração é a chave para transformar a grande quantidade de informação em conhecimento aplicável ao manejo sustentável do solo (Filippini-Alba; Miguel; Araujo, 2023)

## **Geoestatística, interpolação e qualidade dos mapas**

A geoestatística consolidou-se como ferramenta essencial na agricultura de precisão, pois possibilita a análise de variáveis espaciais com rigor científico e a geração de mapas que representam fielmente a variabilidade dos atributos do solo (McBratney; Mendonça-Santos; Minasny, 2003). O princípio central dessa abordagem é considerar a dependência espacial entre os dados, permitindo interpolar valores em áreas não amostradas e, assim, otimizar o planejamento agrícola (Libohova *et al.*, 2019).

A interpolação é uma etapa crucial nesse processo, sendo utilizada para transformar dados pontuais de amostragem em superfícies contínuas de informação. Entre os métodos mais aplicados estão o krigagem ordinária, o inverso da distância ponderada (IDW) e o splines, cada qual com vantagens e limitações que impactam a qualidade dos mapas (Helmann Nunes *et al.*, 2018). A escolha do método adequado deve considerar a natureza da variável e o grau de variabilidade espacial encontrado no campo (Brus; Heuvelink; Marchant, 2019).

A krigagem, por exemplo, é reconhecida por incorporar não apenas a distância entre pontos, mas também a estrutura de correlação espacial descrita pelo semivariograma, garantindo mapas mais robustos (McBratney; Mendonça-Santos; Minasny, 2003). No entanto, sua aplicação demanda maior rigor estatístico e conhecimento técnico para ajustes adequados de modelos, o que nem sempre está disponível em pequenas propriedades (Martini; Teixeira, 2024). O IDW, por sua vez, é amplamente utilizado pela simplicidade de implementação, porém pode gerar suavizações excessivas ou distorções em áreas de transição abrupta (Valente *et al.*, 2018). Embora seja útil em cenários de baixa complexidade, tende a apresentar limitações quando aplicado a atributos com alta variabilidade em pequena escala (Spliethoff *et al.*, 2020).

Os métodos de interpolação devem ser acompanhados de indicadores de qualidade, como validação cruzada e análise de erros médios, para assegurar confiabilidade nos mapas gerados. Essa prática reduz a subjetividade do processo e garante que os resultados possam ser utilizados em recomendações de manejo de fertilidade do solo (Canal, 2021). Além disso, protocolos de validação permitem comparar diferentes estratégias e selecionar aquela que apresenta maior acurácia no contexto local (Camapum *et al.*, 2025).

A qualidade dos mapas está diretamente relacionada à densidade amostral e ao desenho da malha. Grades muito espaçadas podem comprometer a capacidade de interpolação, especialmente em solos heterogêneos, enquanto grades densas elevam custos operacionais (Spliethoff *et al.*, 2020). Nesse sentido, o uso de zonas de manejo associadas a sensores proximais tem sido uma alternativa eficiente para equilibrar custo e representatividade (Martins, 2020). A integração de dados espectrais e proximais no processo geoestatístico também tem ampliado a precisão das estimativas, fornecendo camadas auxiliares para interpolação de atributos químicos e físicos (Filippini-Alba; Miguel; Araujo, 2023). Essas abordagens possibilitam maior detalhamento dos mapas e reduzem a necessidade de amostras químicas extensivas (Tavares *et al.*, 2018).

Outro aspecto importante é a modelagem da incerteza nos mapas produzidos. A geoestatística permite quantificar a confiança das estimativas, fornecendo informações críticas para tomadas de decisão em recomendações de insumos e manejo localizado (Oliveira *et al.*, 2020). Essa abordagem é particularmente relevante em sistemas de alta variabilidade espacial, onde decisões erradas podem gerar prejuízos econômicos e ambientais (Bernardi *et al.*, 2019). Além disso, o avanço das tecnologias computacionais tem facilitado a aplicação de algoritmos mais complexos e a integração de grandes bases de dados. Modelos computacionais como o Tellus, que predizem fertilidade com base em múltiplas fontes de dados, exemplificam como a geoestatística pode ser potencializada por sistemas inteligentes (Helfer *et al.*, 2019).

