AVALIAÇÃO AVANÇADA DA EFICÁCIA DE NEMATICIDAS NA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO TECNOLOGIAS DIGITAIS

Carlos Eduardo de Mendonça Otoboni
e-mail: carlos.otoboni01@fatec.sp.gov.br.
Instituição: Fatec Pompeia Shunji Nishimura
Danilo Ferreira Cury
e-mail: danilo.cury@fatec.sp.gov.br
Instituição: Fatec Pompeia Shunji Nishimura
Gustavo Di Chiacchio Faulin
e-mail: gustavo.faulin@fatec.sp.gov.br
Instituição: Fatec Pompeia Shunji Nishimura
Jenifer Natáli Ribeiro
e-mail: jeniferribeiro2025@gmail.com
Instituição: Fatec Pompeia Shunji Nishimura
Pedro Henrique Ribeiro Santos
e-mail: pedrohdossantos999@gmail.com
Instituição: Fatec Pompeia Shunji Nishimura

RESUMO: O presente trabalho avaliou o uso de metodologias digitais, por meio de imagens obtidas via satélite e drone, para analisar a performance de nematicidas aplicados em cana-de-açúcar infestada por nematoides. A crescente demanda por eficiência e precisão no manejo agrícola motivou o emprego de tecnologias digitais para complementar métodos tradicionais de avaliação de campo, permitindo maior assertividade nas mensurações e um acompanhamento contínuo da resposta das plantas. O objetivo principal foi avaliar o impacto dos tratamentos (*Pochonia chlamydosporia,* cinetina, ácido giberélico e ácido 4-indol-3-ilbutírico) (T1), do tratamento anterior associado a fertilizante líquido (T4), e o uso de um nematicida biológico à base de *Bacillus subtilis* (T3), comparados a uma faixa controle, sem tratamento (T2). Setenta dias após a aplicação dos tratamentos, foram coletadas imagens de satélite (*Sentinel* 2A) e de drone (modelo e-*Bee*) para a construção de uma ortofoto e posterior análise digital da área, utilizando o índice GLI e NDVI. Os dados foram submetidos a análises estatísticas, incluindo teste de *Kruskal-Wallis* e *Conover*, além da comparação com medições biométricas manuais. Os resultados demonstraram que os tratamentos T1 e T2 apresentaram cobertura vegetal superior em 14% e 32%, respectivamente, em comparação à testemunha (T4), além de maior altura das plantas e número de perfilhos. O tratamento T3, embora eficaz no controle dos nematoides, mostrou menor desenvolvimento das plantas. As tecnologias digitais mostraram-se eficazes na identificação de padrões de crescimento e controle nematológico, contribuindo significativamente para a avaliação dos tratamentos. A conclusão do estudo confirma a viabilidade de se utilizar metodologias digitais para mensurar a eficácia de tratamentos contra os nematoides em cana-de-açúcar, permitindo avaliações precisas e não invasivas, que podem ser integradas ao manejo agrícola com maior confiabilidade e rapidez.

Palavras-chave: Nematicidas; Cana-de-açúcar; Imagens digitais; Controle biológico; Precisão agrícola.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura essencial no Brasil, tanto para a produção de açúcar quanto para bioenergia, especialmente o etanol. No entanto, enfrenta desafios como pragas e doenças, entre as quais os nematoides se destacam.

Esses parasitas atacam as raízes das plantas, reduzindo a absorção de água e nutrientes e comprometendo a produtividade (Chitwood, 2003). Nematoides causam prejuízos anuais significativos em várias culturas, com perdas de até 20% na produção de cana-de-açúcar (Dinardo-Miranda, 2008; Nicol *et al.,* 2011).

O controle dos nematoides é feito principalmente por nematicidas, mas sua eficácia avaliada de forma manual. Contudo, os métodos de avaliação tradicionais são limitados e não representam adequadamente grandes áreas.

Com o avanço das tecnologias digitais surgiram novas possibilidades para o monitoramento de pragas, como o uso de imagens de satélites e drones, que permitem a análise de grandes áreas (Zhang; Kovacs, 2012).

