ANAIS

INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO ESPACIAL NA CLASSIFICAÇÃO DA MATURAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ANÁLISE ESTATÍSTICA

OTAVIO SALOMÃO
otavio.salomao@unesp.br
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" - FCAV

TATIANA CANATA
tatiana.canata@unesp.br
UNESP

FELIPE PONTES MONACHESI
felipe.monachesi@unesp.br
UNESP-FCAV

RESUMO: A determinação do ponto ideal de maturação da cana-de-açúcar é essencial para o planejamento da colheita e para a maximização da qualidade da matéria-prima destinada à produção de açúcar e etanol. Entretanto, os métodos convencionais de avaliação são baseados em amostragens pontuais e análises laboratoriais destrutivas, limitando a representação da variabilidade espacial presente em áreas comerciais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a influência do tamanho de pixel adotado na interpolação para diferenciar os níveis de maturação da cana-de-açúcar em talhões comerciais. A pesquisa foi conduzida em um talhão comercial de 10,4 ha localizado no estado de São Paulo, onde foram coletadas 49 amostras georreferenciadas para determinação dos atributos tecnológicos °Brix e Pureza. Os dados foram processados no software QGIS 3.40.9, utilizando interpolação espacial pelo método do Inverso da Distância Ponderada (IDW), com coeficiente de potência P = 2, para geração dos mapas temáticos dos atributos. Foram avaliadas diferentes resoluções espaciais dos modelos raster (0,5 a 5,0 m) por meio de testes estatísticos, visando verificar a influência do tamanho do pixel sobre os resultados da interpolação. Os resultados indicaram média de 17,78° para °Brix e 85,40% para Pureza, evidenciando que o teor de sólidos solúveis foi o principal fator limitante da maturação da cultura no momento da amostragem. Além disso, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes tamanhos de pixel avaliados, indicando que resoluções espaciais intermediárias podem ser empregadas sem comprometer a qualidade da representação espacial, reduzindo simultaneamente o custo computacional em aplicações de maior escala. Esses resultados demonstram que a escolha adequada da resolução espacial pode aumentar a eficiência do processamento de dados geoespaciais, especialmente em áreas produtivas extensas, sem perda significativa da qualidade dos produtos cartográficos gerados. Conclui-se que a integração entre geotecnologias, Sistemas de Informação Geográfica e interpolação espacial constitui uma ferramenta eficiente para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar, uma vez que tamanho do pixel da resolução espacial não acarretará em perdas significativas na qualidade dos dados, fornecendo informações que podem subsidiar o planejamento da colheita e a tomada de decisão em sistemas comerciais de produção.

PALAVRAS CHAVE: Agricultura de precisão; Sistemas de Informação Geográfica; interpolação espacial; resolução espacial; qualidade tecnológica da cana-de-açúcar.

ABSTRACT: Determining the optimal sugarcane maturity stage is essential for harvest planning and for maximizing the quality of raw material destined for sugar and ethanol production. However, conventional assessment methods rely on point sampling and destructive laboratory analyses, limiting the representation of the spatial variability found in commercial fields. In this context, the present study aimed to investigate the influence of pixel size adopted during spatial interpolation on the differentiation of sugarcane maturity levels in commercial fields. The research was conducted in a 10.4-ha commercial sugarcane field located in the state of São Paulo, Brazil, where 49 georeferenced samples were collected to determine the technological attributes °Brix and Purity. The data were processed using QGIS 3.40.9 software, applying the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method with a power coefficient of P = 2 to generate thematic maps of the evaluated attributes.

Different raster spatial resolutions (0.5 to 5.0 m) were assessed through statistical analyses to verify the influence of pixel size on the interpolation results. The results showed mean values of 17.78°Brix and 85.40% Purity, indicating that the soluble solids content was the main limiting factor for crop maturity at the time of sampling. Furthermore, no statistically significant differences were observed among the evaluated pixel sizes, demonstrating that intermediate spatial resolutions can be adopted without compromising the quality of spatial representation while simultaneously reducing computational costs in large-scale applications. These findings indicate that an appropriate choice of spatial resolution can improve the efficiency of geospatial data processing, particularly in extensive production areas, without significant loss in the quality of the generated cartographic products. It is concluded that the integration of geotechnologies, Geographic Information Systems (GIS), and spatial interpolation provides an efficient approach for monitoring sugarcane maturity, since the selected pixel size does not significantly affect data quality, thereby supporting harvest planning and decision-making in commercial production systems.