O rigor geoestatístico também é indispensável para que os mapas sejam úteis em contextos de pesquisa e formulação de políticas públicas. Trabalhos que negligenciam essa etapa acabam comprometendo a comparabilidade entre regiões e a construção de bancos de dados consistentes (Oliveira *et al.*, 2020). A padronização metodológica, portanto, representa uma condição básica para a qualidade e usabilidade das informações (Camapum *et al.*, 2025). Em contrapartida, a aplicação prática dos métodos geoestatísticos ainda encontra barreiras em propriedades de pequeno porte devido à carência de infraestrutura e assistência técnica. Para esses contextos, soluções de acesso livre e ferramentas simplificadas vêm sendo desenvolvidas para democratizar o uso da geoestatística (Martini; Teixeira, 2024).

A análise crítica da literatura também mostra que a interpolação não deve ser encarada apenas como uma técnica matemática, mas como um processo contextualizado às características edafoclimáticas de cada região (Gomes *et al.*, 2021). Isso reforça a importância da calibração local e da integração entre diferentes métodos de coleta e interpolação (Machado *et al.*, 2019). Ao considerar esses aspectos, percebe-se que a geoestatística cumpre papel estratégico na agricultura de precisão, unindo rigor técnico à aplicabilidade prática. O desafio está em equilibrar custo, representatividade e qualidade dos mapas, de modo que atendam tanto às demandas científicas quanto às necessidades produtivas (Bonani; Nunes; Fernandes, 2024).

Portanto, a interpolação geoestatística deve ser entendida como etapa central na construção de diagnósticos de solo e recomendações de manejo. Somente com o uso responsável e criterioso dessas ferramentas será possível transformar dados brutos em informações espacialmente coerentes e úteis para a sustentabilidade da agricultura (Fadanelli, 2021). Assim, a literatura converge para a necessidade de consolidar



práticas metodológicas que unam a precisão da geoestatística à eficiência operacional, garantindo que os mapas sejam instrumentos confiáveis de tomada de decisão na agricultura de precisão (Caregnato; Alves; Sampaio, 2019).

#### **Da amostragem à recomendação e adoção**

A transição entre a coleta de amostras de solo e a elaboração de recomendações agronômicas constitui um elo central da agricultura de precisão. Não basta apenas gerar dados, é necessário transformá-los em informações compreensíveis e aplicáveis ao manejo, respeitando a variabilidade espacial e temporal do ambiente agrícola (Libohova *et al.*, 2019). O processo inicia-se com a consolidação dos resultados laboratoriais, que devem ser ajustados a partir de calibrações regionais e curvas de resposta a nutrientes, evitando extrapolações inadequadas. A padronização de metodologias e interpretações é essencial para garantir comparabilidade entre áreas e consistência nas recomendações (Naka, 2019).

A elaboração de mapas de fertilidade e de zonas de manejo deve ser acompanhada por critérios técnicos claros. Isso envolve a escolha adequada de escalas cartográficas, a validação cruzada de dados interpolados e a integração com informações de produtividade e histórico de cultivo (Canal, 2021). Na etapa seguinte, os mapas tornam-se a base para a formulação de recomendações de calagem, adubação e manejo específico por talhão ou zona. Essa abordagem busca otimizar o uso de insumos, reduzir custos e minimizar impactos ambientais, reforçando a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Oliveira *et al.*, 2020).