O uso de tecnologias digitais pode superar essas limitações, fornecendo dados mais precisos e frequentes (Mulla, 2013). Assim, este trabalho avaliou a performance de tratamentos nematicidas em cana-de-açúcar de forma indireta, por meio de imagens capturadas por drones e satélites, comparando métodos tradicionais com as novas ferramentas. Os objetivos incluíram desenvolver um protocolo de análise digital, analisar a viabilidade técnica e econômica dessas ferramentas e avaliar a performance dos tratamentos com base nas imagens digitais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de referência sobre a avaliação da eficácia de diferentes tratamentos nematicidas em cana-de-açúcar, utilizando metodologias digitais e avaliações manuais, serviu como base para a elaboração desse estudo. A avaliação foi realizada setenta dias após a aplicação dos tratamentos, nas faixas experimentais, com três repetições, para cada um dos tratamentos:

- T1: *Pochonia chlamydosporia*, cinetina, ácido giberélico e ácido 4-indol-3-ilbutírico;
- T4: Aplicação de T1, com adição de fertilizante líquido;
- T3: Aplicação de nematicida biológico à base de *Bacillus subtilis*, de produção on-farm;
- T2 (Controle): Faixa sem aplicação de produtos.

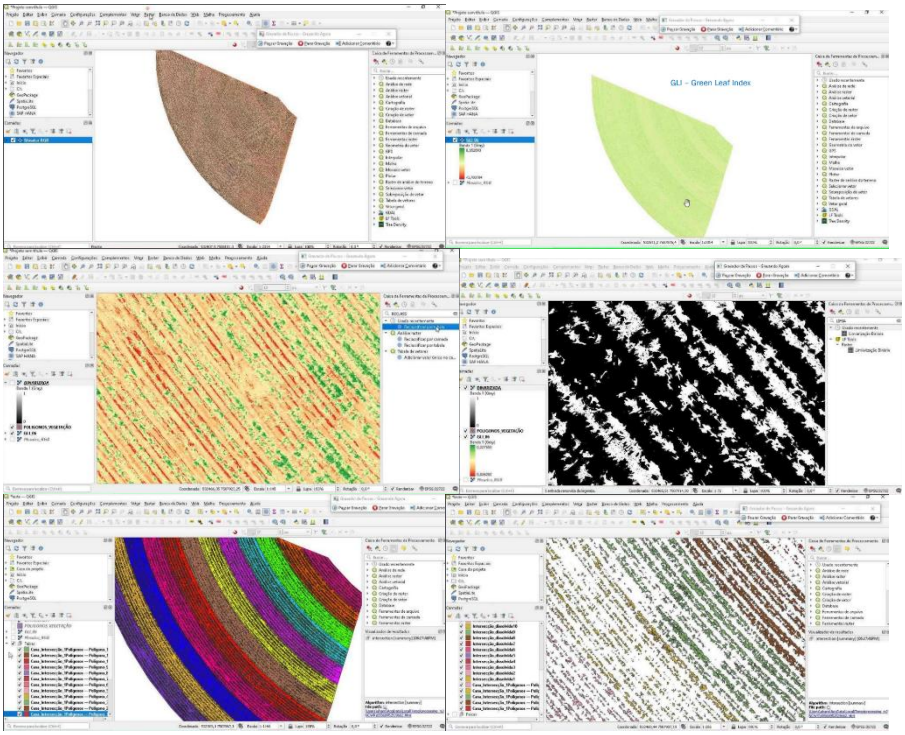
Para a análise digital dos tratamentos, foram coletadas imagens de satélite (Sentinel 2A) e de drone, equipado com RTK e sensor RGB.

As imagens do drone permitiram a geração de uma ortofoto da área experimental e, com o auxílio do software Quantum GIS 3.36.0, foram processadas para se calcular o Índice de Área Foliar Verde (GLI) e realizar a classificação supervisionada e vetorização da cobertura vegetal em cada faixa.

As imagens de satélite foram extraídas das plataformas OneSoil, Agromax e Google Earth Engine, possibilitando uma análise do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) ao longo do tempo, resultando em curvas de resposta para cada tratamento. As medianas dos valores de NDVI foram comparadas utilizando o teste de Kruskal-Wallis, com posterior aplicação do teste de Conover para analisar diferenças significativas entre os tratamentos.

A avaliação digital foi contrastada com medições manuais, em que foram realizadas 21 análises nematológicas por tratamento e a biometria das plantas foi conduzida com medições de altura e contagem de perfilhos. Esses dados biométricos foram analisados em b*oxplots,* seguindo o método proposto por Chambers *et al*. (1983).

