

Estudo de Caso 6 - Zonas de Manejo e Adubação em Área de Cultivo de Cana-de-Açúcar na Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP

Célia Regina Grego
Eduardo Antonio Speranza
Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues
Carlos Cesar Ronquim
Ariovaldo Luchiari Junior
Guilherme Martineli Sanches
Carlos Manoel Pedro Vaz
Lúcio André de Castro Jorge
Vargas Henrique Bellafronte Porto

Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, responsável por 40% da produção global (Cursi et al., 2021). Destaca-se pela maior frota de veículos *flex-fuel* (aproximadamente 30 milhões) e, além disso, o País vem aumentando, nas últimas décadas, não só a área sob cultivo de cana-de-açúcar, mas também a produção de açúcar, de etanol e de bioeletricidade (Cherubin et al., 2021).

A área de cana-de-açúcar no Brasil é de 8,6 milhões de hectares, com produção de 642,7 milhões de toneladas e produtividade média de 77,3 toneladas por hectare. A maior produção ocorre no sudeste brasileiro e no estado de São Paulo, que é o maior produtor nacional, com área colhida de cerca de 4,2 milhões de hectares (Conab, 2021).

Apesar das inúmeras vantagens como matéria-prima sustentável para a produção de biocombustíveis e açúcar, há preocupações crescentes principalmente em relação aos ganhos de produtividade, aos potenciais impactos ambientais da expansão do cultivo da cana-de-açúcar e da mudança no uso da terra, à interrupção do fornecimento de alimentos, às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), de insumos agrícolas e operações agrícolas, ao uso excessivo de água e à eutrofização, perda de biodiversidade do solo e erosão acelerada do solo (Bordonal et al., 2018).

É preciso que essas novas áreas de cultivo sejam manejadas com tecnologias modernas que tragam maiores retornos financeiros ao produtor, mas que gerem, também, menores impactos ao ambiente. A adoção da Agricultura de Precisão (AP) ajusta-se muito bem a esses propósitos, porém a adoção dessa tecnologia exige grande número de informações sobre a área em que a cultura está sendo implantada, tais como informações mais precisas sobre as características do solo e produtividade da cultura, além do uso de equipamentos específicos (Silva et al., 2011).

As tecnologias de AP aplicadas à cana-de-açúcar compreendem o mapeamento da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, a aplicação localizada de corretivos, fertilizantes e herbicidas, o manejo e o controle localizados de pragas e doenças, o monitoramento da produtividade e o controle de tráfego de máquinas agrícolas (Grego et al., 2020).

A avaliação da variabilidade espacial de atributos do solo e da planta pode ser usada como uma excelente estratégia para desenhar formas de intervenção que resultem em melhor rentabilidade para algumas culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar (Ferraz et al., 2019). Em AP é necessário compreender e caracterizar muito bem o comportamento da variabilidade espacial dos atributos estudados (Vieira et al., 2008). Os mapas de produtividade podem ser considerados uma das ferramentas mais úteis para caracterizar a variabilidade da cultura, o que é extremamente importante para aprimorar as iniciativas de manejo que buscam compreender a variabilidade espacial da cultura por meio de práticas de AP (Sanches et al., 2019).

O uso de tais tecnologias tem potencial para aumentar a gestão sustentável dos recursos naturais (solo e água) e para reduzir o uso de insumos agrícolas, tornando as áreas agrícolas mais produtivas e reduzindo seu impacto ambiental. Em um setor cada vez mais competitivo e tecnológico, os produtores necessitam buscar novas tecnologias e diferenciais para aumentar a produtividade, promover a sustentabilidade e melhorar a qualidade da produção. A pesquisa realizada por Bolfe et al. (2020) aponta que 95% dos agricultores brasileiros têm interesse nessas novas tecnologias em AP, bem como em fortalecer suas aplicações. Nesse contexto, foi proposto à Usina Santa Cruz o desenvolvimento de ferramentas de AP em um talhão de cana-de-açúcar com 15,7 hectares localizado no município de Ibaté, SP. Acredita-se que os distintos dados de atributos do solo, aliados aos índices vegetativos da cultura, obtidos por sensoriamento proximal e suborbital, possam gerar mapas com distintas Zonas de Manejo (ZMs), capazes de expressar a variabilidade espacial da área de cultivo da cana-de-açúcar. Dentro desta abordagem, esse trabalho teve como objetivo avaliar estratégias de adubação de cana-de-açúcar por meio de pesquisa on-farm (na fazenda) para validar a aplicação da ferramenta AP na área de estudo. O diferencial do experimento on-farm é a realização em condições reais do sistema de produção, com a utilização de maquinário e ferramental disponível na propriedade para obtenção de maior produtividade e redução de custos com uso de adubação adequada.

Material e Métodos

A área de estudo compreendeu um talhão de 14,83 hectares cultivado com cana-de-açúcar na Usina Santa Cruz, pertencente ao grupo São Martinho. A área localiza-se em Ibaté, SP, na Fazenda Santa Helena (Figura 1), entre os paralelos 21°58'21"S e 21°58'19"S e o meridiano 48°05' W. A região, segundo a classificação climática de Köppen, pertence ao tipo climático Cwa. A média da precipitação anual acumulada na região (de janeiro de 2018 a dezembro de 2020) foi de 1.202,7 mm, segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021).

No momento da escolha da área, em março de 2018, foi estabelecido o critério de que a área apresentasse indicativos de variabilidade espacial, principalmente pelo aspecto cor do solo e declividade (Figura 1).

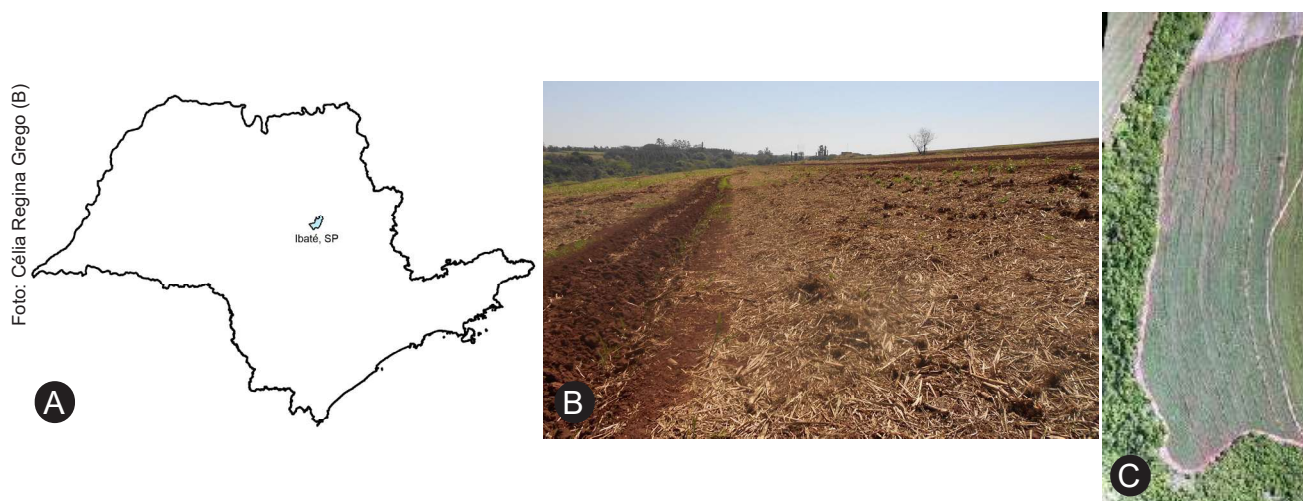


Figura 1. Localização da área de estudo: A) Estado de São Paulo e Município de Ibaté, SP; B) Foto da área no início do estudo; C) Imagem aérea da Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP (ortomosaico de 05 de outubro de 2018).

Fonte: (C) Imagem de aeronave remotamente pilotada (ARP) modelo Verok Horus (2018).

