

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ANÁLISE DE SOLO EM ÁREA DE REFORMA DE CANAVIAL NA REGIÃO DE
JABOTICABAL/SP**

RÔMULO LUCILIO VENTURINI

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Dr. Jean Lucas Pereira Oliveira

JABOTICABAL

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

ANÁLISE DE SOLO EM ÁREA DE REFORMA DE CANAVIAL NA REGIÃO DE
JABOTICABAL/SP

RÔMULO LUCILIO VENTURINI

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Dr. Jean Lucas Pereira Oliveira

Trabalho de conclusão de curso apresentado como
requisito parcial à obtenção do título de Engenharia
Agrônoma

JABOTICABAL

2025

V469a

Venturini, Romulo Lucilio

Análise de solo em área de reforma de canavial na região de
Jaboticabal - SP / Romulo Lucilio Venturini. -- Jaboticabal, 2025
50 p. : mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia
Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Jean Lucas Pereira Oliveira

1. Agricultura Mapas. 2. Agricultura de precisão. 3. Solos
Produtividade. 4. Rotação de cultivos. 5. Cana-de-açúcar. I. Título.

RÔMULO LUCÍLIO VENTURINI

**ANÁLISE DE SOLO EM ÁREA DE REFORMA DE CANAVIAL NA REGIÃO DE
JABOTICABAL - SP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônoma.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Co-orientador: Dr. Jean Lucas Pereira Oliveira

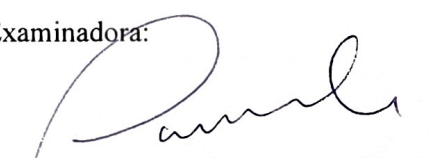
Área de Concentração: Máquinas e Mecanização Agrícola

Data da defesa: 23/09/2025

(X) Aprovado

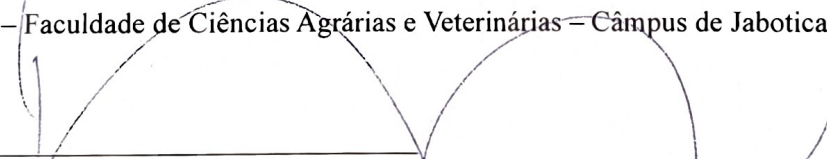
() Reprovado

Banca Examinadora:



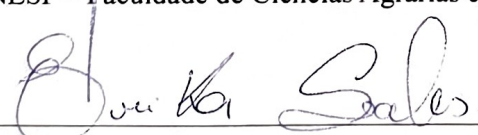
Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal



Prof. Dr. Afonso Lopes

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal

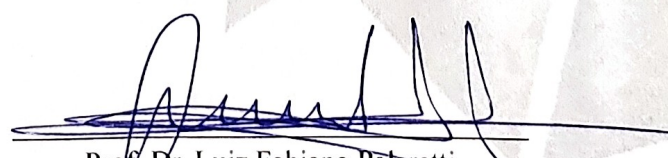


Engenheira Agrônoma Erika Cristina Gomes Sales

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

23 / 09 / 2025 * ad referendum



Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Nilce e Augusto, pelo amor incondicional, pelos valores transmitidos e pelo apoio em todos os momentos da minha vida. Dedico também ao meu irmão Danilo, pelo companheirismo e incentivo constantes, que sempre me motivaram a seguir em frente.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Nilce e Augusto, pelo exemplo de dedicação, trabalho e honestidade, que foram fundamentais em toda a minha formação pessoal e profissional. Ao meu irmão Danilo, pela amizade, confiança e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador e professor, Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani pela amizade, paciência, pelas orientações, pelo apoio desde os primeiros anos da graduação e pelo incentivo na construção deste trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Jean Lucas Pereira Oliveira pela amizade, por todos os ensinamentos sobre a pesquisa acadêmica, por dividir momentos de trabalhos no laboratório e por todo o apoio e suporte na elaboração desse trabalho.

Ao meu amigo, Gustavo (Pandinha), que foi muito mais do que um apoio acadêmico durante esta jornada. Sua ajuda, companheirismo e incentivo foram decisivos para que este trabalho se tornasse realidade. Agradeço não apenas pela orientação e pelos conhecimentos compartilhados, mas, sobretudo, pela amizade verdadeira, pela motivação nos momentos difíceis e por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1 RESUMO.....	VII
2 SUMMARY	VIII
3 INTRODUÇÃO	9
3.1. Agricultura convencional e limitações no manejo do solo	9
3.1.1 Impactos da variabilidade na produtividade e nos custos.....	9
3.1.2 Agricultura de precisão como alternativa tecnológica.....	10
3.1.3 Zonas de manejo como conceito de otimização.....	10
3.1.4 Importância da geoestatística no estudo da variabilidade	11
3.1.5 Benefícios do manejo localizado e perspectivas	11
3.1.6 Objetivos do trabalho.....	11
3.2 Cana-de-açúcar e reforma de canaviais.....	12
3.2.1 Métodos de preparo de solo em áreas de reforma.....	13
3.3 Variabilidade espacial do solo	15
3.3.1 Geoestatística e ferramentas de análise	18
3.3.2 Agricultura de precisão e zonas de manejo.....	20
3.3.3 Estudos de caso em diferentes culturas (soja e cana)	22
3.3.4 Limitações, desafios e perspectivas futuras	24
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Área experimental	26
4.2 Amostragem de solo e análises laboratoriais	27
4.3 Geoprocessamento e interpolação.....	28
4.4 Dados de produtividade.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Distribuição espacial da produtividade	30
5.2 Produtividade x macronutrientes	32
5.2.1 Fósforo (P-resina).....	33
5.2.2 Potássio (K^+).....	35
5.2.3 Cálcio (Ca^{2+}).....	36
5.2.4 Magnésio (Mg^{2+}).....	38
5.2.5 Matéria orgânica (MO).....	39

5.3 Produtividade x saturação por bases (V%).....	41
5.4 Produtividade x textura (argila).....	42
5.5 Síntese dos resultados e discussão	44
6 CONCLUSÃO	46
7 REFERÊNCIAS	46

2025

ANÁLISE DE SOLO EM ÁREA DE REFORMA DE CANAVIAL NA REGIÃO DE JABOTICABAL/SP

1 RESUMO

A reforma de canaviais é um momento estratégico para avaliar e corrigir a fertilidade do solo, garantindo a sustentabilidade da produção agrícola. O presente trabalho teve como objetivo apresentar os resultados sobre a relação entre atributos químicos e físicos do solo e a produtividade agrícola em áreas de reforma de canavial cultivadas com soja e cana-de-açúcar na região de Jaboticabal/SP, utilizando mapas temáticos como ferramenta de apoio à interpretação. Foram analisados os atributos fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), matéria orgânica (MO), saturação por bases (V%) e teor de argila, interpolados pelo método IDW (Inverse Distance Weighting). Os resultados mostraram que a produtividade apresenta forte variabilidade espacial, associada principalmente às diferenças nos teores de fósforo e potássio, enquanto cálcio e magnésio foram observados em níveis adequados em quase toda a área. A matéria orgânica apresentou predominância de valores baixos a médios, indicando necessidade de práticas conservacionistas, e a textura do solo, homogênea e de classe média, reforçou a dependência do manejo da fertilidade química para alcançar altos rendimentos. Conclui-se que a relação entre fertilidade do solo e produtividade, associada à visualização espacial por meio de mapas, constitui ferramenta importante para orientar práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis em sistemas de reforma de canavial.

Palavras-chave: agricultura de precisão; fertilidade do solo; variabilidade espacial; cana-de-açúcar; soja.

2025

ANALYSIS OF SOIL IN A SUGARCANE FIELD REFORM AREA IN THE REGION OF JABOTICABAL/SP

2 SUMMARY

Sugarcane field reform is a strategic moment to evaluate and correct soil fertility, ensuring the sustainability of agricultural production. The aim of this study was to show the results on the relationship between soil chemical and physical attributes and crop yield in sugarcane reform areas cultivated with soybean and sugarcane in the region of Jaboticabal, São Paulo State, Brazil, using thematic maps as a tool to support interpretation. The analyzed attributes were phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), soil organic matter (SOM), base saturation (V%) and clay content, interpolated by the IDW (Inverse Distance Weighting) method. Results showed that yield presents strong spatial variability, mainly associated with differences in phosphorus and potassium contents, while calcium and magnesium were observed at adequate levels in almost the entire area. Soil organic matter was predominantly low to medium, indicating the need for conservation practices, and soil texture, homogeneous and of medium class, reinforced the dependence on fertility management to achieve high yields. It is concluded that the relation between soil fertility and productivity, associated with spatial visualization through maps, is an important tool to guide more efficient and sustainable management practices in sugarcane reform systems.

Keywords: precision agriculture; soil fertility; spatial variability; sugarcane; soybean.

3 INTRODUÇÃO

3.1 Agricultura convencional e limitações no manejo do solo

A agricultura convencional baseia-se no manejo homogêneo do solo, realizado em área total e a partir de valores médios dos atributos avaliados. No entanto, o solo é resultado de interações complexas em seu processo de formação, somadas aos efeitos do manejo adotado e da cultura implementada, sobretudo nas camadas superficiais, onde há maior vulnerabilidade (VIEIRA, 2000; COELHO, 2005).

Essas interações geram variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos, físicos e biológicos, o que significa que áreas pedologicamente semelhantes podem apresentar diferentes níveis de variabilidade em seus atributos, enquanto áreas distintas podem exibir padrões semelhantes. Consequentemente, a produtividade agrícola não é uniforme, podendo um mesmo talhão apresentar regiões com maior ou menor desempenho produtivo (SIQUEIRA et al., 2008).

3.1.1 Impactos da variabilidade na produtividade e nos custos de produção

O manejo tradicional, portanto, não assegura a correta disponibilidade de recursos em cada localidade, podendo resultar em aplicação excessiva ou insuficiente de insumos. Isso implica custos de produção mal alocados, queda de performance das culturas e subaproveitamento dos recursos naturais disponíveis, já que os fatores determinantes da produtividade variam no espaço e no tempo (CORÁ et al., 2004; RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

3.1.2 Agricultura de Precisão como alternativa tecnológica

Nesse contexto, a adoção da Agricultura de Precisão (AP) surge como alternativa tecnológica capaz de permitir a gestão mais assertiva da produção agrícola, considerando a variabilidade espacial e temporal dos fatores limitantes de produtividade (COELHO, 2005; MULLA; SCHEPERS, 1997). O manejo regionalizado possibilita avaliar a heterogeneidade do ambiente produtivo, levando em conta informações pontuais do solo e da cultura, otimizando o uso de recursos, aumentando a produtividade, reduzindo custos e promovendo maior sustentabilidade ambiental (COELHO, 2005).

