

BIOSPECKLE LASER COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE TEOR DE UMIDADE DE SOLO

André Batista Santos¹, Adilson Machado Enes², Raimundo Rodrigues Gomes Filho³, Wellington Gonzaga do Vale⁴, Raphael Prazeres da Silva⁵.

RESUMO: A determinação precisa da umidade do solo é fundamental para o manejo eficiente da água na agricultura. Diante das limitações dos métodos tradicionais, técnicas ópticas não destrutivas como o Biospeckle Laser (BSL) surgem como alternativas promissoras. Este estudo teve como objetivo avaliar a correlação entre o teor de umidade do solo e o Momento de Inércia (MI) obtido pela técnica de BSL, a fim de verificar a viabilidade dessa abordagem. Amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo foram preparadas em quatro níveis de umidade (0, 10, 20 e 30%) em um delineamento inteiramente casualizado com 20 repetições. O MI foi mensurado com um sistema BSL, e os dados, por não seguirem uma distribuição normal, foram analisados com os testes de Kruskal-Wallis, Dunn e a correlação de Spearman. Os resultados indicaram diferenças estatisticamente significativas entre todos os tratamentos (p ajustado $< 0,025$). A correlação de Spearman revelou uma associação forte e positiva entre a umidade e o MI ($\rho = 0,8831$; $p < 0,0001$). A relação entre as variáveis foi descrita por um modelo exponencial ($y(x) = 0,016 e^{(0,09 \times x)}$), que explicou 75,1% da variação dos dados ($R^2=0,751$). Conclui-se que a técnica de BSL é uma abordagem viável e sensível para estimar a umidade do solo de forma não destrutiva, apresentando-se como uma ferramenta promissora para o manejo da irrigação.

PALAVRAS-CHAVE: engenharia agrícola; agricultura de precisão; análise não destrutiva.

¹ Pós-Graduando em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: andregeoagri@gmail.com

² Professor Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: adilsonenes@academico.ufs.br

³ Professor Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: rrgomesfilho@hotmail.com

⁴ Professor Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: valewg@gmail.com

⁵ Engenheiro Agrícola, Universidade Federal de Sergipe – UFS, e-mail: rprazeress@gmail.com

BIOSPECKLE LASER AS AN EVALUATION TOOL FOR DETERMINING SOIL MOISTURE CONTENT

ABSTRACT: The precise determination of soil moisture is fundamental for efficient water management in agriculture. Given the limitations of traditional methods, non-destructive optical techniques such as Biospeckle Laser (BSL) are emerging as promising alternatives. This study aimed to evaluate the correlation between soil moisture content and the Moment of Inertia (MI) obtained by the BSL technique to verify the feasibility of this approach. Samples of a Red-Yellow Argisol were prepared at four moisture levels (0, 10, 20, and 30%) in a completely randomized design with 20 replications. The MI was measured using a BSL system, and the data, which did not follow a normal distribution, were analyzed using the Kruskal-Wallis, Dunn, and Spearman correlation tests. The results indicated statistically significant differences among all treatments (adjusted $p < 0.025$). Spearman's correlation revealed a strong, positive association between moisture and MI ($\rho = 0.8831$; $p < 0.0001$). The relationship between the variables was described by an exponential model ($y(x) = 0,016 e^{(0,09 \times x)}$), which explained 75.1% of the data variation ($R^2=0.751$). It is concluded that the BSL technique is a viable and sensitive approach for non-destructively estimating soil moisture, presenting itself as a promising tool for irrigation management.

KEYWORDS: agricultural engineering; precision agriculture; non-destructive analysis.

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na agricultura tem ampliado o uso de ferramentas ópticas para avaliação de variáveis agronômicas críticas (Falcioni et al., 2023). Entre essas variáveis, destaca-se a umidade do solo, que exerce papel crucial na otimização do uso da água na agricultura, contribuindo para uma produção mais eficiente e ambientalmente sustentável (Assis; Azevedo et al., 2024). A determinação precisa do teor de umidade do solo é fundamental para o manejo eficiente da irrigação, otimização do uso da água e manutenção da produtividade agrícola, especialmente em regiões de clima variável (Singh et al., 2014; Chowdhury et al., 2022; Keshavarz; Shariati, 2024). Métodos tradicionais, como gravimetria e sondas de capacitância, embora amplamente utilizados, apresentam limitações relacionadas ao tempo de análise, custo e, por vezes, caráter destrutivo das amostras (Chowdhury et al., 2022). Nesse contexto, tecnologias ópticas não destrutivas vêm ganhando destaque. Entre elas, o método de