O talhão foi cultivado com cana-de-açúcar (cultivar Sweet 9005HP, do CTC) em área de reforma e em sistema “meiosi” (10.000 mudas ha⁻¹ com espaçamento de 1,5 m). O ambiente de produção foi classificado, considerando a pedologia, como BC (médio/alto a médio para potencial do ambiente de produção, desenvolvimento e rendimento da cana-de-açúcar). Segundo Prado (2013), a com-

posição do ambiente de produção indica a fertilidade do solo e a disponibilidade de água, e dependendo dessas condições, os ambientes são classificados de A até G; quanto mais se afastam de condições ideais de fertilidade e disponibilidade de água, mais se distanciam do ambiente A.

As avaliações foram realizadas no solo e na planta nas safras de 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 para mapeamento, identificação das ZMs, intervenção e validação com experimentação on-farm.

Mapeamento da Condutividade Elétrica Aparente (CEa) do Solo

A CEa foi mensurada com o objetivo de permitir a identificação de regiões distintas na área em termos de conteúdo de argila, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, elementos do solo fundamentais no estabelecimento da produtividade da cana-de-açúcar (Sanches et al., 2018). A CEa foi mensurada com o sensor de Indução Eletromagnética EM38-MK2® (Geonics, Ontário, Canadá) conectado a um receptor de GPS e tracionado por um quadriciclo (Figura 2A). Por não necessitar entrar em contato direto com o solo, os equipamentos de Indução Eletromagnética (IEM) são mais adequados para as lavouras de cana-de-açúcar, principalmente pelo fato da quantidade de resíduos (palha) na superfície do solo (o que impede o contato dos discos dos sensores de contato direto) e pelas características do ciclo produtivo. A CEa foi mensurada em linhas paralelas com intervalos de 5 m a 10 m. A frequência de coleta de dados do *datalogger* foi de 1 Hz. A mensuração dos dados ocorreu em um único dia, evitando que possíveis precipitações pluviais alterassem a umidade do solo e, conseqüentemente, as medidas finais e os mapas de CEa. O sensor foi inserido em um tubo plástico e acoplado a uma esteira de plástico resistente ao atrito, para que pudesse ser conduzido em campo pelo quadriciclo. Os dados coletados pelo sensor, com frequência de cerca de uma a duas amostras por segundo, foram transmitidos instantaneamente via *bluetooth* para um computador de mão modelo Juno, da Trimble. Foram obtidas medidas de condutividade elétrica do solo em duas profundidades limites (até 0,5 m e até 1,0 m), nas direções horizontal e vertical, em fevereiro de 2018, antes da operação de subsolagem para o plantio da cana.



Fotos: Célia Regina Grego

Figura 2. Equipamento para mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A) EM38-MK2® (Geonics, Mississauga, Ontário, Canadá); B) detalhe do suporte do equipamento EM38-MK2® para arraste pelo quadriciclo.

Imagens de Satélite e Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant)

Foram coletadas 18 imagens entre março de 2018 e julho de 2019 do sensor MSI/Sentinel-2A e 2B de reflectância no topo da atmosfera (nível 1C) e corrigidas para reflectância de superfície (nível 2A) por meio do algoritmo MAJA (MACCS ATCOR Joint Algorithm) na Plataforma Operacional dos Produtos Sentinel (Peps..., 2019; Rodrigues et al., 2019). Para geração das imagens de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Red Edge (NDre2), utilizou-se o software ArcGis versão 10.6, respectivamente nas bandas B4 (Red) e B8 (NIR) ($NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$) e nas bandas B5 (Red-Edge 1) e B7 (Red-Edge 3) ($NDre2 = (B7 - B5) / (B7 + B5)$), conforme Fernández-Manso et al. (2016). Foram extraídos 1.383 pixels de NDVI (10 m x 10 m) e 375 pixels de NDre2 (20 m x 20 m), totalizando 1.758 pixels de referência (valores de N), respectivamente, em cada data (Rodrigues et al., 2019).

As análises estatísticas dos IV's foram realizadas com os programas R e o Origin 9.1 (Origin LabCo.). Para testar se os valores dos IVs apresentavam distribuição normal, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk (Mangiafico, 2016). Como houve rejeição de normalidade dos dados, foram realizadas correlações de Spearman. Para a análise de dependência espacial fez-se a interpolação espacial com uso da *krigagem* ordinária (Vieira, 2000) e foram construídos mapas dos valores interpolados para dois agrupamentos que mais diferenciam o desenvolvimento das plantas considerando o ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar, 1 = médias respectivas de valores de NDVI e NDre2 obtidos em 11 de março e 10 de abril de 2018; e agrupamento 3 = médias respectivas de valores de NDVI e NDre2 obtidos em 6 de novembro e 6 de dezembro de 2018, que são as datas do pico de crescimento da variedade de cana-de-açúcar hiperprecoce.

A partir de imagem raster de MDE (modelo digital de elevação) da Fazenda Santa Helena, obtiveram-se as curvas de nível da área experimental utilizando-se o ArcGis versão 10.6.

Variabilidade espacial da fertilidade do solo, física do solo e produtividade da cana-de-açúcar

Amostras de solo foram coletadas em 2018 numa grade de 67 pontos de amostragem distribuídos medindo 40 m na linha por 50 m entrelinha, conforme a identificação de regiões distintas indicadas pela medição da condutividade elétrica do solo.

O solo foi amostrado para fins de análise de textura, fertilidade, densidade do solo e umidade. Também foi medida a resistência do solo à penetração com penetrômetro de impacto Kamaq (Stolf, 1991).

Quanto à textura (0-20 cm de profundidade), foram obtidos os teores de argila ($g\ g^{-1}$), silte ($g\ g^{-1}$) e areia ($g\ g^{-1}$). Para a análise de fertilidade do solo (0-20 cm), foram obtidos os teores de macronutrientes, pH ($CaCl_2$), matéria orgânica ($g\ dm^{-3}$), fósforo resina ($mg\ dm^{-3}$), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases (V%) e valores em $cmol_c\ dm^{-3}$ para hidrogênio + alumínio, potássio, cálcio e magnésio. As análises de solo foram realizadas segundo metodologia da Claessen (1997). As análises de fertilidade foram realizadas em duas fases, no início do estudo, em 2018 (67 pontos de amostragem) e ao final do experimento, em 2021 (em 20 pontos) de acordo com os cinco tratamentos de adubação, duas ZMs e duas repetições por ZM, para verificação das alterações após o manejo localizado de insumos, como adubos, nos tratamentos da experimentação on-farm.

A resistência do solo à penetração foi medida conforme metodologia de Stolf (1991), para obter valores em MPa de 0-40 cm de profundidade. A medição foi realizada no início de condução do estudo para caracterização de áreas potenciais para a compactação do solo. Foram medidas seis repeti-

ções, sendo três na entrelinha com a passagem do rodado (compactada) e três na entrelinha sem a passagem do rodado, coberta de solo revolvido durante a subsolagem. A grade foi de 50 pontos regulares com borda de 5 metros, em uma área efetiva de 700 m x 200 m, com pontos espaçados de 60 m x 28 m. Os dados de umidade do solo foram medidos por TDR, usando uma sonda de três hastas (tipo garfo) até 0-20cm de profundidade, considerando valores médios de quatro medidas por ponto (duas na linha e duas na entrelinha de plantio).

A avaliação da produção da cana no talhão dos ciclos 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021 foi realizada nos meses de junho a julho, pelo método da biometria, ou seja, por pesagem da biomassa e contagem do número de colmos em uma área de duas linhas de cana-de-açúcar por 2 metros de comprimento por ponto, para posterior cálculo da produtividade em $t\ ha^{-1}$. A produtividade obtida em 2019 foi realizada em uma grade de amostragem de 31 pontos, estabelecida previamente para análise espacial. Também foram coletados 10 colmos, aleatoriamente, para análise de teor de Brix. Para medir a produtividade da cana-de-açúcar foi aplicado o método proposto por Gheller et al. (1999), que estima o peso total da parcela por meio da multiplicação do número de colmos da área amostrada pelo peso médio de dez colmos. As avaliações da produtividade em 2020 e 2021 foram acompanhadas após estabelecimento da experimentação on-farm (detalhada no item 2.5), porém a produção foi obtida somente em 2021, pois em 2020 não foi realizada devido ao desalinhamento na aplicação de adubo na linha de plantio na faixa do tratamento de adubação. A altura das plantas no momento da aplicação dificultou a passagem pelo operador da máquina. Em julho de 2021, foi realizada a colheita no experimento on-farm em 20 pontos, considerando os cinco tratamentos, duas ZMs e duas repetições por zona.