Figura 1. Resumo das etapas do processo de obtenção da área de cobertura vegetal de cana-de-açúcar de ortofoto obtida por drone (ART) no programa computacional Quantum GIS 3.36.0, submetida a diferentes tratamentos em faixas.



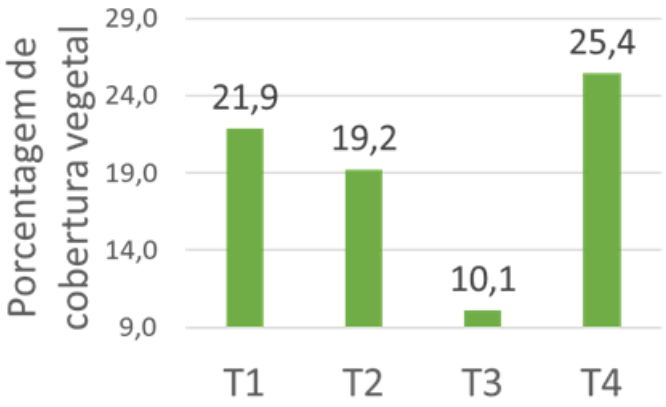
Fonte: autores (2024)

Esse estudo forneceu uma base sólida para entender como a combinação de ferramentas digitais avançadas, como imagens de satélite e drones, com métodos manuais tradicionais, pode oferecer uma avaliação mais detalhada da eficácia de tratamentos nematicidas. A aplicação dessa abordagem integrada em nesta pesquisa poderá aprimorar a compreensão sobre o impacto de diferentes intervenções no controle de nematoides em cana-de-açúcar, promovendo um manejo mais eficiente e sustentável.

3. RESULTADOS

A seguir, são apresentadas as imagens obtidas durante o estudo, destacando os resultados das análises digitais realizadas com o uso de satélites e drones, bem como a comparação com os métodos tradicionais de avaliação dos tratamentos nematicidas.

Figura 2. Porcentagem de cobertura vegetal das faixas/tratamentos em cana-de-açúcar determinadas através de ortofoto do canavial obtida por drone (ART), 70 dias após aplicação dos tratamentos.

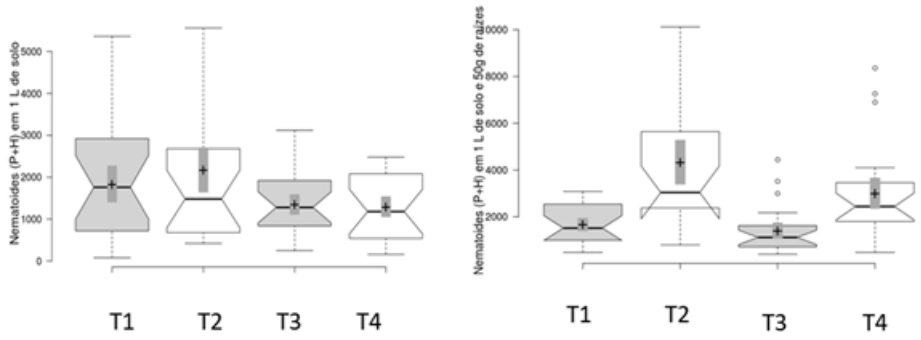


Fonte: Autores (2024)

A Figura 2 apresenta o cálculo da cobertura vegetal nas faixas experimentais submetidas aos diferentes tratamentos. Os resultados demonstram que o tratamento T1 resultou em uma cobertura vegetal 14% superior em relação à faixa testemunha, que não recebeu aplicação de produtos. Além disso, esse tratamento combinado com fertilizante líquido apresentou um aumento ainda mais significativo, com uma cobertura vegetal 32% maior que a testemunha. A utilização do NDVI, amplamente reconhecida como uma métrica confiável para avaliar o vigor da vegetação, reforça a robustez dos dados obtidos (Rouse *et al*., 1974). Ainda, esses tratamentos apresentaram resultados superiores de NDVI, o que indica uma maior saúde e desenvolvimento das plantas, corroborando as análises feitas por Imagens de Satélite (Agarwal *et al*., 2020).