KEY WORDS: Precision agriculture; Geographic Information Systems (GIS); spatial interpolation; spatial resolution; sugarcane technological quality.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do agronegócio brasileiro, desempenhando papel estratégico na produção de açúcar, etanol, bioenergia e coprodutos. Nesse contexto, a determinação do ponto ideal de maturação da cultura é um fator determinante para maximizar a qualidade da matéria-prima, otimizar o planejamento da colheita e aumentar a eficiência operacional das usinas. Tradicionalmente, a avaliação da maturação é realizada por meio de análises laboratoriais destrutivas, como a determinação dos teores de Brix e Pureza. Entretanto, esses métodos apresentam limitações relacionadas ao elevado custo operacional, ao caráter amostral e à dificuldade de representar a variabilidade espacial existente dentro dos talhões, restringindo sua aplicação em áreas comerciais de grande extensão.

O avanço das geotecnologias, associado ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sensoriamento remoto e técnicas de agricultura de precisão, tem possibilitado o desenvolvimento de métodos mais eficientes para o monitoramento espacial das lavouras. Essas ferramentas permitem integrar informações georreferenciadas e análises espaciais, auxiliando a identificação da variabilidade da maturação da cultura e prestando suporte a tomada de decisão quanto à priorização das áreas para colheita. Além disso, a utilização dessas tecnologias contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo a necessidade de amostragens destrutivas e ampliando a capacidade de monitoramento.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo investigar a influência do tamanho de pixel adotado na interpolação dos dados georreferenciados para diferenciar os níveis de maturação da cana-de-açúcar em talhões comerciais utilizando atributos qualitativos da cultura e técnicas de geoprocessamento.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Setor sucroenergético, amostragem na cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.) desempenha papel estratégico no agronegócio brasileiro, sendo o país o maior produtor mundial da cultura e referência na produção de açúcar e etanol. Nesse contexto, a determinação do ponto ideal de colheita constitui um dos principais fatores para maximizar o rendimento industrial e a qualidade da matéria-prima. Entre os parâmetros tecnológicos utilizados para avaliar a maturação destacam-se o teor de sólidos solúveis (°Brix) e a Pureza do caldo, indicadores diretamente relacionados ao acúmulo de sacarose e ao potencial de produção de açúcar (CONSECANA, 2006; BARBOSA JÚNIOR et al., 2023).

Os métodos convencionais de avaliação da maturação baseiam-se em amostragens de campo e análises laboratoriais destrutivas. Embora apresentem elevada precisão, essas metodologias possuem limitações relacionadas ao custo operacional, ao tempo necessário para obtenção dos resultados e à baixa representatividade da variabilidade espacial existente em áreas comerciais. Em consequência, informações obtidas em poucos pontos amostrais podem não representar adequadamente as diferenças de maturação presentes ao longo do talhão, dificultando o planejamento da colheita (BÉGUÉ et al., 2010; MAGALHÃES et al., 2021).

2.2. Agricultura de precisão, sensoriamento remoto, sistema de informação geográfica

Nas últimas décadas, o avanço da agricultura de precisão e do sensoriamento remoto ampliou significativamente as possibilidades de monitoramento da variabilidade espacial das culturas agrícolas. O emprego de sensores embarcados em satélites e aeronaves remotamente pilotadas

(RPAs), associado ao desenvolvimento de técnicas de aprendizado de máquina, tem possibilitado estimar atributos qualitativos da cana-de-açúcar de forma rápida, não destrutiva e em escala espacial compatível com sistemas comerciais de produção. Barbosa Júnior et al. (2023) demonstraram que imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados, combinadas com algoritmos de aprendizado de máquina, apresentam elevada capacidade para predizer atributos tecnológicos da cultura. De forma semelhante, Canata et al. (2024) verificaram que imagens do satélite Sentinel-2 associadas a modelos de inteligência artificial possibilitam estimativas precisas dos atributos de qualidade da cana-de-açúcar, evidenciando o potencial dessas ferramentas para o planejamento da colheita.