Para as análises dos dados do primeiro ciclo produtivo da cultura (2018/2019), inicialmente os dados foram analisados pela estatística descritiva obtendo-se média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, valor mínimo, valor máximo, assimetria e curtose. Para verificar a variabilidade espacial, os dados foram analisados pela geoestatística, por meio da construção e ajuste de semi-variogramas (representação gráfica da variação de um conjunto de dados em relação à distância indicando ou não a existência de variabilidade espacial, segundo Grego et al., 2014), *krigagem* (método utilizado em geoestatística para interpolação de dados) para interpolação de dados e construção de mapas de isolinhas, descritos em Vieira (2000). Após a obtenção dos atributos do solo e da planta e análise de variabilidade espacial, foram geradas as plataformas espaciais de informação contendo os mapas de variabilidade espacial para a definição das ZMs.

Definição das Zonas de Manejo e imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant)

Os mapas de monitoramento das diferentes variáveis de solo e da cultura, realizados no primeiro ano do experimento (2018), permitiram identificar a presença de regiões com variabilidades distintas dentro do talhão. Desse modo, a subdivisão da área em ZMs foi realizada como sendo um primeiro passo para viabilizar a experimentação on-farm. Diferentes algoritmos de agrupamento de dados, bem como combinações das diferentes variáveis relacionadas ao solo (condutividade elétrica do solo) e à planta (índices de vegetação), foram utilizados para identificar diferentes arranjos de ZMs para a área. A escolha da melhor configuração deu-se a partir de duas análises principais: ZMs equilibradas com relação à área (áreas de tamanho similar) e que possuísem diferenças significativas quanto à média de produtividade, considerando os dados médios das amostras de biometria internas a cada ZM (Speranza et al., 2019).

Imagens do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) foram obtidas para verificar a evolução da cultura e o índice de vegetação. Aquisição de imagens com câmeras NIR-RGB e multiespectral acopladas

na Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) modelo VerokHorus e, também, na Phantom 4, foram obtidas em outubro e dezembro de 2018 e maio de 2019. As imagens foram obtidas e mosaicas no Laboratório Nacional de Agricultura de Precisão da Embrapa (LANAPRE), conforme metodologia descrita por Grego et al. (2020).

Estabelecimento da experimentação on-farm

Após o mapeamento e delimitação das ZMs, foi implantado experimento on-farm de adubação para aplicação localizada em cobertura, variando as doses dos insumos dentro de cada ZM definida sem ruídos, de forma otimizada para facilitar a aplicação. O delineamento experimental (blocos ao acaso) foi definido com a equipe envolvida no projeto, considerando as necessidades e manejos já realizados pela Usina, de modo a garantir adequado teste de hipótese e análise adequada dos dados. Foram aplicados cinco tratamentos de adubação sólida e foliar (T1 - testemunha; T2 - adubação sólida 30 kg de N ha⁻¹; T3 - adubação foliar 3 L ha⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg); T4 - adubação foliar 1,5 L ha⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg); T5 - adubação sólida 30 kg de N ha⁻¹ + adubação foliar 3 L ha⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg), conforme a Figura 3. A adubação sólida foi realizada três meses após colheita do ciclo anterior da cultura, e a adubação líquida foi realizada quatro meses após a adubação sólida. Os tratamentos foram aplicados em faixas de 18 metros de largura contemplando 12 linhas da cultura com 650 m de comprimento.

A aplicação da taxa variada de insumos foi realizada de forma mecanizada de acordo com a disponibilidade de equipamento da Usina (Figura 3). Análises de solo quanto à fertilidade e à produtividade foram realizadas em cada ZM antes e após a implantação do experimento on-farm conforme detalhado no item 2.3. Os dados de fertilidade do solo e de produção da cana-de-açúcar, em cada tratamento, foram submetidos à análise estatística para análise e validação dos tratamentos. Foi realizada análise estatística com delineamento em blocos casualizados e em faixa no software R. Foi aplicada a análise de variância (ANOVA) como método estatístico utilizando o teste F de Fisher-Snedecor (Fisher, 1922). As médias seguidas de letras diferentes, minúsculas nas colunas, indicam diferença significativa a 5% de probabilidade entre os tratamentos, e a ausência de letras não indica diferença estatística significativa.



Figura 3. Aplicação dos tratamentos no ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar. A) Croqui dos cinco tratamentos de adubação em faixas e os quatro locais de amostragem (1, 2, 3 e 4); B) Equipamento realizando a aplicação dos tratamentos. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Resultados e Discussão

Condutividade Elétrica e Zonas de Manejo

Considerando que a condutividade elétrica do solo tem se tornado importante indicador da variabilidade espacial de áreas agrícolas, com o intuito de aumentar a precisão ou até mesmo substituir as amostragens de solo tradicionais indicando regiões homogêneas, os dados foram analisados pela geoestatística e foram gerados mapas de variabilidade espacial. Foi possível a identificação de manchas representativas de condutividade elétrica do solo na direção horizontal, considerando as duas profundidades, de até 0,5 m e até 1,0 m. A Figura 4 exibe os mapas de condutividade elétrica do solo a 0,5 m e 1,0 m após a interpolação espacial, classificados em quatro intervalos.

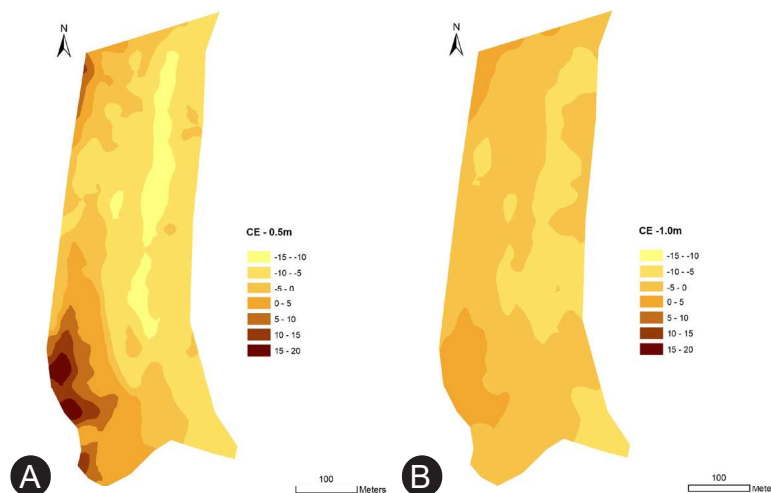


Figura 4. Condutividade elétrica do solo (CE) na área de realização de ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar após a interpolação espacial, considerando A) até 0,5 m de profundidade, e B) até 1,0 m de profundidade. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Para o delineamento de ZMs, foram utilizados algoritmos de agrupamento específicos para dados espaciais, seguindo os conceitos de descoberta de conhecimento em bancos de dados espaciais (Speranza et al., 2018). A partir dos dados exibidos na Figura 4, foram obtidos mapas de zonas de manejo que permitiram análises individuais com relação à variabilidade espacial.

Após a realização de diversos experimentos e por ser considerada uma área experimental pequena, estabeleceu-se uma divisão em 2 ZMs, conforme a Figura 5.

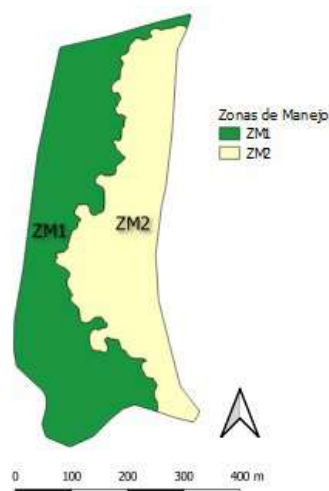


Figura 5. Mapa de Zonas de Manejo (ZM) na área de realização de ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar, definido para a área experimental, considerando a condutividade elétrica do solo em duas profundidades. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Medidas relacionadas à estatística descritiva das amostras internas a cada uma das duas zonas de manejo foram obtidas para analisar a variabilidade com relação aos dados de condutividade elétrica do solo (0,5 m e 1,0 m), conforme Tabela 1. As amostras contidas na ZM1, tanto para o mapa de condutividade a 0,5 m quanto para 1,0 m, são representadas por um intervalo maior de medidas, proporcionando maiores variância e desvio padrão quando comparadas com as amostras contidas na ZM 2. Ao analisarmos os mapas da Figura 4, verifica-se que, na área representada pela ZM 1 na Figura 5, existe grande variação dos níveis de classificação adotados, principalmente na região noroeste dos dois mapas. Por outro lado, a área representada pela ZM2, na Figura 5, mostra, para ambos os mapas da Figura 4, uma predominância de amostras com baixa condutividade elétrica e valores menos variáveis.