3.1.3 Zonas de manejo como ferramenta de otimização

No contexto da Agricultura de Precisão, o conceito de zonas de manejo (ZMs) tem sido amplamente discutido como uma estratégia de otimização, permitindo ajustar práticas de cultivo à variabilidade espacial do solo. Uma zona de manejo pode ser definida como uma sub-região do campo que apresenta combinação semelhante de fatores limitantes de produtividade e qualidade, possibilitando a aplicação mais uniforme e eficiente de insumos (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011).

Para sua definição, diferentes atributos podem ser utilizados, como fertilidade do solo, condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração, índices de vegetação e imagens de satélite (CORÁ et al., 2004; SIQUEIRA et al., 2008). Embora este trabalho não tenha realizado a delimitação prática de zonas de manejo, a revisão da literatura sobre o tema e a análise dos mapas temáticos de atributos químicos e físicos do solo permitem compreender como esses fatores constituem a base para futuras estratégias de segmentação e manejo diferenciado.

3.1.4 Importância da geoestatística no estudo da variabilidade

Nesse processo, a geoestatística desempenha papel essencial, pois permite interpretar a variabilidade natural dos atributos em estudo, considerando a dependência espacial dos dados dentro do intervalo de amostragem (RIBEIRO JÚNIOR, 1995; SOUZA et al., 2010). Essa abordagem possibilita detectar e quantificar a distribuição espacial dos atributos, uma vez que estes apresentam correlação espacial em determinada área, sendo o conhecimento dessas dependências fundamental para compreender a influência do manejo do solo sobre a produtividade das culturas (CORÁ et al., 2004; FARACO et al., 2008).

3.1.5 Benefícios do manejo localizado e perspectivas

A associação entre ferramentas geoestatísticas, compreensão da variabilidade espacial e uso de tecnologias de aplicação localizada permite manejar a variabilidade do solo de forma racionalizada, otimizando o uso de sementes, fertilizantes, corretivos e defensivos. Tal estratégia agrega valor à produção, aumenta a eficiência do sistema produtivo e reduz impactos ambientais, atendendo tanto à necessidade de maior produtividade agrícola quanto à conservação dos recursos naturais (COELHO, 2005; VIEIRA, 2000).

3.1.6 Objetivo do trabalho

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi apresentar os resultados sobre a relação entre atributos químicos e físicos do solo e a produtividade agrícola, com foco em áreas de reforma de canaviais cultivados com soja e cana-de-açúcar na região de

Jaboticabal/SP, utilizando mapas temáticos interpolados para discutir a fertilidade do solo e sua influência na variabilidade produtiva.

3.2 Cana-de-açúcar e reforma de canaviais

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, com destaque para a região Centro-Sul, responsável por mais de 70% da produção nacional (PRADO; VITTI, 2006). Além da produção de açúcar e etanol, a cultura apresenta relevância estratégica para a geração de energia renovável e para a sustentabilidade ambiental.

A produtividade da cana, entretanto, tende a declinar após alguns cortes, em razão de fatores como compactação do solo, esgotamento de nutrientes, incidência de pragas e doenças, e redução da longevidade dos colmos (PRADO; VITTI, 2006). Por isso, o processo de reforma de canaviais é prática essencial para manter a viabilidade econômica da cultura. A reforma geralmente ocorre entre o quinto e o sétimo corte, quando a rebrota não apresenta mais desempenho satisfatório (MONTEIRO, 2012).

O sucesso da reforma está diretamente ligado à qualidade do preparo do solo, que influencia o desenvolvimento radicular, a disponibilidade de água e nutrientes, além da estrutura física do perfil (PRADO; VITTI, 2006; MONTEIRO, 2012). Práticas como subsolagem, escarificação e correção da fertilidade visam restabelecer condições adequadas de aeração, infiltração e aproveitamento dos insumos.

Estudos apontam que o entendimento dos ambientes de produção é essencial para orientar tanto o preparo do solo quanto a escolha de variedades adaptadas. Monteiro (2012), ao utilizar modelos agrometeorológicos, demonstrou que a classificação de ambientes baseada em clima, solo e disponibilidade hídrica permite prever

produtividades potenciais e atingíveis da cana, auxiliando o planejamento agrícola. Da mesma forma, Prado e Vitti (2006) ressaltam que a variabilidade dos solos da região Centro-Sul, em termos químicos e físico-hídricos, exige estratégias de manejo diferenciadas para maximizar a produtividade. Portanto, a reforma de canaviais deve ser encarada não apenas como renovação do cultivo, mas como oportunidade de incorporar técnicas modernas de agricultura de precisão. O mapeamento da variabilidade espacial, a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes e o uso de indicadores de qualidade do solo são práticas que podem tornar o processo mais eficiente e sustentável.

3.2.1 Métodos de preparo de solo em áreas de reforma de canavial

O preparo do solo é uma das etapas mais determinantes para o sucesso da reforma de canaviais, pois afeta diretamente a emergência da cultura, o desenvolvimento radicular, a infiltração e retenção de água e a disponibilidade de nutrientes. Na região Centro-Sul do Brasil, os canaviais são tradicionalmente reformados após o quinto a sétimo corte, quando a produtividade declina de forma significativa. Nesse momento, a qualidade do preparo do solo exerce papel fundamental na recuperação do potencial produtivo, sendo necessário adotar estratégias que conciliem eficiência agronômica, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica (PRADO; VITTI, 2006).

O sistema convencional de preparo de solo caracteriza-se pelo revolvimento intenso, com operações como aração e gradagens sucessivas. Essa prática favorece o controle de plantas daninhas e a incorporação de corretivos e fertilizantes, mas apresenta desvantagens importantes, como a fragmentação excessiva dos agregados, a redução da matéria orgânica e o aumento da suscetibilidade à erosão. Além disso, em áreas

declivosas, a mobilização intensiva pode comprometer a conservação do solo e da água, elevando os riscos ambientais (COELHO, 2005).

Como alternativa, o preparo reduzido ou mínimo tem se destacado em reformas de canaviais. Nesse sistema, busca-se diminuir a intensidade das operações mecânicas, utilizando práticas como a escarificação e a subsolagem pontual, que promovem a descompactação em profundidade sem comprometer a estrutura superficial. Esse manejo preserva melhor a cobertura do solo, reduz a erosão, mantém maior estabilidade estrutural e pode reduzir custos operacionais, já que envolve menor número de operações com maquinário (SOUZA et al., 2010).

Outra tendência observada nos últimos anos é a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto associado ao uso de culturas de rotação em áreas de reforma de canaviais. Nessas situações, culturas como a soja são utilizadas na entressafra, aproveitando-se da palhada para proteger a superfície do solo, reduzir a amplitude térmica e hídrica, aumentar o aporte de matéria orgânica e favorecer a ciclagem de nutrientes. Estudos demonstram que a manutenção da palhada contribui para maior resiliência do sistema produtivo, além de otimizar o aproveitamento da água de chuva e reduzir perdas por escoamento superficial (SIQUEIRA et al., 2008).

A escolha do método de preparo do solo deve estar alinhada ao princípio da agricultura de precisão, que leva em consideração a variabilidade espacial das áreas agrícolas. O mapeamento de atributos do solo, como fertilidade, condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração e índices de vegetação, permite aplicar corretivos e realizar operações mecânicas de forma localizada, otimizando recursos e aumentando a eficiência do manejo. Nesse sentido, o preparo do solo em canaviais tende a deixar de ser homogêneo, passando a ser conduzido de forma regionalizada, com base em zonas

de manejo específicas para cada situação, o que contribui para o aumento da produtividade e para a sustentabilidade do sistema (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011).

3.3 Variabilidade espacial do solo

O solo é um corpo natural heterogêneo, formado a partir da ação conjunta de fatores de origem geológica, climática, biológica e antrópica. Essa complexidade confere variabilidade aos atributos físicos, químicos e biológicos, que se expressa em diferentes escalas espaciais e temporais (VIEIRA, 2000). Tal variabilidade é um dos principais desafios para a agricultura, pois implica que áreas aparentemente semelhantes podem apresentar características contrastantes, exigindo manejos diferenciados para alcançar maior eficiência produtiva.

A agricultura convencional, ao tratar o solo como homogêneo, ignora essas diferenças, aplicando insumos de forma uniforme em toda a área. Isso resulta em riscos de aplicação excessiva ou insuficiente, desperdício de recursos e impactos ambientais. Já a agricultura de precisão reconhece a variabilidade espacial e busca quantificá-la, transformando-a em informação para subsidiar o manejo localizado (COELHO, 2005).

Os atributos físicos do solo, como densidade, porosidade, umidade e resistência mecânica à penetração, são particularmente relevantes na determinação do crescimento radicular e, conseqüentemente, da produtividade das culturas (SIQUEIRA et al., 2008). A densidade do solo, por exemplo, quando excessiva, limita o desenvolvimento das raízes e restringe a infiltração de água, sendo fortemente associada à compactação em áreas de tráfego intenso de máquinas agrícolas. A porosidade total está diretamente ligada à capacidade de armazenamento de água e à difusão de gases, enquanto a

variabilidade da umidade reflete tanto as características físicas quanto os processos hidrológicos locais.

Estudos têm demonstrado que a variabilidade dos atributos físicos ocorre mesmo em áreas de pequena extensão. Siqueira et al. (2008), avaliando diferentes métodos de amostragem em um Latossolo Vermelho eutroférico, verificaram que a densidade do solo medida pelo método do anel volumétrico apresentou o menor coeficiente de variação (7,13%) e o menor efeito pepita, indicando maior precisão na representação espacial desse atributo. Já a umidade apresentou maior variabilidade, especialmente quando obtida por métodos indiretos, como a reflectometria no domínio do tempo (TDR), reforçando a importância de selecionar metodologias adequadas de coleta.

Os atributos químicos do solo também apresentam grande heterogeneidade espacial, em função de processos de formação, práticas de manejo, aplicação localizada de fertilizantes e mobilidade diferenciada dos nutrientes. Estudos apontam que propriedades como pH, fósforo disponível, matéria orgânica e micronutrientes apresentam elevada variabilidade, o que dificulta o uso de médias amostrais como referência para recomendações de adubação. Coelho (2005) destaca que a análise geoestatística é fundamental para mapear essa variabilidade, fornecendo subsídios para recomendações mais precisas de calagem e adubação em taxa variável.

