AQUECIMENTO VOLUMÉTRICO POR MICRO-ONDAS VERSUS BANHO TÉRMICO CONVENCIONAL NA DESINFECÇÃO DE SOLOS INFESTADOS

Guilherme Mathias Lopes[1], Natália de Oliveira Souza[1], Matheus de Souza Cruz[1], William Cesar Terra[1], Irineu Petri Júnior[1], Jefferson Luiz Gomes Corrêa[1]

[1]*Universidade Federal de Lavras, Lavras, Brasil (gmlopes25@gmail.com)*

Resumo: A infestação por *Meloidogyne incognita* causa severas perdas na agricultura, tornando necessários métodos sustentáveis de desinfecção do solo. Este estudo comparou o aquecimento dielétrico por micro-ondas e o método condutivo convencional por banho em óleo no manejo térmico desse fitonematode a 90 °C. O tratamento por micro-ondas reduziu drasticamente o tempo de processo, acelerou a cinética de aquecimento volumétrico e diminuiu o consumo total de energia, além de eliminar por completo a formação de galhas no sistema radicular das plantas. Assim, essa tecnologia mostrou-se promissora e energeticamente eficiente para a desinfecção física de solos em sistemas agrícolas e de cultivo protegido.

Palavras-chave: Manejo físico; eficiência energética; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Os nematoides do gênero *Meloidogyne*, popularmente denominados nematoides das galhas, constituem um dos principais grupos de fitopatógenos que habita solos agrícolas, sendo responsáveis por severas perdas na produtividade de culturas de elevada importância econômica (Sikora et al., 2022). O controle químico por meio de nematicidas sintéticos, embora amplamente difundido, tem sofrido restrições progressivas devido aos impactos ambientais adversos, alta toxicidade e potencial de contaminação de matrizes de solo e recursos hídricos (Desaeger et al., 2020). Nesse cenário, intensifica-se a busca por estratégias alternativas, eficazes e ecologicamente sustentáveis para o manejo desses parasitas.

Sob essa perspectiva, as intervenções térmicas surgem como uma abordagem promissora. Tradicionalmente, os processos baseados em aquecimento do solo usam como fonte o calor proveniente do sol. Transferindo calor para a matriz mineral para elevar a temperatura até patamares letais à patógenos. Contudo esse método tem como limitações a baixa temperaturas atingidas e a falta de controle dessas temperaturas (Acharya et al., 2020).

Nesse contexto, as tecnologias térmicas emergentes têm recebido maior atenção, especialmente sistemas baseados em micro-ondas, devido à sua rápida cinética e praticidade de implementação. As ondas eletromagnéticas, com frequência de 300 MHz a 300GHz, interagem com a água presente no solo. O campo oscilante induz a rotação dos dipolos elétricos que, ao colidirem com as partículas minerais, transformando a energia eletromagnética em calor (Sun et al., 2022).

Embora investigações preliminares já sinalizem o potencial promissor do aquecimento por micro-ondas na inativação de patógenos de menor escala, como bactérias e vírus, estudos direcionados ao controle de fitonematoides sob essa tecnologia ainda são escassos e de abrangência limitada na literatura. Tais organismos apresentam estruturas biológicas complexas e mecanismos de sobrevivência que lhes conferem acentuada termotolerância, demonstrando capacidade de resistir a exposições térmicas contínuas de até 50 °C (Wang e McSorley.,2008).

Diante deste contexto, este estudo objetivou contrastar o desempenho térmico e energético do aquecimento por micro-ondas frente ao método convencional de banho em óleo.

MATERIAL E MÉTODOS

A condução dos ensaios experimentais ocorreu em casa de vegetação, localizada na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras-MG, Brasil. O composto utilizado foi formado a partir de uma mistura equivolumétrica (1:1, v/v) de Latossolo Vermelho-Amarelo e substrato comercial (50% de perlita e 50% de turfa de Sphagnum). A mistura foi previamente autoclavada a 121ºC por 60 minutos, e posteriormente colocando 400g deste material em bécheres de 500 mL. Avaliou-se o aquecimento das tecnologias de micro-ondas e banho em óleo até atingirem a temperatura de 90ºC.

Os tratamentos avaliados foram definidos em função da tecnologia e da temperatura de exposição, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Delineamento experimental.

Tratamentos	Tecnologia	Temperatura (ºC)
CONTROLE	-	Ambiente
MW90	Micro-ondas	90
OB90	Banho Maria	90

O micro-ondas operou a 2450MHz com potência máxima de 1150W. As amostras foram tratadas individualmente até atingir a temperatura desejada. Já para o tratamento por condução térmica foi utilizado um banho maria de aquecimento á óleo, Fisatom 550 (50-120ºC). Após os tratamentos as amostras de solos foram resfriadas à temperatura ambiente.

Registrou-se o período de aquecimento demandado por cada equipamento até que a temperatura-alvo fosse alcançada. A demanda energética do processo foi mensurada com o auxílio de um analisador digital de energia, o qual computou o consumo elétrico total (CE, kWh) a partir dos parâmetros de tensão (V, em Volts), corrente (I, em Amperes) e tempo de atividade (t, em horas), conforme estabelecido na Equação 1:

$$CE = V \times I \times t \quad (1)$$

Após a aplicação dos tratamentos, as amostras de solo foram resfriadas até atingirem a temperatura ambiente (25 °C) e transferidas para vasos de 500 mL, nos quais realizou-se o transplantio de plântulas de tomate (Solanum lycopersicum, cultivar Santa Clara). Os vasos foram mantidos em casa de vegetação e, após um período de condução de 42 dias, procedeu-se à avaliação da presença de nematoides.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na Tabela 2, demostram que o desempenho dos tratamentos térmicos no processo de desinfecção do solo foi eficiente.