Entretanto, a obtenção das imagens representa apenas uma etapa do processo. A transformação dessas informações em mapas capazes de subsidiar a tomada de decisão depende da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), responsáveis pela organização, integração e análise espacial dos dados georreferenciados. Nesse contexto, técnicas como interpolação espacial, álgebra de mapas e classificação temática permitem representar a distribuição espacial dos atributos tecnológicos ao longo do talhão, identificando zonas com diferentes níveis de maturação e fornecendo suporte ao manejo localizado (BURROUGH; MCDONNELL; LLOYD, 2015).

Entre as plataformas SIG disponíveis, o QGIS destaca-se por ser um software livre amplamente empregado em pesquisas científicas e aplicações de agricultura de precisão. O programa integra bibliotecas consolidadas de geoprocessamento, como GDAL, PROJ, GEOS e GRASS GIS, permitindo realizar interpolações espaciais, processamento raster, análises estatísticas e elaboração de mapas temáticos em ambiente integrado (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2025). Além disso, sua compatibilidade com diferentes formatos de dados e a possibilidade de integração com algoritmos geoestatísticos e de sensoriamento remoto tornam o software uma alternativa robusta para estudos envolvendo variabilidade espacial agrícola.

Nesse cenário, a integração entre sensoriamento remoto, geoestatística e Sistemas de Informação Geográfica constitui uma abordagem promissora para o monitoramento da maturação da cana-de-açúcar. A espacialização dos atributos tecnológicos permite identificar regiões com diferentes níveis de maturação, priorizar áreas para colheita e contribuir para a otimização das operações agrícolas, reduzindo custos e aumentando a eficiência do processo produtivo (BARBOSA JÚNIOR et al., 2023; CANATA et al., 2024).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1. Área de estudo, amostragem, integração com sistema de informação geográfica

A pesquisa foi conduzida em um talhão comercial de cana-de-açúcar localizado no estado de São Paulo, com área de 10,4 ha. Para caracterização da maturação da cultura, foram coletadas 49 amostras georreferenciadas distribuídas ao longo do talhão. As amostras foram encaminhadas a um laboratório especializado para determinação dos atributos tecnológicos da matéria-prima, sendo obtidos os valores de sólidos solúveis totais (°Brix) e Pureza do caldo.

Os dados obtidos, juntamente com as coordenadas geográficas (latitude e longitude), informações de corte e dias após o plantio, foram organizados em planilha eletrônica no Microsoft Excel®. Posteriormente, a planilha foi importada para o software QGIS, versão 3.40.9, onde os registros foram convertidos em uma camada vetorial de pontos. Também foi inserido o limite do talhão, ambos armazenados no formato *shapefile*. A Figura 1 apresenta os dados inseridos no software QGIS.

FIGURA 1. Perímetro e pontos amostrais inseridos no software QGIS.



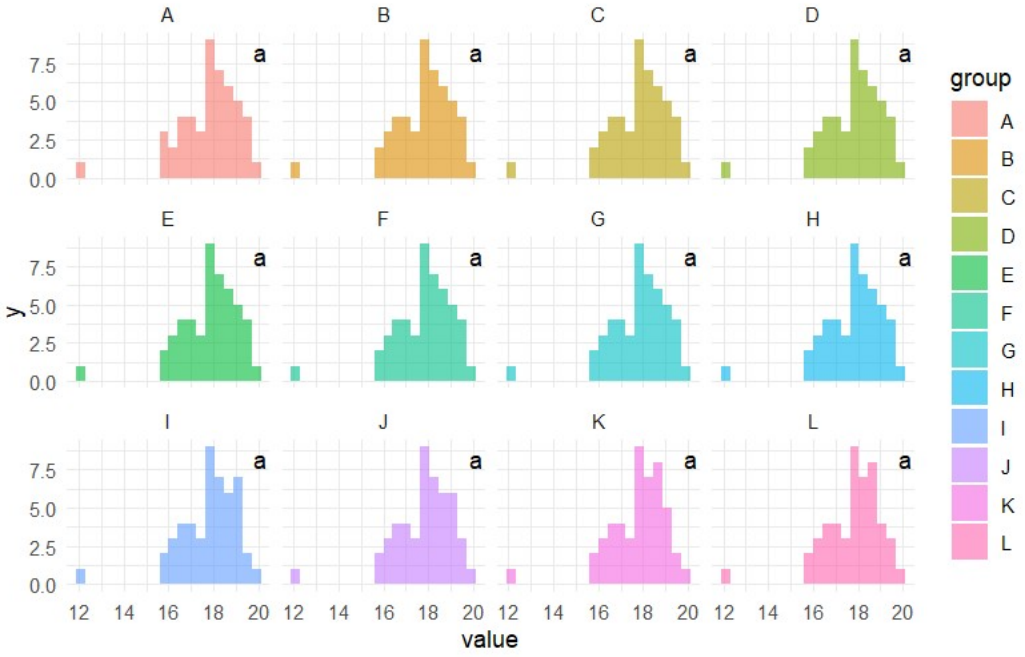
Fonte: Arquivo Pessoal (2026)