A compreensão da variabilidade espacial se fortaleceu com o desenvolvimento da geoestatística, uma área estatística voltada ao estudo de variáveis regionalizadas, isto é, atributos que variam no espaço de forma contínua e cuja correlação depende da distância entre pontos amostrais (RIBEIRO JÚNIOR, 1995). Entre as principais ferramentas, destaca-se o semivariograma, que descreve a dependência espacial de uma variável a partir da distância que separa as amostras. Os parâmetros derivados do semivariograma

– efeito pepita, patamar e alcance – permitem identificar a magnitude da variabilidade não explicada pela amostragem, o grau de dependência espacial e a dimensão das manchas de variabilidade. Quando associados à técnica de krigagem, esses modelos possibilitam interpolar valores para locais não amostrados, permitindo a construção de mapas temáticos dos atributos do solo (FARACO et al., 2008).

A seleção de modelos de variabilidade espacial é outra etapa crítica. Faraco et al. (2008), avaliando atributos físicos do solo e produtividade da soja em um Latossolo Vermelho, utilizaram diferentes métodos de ajuste (mínimos quadrados ordinários, ponderados e máxima verossimilhança) e concluíram que a validação cruzada foi o critério mais eficaz para a escolha do modelo semivariográfico mais adequado. O uso dessa ferramenta aumentou a precisão dos mapas de atributos, demonstrando que a variabilidade espacial não pode ser tratada como aleatória, mas sim como componente essencial da estrutura dos dados.

Além da análise univariada de atributos, a variabilidade espacial pode ser explorada em abordagem multivariada. Isso é particularmente importante em sistemas agrícolas complexos, onde múltiplos fatores interagem simultaneamente. Técnicas como a análise de componentes principais e algoritmos de agrupamento, têm sido aplicados com sucesso no delineamento de zonas de manejo, integrando atributos do solo, produtividade e índices de vegetação. Esses métodos reforçam a necessidade de considerar a variabilidade como elemento chave para o planejamento agrícola de médio e longo prazo. Portanto, o estudo da variabilidade espacial do solo, aliado à aplicação da geoestatística e de métodos multivariados, constitui ferramenta essencial para o manejo diferenciado em canaviais. O reconhecimento e a modelagem dessas diferenças

permitem não apenas reduzir custos e otimizar o uso de insumos, mas também preservar o ambiente, promovendo maior sustentabilidade ao sistema produtivo.

3.3.1 Geoestatística e ferramentas de análise

A geoestatística consolidou-se como a principal ferramenta para quantificar e interpretar a variabilidade espacial de atributos do solo. Diferentemente da estatística clássica, que pressupõe independência entre as observações, a geoestatística parte do princípio de que valores próximos no espaço tendem a ser mais semelhantes do que valores distantes, caracterizando a dependência espacial das variáveis (RIBEIRO JÚNIOR, 1995; VIEIRA, 2000). Esse enfoque é essencial em estudos agronômicos, nos quais a heterogeneidade do solo e do ambiente produtivo exerce influência direta sobre o desempenho das culturas.

O primeiro passo em uma análise geoestatística é a elaboração do semivariograma, que representa graficamente a variância das diferenças entre pares de amostras em função da distância que as separa. Os principais parâmetros derivados do semivariograma são: o efeito pepita (C_0), que corresponde à variabilidade não explicada pela amostragem ou a erros de medida; o patamar ($C_0 + C_1$), que expressa a variância total do atributo em estudo; e o alcance (a), que indica a distância máxima de correlação espacial, ou seja, o tamanho médio das manchas de variabilidade (CRESSIE, 1991; RIBEIRO JÚNIOR, 1995).

Com base nesses parâmetros, é possível identificar a intensidade da dependência espacial. Valores elevados do efeito pepita em relação ao patamar indicam maior variabilidade aleatória ou não detectada, enquanto valores baixos sugerem forte estrutura espacial. Siqueira et al. (2008) demonstraram, por exemplo, que atributos como

densidade do solo e porosidade tendem a apresentar dependência espacial moderada a forte, enquanto a umidade pode exibir maior descontinuidade em função de variações microambientais.

Após o ajuste do semivariograma a modelos teóricos – como esférico, exponencial e gaussiano – os dados podem ser interpolados utilizando técnicas de krigagem. A krigagem é considerada o método de interpolação mais eficiente, pois fornece estimativas não tendenciosas e com variância mínima para pontos não amostrados. Além disso, permite gerar mapas temáticos que representam a distribuição espacial de atributos do solo, facilitando a visualização da variabilidade e a definição de zonas de manejo (VIEIRA, 2000; OLIVEIRA; FURLANI, 2023).

A escolha do modelo de semivariograma é um aspecto crítico do processo. Faraco et al. (2008), avaliando diferentes critérios de ajuste, concluíram que a validação cruzada é o método mais adequado para selecionar o modelo que melhor representa a variabilidade espacial dos dados. Essa abordagem consiste em retirar temporariamente uma amostra do conjunto, estimar seu valor com base nas demais e comparar o valor estimado com o observado. Esse processo é repetido para todas as amostras, fornecendo indicadores de erro que permitem avaliar a qualidade do ajuste.

Além da análise univariada, a geoestatística pode ser combinada a métodos multivariados, como a análise de componentes principais (PCA), para reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a interpretação. Essa integração é particularmente útil quando se busca identificar padrões complexos envolvendo múltiplos atributos do solo e variáveis associadas, como índices de vegetação ou produtividade. O uso de algoritmos de agrupamento exemplifica essa evolução metodológica, permitindo o delineamento de zonas de manejo a partir da integração de diferentes camadas de informação espacial.

Outro aspecto importante é a escalabilidade das análises. Enquanto experimentos clássicos de campo podem utilizar malhas de 10 a 100 metros, imagens de sensoriamento remoto e sensores de condutividade elétrica permitem ampliar a escala de observação e aumentar a densidade amostral. Essa integração entre geoestatística e tecnologias de coleta de dados em alta resolução amplia o potencial da agricultura de precisão, tornando-a mais acessível e eficiente.

Assim, a geoestatística e suas ferramentas de análise constituem um alicerce conceitual e metodológico indispensável para a agricultura moderna. Ao permitir a modelagem da variabilidade espacial e a geração de mapas de atributos do solo, ela fornece a base científica para a aplicação localizada de insumos, para o manejo racional dos recursos naturais e para o aumento sustentável da produtividade agrícola.

3.3.2 Agricultura de precisão e zonas de manejo

A Agricultura de Precisão (AP) surgiu como resposta à necessidade de tornar o manejo agrícola mais eficiente, sustentável e economicamente viável. Seu princípio central é reconhecer e manejar a variabilidade espacial e temporal dos fatores que afetam a produção agrícola, em contraste ao modelo convencional, que aplica insumos de maneira uniforme em toda a área de cultivo (COELHO, 2005). Essa abordagem busca otimizar a utilização de sementes, fertilizantes, corretivos e defensivos, reduzindo custos e impactos ambientais e, ao mesmo tempo, aumentando a produtividade.

No contexto da cana-de-açúcar, a aplicação da AP tem se mostrado fundamental durante as reformas de canaviais. Nessas áreas, a heterogeneidade do solo é acentuada por fatores como compactação devido ao tráfego intenso de máquinas, variabilidade natural dos atributos químicos e físicos e histórico diferenciado de cultivo. O emprego de

técnicas de mapeamento, sensoriamento remoto e análises geoestatísticas permite identificar essas diferenças e propor manejos ajustados às condições locais (PRADO; VITTI, 2006; RODRIGUES JUNIOR et al., 2011).

Entre as ferramentas mais utilizadas na AP está o conceito de zonas de manejo (ZMs). Uma zona de manejo é definida como uma sub-região dentro do campo que apresenta relativa homogeneidade em fatores de produção, como fertilidade do solo, textura, condutividade elétrica, resistência mecânica à penetração, índices de vegetação e até produtividade histórica. Nessas áreas homogêneas, é possível aplicar uma mesma taxa de insumos ou adotar práticas específicas que sejam mais eficientes para as condições ali encontradas (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011).

O delineamento das ZMs pode ser feito a partir de diferentes fontes de informação. Dados de produtividade obtidos por monitores acoplados às colhedoras, mapas de fertilidade, imagens de satélite, dados de relevo e sensoriamento proximal (como condutividade elétrica do solo) são comumente utilizados. Para integrar essas informações, análises multivariadas e algoritmos de agrupamento têm sido amplamente aplicados, pois permitem agrupar células de uma área em classes distintas com base em sua similaridade. Esse método se diferencia por atribuir graus de pertinência a cada ponto, reconhecendo a transição gradual entre zonas, o que reflete melhor a realidade dos sistemas agrícolas.

Estudos mostram que a definição de ZMs pode aumentar a eficiência do uso de insumos e reduzir a variabilidade da produtividade dentro dos talhões. Em pesquisa realizada por Rodrigues Junior et al. (2011) em canaviais, a divisão da área em zonas homogêneas possibilitou maior correlação entre atributos do solo e produtividade, destacando-se a importância de dados de fertilidade e condutividade elétrica para o

delineamento das zonas. Oliveira e Furlani (2023) também reforçam que a integração de índices de vegetação derivados de imagens de satélite com atributos físico-químicos do solo é uma estratégia eficiente para gerar zonas de manejo aplicáveis em escala operacional.

O conceito de ZMs também contribui para a gestão ambiental. Ao direcionar insumos apenas onde são necessários, reduz-se o risco de lixiviação de nutrientes, contaminação de corpos hídricos e emissões de gases de efeito estufa decorrentes do uso excessivo de fertilizantes. Dessa forma, a Agricultura de Precisão e o delineamento de zonas de manejo representam não apenas um avanço produtivo, mas também uma ferramenta para maior sustentabilidade da produção agrícola (COELHO, 2005; PRADO; VITTI, 2006). Portanto, a adoção de ZMs em reformas de canaviais possibilita transformar grandes volumes de dados, obtidos por diferentes tecnologias, em informações práticas que orientam a tomada de decisão. Esse processo contribui para o aumento da eficiência agrônoma, econômica e ambiental dos sistemas de produção.

3.3.3 Estudos de caso em diferentes culturas (soja e cana-de-açúcar)

A aplicação prática da agricultura de precisão tem sido amplamente estudada em diferentes culturas, destacando-se a soja e a cana-de-açúcar. Essas culturas apresentam grande relevância econômica para o Brasil e características agrônomicas que as tornam modelos adequados para estudos de variabilidade espacial e definição de zonas de manejo.