Tabela 1. Estatística descritiva considerando dados de condutividade elétrica do solo separadas por zonas de manejo. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Estatística	Zona de Manejo 1	Zona de Manejo 2	Zona de Manejo 1	Zona de Manejo 2
	profundidade de 0,5 m		profundidade de 1,0 m	
Média	-0,10	-10,57	-2,41	-6,74
Intervalo (%)*	46,92	26,34	19,70	14,32
Desvio Padrão	8,56	3,60	3,49	1,43
Variância	3.550	2.673	3.551	2.671

*Porcentagem de variação dos valores em relação à média.

Assim, o delineamento de ZM escolhido para a área define duas ZMs ocupando, respectivamente, 55,5% (ZM 1) e 45,5% (ZM 2) da área do talhão. A experimentação on-farm foi planejada em faixas do sul ao norte do talhão, de tal forma que, tanto para adubação sólida quanto para a adubação líquida, fossem acomodadas todas as diferentes taxas previstas nos experimentos, garantido as mesmas repetições para as duas ZMs.

Considerando o declive especificado na área, representado pelo Modelo Digital de Elevação (MDE) mostrado na Figura 6, foi possível correlacionar os valores mais altos de condutividade do solo também com a parte de menor declive, onde houve tendência de aumento da umidade do solo e, portanto, da concentração maior de argila no solo, tornando-o mais apto à condutividade elétrica do solo. Os valores das curvas de nível da área variaram com valores de 690 m a 735 m, ou seja, uma diferença de 45 m. Essas diferentes cotas altimétricas do terreno, no sentido leste a oeste da área experimental, vêm corroborar para a definição das zonas de manejo definidas para a experimentação on-farm.

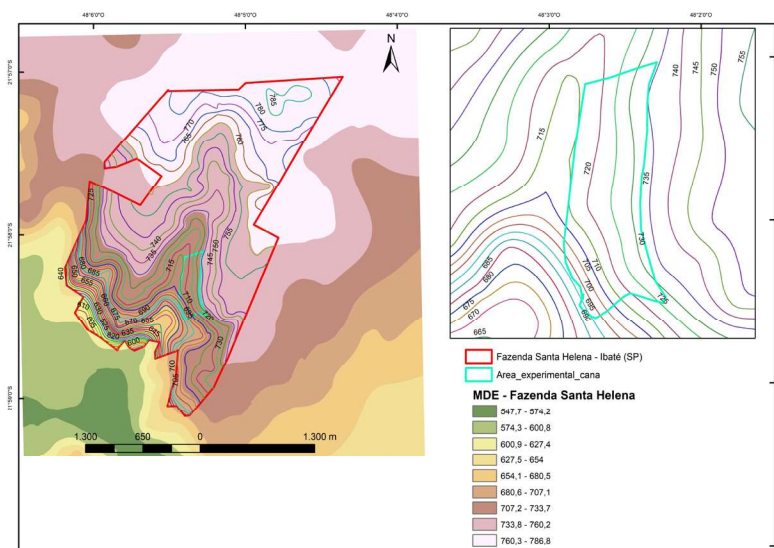


Figura 6. Modelo Digital de Elevação (MDE) da Fazenda Santa Helena e curvas de nível da área experimental de realização de ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Imagens de Satélite e por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP)

A relação entre IVs obtidos por sensores remotos com parâmetros biofísicos das plantas e com atributos físicos do solo é usual na AP. Os IVs, especialmente o NDVI, têm sido utilizados principalmente para estimativa do potencial produtivo das culturas agrícolas, para adubações nitrogenadas diferenciadas e para detectar infestação de plantas daninhas e falhas de irrigação.

O comportamento espectral e espacial da área experimental da cana-de-açúcar no primeiro ano do ciclo de produção (safra 2018/2019) foi estudado a partir do cálculo de IVs (NDVI e NDre2) obtidos de imagens do Sentinel-2 em 18 datas da safra. Na Figura 7 pode ser observada a variação dos IVs no decorrer das datas avaliadas. Correlacionando os IVs com os dados da condutividade elétrica do solo (dados não mostrados), houve correlação positiva (tanto para 0,5 m quanto para 1,0 m do solo) desde a implantação até o sétimo mês (223 dias após plantio – pico do crescimento) e correlação negativa a partir de outubro de 2018 até julho de 2019 (Figura 7).

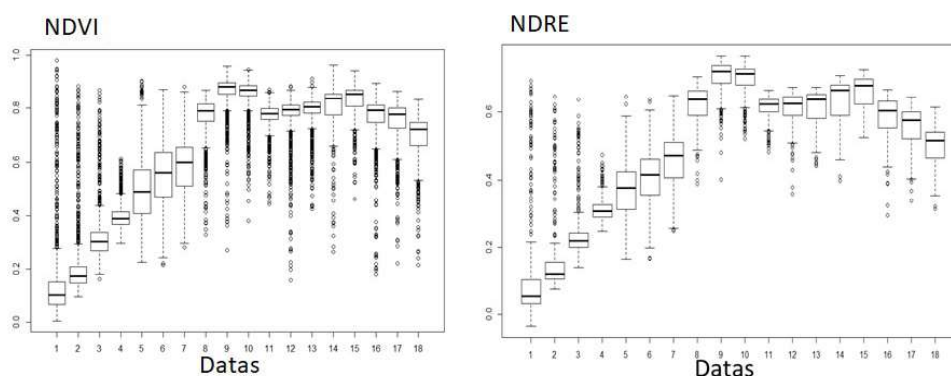


Figura 7. Evolução de valores de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Red Edge (NDre2) nas 18 datas de observação dos IVs na lavoura de cana-de-açúcar em Ibaté (SP), safra de 2018/2019. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

As imagens do Sentinel-2, com suas 13 bandas e resolução temporal adequada, apresentaram potencial de aplicação quanto ao acompanhamento vegetativo do ciclo todo da planta e associação com a condutividade elétrica do solo.

Para a análise de dependência espacial, fez-se a interpolação espacial com uso da *krigagem* ordinária conforme Vieira (2000) e foram construídos mapas dos valores interpolados para os dois agrupamentos em cada um dos IVs (1 = médias de IV de 11 de março e 10 de abril de 2018; e agrupamento 3 = médias de IV de 06 de novembro e 06 de dezembro de 2018, datas do pico de crescimento da variedade de cana hiperprecoce).

Apesar da área experimental ser considerada pequena, quando se trabalhou com imagens satelitais foi possível encontrar dependência espacial para os índices de vegetação nos dois agrupamentos (Figura 8). Quando comparados com a condutividade elétrica do solo (Figura 4), houve tendência de correlação espacial positiva entre os IVs obtidos de março a abril de 2018 e correlação negativa entre índices de vegetação de 06 de novembro a 6 de dezembro de 2018. Isto indica que os IVs do início de desenvolvimento da cultura refletiram melhor as diferenças do solo do que os IVs das imagens obtidas no pico de crescimento da cultura.

Foram obtidas imagens por Vant/Arp modelo Verok Horus (Figura 9A) durante três fases do ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar na safra de 2018/2019 (Figuras 9B, 9C, e 9D). Notou-se que, ao longo de todo ciclo, a parte inferior, identificada como ZM 1 (Figura 5) apresentou menores valores

de NDVI. As imagens indicaram, portanto, a diferença espacial dos índices de vegetação ao longo do ciclo, o que auxilia grandemente na correlação com a produção da cana nesse ciclo.