3.2. Interpolação, testes estatísticos

A espacialização dos atributos tecnológicos foi realizada por meio da interpolação espacial utilizando o método do Inverso da Distância Ponderada (Inverse Distance Weighting – IDW). Esse método foi selecionado por sua ampla aplicação em estudos de agricultura de precisão e mapeamento de atributos agrícolas, uma vez que considera que amostras geograficamente mais próximas apresentam maior similaridade do que amostras mais distantes, permitindo representar adequadamente a variabilidade espacial quando a densidade amostral é suficiente. Na interpolação foi adotado o coeficiente de potência P = 2, atribuindo maior peso às amostras mais próximas do ponto interpolado e reduzindo progressivamente a influência das amostras mais distantes. A interpolação resultou na geração de dois modelos raster, um para os valores de °Brix e outro para Pureza. Com o objetivo de avaliar a influência da resolução espacial sobre os resultados da interpolação, foram gerados modelos com tamanhos de pixel de 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5 e 5,0 m.

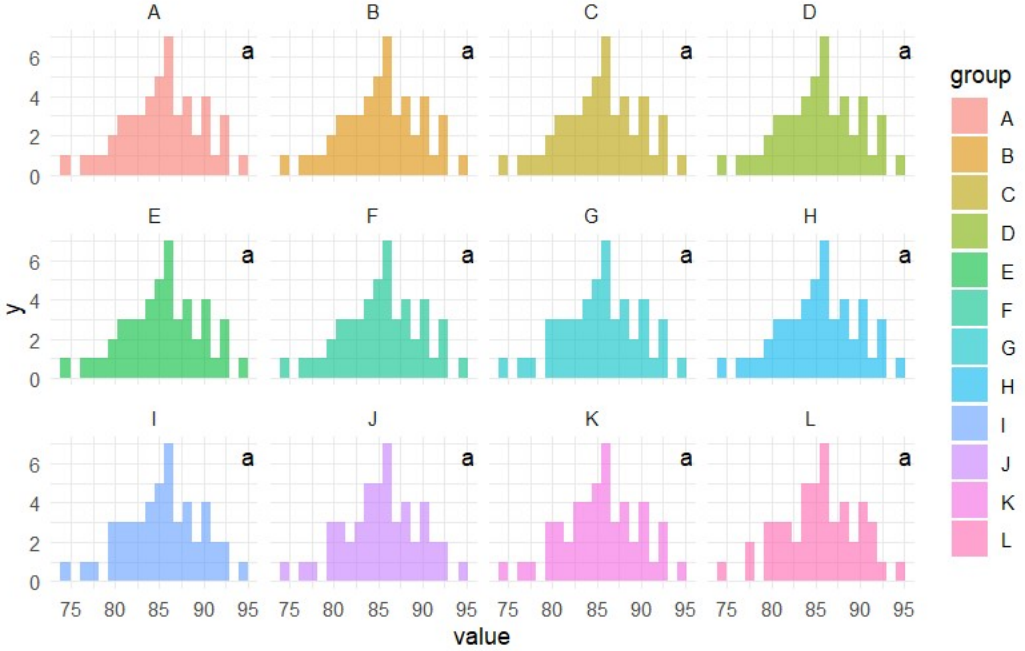
Posteriormente, os diferentes tamanhos de pixels foram comparados por meio de testes de comparação múltipla de médias ou medianas, realizados no software R, visando verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as resoluções espaciais avaliadas. Os resultados demonstraram que não há diferença significante entre os diferentes tamanhos de pixels, uma vez a letra “a” aparece em todos os diferentes tamanhos de pixel (Figura 2 e 3), logo ambos os tamanhos podem ser usados para gerar a classificação.

FIGURA 2. Histogramas graus brix em diferentes tamanhos de pixels.