Na cultura da soja, pesquisas mostram que a variabilidade espacial de atributos do solo pode explicar parte significativa das diferenças de produtividade entre áreas de um mesmo talhão. Faraco et al. (2008), avaliando um Latossolo Vermelho distroférico

no Paraná, constataram que variáveis como densidade, umidade e resistência mecânica do solo à penetração apresentaram dependência espacial estruturada e puderam ser modeladas por semivariogramas esféricos, exponenciais e gaussianos. A análise indicou que a validação cruzada foi o critério mais eficaz para selecionar o melhor modelo, resultando em mapas temáticos mais acurados e permitindo identificar manchas de variabilidade diretamente associadas à produtividade da soja. Esses resultados reforçam a importância da integração entre atributos físicos do solo e análises geoestatísticas para definir estratégias de manejo localizado.

Outro exemplo é apresentado por Siqueira et al. (2008), que compararam diferentes métodos de amostragem em um Latossolo Vermelho eutroférico em Campinas/SP. O estudo mostrou que a densidade do solo medida por anéis volumétricos apresentou menor variabilidade, enquanto a umidade, quando medida por métodos indiretos como a reflectometria no domínio do tempo (TDR), mostrou maior descontinuidade espacial. Essa diferença metodológica impacta diretamente a interpretação da variabilidade e a definição de zonas de manejo, evidenciando que a escolha do método de coleta e análise é determinante para a qualidade dos mapas gerados.

Na cana-de-açúcar, estudos também demonstram a relevância da identificação de zonas de manejo em áreas de reforma de canaviais. Rodrigues Junior et al. (2011) integraram atributos químicos do solo, como fósforo e potássio disponíveis, com dados de produtividade para definir zonas homogêneas em talhões de cana. A análise mostrou que a correlação espacial entre atributos químicos e produtividade permitiu delinear zonas com maior precisão, facilitando a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes.

Essa prática resultou em melhor aproveitamento dos insumos e maior uniformidade na produção do canavial.

Além dos atributos de fertilidade, a resistência mecânica do solo à penetração também tem sido estudada como indicador para o delineamento de zonas de manejo em canaviais. Oliveira e Furlani (2023), avaliando uma área de reforma de canavial com cultivo de soja em Jaboticabal/SP, demonstraram que o uso de análises multivariadas foi eficiente para integrar variáveis físicas, químicas e índices de vegetação (NDVI, GNDVI e NLI) obtidos por sensoriamento remoto. O estudo mostrou que a divisão da área em duas zonas de manejo foi a mais adequada, apresentando correspondência com as diferenças de produtividade observadas em campo.

Esses estudos confirmam que a variabilidade espacial não é um obstáculo, mas uma oportunidade para a agricultura de precisão. A correta interpretação dessa variabilidade, aliada ao uso de ferramentas geoestatísticas e de sensoriamento, permite identificar zonas de manejo mais estáveis e produtivas. Assim, tanto na soja quanto na cana-de-açúcar, a delimitação de zonas de manejo tem se mostrado uma estratégia eficiente para aumentar a produtividade, reduzir custos e melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

3.3.4 Limitações, desafios e perspectivas futuras

Apesar dos avanços significativos da Agricultura de Precisão (AP) e do delineamento de zonas de manejo (ZMs), ainda existem limitações importantes para a adoção plena dessas práticas em áreas de reforma de canaviais e em outras culturas. Uma das principais dificuldades está associada ao custo de aquisição e manutenção das tecnologias necessárias, como sensores de condutividade elétrica, monitores de

produtividade, imagens de satélite de alta resolução e softwares de análise. Muitos produtores, especialmente de médio e pequeno porte, ainda consideram tais ferramentas inacessíveis, o que restringe sua aplicação em escala comercial (COELHO, 2005).

Outro desafio está relacionado à densidade amostral necessária para caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo. Malhas de amostragem mais densas proporcionam maior precisão na elaboração de mapas temáticos, mas elevam os custos e a demanda por mão de obra especializada. Trabalhos como o de Siqueira et al. (2008) evidenciam que diferentes métodos de amostragem podem produzir resultados distintos, o que reforça a importância de padronizar protocolos e selecionar técnicas que conciliem custo e precisão. Além disso, atributos do solo altamente dinâmicos, como a umidade e o nitrogênio mineral, apresentam maior variabilidade temporal, dificultando sua utilização como referência estável para o delineamento de ZMs.

A interpretação e integração de dados também constituem uma barreira. A AP gera grande volume de informações provenientes de diferentes fontes, como análises laboratoriais, sensoriamento remoto, geoprocessamento e séries históricas de produtividade. Transformar esses dados em informações práticas para orientar o manejo exige conhecimento técnico especializado e ferramentas computacionais avançadas.

Do ponto de vista científico, um dos principais desafios é a estabilidade temporal das zonas de manejo. Estudos mostram que ZMs definidas a partir de atributos estáveis, como textura e topografia, tendem a se manter consistentes ao longo dos anos. Entretanto, quando o delineamento é baseado em atributos dinâmicos, como fertilidade e produtividade anual, as zonas podem variar de safra para safra, comprometendo sua confiabilidade (RODRIGUES JUNIOR et al., 2011). Nesse sentido, há necessidade de

pesquisas que avaliem a consistência das zonas de manejo em longo prazo, bem como a viabilidade de sua aplicação operacional em culturas perenes como a cana-de-açúcar.

As perspectivas futuras apontam para uma integração cada vez maior entre geoestatística, sensoriamento remoto, modelagem agrometeorológica e inteligência artificial. O uso de imagens de satélite de alta resolução, associado a sensores embarcados em drones, já permite monitorar com maior frequência atributos da cultura e do solo, facilitando a detecção precoce de estresses hídricos e nutricionais. Além disso, algoritmos de aprendizado de máquina vêm sendo explorados para identificar padrões complexos nos dados e aprimorar o delineamento de zonas de manejo.

No contexto da cana-de-açúcar, as reformas de canaviais representam oportunidade estratégica para incorporar essas inovações. A integração entre dados de solo, clima, produtividade e imagens de sensoriamento remoto poderá transformar a forma como os produtores planejam o preparo e a condução das lavouras. Espera-se que, com a redução dos custos tecnológicos e maior capacitação técnica, a Agricultura de Precisão e o uso de zonas de manejo se tornem práticas mais difundidas, contribuindo para maior sustentabilidade, eficiência e competitividade da produção agrícola brasileira.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área Experimental

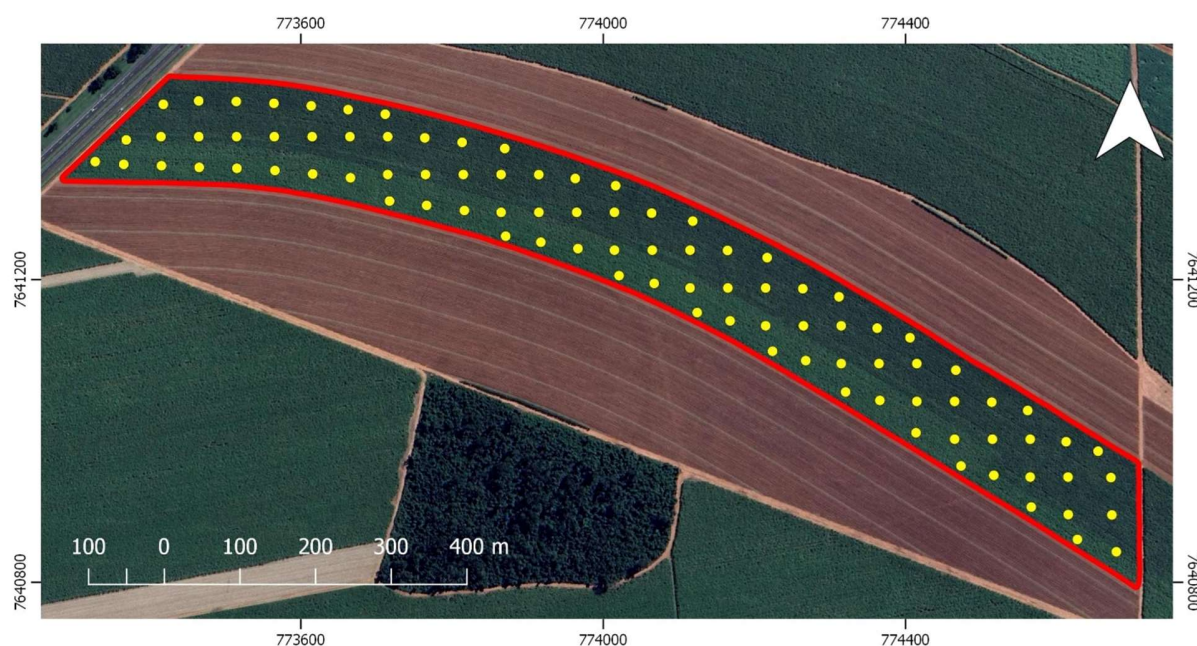
O estudo foi conduzido em área agrícola localizada no município de Jaboticabal/SP, importante polo do setor sucroenergético no Estado de São Paulo. O talhão analisado corresponde a uma área de reforma de canavial de 21 hectares, na qual

foi implantada a cultura da soja como cultivo de rotação, durante o período de 18 de novembro de 2020 a 15 de março de 2021. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico típico, de textura franco-argilo-arenosa e relevo suave ondulado, conforme levantamento detalhado realizado por Andrioli & Centurion (1999). O clima regional é do tipo Cwa, segundo Köppen, caracterizado como subtropical úmido com inverno seco, apresentando precipitação média anual de 1.400 mm, temperatura média de 22 °C e umidade relativa em torno de 70%.

4.2 Amostragem de solo e análises laboratoriais

A amostragem de solo foi realizada em malha regular de 50 por 50 metros, definida pelo software QGIS totalizando 92 pontos amostrais georreferenciados. Em cada ponto da malha foram coletadas cinco subamostras na profundidade de 0 a 40 cm, que formaram uma amostra composta representativa do local. As amostras foram coletadas em período anterior ao preparo de solo e cultivo da cultura da soja, com equipamento automatizado de amostragem de solo Falker SoloStar acoplado em um quadriciclo. Durante a amostragem, os locais de interesse tiveram a massa de palhada previamente removida e foram georreferenciados utilizando o receptor de navegação do Sistema de Navegação Global que equipava o quadriciclo. As amostras foram encaminhadas a laboratório credenciado, onde foram determinados os seguintes atributos físicos e químicos: fósforo (P, resina), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), matéria orgânica (MO) e teor de argila. A partir dos resultados obtidos em laboratório foi calculada a saturação por bases (V%), utilizada como parâmetro de avaliação integrada da fertilidade do solo.