Contudo, para que a recomendação seja efetiva, deve haver alinhamento com a realidade socioeconômica do agricultor. Recomendações excessivamente complexas ou de alto custo tendem a ter baixa taxa de adoção, mesmo que tecnicamente robustas (Bernardi *et al.*, 2019). Nesse sentido, a comunicação entre técnicos, pesquisadores e produtores é um fator determinante. O conhecimento científico precisa ser traduzido em orientações práticas, de fácil entendimento e aplicáveis no cotidiano da produção agrícola (Camapum *et al.*, 2025).

A literatura mostra que a adoção das recomendações depende tanto da confiabilidade dos dados quanto da credibilidade das instituições envolvidas. Quando o produtor percebe transparência e resultados consistentes, tende a aceitar mais facilmente práticas inovadoras (Fadanelli, 2021; Bernardi *et al.*, 2019; Libohova *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020).

Outro aspecto relevante é a integração das informações de solo com dados de sensores remotos e plataformas digitais. Ferramentas de agricultura digital permitem que o produtor acompanhe, em tempo real, a aplicação das recomendações e os resultados no campo (Helguera; Lollato; Patrignani, 2022). Além disso, o monitoramento contínuo garante a retroalimentação do sistema, possibilitando ajustes finos em cada safra. A adoção de ciclos de avaliação e atualização periódica fortalece a confiança no processo e contribui para ganhos de produtividade sustentáveis (Machado *et al.*, 2019).

Apesar dos avanços tecnológicos, a literatura evidencia que muitos agricultores ainda enfrentam barreiras na implementação das recomendações derivadas da agricultura de precisão. Essas barreiras incluem custos de equipamentos, acesso limitado à assistência técnica e dificuldades em interpretar relatórios técnicos (Martini; Teixeira, 2024). Estratégias de extensão rural, capacitação e demonstrações práticas em unidades de referência têm se mostrado eficazes para reduzir essas barreiras e estimular a adoção das práticas recomendadas (Bonani; Nunes; Fernandes, 2024). Outro ponto crítico é a necessidade de validação econômica das recomendações. Mapas e diagnósticos técnicos só terão impacto prático quando estiverem associados a análises de custo-benefício que demonstrem claramente os retornos esperados (Valente *et al.*, 2018).

O avanço de plataformas digitais interativas, como aplicativos móveis e painéis online, tem facilitado essa integração, permitindo que o produtor visualize suas áreas, compare resultados e acompanhe a evolução do manejo (Suto, 2022; Spliethoff *et al.*, 2020). Assim, o caminho que vai da amostragem à adoção das recomendações não é linear, mas exige diálogo constante entre ciência, técnica e prática agrícola. Esse processo precisa ser entendido como um ciclo de melhoria contínua, em que dados coletados no solo retornam ao campo em forma de decisões cada vez mais ajustadas (Caregnato; Alves; Sampaio, 2019).

Nesse sentido, a literatura converge para a ideia de que a efetividade da agricultura de precisão depende não apenas da qualidade técnica das análises, mas também da capacidade de transformar informações em recomendações aplicáveis e economicamente viáveis. A adoção, nesse contexto, é o resultado de um processo de construção coletiva entre pesquisadores, técnicos e agricultores (Oliveira *et al.*, 2020).

#### **IV. Considerações Finais**

A análise desenvolvida neste estudo permitiu compreender que a amostragem de solo continua sendo um dos maiores desafios da agricultura de precisão. A problemática central identificada refere-se à ausência de padronização metodológica e à diversidade de equipamentos disponíveis, fatores que dificultam a comparabilidade entre estudos e comprometem a consistência das recomendações agronômicas. Embora os

avanços tecnológicos tenham ampliado as possibilidades de coleta e monitoramento, ainda persiste o dilema entre custos, confiabilidade dos dados e aplicabilidade prática no campo.

Os diferentes métodos analisados, desde grades regulares até delineamentos adaptativos e zonas de manejo, demonstraram que não existe uma estratégia universal, mas sim alternativas que devem ser escolhidas em função da variabilidade espacial, do objetivo do diagnóstico e das condições econômicas e ambientais da propriedade. Nesse sentido, a adoção de sensores proximais, plataformas de sensoriamento remoto e redes de monitoramento digital representam um avanço promissor, mas exigem protocolos de validação robustos para garantir maior segurança nas interpretações.