Legenda: A: Dados originais; B: 0,1 m; C:0,5 m; D: 1,0 m; E: 1,5 m; F: 2,0 m; G: 2,5 m; H: 3,0 m; I: 3,5 m; J: 4,0 m; K: 4,5 m; L: 5,0 m.
Fonte: Arquivo Pessoal (2026)

FIGURA 3. Histogramas porcentagem pureza em diferentes tamanhos de pixels.



Legenda: A: Dados originais; B: 0,1 m; C:0,5 m; D: 1,0 m; E: 1,5 m; F: 2,0 m; G: 2,5 m; H: 3,0 m; I: 3,5 m; J: 4,0 m; K: 4,5 m; L: 5,0 m.
Fonte: Arquivo Pessoal (2026)

No presente trabalho adotamos o pixel com tamanho 1,5 m por representar o espaçamento adotado entrelinhas no plantio e devido ao desempenho operacional do computador. A Figura

4 apresenta mapa temático com interpolação do atributo brix com tamanho dos pixels de 1,5 m.

FIGURA 4. Mapa Temático de Teores de °Brix — Resolução Espacial de 1,5 m.



Legenda: °Brix: Graus brix
Fonte: Arquivo Pessoal (2026)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estatística descritiva dos atributos brix e pureza

A estatística descritiva dos modelos raster interpolados, utilizando resolução espacial de 1,5 m, evidenciou que os valores de °Brix apresentaram média de 17,78°, com mínimo de 12,11° e máximo de 19,89°. O desvio padrão foi de 0,64° e o coeficiente de variação (CV) de 3,59% (Tabela 1), indicando baixa variabilidade espacial desse atributo ao longo do talhão. Para a Pureza, a média observada foi de 85,40%, com valores mínimo e máximo de 74,41% e 94,54%, respectivamente. O desvio padrão foi de 2,25% e o coeficiente de variação de 2,64% (Tabela 1), demonstrando comportamento semelhante ao observado para o °Brix, com reduzida dispersão dos dados.

TABELA 1. Dados estatística descritiva dos atributos brix e pureza

	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
Brix	12,110819	19,894367	17,788057	0,639217	3,59%
Pureza	74,418030	94,542160	85,400127	2,255310	2,64%

Fonte: Arquivo Pessoal (2026)

Os baixos coeficientes de variação obtidos para ambos os atributos, conforme observado na Tabela 1, indicam elevada homogeneidade espacial dos valores interpolados. Entretanto, embora a Pureza tenha apresentado média superior ao limite mínimo recomendado para colheita (≥ 85%), a média de °Brix permaneceu inferior ao valor de referência de 18°, sugerindo que esse atributo constituiu o principal fator limitante para a maturação da cultura no momento da amostragem. Esse comportamento reforça a importância da avaliação conjunta dos atributos tecnológicos, uma vez que a utilização isolada da Pureza poderia resultar em interpretações equivocadas quanto ao momento ideal de colheita.

Os testes estatísticos realizados para comparar os diferentes tamanhos de pixel dos modelos interpolados não evidenciaram diferenças significativas entre as resoluções espaciais avaliadas. Esse resultado indica que a redução do tamanho do pixel não promoveu ganhos estatísticos na representação espacial dos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar para as condições deste estudo. Do ponto de vista operacional, esse achado possui grande relevância, uma vez que resoluções espaciais muito elevadas aumentam significativamente o número de pixels processados, elevando o tempo de processamento, o consumo de memória e o tamanho dos arquivos gerados

4.3. Possíveis implicações do trabalho no setor sucroenergético

Do ponto de vista operacional, os resultados demonstram que a utilização dos mapas de maturação pode subsidiar estratégias de colheita localizada, permitindo que apenas as áreas que atingiram os padrões tecnológicos desejados sejam colhidas, enquanto as demais permaneçam no campo até alcançarem condições adequadas de maturação. Dessa forma, uma nova campanha de amostragem em momento posterior poderá indicar o aumento da área apta para colheita, contribuindo para um planejamento mais eficiente das operações agrícolas e para a maximização da qualidade da matéria-prima destinada à indústria.