FIGURA 1 – DELIMITAÇÃO DE ÁREA EXPERIMENTAL NO MUNICÍPIO DE JABOTICABAL - SP, COM MALHA AMOSTRAL COM 92 PONTOS GEORREFERENCIADOS UTILIZADOS PARA COLETA DE SOLO.



4.3 Geoprocessamento e interpolação

Os pontos amostrais foram georreferenciados com o auxílio de receptor GNSS de navegação, e a construção da malha, o processamento dos dados e a elaboração dos mapas temáticos foram realizados em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando-se o software QGIS. A interpolação espacial dos atributos do solo foi realizada por meio do método de ponderação pelo inverso da distância, conhecido como IDW (*Inverse Distance Weighting*). A escolha desse método se justifica pelo caráter exploratório do presente estudo e pela boa distribuição dos pontos amostrais, o que permite representar a variabilidade espacial de maneira eficiente e prática. A interpolação pelo método IDW é determinística, produzindo uma superfície contínua a partir de pontos georreferenciados com atributos conhecidos. A ponderação é constituída com a relação

entre o ponto amostrado e o ponto que se quer prever. Pontos mais distantes são menos correlacionados e tem peso menor na previsão, enquanto que pontos mais próximos são mais correlacionados e tem peso maior na previsão.

O cálculo foi descrito por Mello et al. (2003):

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \cdot z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)}$$

Onde Z_p é o atributo interpolado, z_i é o valor do atributo do i -ésimo ponto de amostragem, d_i é a distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto de amostragem, p é o expoente utilizado e n é o número de amostras.

Embora métodos geoestatísticos, como a krigagem, sejam reconhecidos por sua robustez e precisão, eles exigem análises variográficas e modelagens adicionais, que fogem ao escopo deste trabalho.

4.4 Dados de produtividade

Os dados de produtividade da soja foram estimados a partir de coletas seguindo a mesma grade de amostragem das coletas de solo, com o auxílio de uma moldura de 1m² posicionada no centro de cada ponto, em período anterior a colheita, denominado como R8 no ciclo da cultura da soja, no dia 15/03/2021. Todas as plantas que estavam dentro da moldura foram coletadas e tiveram as suas vagens processadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos mapas temáticos gerados por interpolação espacial pelo método IDW (Inverse Distance Weighting). Os mapas representam a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo avaliados na área experimental, bem como a produtividade da cana-de-açúcar. A apresentação dos resultados será organizada de forma a relacionar a produtividade agrícola com os principais fatores de solo analisados. Inicialmente, discute-se a distribuição espacial da produtividade, seguida pela análise dos macronutrientes (fósforo, potássio, cálcio, magnésio e matéria orgânica), da saturação por bases (V%) e do teor de argila. Essa abordagem busca integrar a interpretação dos mapas com a revisão da literatura, destacando como cada atributo pode influenciar o desempenho das culturas avaliadas.

5.1 Distribuição espacial da produtividade

O mapa de produtividade da área experimental (Figura 3) evidencia a heterogeneidade espacial do rendimento agrícola, com valores variando de aproximadamente 2.600 a 7.000 kg ha⁻¹. A área foi dividida em cinco classes de produtividade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Nota-se que, mesmo em um único talhão, ocorrem manchas contrastantes de desempenho, o que confirma que a produção não é uniforme e que fatores edáficos e de manejo exercem forte influência sobre os resultados obtidos em campo.

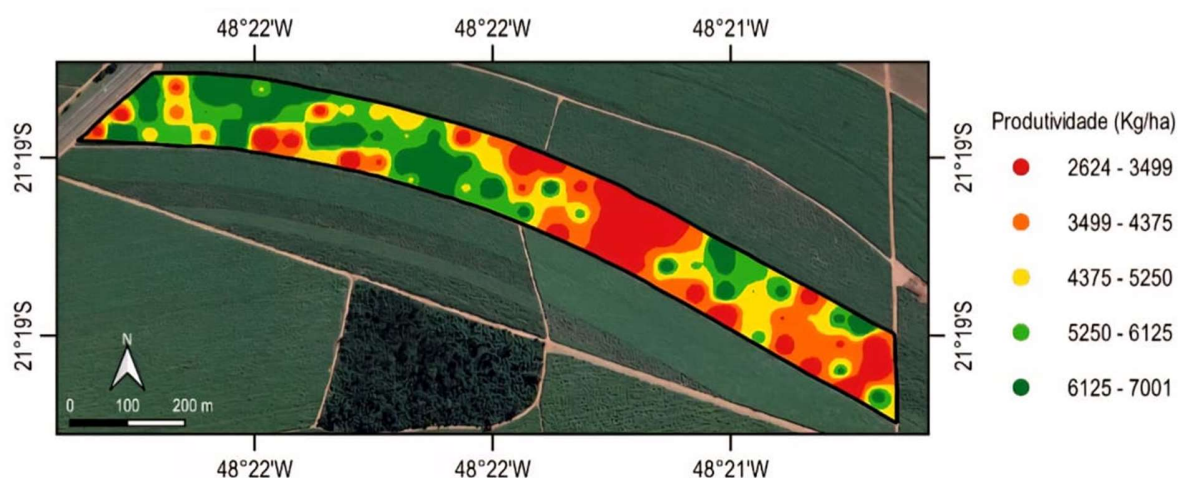
De acordo com Molin, Amaral e Colaço (2015), mapas de produtividade constituem uma das principais ferramentas da agricultura de precisão, pois permitem identificar

zonas de maior e menor potencial produtivo dentro de um mesmo campo. Essas zonas refletem a interação de diversos fatores, como fertilidade química, textura do solo, disponibilidade hídrica, compactação e histórico de uso da área. Nesse sentido, Corá et al. (2004) destacam que a análise espacial da produtividade, associada a atributos do solo, é fundamental para compreender a variabilidade e fundamentar recomendações de manejo localizado.

Na área avaliada, observa-se a predominância de produtividades intermediárias, associadas às classes média e alta, intercaladas por regiões de menor desempenho (classes muito baixa e baixa, representadas pelos tons vermelhos e alaranjados) e por manchas de maior rendimento (classe muito alta, em verde escuro). Essa distribuição espacial evidencia a importância da variabilidade do solo como fator determinante da produção, criando áreas de maior ou menor eficiência de uso de insumos e da água disponível.

A análise integrada do mapa de produtividade com os mapas de atributos do solo, como fósforo, potássio, cálcio, magnésio, matéria orgânica, saturação por bases e argila, possibilita compreender de forma mais aprofundada os fatores responsáveis por essa variabilidade, subsidiando a definição de zonas de manejo. Oliveira (2023), em estudos realizados na mesma região, demonstrou que o cruzamento dessas informações permite identificar padrões estáveis de variabilidade produtiva, tornando mais assertivas as recomendações de correção e adubação em taxa variável.

FIGURA 2 - MAPA DE PRODUTIVIDADE DA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW.



5.2 Produtividade x Macronutrientes

A análise espacial da fertilidade do solo é essencial para compreender a variabilidade da produtividade agrícola dentro de um mesmo talhão. Entre os fatores avaliados, os macronutrientes ocupam papel central, pois são exigidos em maiores quantidades pelas culturas e, quando presentes em teores inadequados, constituem um dos principais limitantes ao rendimento. Nesse sentido, a relação entre os mapas de produtividade e os mapas de nutrientes permite identificar de forma integrada as áreas onde a deficiência ou o excesso de determinados elementos pode estar condicionando o desempenho produtivo.

No presente estudo, foram considerados os macronutrientes fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e a matéria orgânica (MO), esta última entendida como fonte de nutrientes e indicador da qualidade geral do solo. Cada um desses atributos foi analisado separadamente, confrontando-se sua variabilidade espacial com os padrões de produtividade observados. Essa comparação permite discutir, à luz da literatura, de

que maneira a disponibilidade de nutrientes e a condição química do solo se relacionam com o rendimento soja cana-de-açúcar cultivada na área experimental.

Assim, nas subseções seguintes serão apresentados e discutidos os resultados de cada macronutriente, destacando como suas diferentes faixas de disponibilidade podem contribuir para explicar as zonas de maior ou menor produtividade.

5.2.1 Fósforo (P-resina)

O fósforo é um dos nutrientes mais limitantes em solos tropicais, pois apresenta baixa disponibilidade natural e forte tendência à fixação em formas não lábeis, especialmente em Latossolos e Argissolos. Tanto na soja quanto na cana-de-açúcar, o fósforo exerce papel fundamental no desenvolvimento inicial das raízes, no acúmulo de biomassa e nos processos de transferência de energia, sendo determinante para a produtividade agrícola (RAIJ et al., 1997; NOVAIS; SMYTH, 1999).

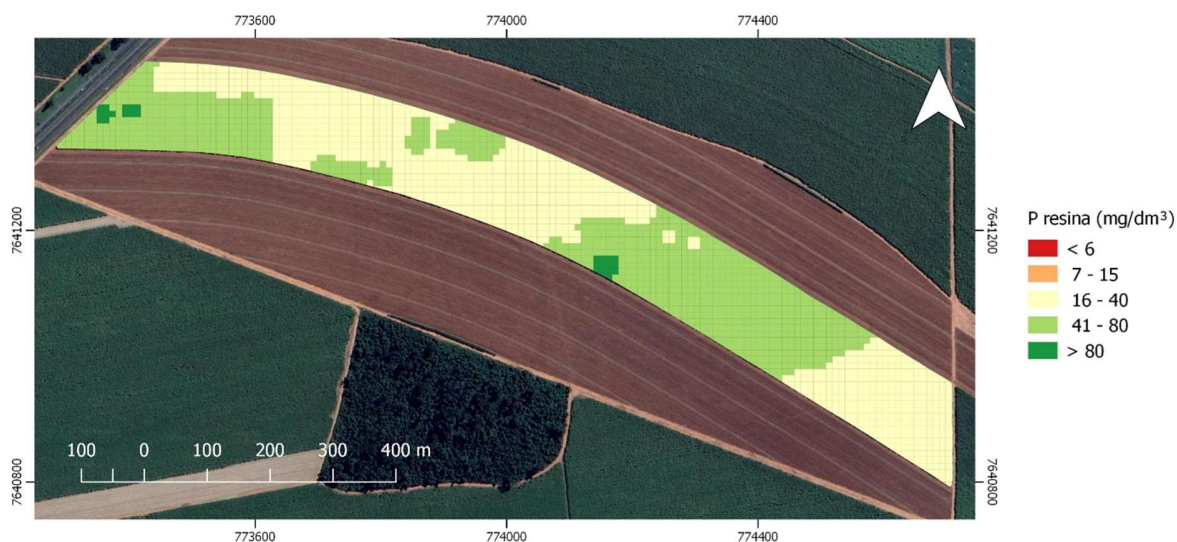
O mapa de fósforo disponível (Figura 4) demonstra a variabilidade espacial desse nutriente na área experimental. Os valores predominam nas classes média (16–40 mg/dm³) e alta (41–80 mg/dm³), com pequenas manchas enquadradas como muito altas (> 80 mg/dm³). Não foram observadas áreas nas classes muito baixa (< 6 mg/dm³) e baixa (7–15 mg/dm³), o que indica que o manejo fosfatado adotado previamente elevou a disponibilidade do nutriente a patamares satisfatórios.