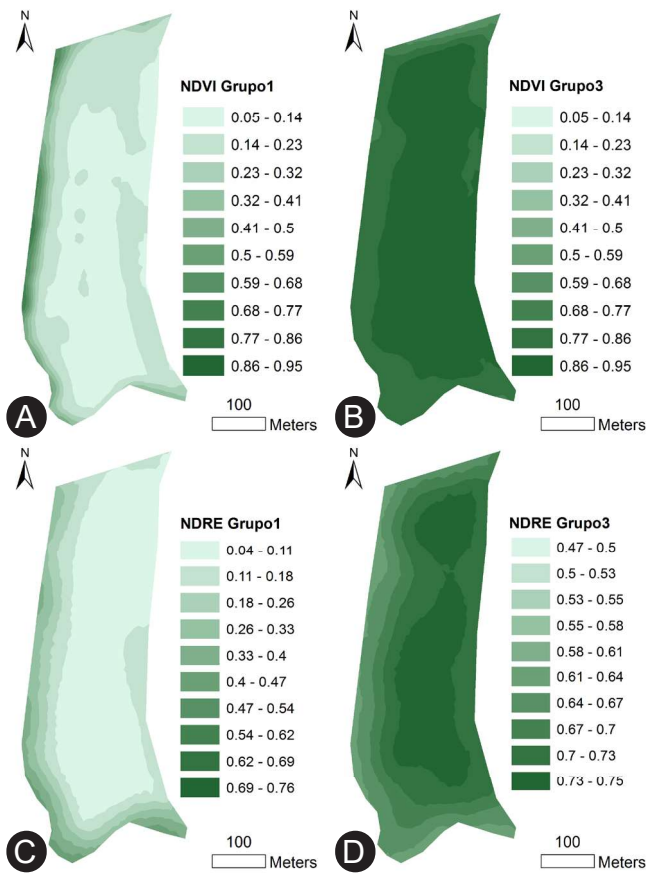


Figura 8. Mapas de contorno de valores interpolados espacialmente na área de realização de ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar, considerando agrupamento 1 (de março a abril de 2018) e 3 (de novembro a dezembro de 2018): A) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (agrupamento 1); B) NDVI (agrupamento 3); C) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Red Edge - NDRE (agrupamento 1); D) NDRE (agrupamento 3). Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

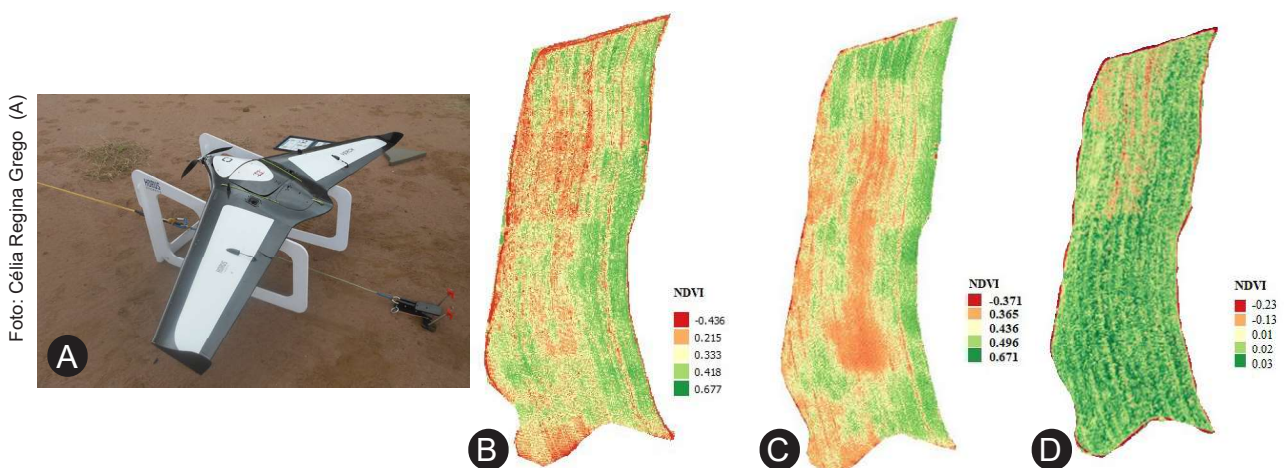


Figura 9. Voo com Aeronave Remotamente Pilotada e Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtidos no ciclo da cana de 2018/2019 na área de realização do ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar: A) Equipamento modelo Verok Horus; B) Imagem NDVI de outubro de 2018; C) Imagem NDVI de dezembro de 2018; D) Imagem NDVI de abril de 2019. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo

As análises espaciais da química e física do solo foram realizadas no início do primeiro ciclo de acompanhamento da cana-de-açúcar, para fins de caracterização inicial do solo e para a identificação de possíveis correlações espaciais com outros atributos levantados, como condutividade elétrica do solo, Índices de vegetação e produtividade.

Em relação aos atributos físicos, foram obtidos os mapas de resistência média do solo à penetração (RP), em MPa, de 0-40 cm e umidade do solo de 0 a 20 cm de profundidade. Os mapas foram obtidos pela análise de dependência espacial e interpolação por *krigagem* (Figura 10) e indicaram manchas semelhantes quanto a maior RP e umidade do solo na ZM 1, onde também foram observadas áreas mais heterogêneas, com maior variação nos dados interpolados. Quanto à textura do solo, apresentaram dependência espacial os teores de areia e argila (Figuras 10C e 10D) e foram negativamente correlacionados, sendo que houve predominância de solo com menor teor de areia e maior de argila na parte mais declivosa da área, na mesma faixa que houve concentração de maiores valores de condutividade elétrica do solo, classificada como ZM 1, faixa onde ocorreram também os maiores valores de RP e umidade do solo. Esses resultados estão de acordo com Sanches et al. (2019), que relatam a relação entre a condutividade elétrica do solo e esses atributos físicos do solo.