Biospeckle Laser (BSL), baseado na análise da variação temporal dos padrões de speckle formados pela iluminação de superfícies com luz coerente, tem se mostrado eficaz para detectar e monitorar níveis de atividade biológica (Braga et al., 2025). Embora ainda pouco explorado diretamente na estimativa do teor de umidade do solo, o BSL apresenta potencial em aplicações agrícolas relacionadas à água, como na análise da hidratação durante a germinação de sementes (Thakur et al., 2022), avaliação de vigor (Braga et al., 2025) e maturação de frutos (Cardoso et al., 2024), utilizando a atividade óptica dinâmica como indicador indireto do conteúdo aquoso. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar a correlação entre o teor de umidade do solo e o Momento de Inércia (MI) obtido pela técnica de BSL, visando verificar a viabilidade dessa abordagem óptica na estimativa da umidade do solo, parâmetro crucial para a gestão eficiente da água em sistemas agrícolas sustentáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo, classificadas como Argissolo Vermelho-Amarelo derivado de sedimentos do Grupo Barreiras (EMBRAPA, 1999), foram coletadas no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão – SE, homogeneizadas para compor uma amostra representativa, secas ao ar, destorroadas manualmente e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), conforme recomendações da EMBRAPA (2017). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos correspondentes a teores de umidade de 0, 10, 20 e 30% em base úmida e 20 repetições cada, totalizando 80 unidades experimentais, sendo a hidratação realizada com água destilada e a umidade final aferida pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 h. Após o equilíbrio de umidade em cada tratamento, efetuaram-se as medições de Momento de Inércia (MI) conforme equação descrita por Oleandro et al. (2021, p. 557), utilizando um sistema óptico de Biospeckle Laser (BSL) composto por laser HeNe ($\lambda = 632,8$ nm) cujo feixe foi expandido por lente biconvexa antes de incidir sobre as amostras, e câmera Raspberry Pi Módulo V1.3 com sensor OmniVision OV5647 (5 MP, foco fixo, 30 fps) para registro das variações temporais dos padrões de speckle. As imagens capturadas foram processadas para construção da Time History Speckle Pattern (THSP), da qual se obteve a matriz de coocorrência (COM) utilizada no cálculo do MI, sendo todo o processamento realizado na plataforma GNU/Octave. A análise estatística incluiu verificação da normalidade dos dados pelo teste de Shapiro–Wilk, aplicação do teste de Kruskal–Wallis para comparação das medianas e, quando necessário, teste

post-hoc de Dunn com correção de Bonferroni, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar a aderência dos dados à distribuição normal, foi aplicado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para cada um dos tratamentos avaliados (Tabela 1). Os resultados indicaram que todos os tratamentos apresentaram valores de p inferiores ao nível de significância de 0,05.

Tabela 1. Resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os tratamentos.

Tratamento	p -valor	Interpretação
T1	$2,55 \times 10^{-9}$	Não segue distribuição normal
T2	$7,52 \times 10^{-5}$	Não segue distribuição normal
T3	$1,54 \times 10^{-6}$	Não segue distribuição normal
T4	$2,71 \times 10^{-7}$	Não segue distribuição normal

Dessa forma, rejeita-se a hipótese nula de normalidade para todos os tratamentos, concluindo-se que os dados não seguem uma distribuição normal. Em razão disso, optou-se por empregar testes estatísticos não paramétricos nas análises subsequentes, conforme recomendado por Carvalho et al. (2023).

Tabela 2. Resultados Teste de Kruskal-Wallis

χ^2	gl	p
186,66	3	0,0001

As análises apresentadas na Tabela 2 mostraram diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, com um valor de qui-quadrado (χ^2) de 186,66, 3 graus de liberdade (gl) e um valor de p menor que 0,0001. Esse resultado nos permite rejeitar a hipótese nula, indicando que as medianas dos tratamentos não são iguais e que, pelo menos um dos tratamentos, possui uma mediana significativamente diferente dos outros.

Tabela 3. Teste de Dunn com correção de Bonferroni

Comparação	Estatística Z	Valor de p	Valor de p ajustado	Significância ($\alpha/2 = 0,025$)
T1 – T2	-4,1899	$1,40 \times 10^{-5}$	$8,37 \times 10^{-5}$	*
T1 – T3	-8,9468	$< 2 \times 10^{-16}$	$1,10 \times 10^{-18}$	*
T2 – T3	-4,7569	$9,83 \times 10^{-7}$	$5,90 \times 10^{-6}$	*
T1 – T4	-12,8052	$< 2 \times 10^{-16}$	$4,60 \times 10^{-37}$	*
T2 – T4	-8,6153	$< 2 \times 10^{-16}$	$2,09 \times 10^{-17}$	*
T3 – T4	-3,8584	$5,71 \times 10^{-5}$	$3,42 \times 10^{-4}$	*