Segundo o Boletim 100 (RAIJ et al., 1997), valores abaixo de 16 mg/dm³ são limitantes para culturas anuais, como a soja e a cana, exigindo adubação corretiva. No entanto, teores acima de 40 mg/dm³ já são considerados altos e indicam baixa probabilidade de resposta à adubação fosfatada. Dessa forma, a predominância de teores médios a altos sugere condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas,

embora a heterogeneidade encontrada entre manchas possa explicar parte da variação de produtividade observada.

A presença de áreas muito altas podem estar relacionada a acúmulos localizados decorrentes do histórico de adubações, reduzindo a eficiência de uso do fósforo e aumentando o risco de perdas ambientais. Conforme ressaltado por Trivelin et al. (2002), a aplicação localizada e em doses ajustadas é uma prática essencial para aumentar a longevidade do canavial e otimizar a produtividade em sistemas de reforma. Portanto, a análise conjunta do mapa de fósforo com o de produtividade reforça a importância desse nutriente como condicionante do rendimento agrícola e indica o potencial da agricultura de precisão para o manejo localizado de fertilizantes, evitando tanto deficiências quanto excessos.

FIGURA 3. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO FÓSFORO DISPONÍVEL (P-RESINA, MG/DM³) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS TEORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO O BOLETIM 100 (RAIJ ET AL., 1997) EM CINCO FAIXAS: MUITO BAIXO (< 6 MG/DM³), BAIXO (7–15 MG/DM³), MÉDIO (16–40 MG/DM³), ALTO (41–80 MG/DM³) E MUITO ALTO (> 80 MG/DM³).



5.2.2 Potássio (K⁺)

O potássio é o segundo nutriente mais requerido em quantidade pelas culturas, desempenhando funções fundamentais na regulação osmótica, na abertura e fechamento estomático, na ativação enzimática e no transporte de fotoassimilados. Na cana-de-açúcar, o K influencia a qualidade tecnológica dos colmos e a resistência a estresses bióticos e abióticos, enquanto na soja atua no enchimento de grãos e na eficiência do uso da água (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

O mapa de potássio trocável (Figura 5) evidencia predominância da classe baixa (0,70–1,50 mmolc/dm³) em praticamente todo o talhão, com pequenas manchas enquadradas como médias (1,50–3,00 mmolc/dm³). Não foram identificadas áreas nas classes muito baixas (< 0,70 mmolc/dm³), mas também não ocorreram regiões altas (3,1–6,0 mmolc/dm³) ou muito altas (> 6,0 mmolc/dm³). Esse cenário indica uma limitação nutricional importante, visto que, de acordo com o Boletim 100 (RAIJ et al., 1997), valores abaixo de 1,5 mmolc/dm³ são considerados baixos para culturas anuais, demandando suplementação potássica para evitar restrição de rendimento.

A predominância da classe baixa pode estar associada ao histórico de colheitas e exportação de nutrientes, já que o potássio é altamente removido tanto pela soja quanto pela cana-de-açúcar. Além disso, solos de textura média a arenosa, como o presente na área experimental, apresenta baixa capacidade de retenção de K, favorecendo perdas por lixiviação. Essa condição contribui para explicar a ocorrência de manchas de menor produtividade observadas no mapa de rendimento (Figura 3). Portanto, a análise espacial do potássio confirma sua relevância como fator limitante da produtividade na área de estudo. O manejo localizado, com adubação potássica em taxa variável, representa uma

alternativa para corrigir a deficiência nas zonas mais críticas, evitando tanto perdas produtivas quanto desperdício de insumos em áreas onde os teores já são satisfatórios.

FIGURA 4. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO POTÁSSIO TROCÁVEL (K^+ , MMOLC/DM³) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS TEORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO O BOLETIM 100 (RAIJ ET AL., 1997) EM CINCO FAIXAS: MUITO BAIXO (< 0,70 MMOLC/DM³), BAIXO (0,70–1,50 MMOLC/DM³), MÉDIO (1,50–3,00 MMOLC/DM³), ALTO (3,00–6,00 MMOLC/DM³) E MUITO ALTO (> 6,00 MMOLC/DM³).



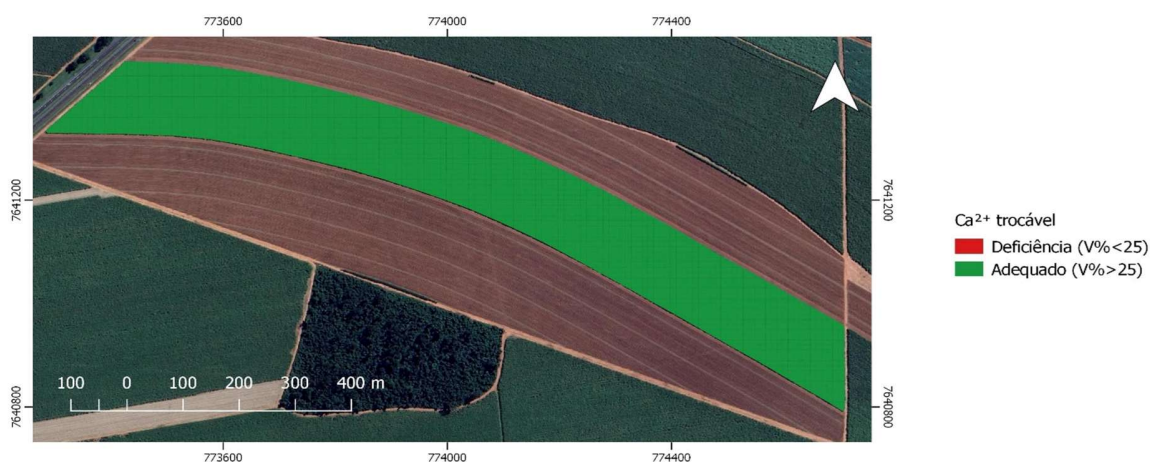
5.2.3 Cálcio (Ca^{2+})

O cálcio é um macronutriente essencial tanto para a nutrição vegetal quanto para a melhoria das condições químicas e físicas do solo. Atua na integridade das paredes celulares, na divisão celular e no crescimento radicular, além de ser determinante na estruturação do solo e na formação de agregados estáveis (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Em solos tropicais, a deficiência de cálcio em subsuperfície pode constituir uma barreira química ao desenvolvimento radicular, limitando a exploração de camadas mais profundas e, conseqüentemente, a capacidade da planta em explorar água e nutrientes.

O mapa de cálcio trocável (Figura 6) mostra que toda a área experimental foi classificada como adequada, com saturação por bases superior a 25%. Não foram observadas manchas em condição de deficiência ($V\% < 25\%$), indicando que o manejo corretivo foi eficiente em fornecer cálcio em quantidade suficiente para atender às necessidades da soja e da cana-de-açúcar.

Segundo o Boletim 100 (RAIJ et al., 1997), a manutenção de $V\%$ acima de 50% na camada superficial e superior a 25% em subsuperfície é fundamental para garantir o bom desenvolvimento radicular. Prado e Vitti (2006) reforçam que, em canaviais da região Centro-Sul do Brasil, a saturação adequada por cálcio está diretamente associada à longevidade dos canaviais e à estabilidade da produtividade ao longo dos cortes. Portanto, a ausência de áreas deficientes em cálcio contribui para explicar as zonas de maior produtividade observadas no talhão, reforçando a importância da calagem e do uso de corretivos como o gesso agrícola para manutenção de níveis adequados desse nutriente no perfil do solo.

FIGURA 5. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CÁLCIO TROCÁVEL (Ca^{2+}) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS VALORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO A SATURAÇÃO POR BASES ($V\%$), SENDO CONSIDERADOS DEFICIENTES OS VALORES COM $V\% < 25\%$ E ADEQUADOS OS VALORES COM $V\% > 25\%$, CONFORME CRITÉRIOS DO BOLETIM 100 (RAIJ ET AL., 1997).



5.2.4 Magnésio (Mg^{2+})

O magnésio desempenha papel essencial na fisiologia vegetal, sendo o elemento central da molécula de clorofila e participando ativamente de processos enzimáticos e de transporte de energia. Sua deficiência pode comprometer a fotossíntese, reduzir a eficiência do uso da luz e afetar a formação de grãos na soja e o acúmulo de biomassa e sacarose na cana-de-açúcar (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

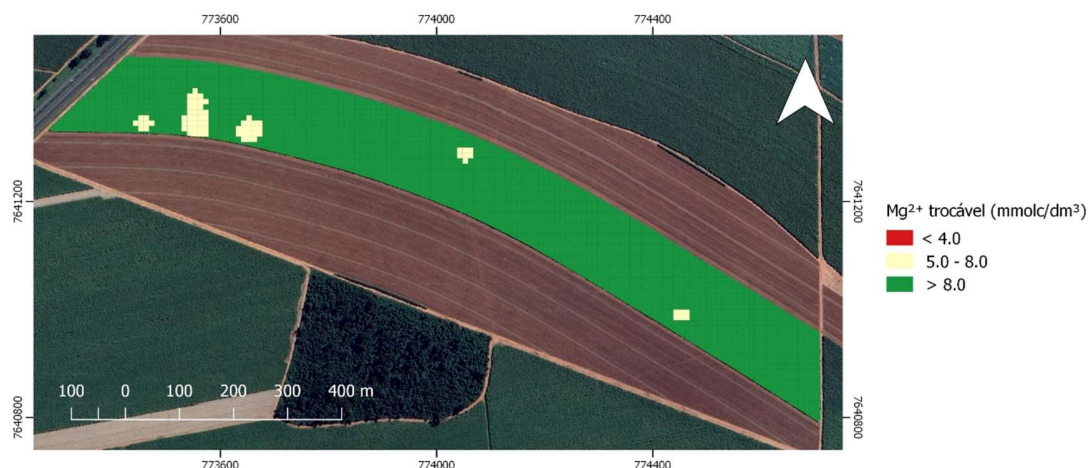
O mapa de magnésio trocável (Figura 7) evidencia que a maior parte da área experimental se encontra na classe alta ($> 8 \text{ mmolc/dm}^3$), condição considerada adequada segundo o Boletim 100 (RAIJ et al., 1997). Foram observadas pequenas manchas na faixa média ($5\text{--}8 \text{ mmolc/dm}^3$), mas nenhuma área classificada como baixa ($< 4 \text{ mmolc/dm}^3$). Esse resultado sugere que o suprimento de magnésio no solo não representa fator limitante à produtividade da área, embora as manchas médias possam demandar monitoramento em longo prazo, principalmente em solos de textura mais arenosa, nos quais a lixiviação do nutriente tende a ser maior.