Outro aspecto relevante refere-se à credibilidade das instituições e à confiança do produtor rural. Ficou evidente que a adoção das recomendações de manejo depende não apenas da qualidade técnica dos dados, mas também da clareza, da transparência e da consistência das orientações transmitidas. Quando o agricultor percebe que os resultados são confiáveis e traduzidos em ganhos econômicos e ambientais, tende a incorporar práticas inovadoras com maior facilidade.

As implicações deste estudo reforçam a importância da pesquisa científica na construção de diretrizes mais consistentes para a amostragem de solo. A integração de métodos tradicionais com tecnologias digitais e sensoriais abre caminhos para práticas mais sustentáveis, contribuindo para a racionalização do uso de insumos, para a preservação dos recursos naturais e para a consolidação de uma agricultura de precisão de caráter inclusivo e ambientalmente responsável.

Este artigo cumpriu seu objetivo ao revisar e analisar criticamente os diferentes métodos e equipamentos de amostragem de solo aplicados à agricultura de precisão. Ressalta-se, entretanto, que a evolução dessa área dependerá da intensificação de estudos comparativos, da validação de novos equipamentos e da aproximação entre pesquisa, extensão e produtores. Somente assim será possível transformar o potencial tecnológico em práticas de manejo mais eficientes, sustentáveis e alinhadas às demandas atuais da agricultura.