Isso sugere que o uso de nematicidas biológicos, especialmente quando associado a fertilizantes, pode promover uma maior cobertura vegetal, refletindo a eficácia no controle de nematoides e a promoção do crescimento da cultura (Mulla, 2013).

Figura 3. Análise de *boxplot* da altura aparente e número de perfilhos em 1,5 metros lineares, 70 dias após o plantio e aplicação dos tratamentos em cana-de-açúcar



Fonte: Autores (2024)

Assim, a análise digital corroborou com os resultados de biometria manual, mostrados na Figura 3. Nessa análise, os tratamentos T1 e T4 exibiram maior altura de plantas e número de perfilhos, confirmando a superioridade em relação ao controle. Estudos prévios já destacam a importância da biometria na avaliação da resposta vegetal aos tratamentos, sendo a altura e o número de perfilhos indicadores-chave da performance produtiva da cultura (Stirling, 2014).

Figura 4. Análise de *boxplot* da recuperação de *Pratylenchus zeae* e *Helicotylenchus dihystera* na amostragem prévia (1L de solo) e 70 dias após a aplicação dos tratamentos (1L de solo e 50 gramas de raízes) em cana-de-açúcar.

Fonte: Autores (2024)

A Figura 4, é possível observar os resultados relacionados ao controle de nematoides em cada tratamento. Todos os tratamentos nematicidas, incluindo o tratamento *on-farm* à base de *Bacillus subtilis* (T3), apresentaram bom controle de nematoides. No entanto, no tratamento da Fazenda (T3), embora o controle dos nematoides tenha sido eficaz, observou-se um menor desenvolvimento das plantas, com cobertura vegetal inferior e menor vigor, quando comparado aos demais.

Esse resultado sugere que, apesar da eficácia no controle da população de nematoides, o tratamento biológico da Fazenda não promoveu o mesmo nível de estímulo ao desenvolvimento das plantas como os demais tratamentos.

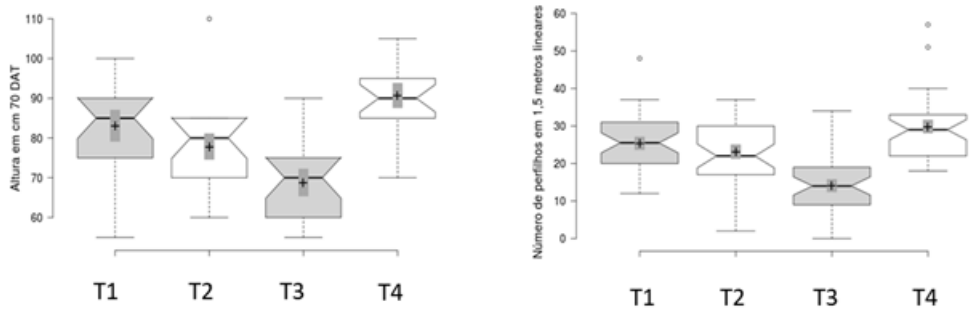
Esses resultados estão de acordo com a literatura, que ressalta que a aplicação de nematicidas biológicos pode variar em termos de eficácia não apenas no controle de nematoides, mas também no impacto sobre o crescimento vegetal (Kerry; Hidayat, 2011).

Assim, os dados observados neste estudo reforçam a importância de uma abordagem integrada, considerando tanto o controle de pragas quanto o desenvolvimento vegetal como parâmetros essenciais na avaliação da eficiência dos tratamentos aplicados.

3. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam o impacto significativo dos tratamentos biológicos com fertilizante líquido no controle de nematoides e no estímulo ao crescimento da cana-de-açúcar. Comparados à testemunha (sem aplicação de nematicidas) e ao tratamento biológico com *Bacillus subtilis* (utilizado na fazenda), esses tratamentos suprimiram de maneira eficaz os nematoides e promoveram um aumento na cobertura vegetal, altura das plantas e número de perfilhos.

A supressão de nematoides é um fator essencial, pois sua infestação pode reduzir



significativamente a produtividade agrícola (Stirling, 2014). Tanto o T1 quanto o T4 se destacaram, não apenas pelo controle eficiente dos nematoides, mas também pelo maior desenvolvimento das plantas, como confirmado pelas análises digitais e medições biométricas manuais. O tratamento com fertilizante (T4) apresentou um crescimento 32% superior em relação à testemunha, reforçando a importância de associar controle biológico a práticas de fertilização para maximizar a produtividade (Mulla, 2013).