É importante ressaltar que, além do teor absoluto, o equilíbrio entre cálcio e magnésio também deve ser considerado, uma vez que desequilíbrios na relação Ca:Mg podem afetar a absorção de potássio e comprometer a eficiência nutricional. A predominância de teores altos de Mg em conjunto com níveis adequados de cálcio (Figura 6) indica condições favoráveis ao crescimento radicular e ao desenvolvimento das culturas avaliadas, corroborando a estabilidade de produtividade observada nas zonas de maior rendimento.

Dessa forma, a análise espacial do magnésio reforça a importância de avaliá-lo de forma conjunta com outros cátions trocáveis e com a saturação por bases (V%), uma vez

que sua interação com cálcio e potássio é determinante para a eficiência do manejo da fertilidade e para a sustentabilidade da produção agrícola.

FIGURA 6. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO MAGNÉSIO TROCÁVEL (Mg^{2+} , MMOLC/DM³) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS TEORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO O BOLETIM 100 (RAIJ ET AL., 1997) EM TRÊS FAIXAS: BAIXO (< 4 MMOLC/DM³), MÉDIO (5–8 MMOLC/DM³) E ALTO (> 8 MMOLC/DM³).



5.2.5 Matéria Orgânica (MO)

A matéria orgânica é considerada um dos principais indicadores da qualidade do solo, exercendo influência direta na agregação, na retenção de água, na infiltração, na capacidade de troca de cátions e na disponibilidade de nutrientes como nitrogênio, fósforo e enxofre. Em ambientes tropicais, os teores de MO são geralmente mais baixos devido à elevada taxa de decomposição, o que torna sua manutenção um desafio para a sustentabilidade produtiva (COELHO, 2005; PRADO; VITTI, 2006).

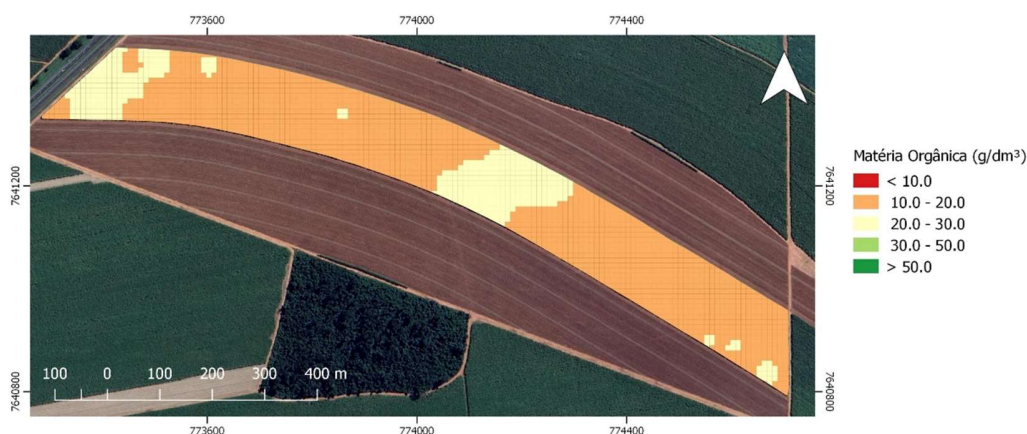
O mapa de matéria orgânica (Figura 8) mostra que a área experimental apresenta predominância das classes baixa (10–20 g/dm³) e média (20–30 g/dm³), com poucas manchas próximas ao limite inferior (< 10 g/dm³). Não foram registradas áreas nas classes alta (30–50 g/dm³) ou muito alta (> 50 g/dm³). Esse padrão indica que, embora a

MO esteja em níveis que permitem a manutenção mínima da fertilidade, existe espaço para melhorias, principalmente em relação à maior estabilidade da estrutura do solo e à disponibilidade de nutrientes ao longo do ciclo das culturas.

De acordo com a CFSEMG (1999), valores de MO inferiores a 20 g/dm³ em solos de textura média já podem ser considerados restritivos, sugerindo a adoção de práticas conservacionistas, como a manutenção da palhada e a rotação com culturas de cobertura. Nessas condições, a variabilidade espacial da MO pode explicar parte das diferenças de produtividade observadas no talhão, uma vez que áreas com menores teores tendem a apresentar menor retenção hídrica e menor CTC efetiva, impactando o aproveitamento de nutrientes.

Além disso, a matéria orgânica interage fortemente com a textura do solo e com a saturação por bases, funcionando como componente chave na interpretação integrada dos atributos químicos e físicos. Assim, a predominância de teores baixos a médios reforça a necessidade de manejo contínuo voltado ao aumento da matéria orgânica no sistema, contribuindo para maior resiliência produtiva ao longo do tempo.

FIGURA 7. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA MATÉRIA ORGÂNICA (MO, G/DM³) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS TEORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO A CFSEMG (1999) EM CINCO FAIXAS: MUITO BAIXO (< 10 G/DM³), BAIXO (10–20 G/DM³), MÉDIO (20–30 G/DM³), ALTO (30–50 G/DM³) E MUITO ALTO (> 50 G/DM³).



5.3 Produtividade x Saturação por Bases (V%)

A saturação por bases (V%) é um dos principais indicadores integrados da fertilidade do solo, pois expressa a proporção da capacidade de troca de cátions (CTC) ocupada por cálcio, magnésio e potássio. Esse parâmetro está diretamente relacionado à acidez do solo, à disponibilidade de nutrientes essenciais e à ausência de alumínio tóxico, sendo frequentemente utilizado como referência para recomendações de calagem (RAIJ et al., 1997).

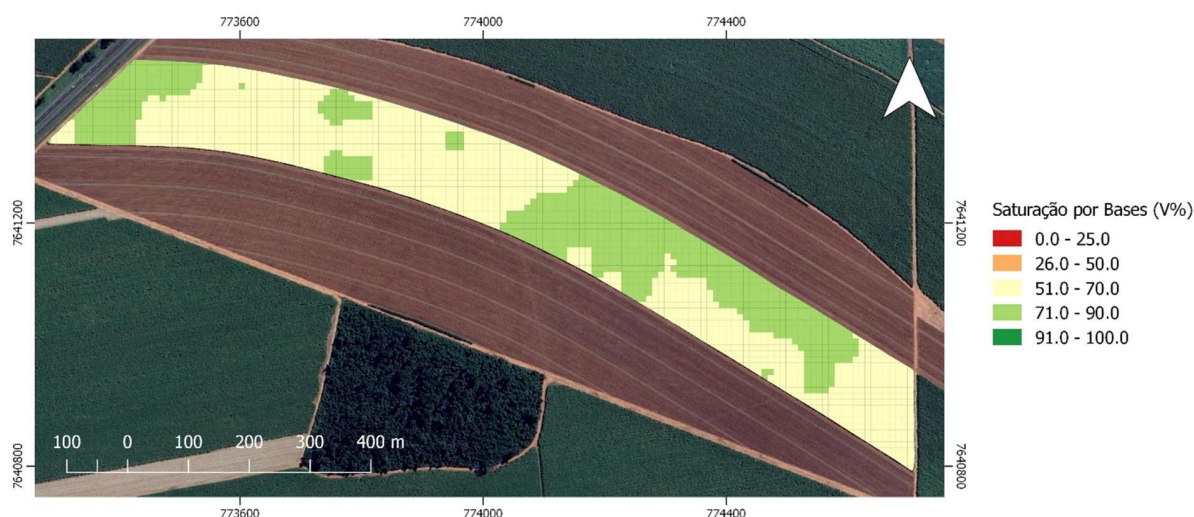
O mapa de V% (Figura 9) demonstra que a área experimental apresenta predominância de valores entre 51 e 70%, enquadrados como faixa média, e algumas manchas localizadas com saturação elevada, entre 71 e 90%. Não foram observadas áreas com saturação muito baixa (< 25%), consideradas críticas por indicarem deficiência de cálcio em subsuperfície e barreira química ao aprofundamento radicular. A presença de áreas com V% médio reforça a necessidade de monitoramento contínuo, uma vez que culturas como a soja e a cana-de-açúcar apresentam melhor desempenho em solos com V% acima de 60% (PRADO; VITTI, 2006).

Segundo o Boletim 100, valores de V% < 50% são considerados baixos, 50–70% médios e > 70% altos. Dessa forma, a variabilidade espacial encontrada na área avaliada indica que, embora o manejo corretivo tenha garantido níveis adequados em grande parte do talhão, ainda existem zonas que podem apresentar menor eficiência de uso de nutrientes, refletindo-se em menor produtividade.

Além disso, a análise conjunta do V% com os mapas de cálcio e magnésio (Figuras 6 e 7) sugere equilíbrio favorável entre os cátions trocáveis, contribuindo para a manutenção de uma boa estrutura radicular. Essa condição está alinhada ao observado

no mapa de produtividade (Figura 3), em que as zonas de maior rendimento coincidem com áreas de saturação de bases mais elevada. Portanto, a saturação por bases se mostra um parâmetro fundamental para explicar parte da heterogeneidade produtiva identificada no talhão, reforçando a importância do seu monitoramento e ajuste via práticas de calagem e gessagem, quando necessário.

FIGURA 8. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SATURAÇÃO POR BASES (V%) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS VALORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO O BOLETIM 100 (RAIJ ET AL., 1997) EM CINCO FAIXAS: MUITO BAIXO (0–25%), BAIXO (26–50%), MÉDIO (51–70%), ALTO (71–90%) E MUITO ALTO (91–100%).