### Referências

- [1] Amashiro, Fernando Koji; Silva, Otávio Augusto Paganotti Messias Da. Desenvolvimento De Uma Aplicação Utilizando Rssf Para A Agricultura De Precisão. 2021. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Engenharia De Computação) – Faculdade De Ciências Exatas E Tecnologias, Universidade Federal Da Grande Dourados, Dourados, Ms, 2021.
- [2] Antonini, Rafael Cippolat Et Al. Adoção E Uso Da Agricultura De Precisão Na Região Das Missões Do Rio Grande Do Sul. *Holos*, V. 4, P. 106-121, 2018.
- [3] Assis, Guilherme José Tonetti; Pederiva, Willian Camargo. Desenvolvimento De Projeto E Protótipo De Um Vant Para Aplicação Em Atividade De Pulverização. 2023. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2023.
- [4] Bernardi, Ac De C. Et Al. Otimização Do Uso De Insumos Em Sistema De Integração Lavoura-Pecuária-Floresta Com Ferramentas De Agricultura De Precisão. *Revista Brasileira De Engenharia De Biosistemas*, V. 13, N. 4, P. 290-300, 2019.
- [5] Brus, D. J.; Heuvelink, G. B. M.; Marchant, B. P. Monitoring And Sampling Approaches For The Global Soil Information System. *Geoderma Regional*, V. 16, P. E00199, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.Geodrs.2019.E00199>.
- [6] Bonani, Jener Augusto; Nunes, Deivid Marques; Fernandes, Nilson José. Redução De Custos E Desperdício Através Da Análise De Dados Estatísticos Na Agricultura De Precisão. *Brazilian Journal Of Production Engineering*, V. 10, N. 5, P. 63-72, 2024.
- [7] Camapum, Yasmim Martins Et Al. Variabilidade Espacial De Atributos Químicos Do Solo Em Diferentes Métodos De Posicionamento. *Revista Mirante (Issn 1981-4089)*, V. 18, N. 1, P. 110-129, 2025.
- [8] Canal, Natália Gonçalves. Sugestão De Amostragem Para Análise De Atributos Físicos Do Solo Orientada Pelo Mapeamento Com Espectrometria Difusa. 2021. Tese (Doutorado Em Ciências) – Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”, Universidade De São Paulo, Piracicaba, 2021.
- [9] Cardoso, Bruno De Moraes Et Al. Avaliação Da Precisão Dos Equipamentos Gns, Verificando A Discrepância Das Coordenadas, Utilizando A Carta Controle. *Revista Brasileira De Geomática*, V. 9, N. 2, P. 120-140, 2021.
- [10] Caregnato, Lucas Henrique; Alves, Luiz Felipe Da Silva; Sampaio, Vanderlei Da Silva. Agricultura De Precisão: Um Estudo Sobre Ferramentas E Técnicas Inovadoras No Agronegócio. *Revista Scientia Alpha*, V. 1, N. 01, 2019.
- [11] De Oliveira, Rayssa Camargo Et Al. Agricultura De Precisão Na Análise De Solo Em Cana-De-Açúcar: Um Comparativo Anual. *Observatório De La Economía Latinoamericana*, V. 22, N. 7, P. E5556-E5556, 2024.
- [12] Fadanelli, Samuel Citon. Protocolo De Agricultura De Precisão Como Ferramenta De Sustentabilidade. 2021. 51 F. Dissertação (Mestrado Em Desenvolvimento Rural Sustentável) - Universidade Estadual Do Oeste Do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.
- [13] Filippini-Alba, José Maria; Miguel, Pablo; Araujo, Mélori Maria Fernandes De. Espectrorradiometria Em Agricultura De Precisão Nas Terras Baixas Do Rio Grande Do Sul. In: *Agricultura De Precisão: Um Novo Olhar Na Era Digital*. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2023. P. 37-50. Doi: <https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0>.
- [14] Franqueto, Rafaela; Blau, João Paulo. Viabilidade Econômica Da Implantação De Agricultura De Precisão Na Cultura Da Soja. *Revista Técnico-Científica*, N. 35, 2024.
- [15] Freitas, Clayton Rossi; Rodrigues, Ricardo Antônio Da Silva. Levantamento Topográfico: Necessidade Do Serviço. *Paramétrica*, V. 16, N. 1, 2024.
- [16] Gimenez, Leandro Maria; Molin, Jose Paulo. Agricultura De Precisão Sob A Perspectiva De Seus Diversos Atores. *Informações Agronômicas*, V. 162, P. 15-19, 2018.
- [17] Gomes, Alexandre Dias Et Al. Variabilidade Espacial De Atributos Químicos Do Solo E Produtividade Da Soja. *Anais Da Academia Pernambucana De Ciência Agronômica*, V. 18, N. 2, 2021.
- [18] Grillo, Vinícius Et Al. Alteração Da Densidade Do Solo Por Operações Agrícolas Mecanizadas: Interação Entre Ambiente E Equipamentos. *Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research*, V. 7, N. 2, P. E68965-E68965, 2024.
- [19] Helfer, Gilson Et Al. Tellus: Um Modelo Computacional Para A Predição Da Fertilidade Do Solo Na Agricultura De Precisão. In: *Simpósio Brasileiro De Computação Ubíqua E Pervasiva (Sbcup)*. Sbc, 2019.