O uso de tecnologias digitais, como imagens de satélite e drones, foi um diferencial deste trabalho, proporcionando uma avaliação mais precisa das áreas tratadas e confirmando a eficácia dos tratamentos com Enraíze por meio das análises dos índices GLI e NDVI (Agarwal *et al.*, 2020). A biometria digital pode ser mais robusta que a manual, eliminando potenciais vieses de amostragem e permitindo uma análise contínua e economicamente viável (Rouse *et al.*, 1974).

Embora o tratamento com *Bacillus subtilis* tenha demonstrado um bom controle de nematoides, o desenvolvimento das plantas foi inferior ao observado nos demais tratamentos, destacando a importância de estratégias que combinem o controle de pragas com o estímulo ao crescimento vegetal.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de tecnologias digitais, como imagens de satélite e drones, foi crucial para um monitoramento mais rápido e preciso das áreas tratadas, permitindo uma análise detalhada e em tempo real das diferenças de desempenho entre os tratamentos. Isso otimiza o processo de avaliação e proporciona uma visão contínua do impacto das intervenções ao longo do ciclo de cultivo.

Este estudo ressalta a importância de um manejo agrícola integrado, onde biocontrole e fertilização se complementam, potencializados por ferramentas digitais avançadas. Essa combinação não apenas suprime eficazmente as populações de nematoides, mas também estimula um desenvolvimento vigoroso da cana-de-açúcar, essencial para a sustentabilidade da cultura.

Ao evidenciar o potencial das tecnologias emergentes na agricultura de precisão, este trabalho aponta para um futuro mais eficiente nas práticas agrícolas. O uso de ferramentas digitais melhora a tomada de decisões e representa um avanço significativo na maximização da produtividade, promovendo um manejo mais sustentável dos recursos agrícolas.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, S.; KAUR, P.; GILL, S. **Application of remote sensing and GIS in agriculture: a review.** Journal of Agricultural Sciences, 2020.

CHAMBERS, J. M.; CLEVELAND, W. S.; KLEINER, B.; TUKEY, P. A. **Graphical methods for data analysis.** Wadsworth International Group, 1983.

CHITWOOD, D. J. Nematicides. In: SCHUMANN, G. L. (Ed.). **Plant Health Instructor**, 2003.

CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. **Rank transformations as a bridge between parametric and nonparametric statistics.** The American Statistician, 35, 1981, pp. 124-129.

CONOVER, W. J. **Practical nonparametric statistics**. 3. ed. New York: Wiley, 1999.

DINARDO-MIRANDA, L. L. **Nematóides em cana-de-açúcar no Brasil**. Tropical Plant Pathology, v. 33, n. 2, p. 158-164, 2008.

KERRY, B. R.; HIDAYAT, T. **Nematophagous fungi as biological control agents of plant-parasitic nematodes.** Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. **Use of ranks in one-criterion variance analysis.** Journal of the American Statistical Association, 47, 1952, pp. 583-621.

KRUSKAL-WALLIS. **Análise de variância em dados não paramétricos.** In: ALMEIDA, D. C. et al. Matéria (Rio Janeiro), v. 27, n. 2, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-45351.

MULLA, D. J. **Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.

NICOL, J. M. et al. **Current nematode threats to world agriculture**. In: JONES, J. T. et al. (Eds.). Genomics and molecular genetics of plant-nematode interaction. Springer, 2011. p. 21-43.

OTOBONI, C.E.M.; FAULIN, G.C., RIBEIRO, J.N., FISCHER, H. **Uso de metodologia digital na análise indireta da performance de nematicidas aplicados em cana-de-açúcar**. 39º Congresso Brasileiro de Nematologia. (2024). Disponível em: www.39cnb.com.br.
ROUSE, J. W. et al. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation.** NASA/GSFC, Type III, Final Report, 1974.
SPITZER, M.; WILDENHAIN, J.; RAPPSILBER, J. et al. **BoxPlotR: a web tool for generation of box plots**. Nature Methods, v. 11, p. 121–122, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nmeth.2811.
STIRLING, G. R. **Biological control of plant-parasitic nematodes**. CABI Publishing, 2014.
ZHANG, C.; KOVACS, J. M. **The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012.