Em aplicações envolvendo áreas produtivas de maior extensão, a utilização de resoluções espaciais intermediárias pode proporcionar resultados equivalentes aos obtidos com pixels menores, porém com maior eficiência computacional. Dessa forma, a definição adequada do tamanho do pixel representa um compromisso entre o nível de detalhamento espacial desejado e o desempenho do processamento, favorecendo a aplicação de técnicas de geoprocessamento em áreas comerciais extensas sem comprometer a qualidade das informações produzidas.

Os resultados obtidos corroboram estudos recentes que demonstram o potencial das geotecnologias, do sensoriamento remoto e dos Sistemas de Informação Geográfica como ferramentas para o monitoramento espacial da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar (BARBOSA JÚNIOR et al., 2023; CANATA et al., 2024). A integração entre dados georreferenciados, interpolação espacial e álgebra de mapas permitiu representar de forma objetiva a variabilidade da maturação no interior do talhão, evidenciando que essas ferramentas podem constituir importante suporte à tomada de decisão por produtores e agroindústrias, favorecendo o planejamento da colheita, a otimização das operações mecanizadas e o aumento da eficiência do sistema produtivo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstraram que a integração de ferramentas de geotecnologia e Sistemas de Informação Geográfica constitui uma alternativa eficiente para a diferenciação espacial da maturação da cana-de-açúcar em talhões comerciais. A utilização da interpolação

pelo método do Inverso da Distância Ponderada (IDW), associada à álgebra de mapas no software QGIS, permitiu identificar e delimitar áreas com diferentes níveis de maturação a partir dos atributos tecnológicos °Brix e Pureza, possibilitando a geração de mapas temáticos que representam de forma objetiva a variabilidade espacial da cultura.

A predominância de áreas classificadas como não aptas para colheita evidenciou que o teor de °Brix foi o principal fator limitante para a maturação da cana-de-açúcar no momento da amostragem. Além disso, a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes tamanhos de pixel avaliados demonstra que resoluções espaciais intermediárias podem ser utilizadas sem prejuízo à representação da variabilidade espacial dos atributos tecnológicos. Esse resultado possui relevância prática, principalmente em aplicações envolvendo áreas comerciais de maior extensão, nas quais a adoção de pixels maiores reduz o tempo de processamento, o consumo de recursos computacionais e o volume de dados gerados, mantendo a qualidade das informações utilizadas para a tomada de decisão. Dessa forma, a metodologia proposta apresenta potencial para subsidiar produtores e agroindústrias no planejamento da colheita, contribuindo para a otimização das operações agrícolas, aumento da eficiência do sistema produtivo e incentivo à adoção de geotecnologias na cultura da cana-de-açúcar. Como perspectiva futura, recomenda-se a aplicação da metodologia em diferentes safras, condições edafoclimáticas e variedades de cana-de-açúcar, bem como sua integração com dados de sensoriamento remoto e técnicas de inteligência artificial para ampliar sua capacidade preditiva e aplicabilidade em sistemas comerciais de produção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA JÚNIOR, M. R.; MOREIRA, B. R. A.; OLIVEIRA, R. P.; et al. UAV imagery data and machine learning: a driving merger for predictive analysis of qualitative yield in sugarcane. Frontiers in Plant Science, Lausanne, v. 14, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1114852.

BÉGUÉ, A.; LEBOURGEOIS, V.; BAPPEL, E.; TODOROFF, P.; PELLEGRINO, A.; BAERISWYL, S.; SIEGMUND, B. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecasting by remote sensing. Agronomy for Sustainable Development, Dordrecht, v. 30, n. 2, p. 407–415, 2010. DOI: https://doi.org/10.1051/agro/2009053.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; LLOYD, C. D. Principles of Geographical Information Systems. 3. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

CANATA, T. F.; BARBOSA JÚNIOR, M. R.; OLIVEIRA, R. P.; et al. AI-driven prediction of sugarcane quality attributes using satellite imagery. Sugar Tech, New Delhi, v. 26, p. 741–751, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12355-024-01399-9.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ETANOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CONSECANA-SP). Manual de instruções. 6. ed. Piracicaba: CONSECANA-SP, 2006.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Canberra: Geoscience Australia, 2014. (Record 2014/32).

MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J.; HERRMANN JÚNIOR, P. S.; et al. Near-infrared spectroscopy as a tool for monitoring the spatial variability of sugarcane quality in the fields. Biosystems Engineering, v. 206, p. 58–72, 2021.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Version 3.40. Open Source Geospatial Foundation, 2025. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 21 jul. 2026.