5.4 Produtividade x Textura (Argila)

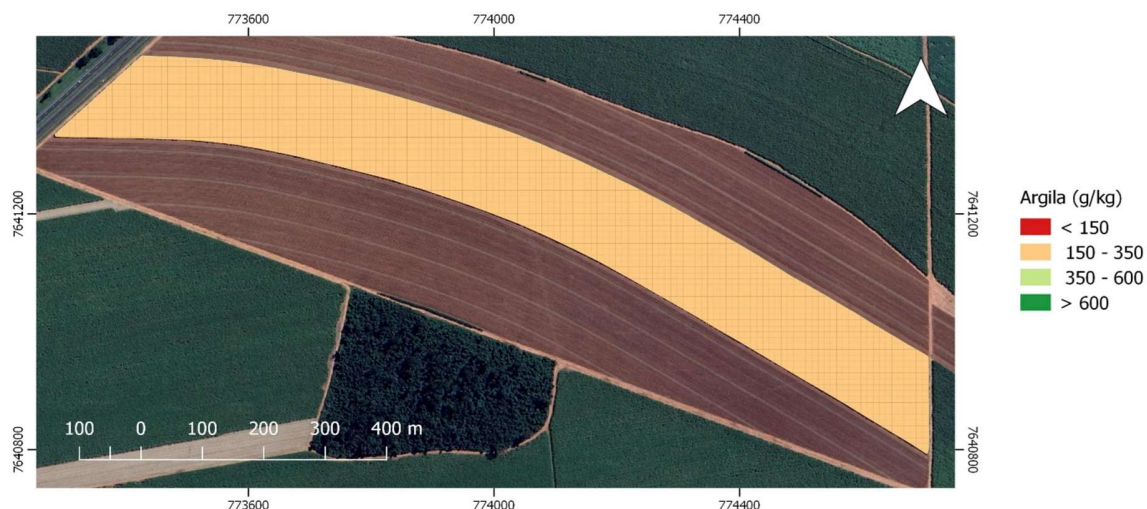
A textura do solo, expressa pelo teor de argila, é um atributo físico estável e de grande importância para a interpretação da fertilidade e da produtividade agrícola. O teor de argila influencia diretamente a capacidade de retenção de água, a capacidade de troca de cátions (CTC), a disponibilidade de nutrientes e a suscetibilidade à compactação, desempenhando papel decisivo no desempenho das culturas (PRADO; VITTI, 2006).

O mapa de argila (Figura 10) mostra que todo o talhão avaliado apresenta valores na faixa de 150–350 g/kg, caracterizando a área como de textura média. Não foram identificadas regiões classificadas como arenosas (< 150 g/kg) ou argilosas (> 350 g/kg). Esse resultado indica homogeneidade textural no talhão, diferentemente do observado nos atributos químicos, que apresentaram variabilidade espacial mais acentuada.

De acordo com o Boletim 100 (RAIJ et al., 1997), a textura média representa condição intermediária de fertilidade, sendo mais responsiva às práticas de adubação e calagem do que os solos muito argilosos ou muito arenosos. Nos solos de textura média, o fósforo tende a apresentar menor fixação do que em solos muito argilosos, mas a lixiviação de potássio pode ser mais expressiva, o que explica a presença de manchas de K em níveis baixos a médios observados na área (Figura 5).

Além disso, a textura média associada aos teores de matéria orgânica entre 10 e 30 g/dm³ (Figura 8) reforça a necessidade de práticas de conservação do solo e manutenção da palhada, a fim de aumentar a resiliência produtiva. Essa interação entre atributos físicos e químicos explica parte da heterogeneidade de produtividade (Figura 3), visto que solos de textura média apresentam maior dependência do manejo para manter rendimentos elevados. Portanto, a análise da textura confirma que a variabilidade de produtividade observada no talhão está menos relacionada à heterogeneidade física e mais às diferenças químicas, como disponibilidade de nutrientes e saturação por bases. Ainda assim, a textura média, por ser altamente responsiva ao manejo, oferece oportunidade para ganhos de produtividade por meio da adoção de práticas de agricultura de precisão e de manejo localizado.

FIGURA 9. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO TEOR DE ARGILA (G/KG) NA ÁREA EXPERIMENTAL LOCALIZADA EM JABOTICABAL/SP, INTERPOLADO PELO MÉTODO IDW. OS VALORES FORAM CLASSIFICADOS SEGUNDO CRITÉRIOS DE TEXTURA EM QUATRO FAIXAS: ARENOSO (< 150 G/KG), TEXTURA MÉDIA (150–350 G/KG), ARGILOSO (350–600 G/KG) E MUITO ARGILOSO (> 600 G/KG).



5.5 Síntese dos Resultados e Discussão

A análise conjunta dos mapas de produtividade e dos atributos químicos e físicos do solo evidencia que a variabilidade espacial observada no talhão é explicada principalmente pelas diferenças na disponibilidade de nutrientes e no estado de fertilidade química, mais do que por contrastes texturais. O fósforo e o potássio se mostraram fatores críticos, com manchas de teores médios a baixos em determinadas regiões, o que pode limitar a expressão do potencial produtivo. O cálcio e o magnésio, por sua vez, apresentaram-se em níveis adequados em quase toda a área, contribuindo para o bom desenvolvimento radicular e para a manutenção da saturação por bases em patamares satisfatórios. A matéria orgânica, embora majoritariamente em classes baixas a médias, reforça a necessidade de práticas conservacionistas para melhorar a qualidade do solo em longo prazo. Já a textura média homogênea indica alta responsividade às práticas de

manejo, tornando o sistema mais dependente da adubação e da calagem para atingir altas produtividades.

Em síntese, a produtividade agrícola da área avaliada reflete a interação entre fertilidade e manejo, confirmando que a adoção de estratégias de agricultura de precisão, como a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, pode reduzir a heterogeneidade do talhão, aumentar a eficiência de uso dos insumos e elevar a sustentabilidade da produção de soja e cana-de-açúcar na região de Jaboticabal.

A análise dos mapas temáticos e a revisão de literatura permitiram compreender como os atributos químicos e físicos do solo se relacionam com a variabilidade da produtividade em áreas de reforma de canavial cultivadas com soja e cana-de-açúcar na região de Jaboticabal/SP. Os resultados mostraram que a produtividade agrícola apresenta forte heterogeneidade espacial, explicada principalmente pela disponibilidade de macronutrientes, em especial fósforo e potássio, cujas manchas de teores médios a baixos podem constituir fatores limitantes ao rendimento. Por outro lado, os teores de cálcio e magnésio apresentaram-se adequados em praticamente toda a área, garantindo condições favoráveis para o desenvolvimento radicular e para a manutenção da saturação por bases em patamares satisfatórios.

A matéria orgânica, embora presente em níveis baixos a médios, destacou-se como um atributo que demanda atenção em longo prazo, pois sua elevação é fundamental para melhorar a qualidade física e química do solo, aumentar a retenção de água e nutrientes e promover maior estabilidade produtiva. Já a textura do solo, homogênea e de classe média, reforça a dependência do sistema agrícola em relação ao manejo da fertilidade química, uma vez que solos dessa categoria tendem a responder de maneira mais evidente às práticas de adubação e calagem.

De forma geral, este trabalho evidenciou que a interpretação integrada da fertilidade do solo, associada à visualização por meio de mapas temáticos, é essencial para explicar a variabilidade produtiva e orientar práticas de manejo mais eficientes. A revisão bibliográfica corroborou a relevância da agricultura de precisão e do manejo localizado como estratégias capazes de otimizar o uso de insumos, reduzir custos e aumentar a sustentabilidade da produção agrícola em áreas de reforma de canavial.

6 CONCLUSÃO

O estudo permitiu identificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo (P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, MO, V% e argila) em área de reforma de canavial cultivada com soja na região de Jaboticabal/SP. Observou-se que essa variabilidade influencia a produtividade agrícola, reforçando a importância do manejo localizado e da Agricultura de Precisão como ferramentas para otimizar o uso de insumos e melhorar a eficiência produtiva.

Conclui-se, portanto, que a compreensão da distribuição espacial dos atributos do solo é fundamental para subsidiar práticas de manejo mais adequadas, contribuindo para maior produtividade e sustentabilidade no sistema cana-soja.

7 REFERÊNCIAS

ANDRIOLI, I. & CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Brasília, 1999. Anais... Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.

BOTTEGA, E. L. Utilização de zonas de manejo para a produção de soja no cerrado brasileiro. 2014.

CAMICIA, R. G. da M. et al. Seleção de variáveis para geração de zonas de manejo e diferentes densidades de semeadura de soja. 2018.

CFSEMG – COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. 5ª Aproximação: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa: UFV, 1999. 359 p.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 60 p. (Documentos, 46).

CORÁ, J. E.; ARAÚJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERGAMASCO, A. F. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CRESSIE, N. A. C. Statistics for spatial data. New York: John Wiley & Sons, 1991. 900 p.

DA SILVA UMBELINO, A. et al. Definições de zona de manejo para soja de alta produtividade. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 41, n. 3, p. 674-682, 2018.

DALCHIAVON, F. C. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 16, n. 2, p. 144-154, 2017.

FARACO, M. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, E. A. A.; JOHANN, J. A.; BORSSOI, J. A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 463-476, 2008.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. de; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. 2014.

GUESSER, V. P. Zonas de manejo do teor de fósforo (P) e resposta da soja inoculada com solubilizador de fosfato. 2022.

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

MELLO, C. D., LIMA, J. M., SILVA, A. M., MELLO, J. M., & OLIVEIRA, M. S. (2003). Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 925-933.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Engenharia Agrícola*, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MONTEIRO, L. A. Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. 2012.

116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F. J.; SADLER, E. J. (ed.). *The state of site-specific management for agriculture*. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1997. p. 1-18.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV, 1999.

OLIVEIRA, J. L. P. Definição de zonas de manejo utilizando análises multivariadas. 2023. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Jaboticabal, 2023.

OLIVEIRA, J. L. P.; FURLANI, C. E. A. Definição de zonas de manejo utilizando fuzzy c-means clustering. *Agronomy*, v. 12, p. 1-14, 2023.

PRADO, H.; VITTI, A. C. Solos e ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas – Centro de Cana IAC, 2006. 47 p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. rev. atual. Campinas: IAC, 1997. (Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Estatística e Experimentação Agrônômica) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

RODRIGUES JUNIOR, F. A. et al. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 778-787, 2011.

RODRIGUES JUNIOR, F. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Definição de zonas de manejo de cana-de-açúcar com base em atributos do solo e produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2029-2039, 2011.

RODRIGUES JUNIOR, F. A.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Definição de zonas de manejo de cana-de-açúcar com base em atributos do solo e produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2029-2039, 2011.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 40, p. 48-56, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 800-806, 2010.

TRIVELIN, P. C. O. et al. Adubação fosfatada na cana-de-açúcar. *STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos*, v. 20, p. 32–36, 2002.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.