- [20] Helguera, M. P. G.; Lollato, R.; Patrignani, A. Winter Wheat Light Interception Measured With A Quantum Sensor And Images. *Agronomy Journal*, V. 114, N. 4, P. 2334-2341, 2022. <https://doi.org/10.1002/aggj.2.21169>.
- [21] Helmann Nunes, Emanuele Et Al. Métodos De Interpolações De Dados Obtidos Por Sensores De Agricultura De Precisão. *Nativa*, V. 6, N. 6, 2018.
- [22] Holanda, Marco Aurélio Calixto Ribeiro; De Albuquerque Soares, Willames. Estudo Da Transferência De Calor Em Solos Do Nordeste Brasileiro. *Brazilian Journal Of Development*, V. 6, N. 7, P. 49095-49104, 2020.
- [23] Libohova, Z.; Wiegand, C.; Waltenberg, S.; Miller, D. M. Et Al. Spatial Sampling For Soil Mapping Using Multiple Strategies And Validation With Legacy Soil Data. *Soil Science Society Of America Journal*, V. 83, N. 6, P. 1701-1714, 2019. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.12.0475>.
- [24] Machado, Paulo Roberto; Pés, Luciano Zucuni; Amaral, Lúcio De Paula; Fiorin, Jackson Ernani; Amado, Telmo Jorge Carneiro. Gestão Da Variabilidade Espacial De Atributos Químicos Do Solo Com Base Na Amostragem E Taxa Variável De Fertilizantes E Corretivos Para A Cultura Da Soja. 2019. Dissertação (Mestrado Em Agricultura De Precisão) – Universidade Federal De Santa Maria, Colégio Politécnico Da Ufsm, Santa Maria, 2019.
- [25] Martini, Luiz Carlos Pittol; Teixeira, Monique Souza. Geotecnologias De Acesso Livre Aplicáveis À Agricultura Familiar De Precisão. *Revista Brasileira De Geomática*, V. 12, N. 2, P. 197-218, 2024.
- [26] Martins, Victor De Oliveira. Caracterização Da Disponibilidade Hídrica Por Meio Da Condutividade Elétrica Aparente Do Solo. 2020. Tese (Doutorado Em Engenharia De Sistemas Agrícolas) – Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”, Universidade De São Paulo, Piracicaba, 2020.
- [27] Mcbratney, A. B.; Mendonça-Santos, M. L.; Minasny, B. On Digital Soil Mapping. *Geoderma*, V. 117, N. 1-2, P. 3-52, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- [28] Melo, Derlei Dias. Zoneamento Hierárquico Para Amostragem Espacial E Mapeamento Digital De Atributos Do Solo. 2024. Tese (Doutorado Em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual De Campinas (Unicamp), Campinas, Sp., 2024.
- [29] Moraes, Philippe Braga. Técnicas De Agricultura De Precisão Em Área De Cultivo De Soja Em Várzea Sistemizada Com Rotação De Culturas, A Fim De Avaliar A Variabilidade Dos Atributos Químicos Do Solo. 2018. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal De Pelotas, Pelotas, 2018.
- [30] Morro, Fernanda Gonçalves Et Al. Avaliação De Agrotóxicos Em Amostras De Solo E De Morango De Sistemas De Produção Agrícola Convencional E Agroecológico. 2021. Dissertação (Mestrado Em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2021.
- [31] Moura, Jaqueline De Et Al. Validação Do Método De Geoprocessamento Na Estimativa De Perdas De Solo Por Erosão Laminar, Em Pequenas Propriedades Rurais, Pela Comparação Com O Método A Campo. 2022. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2022.
- [32] Muendane, Nélia Helena Raúl; Macôo, Severino José; Matusse, Emídio José. Avaliação Da Eficiência Do Método De Amostragem De Bitterlich Em Plantação De Eucalyptus Sp.-Ifloma. 2022. Tese (Doutorado Em Ciências Florestais) – Instituto Superior Politécnico De Gaza, Chókwè, 2022.
- [33] Naka, Jessica Tiossi. Correlação Do Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada Com Parâmetros Químicos Do Solo Para Aplicações Em Agricultura De Precisão. 2019. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2019.