Tabela 2. Desempenho do tratamento térmico.

Tratamentos	Tempo (s)	Temperatura (ºC)	Nº de Galhas
CONTROLE	0	23,5±0,00b	782
MW90	300	89,678±4,847a	0
OB90	18720	91,133±1,248a	0

Constatou-se que ambos os métodos operacionais foram eficazes em elevar a temperatura da matriz mineral até os patamares estipulados, condição amplamente consolidada na literatura como indispensável para a inativação térmica de fitopatógenos. Nesse sentido, Souza Junior e Santos (2021) apontam que a exposição do solo a níveis térmicos elevados possui a capacidade de erradicar por completo populações de nematoides.

Os resultados demostram que a cinética de aquecimento por micro-ondas proporcionou uma transferência de energia mais rápida e eficiente para a interior do solo do que a banho térmico convencional. A ação direta da radiação eletromagnética sobre as moléculas polares contidas na humidade do solo elimina a dependência de fluxos condutivos lentos, acelerando significativamente o processo de desinfecção (Li et al., 2023). A variação da temperatura final registrada pelo micro-ondas, devido ao término da emissão de ondas eletromagnéticas pelo magnetron e a rápida dissipação térmica do solo.

Os indicadores biológicos avaliados nos sistemas radiculares demonstram que o tratamento térmico do solo atua de forma decisiva na supressão de pragas. A eficácia observada no controlo do nematoide consolida estas tecnologias como ferramentas promissoras para a desinfecção física, visando a redução populacional e o bloqueio da dispersão de patógenos em zonas agrícolas.

Apesar do tempo de operação pelo micro-ondas ser mais rápido o consumo de energia pode ser considerado elevado (Tabela 3).

Tabela 3. Delineamento experimental.

Tratamentos	Consumo de Energia (KWh)
CONTROLE	-
MW90	0,1386±0,1386b
OB90	0,3600±0,3600a

O tratamento por banho em óleo apresentou limitações operacionais, uma vez que o consumo e o tempo para atingir a temperatura foram elevados, 18720 segundos e 0,3600 kWh, respectivamente. Este método impõe desafios operacionais, representando risco potencial de contaminação.

O aquecimento por micro-ondas mostra-se promissor como uma tecnologia auxiliadora ao agricultor, reduzindo ou eliminando patógenos que causam elevados prejuízos. A conversão de energia eletromagnética em calor, acelera a curva da cinética de aquecimento, levando à uma otimização do processo, promovendo um menor consumo energético. Assim, a técnica firma-se como uma ferramenta viável para o manejo físico de nematoides, passível de incorporação em plataformas móveis ou fixas de tratamento de solos em viveiros e estruturas de cultivo protegido.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos confirmam a eficiência técnica do aquecimento dielétrico por micro-ondas frente ao método tradicional de banho em óleo para o controle físico de Meloidogyne incognita. Embora ambas as abordagens tenham gerado perfis térmicos letais ao fitopatógeno, o sistema de micro-ondas destacou-se pela rapidez operacional do aquecimento volumétrico e por otimizar expressivamente o balanço energético do processo, registrando menor consumo total em kWh.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio institucional e financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACHARYA, J.; LIU, Q.; SHRESTHA, S.; KHANAL, S. Soil solarization: An eco-friendly alternative for management of soil-borne pathogens. International Journal of Chemical Studies, 8, 1969–1974, 2020.

DESAEGER, J., WRAM, C., & ZASADA, I. (2020). New reduced-risk agricultural nematicides-rationale and review. Journal of Nematology, 52. https://doi.org/10.21307/jofnem-2020-091

GAMLIEL, A.; KATAN, J. Soil Solarization: Theory and Practice. 2. ed. St. Paul: APS Press, 2022. 240 p.

JONES, J. T.; HAEGMAN, A.; DANCHIN, E. G.; GAUR, H. S.; HELDER, J.; JONES, M. G.; KIKUCHI, T.; MANZANILLA-LÓPEZ, R. H.; PALOMARES-RIUS, J. E.; WESEMAEL, W. M. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 14, 946–961, 2013.

LI, Q., SUN, X., ZHAO, C., YANG, S., GU, C., & ZHAI, C. (2023). Effect of Microwave Treatment at 2.45 GHz on Soil Physicochemical Properties and Bacterial Community Characteristics in Phaeozems of Northeast China. Agronomy, 13(2). https://doi.org/10.3390/agronomy13020600

SIKORA, R. A.; COYNE, D.; HALLMANN, J.; TIMPER, P. (2022). Integrated nematode management and crop health: Future challenges and opportunities. In Integrated Nematode Management: State-of-the-art and Visions for the Future (pp. 3–10). CABI International. https://doi.org/10.1079/9781789247541.0001

SOUZA JUNIOR, F. J. C. DE, & SANTOS, C. D. G. (2021). Efeito da temperatura e exsudatos radiculares na eclosão e infectividade de Meloidogyne javanica raça 1 em Solanum lycopersicum. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica Do IFPB, 1(55), 22. https://doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4127

SUN, X., ZHAO, C., YANG, S., MA, H., & ZHAI, C. (2022). Simulations and Experiments of Soil Temperature Distribution after 2.45 GHz Long-Term Microwave Treatment. Agriculture (Switzerland), 12(7). https://doi.org/10.3390/agriculture12070909

WANG, K. H.; McSORLEY, R. Exposure time to lethal temperatures for Meloidogyne incognita suppression and its implication for soil solarization. Journal of Nematology, 40, 7–12, 2008.