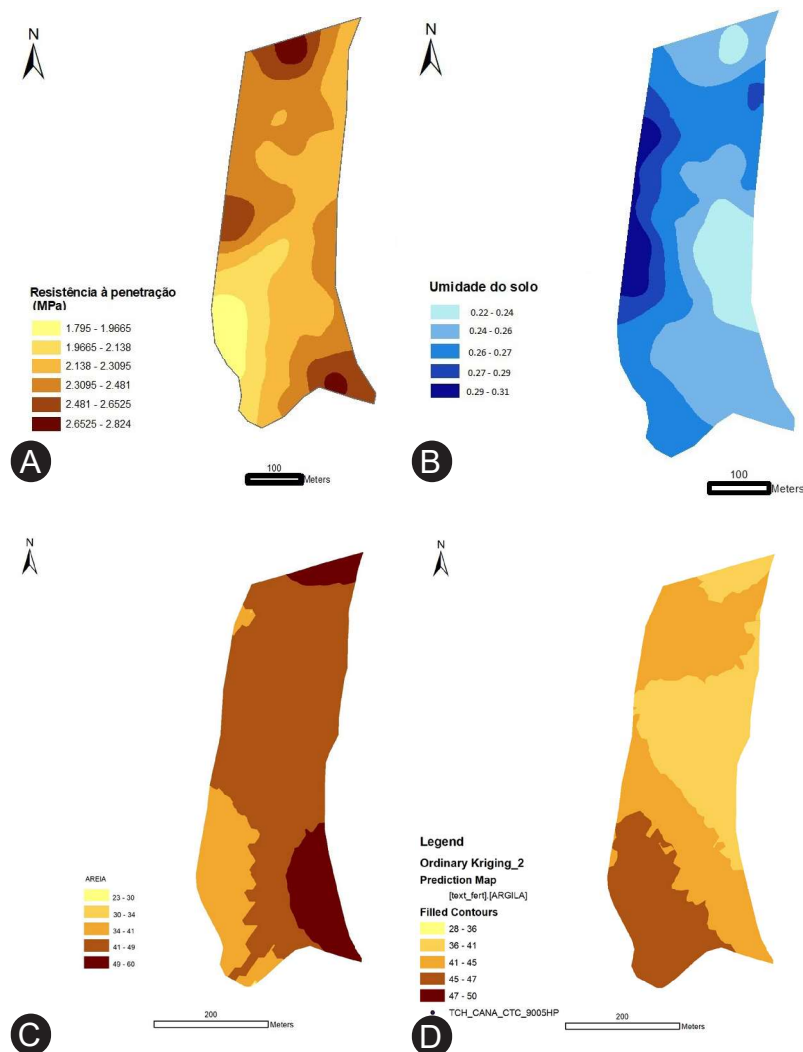


Figura 10. Mapas interpolados por *krigagem* na área de realização do ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar: A) Mapa de resistência média do solo à penetração RP em MPa de 0-40 cm; B) Mapa de umidade do solo de 0-20cm de profundidade; C) Areia (%); D) Argila (%). Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Os mapas dos dados químicos do solo, analisados por geoestatística e interpolados por *krigagem*, estão apresentados na Figura 11. Foram mapeados apenas os atributos químicos que apresentaram dependência espacial, considerando a interpolação por *krigagem*. Os que não apresentaram dependência espacial foram pH, H+Al, capacidade de troca catiônica e enxofre, e como a *krigagem* interpola utilizando os parâmetros de ajuste do semivariograma (efeito, pepita, variância estrutural e alcance), garantindo a interpolação sem tendência e com variância mínima (Vieira, 2000), não foi possível a elaboração dos mapas para esses atributos. Considerando a distância (40 m x 50 m) e número de pontos amostrados (67 pontos), os dados que não apresentaram dependência espacial indicaram comportamento aleatório, sem nenhuma relação espacial entre amostras vizinhas.

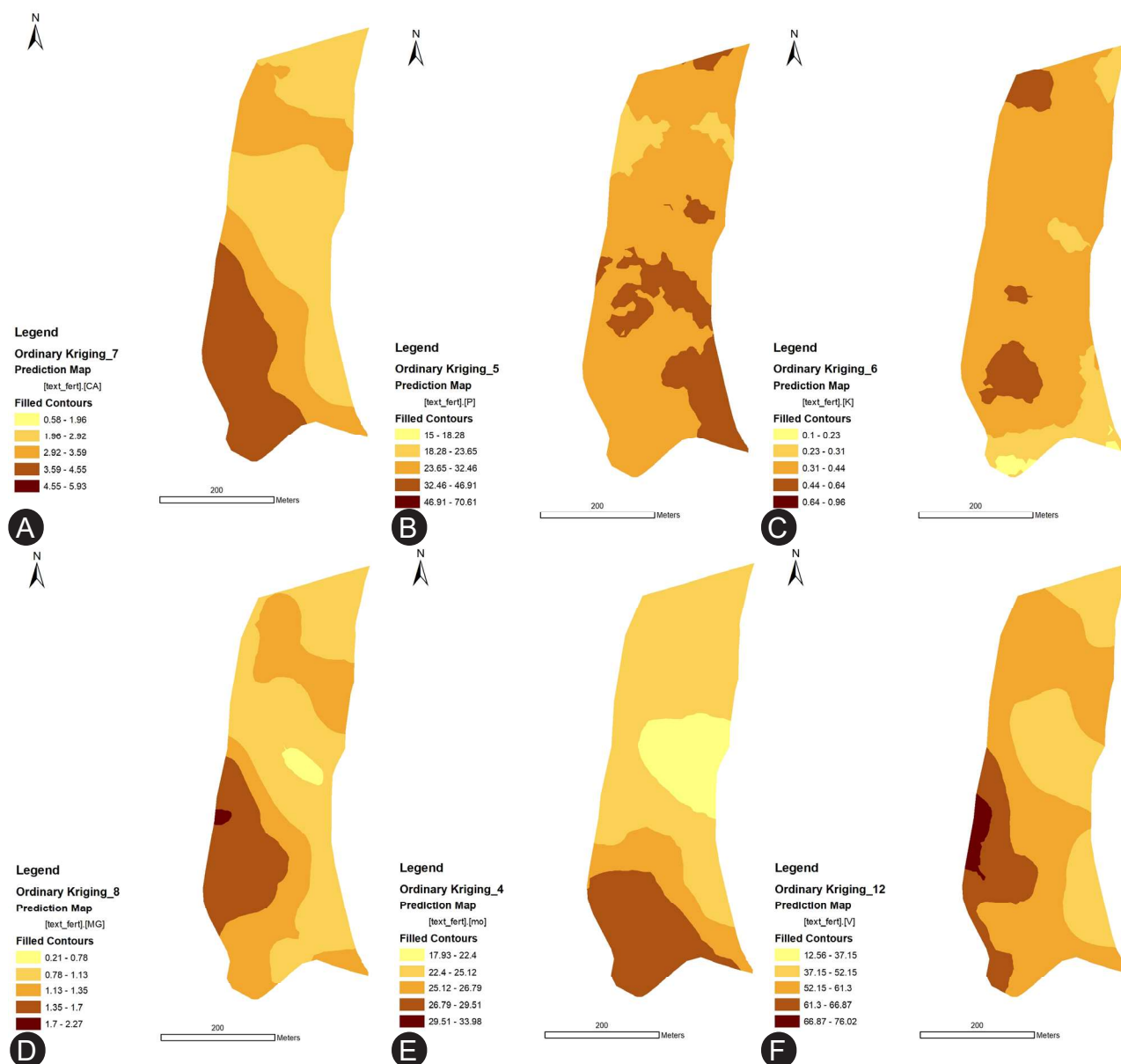


Figura 11. Mapas interpolados por *krigagem* na área de realização do ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar: A) Cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); B) Fósforo (mg dm^{-3}); C) Potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); D) Magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$); E) matéria orgânica (g dm^{-3}); F) saturação por bases (%). Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

De acordo com os mapas da Figura 11, foi possível identificar relações entre a distribuição espacial dos dados. Nota-se maior variação nas manchas dos teores de macronutrientes, matéria orgânica e saturação por bases distribuídos na faixa da ZM 1 do que na ZM 2, assim como verificado para a distribuição espacial da condutividade elétrica do solo (Figura 4). Isso comprova que a medida

de condutividade elétrica do solo é um bom indicativo da variabilidade físico-química do solo nesse estudo com cana-de-açúcar, concordando com Sanches et al. (2019).

Considerando os teores dos atributos químicos, e de acordo com Raji e Cantarella (1997), o solo apresentou teores médios de cálcio e fósforo, porém teor baixo de potássio. Mas, considerando a saturação por bases, a recomendação para controlar a acidez do solo na área com cana-de-açúcar foi elevar para 60%, e o valor médio das amostras foi de 56%, ou seja, praticamente não haveria necessidade de calagem no solo da área de estudo.

Medidas relacionadas à estatística descritiva das amostras internas a cada uma das duas ZMs foram obtidas para analisar a variabilidade com relação aos dados de condutividade elétrica do solo (0,5 m e 1,0 m), conforme Tabela 1. As amostras contidas na ZM 1, tanto para o mapa de condutividade a 0,5 m quanto para 1,0 m, foram representadas por um intervalo maior de medidas, proporcionando maior variância e desvio padrão quando comparadas com as amostras contidas na ZM 2. Ao analisarmos os mapas da Figura 4, verifica-se que, na área representada pela ZM 1 na Figura 5, existiu grande variação dos níveis de classificação adotados, principalmente na região noroeste dos dois mapas. Por outro lado, a área representada pela ZM 2 na Figura 5 mostra, para ambos os mapas da Figura 4, uma predominância de amostras com baixa condutividade elétrica e valores menos variáveis.

Variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar

Os dados relacionados à produção da cana-de-açúcar foram analisados por geoestatística e houve dependência espacial para a produtividade ($t\ ha^{-1}$). Visualizando o mapa de produtividade (Figura 12), verificamos que a faixa de, aproximadamente, $180\ t\ ha^{-1}$ a $200\ t\ ha^{-1}$ foi a predominante na área. Maior produtividade foi vista na faixa superior do mapa, com pouca diferença de produtividade entre as ZM 1 e ZM 2.