- [34] Nichellatti, Lucas Gabriel Et Al. Caracterização Espacial Da Acidez Do Solo Em Agricultura De Precisão. *Anais Da Feira Do Conhecimento Tecnológico E Científico*, N. 25, 2024.
- [35] Oliveira, Agda Loureiro Gonçalves Et Al. Influência Do Rigor Geoestatístico Na Qualidade Do Mapeamento Em Agricultura De Precisão. 2020. Tese (Doutorado Em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual De Campinas, Faculdade De Engenharia Agrícola, Campinas, 2020.
- [36] Padilha, Patrícia De Oliveira. Avaliação Da Eficiência Da Aplicação De Corretivos E Fertilidade Utilizando Taxa Variável Para Intervenções Na Homogeneidade Da Fertilidade Do Solo Em Uma Propriedade No Município De São Luiz Gonzaga-Rs. 2024. Dissertação (Mestrado Em Agricultura De Precisão) – Universidade Federal De Santa Maria, Colégio Politécnico Da Ufsm, Santa Maria, 2024.
- [37] Pereira, Adriano Vilela. Efeito Da Forma De Coleta Do Solo Na Recomendação Da Adubação Em Agricultura De Precisão. 2020. 29 F. Trabalho De Conclusão De Curso (Graduação) – Bacharelado Em Agronomia. Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, Rio Verde – Go, 2020.
- [38] Rauber, L. R.; Mallman, M. S.; Reinert, D. J.; Pires, F. S.; Vargas, F. D.; Gubiani, P. I. Automatic Measurement Of Water Infiltration Into The Soil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, V. 48, P. E0230078, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230078>.
- [39] Silva, Alessandro Alvarenga Pereira Da. Caracterização E Modelagem Da Compactação Do Solo Em Área De Produção De Grãos. 2025. Tese (Doutorado Em Engenharia Agrícola) – Universidade De São Paulo, Piracicaba, 2025.
- [40] Silva, Frederico Víctor Dos Santos. Rede De Sensores Sem Fio Aplicada À Agricultura Para Geração De Mapas Temáticos. 2023. Trabalho De Conclusão De Curso (Bacharelado Em Engenharia De Computação) – Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Curitiba, 2023.
- [41] Silva, Matheus Henrique; Elias, Adão Robson; Rosário, Leticia Laura. Análise Da Cultura Da Soja A Partir De Índices De Vegetação (Exg–Gli–Tgi–Veg) Advindos De Imagens Rgb Obtidas Com Arp. *Revista Brasileira De Geomática*, V. 10, N. 2, P. 140-154, 2022.
- [42] Silva, Wanderson De Vasconcelos Rodrigues Da; Silva-Mann, Renata. Transformações Na Agricultura: Uma Abordagem Crítica Sobre A Agricultura De Precisão. *Iosr Journal Of Business And Management (Iosr-Jbm)*, V. 25, N. 12, Ser. 5, P. 37-50, Dez. 2023. <https://doi.org/10.9790/487x-2512053750>.
- [43] Suto, J. A Novel Plug-In Board For Remote Insect Monitoring. *Agriculture*, V. 12, N. 11, P. 1897, 2022. <https://doi.org/10.3390/Agriculture12111897>.
- [44] Spliethoff, Jhonatan Et Al. Implicação De Grades Amostras Na Determinação Da Resistência Do Solo À Penetração E Indicação De Manejo. *Research, Society And Development*, V. 9, N. 9, P. E790997871-E790997871, 2020.
- [45] Tavares, Tiago R.; Eitelwein, Mateus T.; Trevisan, Rodrigo G.; Maldaner, Leonardo F.; Molin, José P. Sensoriamento Proximal Do Solo: O Estado Da Arte Em Solos Tropicais Brasileiros. In: Congresso Latinoamericano De Agricultura De Precisión – Clap2018, 1., 2018, Santiago, Chile. *Memórias... Santiago*, 2018.
- [46] Terra, Fábio Pedrotti. Desenvolvimento De Um Protótipo De Baixo Custo Para Automação De Pulverizadores Agrícolas. 2020. Dissertação (Mestrado Em Engenharia De Computação) – Universidade Federal Do Rio Grande (Furg), Rio Grande, 2020.
- [47] Valente, I. Q. M. Et Al. Eficiência Da Amostragem Em Grade Para A Caracterização Da Disponibilidade De Potássio No Solo. In: Congresso Brasileiro De Agricultura De Precisão–Conbap. 2018.