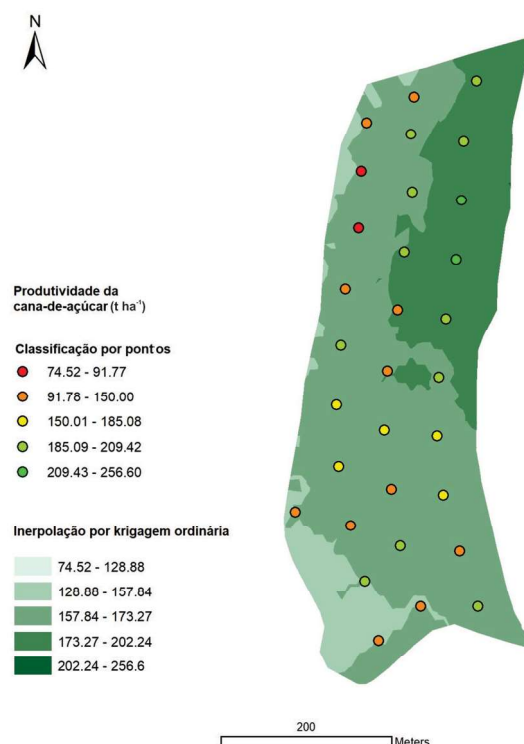


Figura 12. Mapa de produtividade de cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) na área de realização do ensaio on-farm na cultura da cana-de-açúcar. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Comparando visualmente o mapa de produtividade com os atributos do solo apresentados anteriormente, não foi possível estabelecer uma relação positiva, o que indica baixa influência das variáveis de solo com a produtividade da cana-de-açúcar. Resultado semelhante foi verificado por Souza et al. (2008), que salientaram que o relevo tem sido uma variável importante para estudo entre a distribuição de atributos do solo e a produtividade de culturas. Outro fator importante a ser considerado é que a grade de pontos não foi a mesma, pois, devido às necessidades e à logística de cada método de amostragem, foram amostrados menos pontos para a produtividade (31 pontos) em relação aos atributos do solo (67 pontos). Uma grade mais densa, aliada a uma evolução temporal de mapas de produtividade com uma sequência de várias safras da cana-de-açúcar, seria uma base mais consistente para se verificar o relacionamento espacial entre a produtividade e os atributos do solo.

Análise da experimentação on-farm na cana-de-açúcar

As ZMs e todas as bases de dados especializadas por geoestatística deram suporte para a definição da aplicação dos cinco tratamentos para a aplicação localizada de insumos na experimentação on-farm. Os tratamentos foram aplicados em faixas em 2019 e os dados foram levantados por parcelas no final do ciclo da cana, em julho de 2021, terceiro ciclo após a renovação do canavial. As dosagens e tipos de adubação foram definidos em comum acordo com os dirigentes da Usina Santa Cruz, no intuito de atender ao princípio da experimentação *on-farm* que caracteriza uma experimentação prática no campo produtivo, de acordo com os recursos e as necessidades do produtor.

Foram testados tratamentos relacionados à adubação principalmente de nitrogênio nas formas sólida em cobertura e líquida, sendo duas faixas para cada tratamento, uma em cada ZM (ZM 1 e ZM 2). O nitrogênio é um dos elementos mais exigidos na cultura da cana-de-açúcar porque tem a função de promover o alongamento dos entrenós da cana, que afeta diretamente a produtividade (Penatti, 2013). Dessa forma, é importante investigar a forma e a quantidade de aplicação do nutriente como feito neste trabalho, que considerou as formas de adubação líquida e sólida em diferentes dosagens.

De acordo com os resultados da análise estatística, não houve diferença nos tratamentos entre as duas ZMs, ou seja, não foram identificadas alterações significativas nos atributos do solo e na produtividade da cana-de-açúcar nas duas ZMs quando foram aplicados tratamentos com adubação sólida e foliar nas diferentes doses. O acompanhamento de outros ciclos da cultura, aplicando os mesmos tratamentos, poderia evidenciar essas diferenças entre as zonas de manejo. Speranza et al (2019) encontraram dificuldade para separar as ZMs considerando a produtividade da cana-de-açúcar e a hipótese foi de que a cultura ainda não havia atingido a maturidade capaz de diferenciar a partir dos índices de vegetação.

Na Tabela 2, estão apresentadas as análises estatísticas das diferentes aplicações de insumos e doses de acordo com os cinco tratamentos aplicados em faixa, considerando as duas ZMs, para os atributos químicos do solo, coletados na área no final do estudo. Houve diferença significativa entre os tratamentos para os atributos fósforo, magnésio, cálcio, pH, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). De forma predominante, o tratamento que resultou em maiores teores dos macronutrientes (magnésio, cálcio), matéria orgânica, soma de bases, CTC e V% foi a adubação na forma sólida com a dose de 30 kg de N ha⁻¹, seguido da forma líquida (3 L ha⁻¹).

Na Tabela 3 estão apresentadas as análises estatísticas das diferentes aplicações de insumos e dosagens de acordo com os cinco tratamentos aplicados em faixa considerando as duas ZMs, para

a produtividade e teor de Brix da cana-de-açúcar na área no final do estudo. Verificou-se que houve diferença significativa apenas para a produtividade e que o tratamento que resultou em maior produtividade foi a adubação na forma sólida com a dose de 30 kg de N ha⁻¹, assim como para os atributos químicos do solo. É importante salientar que a mistura de adubação foliar mais sólida não trouxe benefícios para a produtividade e nem para a fertilidade do solo. Nesse sentido, Gonzáles Villalba et al. (2014) demonstraram que adubação nitrogenada, quando adicionada além do necessário, parte pode não ser absorvida pela planta e pode sofrer processos microbiológicos, químicos e físicos, como lixiviação e volatilização, resultando em baixo desempenho produtivo das culturas e risco de contaminação ambiental, tendo implicações na sustentabilidade dos agrossistemas.

Tabela 2. Análise estatística na experimentação on-farm em cana-de-açúcar para fósforo resina (mg dm⁻³), potássio (cmol_c dm⁻³), magnésio (cmol_c dm⁻³), cálcio (cmol_c dm⁻³), pH CaCl₂, matéria orgânica (g dm⁻³), soma de bases, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%). Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Adubação	Fósforo	Potássio	Magnésio	Cálcio	pH	Matéria orgânica	Soma de bases	CTC	Saturação por bases
Testemunha	1,096 ab*	0,61	1,22 a	2,66 ab	4,83 ab	24,50 b	4,01 ab	8,18 ab	54,13 ab
Sólida 30 kg de N ha ⁻¹	1,094 b	0,36	1,38 a	3,15 a	5,12 a	27,75 ab	4,90 a	8,08 bc	60,52 a
Foliar 3 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg)	1,127 ab	0,67	1,03 ab	2,37 bc	4,63 b	27,50 a	4,07 ab	9,07 a	43,20 b
Foliar 1,5 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, e Zn e Mg)	1,112 ab	0,50	0,78 b	2,11 c	4,53 b	25,75 ab	3,40 b	7,79 bc	43,28 b
Foliar 1,5 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg) + sólida 30 kg de N ha ⁻¹	1,067 c	0,44	1,24 a	2,67 abc	4,86 ab	24,25 b	4,35 ab	7,15 c	59,90 a
Média	1,097	0,519	1,13	2,62	4,81	25,95	4,26	8,097	52,23
Diferença Mínima Significativa (LSD) a 0,05	1,34	0,44	0,41	0,60	0,43	2,85	1,34	0,95	13,78
Coefficiente de variação (C.V.%)	0,022	56,23	23,99	15,21	5,90	7,29	20,87	7,79	17,49

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste F a 5% de probabilidade.

Tabela 3. Análise estatística na experimentação on-farm para a produtividade (t ha⁻¹) e teor de Brix (%) da cana-de-açúcar. Fazenda Santa Helena, Ibaté, SP.

Adubação	Produtividade	Brix
Testemunha	189,30 c	26,26
Sólida 30 kg de N ha ⁻¹	222,49 a	21,90
Foliar 3 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg)	205,30 b	22,26
Foliar 1,5 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg)	208,40 b	22,21
Foliar 1,5 L ha ⁻¹ (fonte de N, B, Zn e Mg)+ sólida 30 kg de N ha ⁻¹	208,00 b	22,21
Médias	207,02	22,15
Diferença Mínima Significativa (LSD) a 0,05	11,88	1,11
Coefficiente de variação (C.V.%)	3,80	3,33

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste F a 5% de probabilidade.

Portanto, houve resposta do solo e da planta somente entre os tratamentos de adubação e não entre as ZM 1 e ZM 2. Provavelmente, os estudos entre as ZMs necessitam de continuidade da experimentação on-farm para indicar diferenças significativas, ou ainda, para que essas diferenças possam ser diagnosticadas com auxílio de sensores que venham a suprir a amostragem em quantidade, rapidez e de forma espacial. Desta forma, a experimentação on-farm poderá validar a

técnica de agricultura de precisão, que, segundo Molin et al. (2015), resulta no manejo localizado de adubação para gerar economia da dose aplicada, aumento da eficiência de uso dos fertilizantes e diminuição dos impactos ambientais.

Considerações Finais

Considerando todas as bases espaciais geradas, é possível concluir que a medida de condutividade elétrica do solo foi indicativa e essencial, permitindo a divisão da área em duas zonas distintas de manejo ao longo da linha de plantio da cana-de-açúcar, separando adequadamente a área com zonas de maior e menor variabilidade espacial. As duas zonas distintas de manejo direcionaram todas as avaliações realizadas na área em termos de solo e planta, o que otimizou a amostragem e as análises laboratoriais e, conseqüentemente, foram fundamentais no estabelecimento da experimentação on-farm.

A variabilidade espacial, representada no mapa de condutividade elétrica do solo, é correlacionada com a variabilidade espacial de atributos do solo e de índices de vegetação ao longo do ciclo da cultura, demonstrando que a condutividade elétrica do solo é uma variável indicativa de manejo diferenciado e, conseqüentemente, pode auxiliar na indicação da variabilidade espacial da produção da cana-de-açúcar.

Os tratamentos de adubação da experimentação on-farm foram aplicados para validação do sistema de agricultura de precisão utilizado no talhão da cana-de-açúcar da fazenda e foram estabelecidos de acordo com as necessidades práticas discutidas com os representantes da usina Santa Cruz, utilizando os recursos e equipamentos disponíveis. Considerando as duas distintas zonas de manejo (ZM 1 e ZM 2), os tratamentos de adubação, nas formas sólida e foliar, aplicados em faixas, não provocaram efeitos significativos nos atributos do solo e nem da planta. Contudo, independente das zonas de manejo, a adubação sólida com 30kg de N ha⁻¹ foi o tratamento que significativamente proporcionou maiores teores de macronutrientes do solo e também maior produtividade da cana-de-açúcar no terceiro ciclo produtivo.

O acompanhamento temporal de ciclos subsequentes da cultura no talhão, aplicando os mesmos tratamentos, faz-se necessário para que a experimentação on-farm possa evidenciar as diferenças entre as zonas de manejo e, assim, possa validar as técnicas de agricultura de precisão utilizadas no talhão, considerando as bases espaciais do solo e da planta no cultivo da cana-de-açúcar.

Referências

- BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. D. C.; SANCHES, I. D.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C. da; VICTORIA, D. D. C.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; FERREIRA, V. R.; RAMIREZ, A. R. Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. **Agriculture**, v. 10, n. 12, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture10120653>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- BORDONAL, R. de O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, Apr. 2018. Article 13. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v. 10, n. 1, Jan. 2021. Article 72. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land10010072>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- CONAB. **Safra brasileira de cana-de-açúcar**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>. Acesso em: 5 maio 2021.

- CURSI, D. E.; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S.; BRESSIANI, J. A.; GAZAFFI, R.; CHAPOLA, R. G.; FERNANDES JÚNIOR, A. R.; BALSALOBRE, T. W. A.; DINIZ, C. A.; SANTOS, J. M.; CARNEIRO, M. S. History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**, v. 24, n. 1, p. 112-133, Feb. 2021. Special issue. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-021-00951-1>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- CLAESSEN, M. E. C. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 1).
- FERNÁNDEZ-MANSO, A.; FERNÁNDEZ-MANSO, O.; QUINTANO, C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 50, p. 170-175, Aug. 2016. DOI: 10.1016/j.jag.2016.03.005
- FERRAZ, M. N.; CORREDO, L. de P.; WEI, M. C. F.; MOLIN, J. P. Spatial variability mapping of sugarcane qualitative attributes. **Engenharia Agrícola**, v. 39, p. 109-117, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep109-117/2019>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- FISHER, R. A. On the mathematical foundations of theoretical statistics. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: mathematical, physical and engineering sciences**, v. 222, n. 594-604, p. 368-368, Jan. 1922. Disponível em: http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/Fisher_1922_Estimation.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.
- GHELLER, A. C. A.; MENEZES, L. L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H. P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A. A. F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCAR/CCA/DBV, 1999. 7 p.
- GONZÁLES VILLALBA, H. A. LEITE, J. M.; OTTO, R.; TRIVELLIN, P. C. O. Fertilizantes nitrogenados: novas tecnologias. **Informações Agrônomicas**, v. 148, p. 12-20, 2014.
- GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. de C. Agricultura. In: TÔSTO, S. G.; RODRIGUES, C. A. G.; BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. (ed.). **Geotecnologias e geoinformação: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 135-148. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103408/1/Cap.-9.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- GREGO, C. R.; SPERANZA, E. A.; RODRIGUES, G. C.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; VENDRUSCULO, L. G.; RODRIGUES, C. A. G.; INAMASU, R. Y.; VAZ, C. M. P.; RABELLO, L. M.; JORGE, L. A. de C.; ZOLIN, C. A.; FRANCHINI, J. C.; RONQUIM, C. C. Tecnologias desenvolvidas em agricultura de precisão. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 166-191.
- INMET. **Dados meteorológicos**: dados históricos anuais. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 5 ago. 2021.
- MANGIAFICO, S. S. **Summary and analysis of extension program evaluation in R, version 1.19.10**. Disponível em: <https://rcompanion.org/documents/RHandbookProgramEvaluation.pdf>. Acesso: 7 ago. 2019.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.
- PENATTI, C. P. **Adubação da cana-de-açúcar: 30 anos de experiência**. Ituiutaba: Ottoni Ed., 2013. 347 p.
- PEPS: operating platform sentinel products. 2019. Disponível em: <https://peps.cnes.fr>. Acesso em: 2 ago. 2019.
- PRADO, H. **Pedologia fácil: aplicações em solos tropicais**. 4. ed. Piracicaba: Do Autor, 2013. 284 p.
- RAIJ, B. van., CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1997. p. 233-239. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R.; SANCHES, G. M.; SPERANZA, E. A.; RONQUIM, C. C.; SILVEIRA, H. L. F.; LUCHIARI JUNIOR, A. Índices de vegetação (sentinel-2) da cana-de-açúcar relacionados com a condutividade elétrica aparente de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2019, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019. p. 155-159.
- SANCHES, G. M.; MAGALHAES, P. S. G.; REMACRE, A. Z.; FRANCO, H. C. J. Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. **Soil & Tillage Research**, v. 175, p. 217-225, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2017.09.010.
- SANCHES, G. M.; PAULA, M. T. N. de; MAGALHÃES, P. S. G.; DUFT, D. G.; VITTI, A. C.; KOLLN, O. T.; BORGES, B. M. M. N.; FRANCO, H. C. J. Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agrícola**, v. 76, n. 1, p. 10-17, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0128>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D. de; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, v. 12, p. 67-81, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11119-009-9155-8>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; JORGE, L. A. de C.; RODRIGUES, C. A. G.; LUCHIARI JUNIOR, A.; RONQUIM, C. C.; SANCHES, G. M. Delineamento de zonas de manejo em cana-de-açúcar a partir de atributos do solo e da cultura e imagens georreferenciadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. **Ciência, inovação e mercado: anais**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019. p. 175-179.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; SANCHES, G. M.; LUCHIARI JUNIOR, A. Caracterização da variabilidade espacial do solo a partir de medidas de condutividade elétrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2018, Curitiba. **Construção dos dados na era da digitalização agrícola: anais**. [Piracicaba]: AsBraAP, 2018. p. 329-334. ConBAP 2018.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.

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

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). **Cana de açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 839-852.