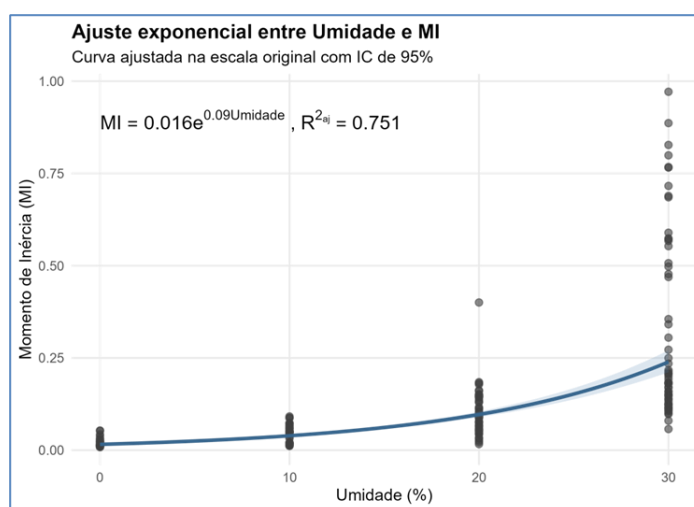
Nota: Diferenças significativas para $p \leq 0,025$, conforme correção de Bonferroni.

O teste de Dunn, com correção de Bonferroni, foi aplicado para identificar as diferenças entre os grupos após a verificação de significância global pelo teste de Kruskal-Wallis. A Tabela 3 sugere que todas as comparações entre os tratamentos apresentaram diferenças estatisticamente significativas (p ajustado $< 0,025$), indicando que cada tratamento influenciou de maneira distinta a variável Momento de Inércia (MI).

Tabela 4. Correlação de Spearman entre Umidade e MI

Par de variáveis	Coefficiente de correlação (ρ)	Valor de p	Interpretação
Umidade \times MI	0,8831	$< 0,0001$	Correlação forte e positiva

A análise de correlação entre o Momento de Inércia (MI) e a umidade do solo revelou forte associação positiva ($\rho = 0,8831$; $p < 0,0001$), corroborando a premissa de que o aumento do teor de água afeta diretamente a dinâmica do padrão de *biospeckle*. Resultado semelhante foi observado por Pandiselvan et al. (2020), que relataram correlação elevada ($r \approx 0,88$) em medições de MI utilizando configuração de bancada, enquanto Rahmanian et al. (2020) também evidenciaram alta sensibilidade do método às variações de umidade em superfícies vegetais.

**Figura 1.** Correlação entre MI e umidade do solo

A umidade do solo apresentou uma forte influência positiva sobre o MI, relação que foi confirmada pela correlação de Spearman ($\rho = 0,8831$; $p < 0,0001$). O comportamento entre as variáveis foi modelado por meio de uma equação exponencial ($y(x) = 0,016 e^{(0,09 \times x)}$), que explicou 75,1% da variação dos dados ($R^2 = 0,751$), como pode ser observado na Figura 1. Esse comportamento indica que incrementos na umidade promovem aumento acelerado do MI, em consonância com o efeito esperado da maior quantidade de água sobre o espalhamento e a interferência óptica do padrão de biospeckle. Achados semelhantes foram reportados por Enes et al. (2022).

CONCLUSÕES

O Momento de Inércia (MI), determinado pela técnica de Biospeckle Laser (BSL), apresenta forte e positiva correlação com o teor de umidade em amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo. O método demonstrou sensibilidade para discriminar estatisticamente todos os níveis de umidade avaliados (0, 10, 20 e 30%). A relação entre as variáveis foi adequadamente descrita por um modelo exponencial ($R^2=0,751$), confirmando a viabilidade da abordagem óptica e não destrutiva do BSL como uma ferramenta promissora para a estimativa da umidade do solo, um parâmetro fundamental para o manejo eficiente da água na irrigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, Kamila Cristina de Credo; AZEVEDO, Rodrigo Ferraz. Monitoramento da umidade do solo: análise de tecnologias para agricultura de precisão. In: Anais do Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 2024. Disponível em: **Monitoramento Da Umidade Do Solo Análise De Tecnologias Para Agricultura De Precisão.pdf** Acesso em: 14 ago. 2025.

BRAGA, Roberto A.; GODINHO, Robson P. Biospeckle Laser On Clouds, a digital gateway aiming at collaborative research improvement. **Research Ideas and Outcomes**, v. 9, p. 1–13, 03 nov. 2023. DOI: 10.3897/rio.9.e114736. Disponível em: <<https://doi.org/10.3897/rio.9.e114736>>. Acesso em: 04 ago. 2025.

BRAGA, R. A., Jr., Contado, J. L., Ducatti, K. R., & da Silva, E. A. A. (2025). Analysis of Seed Vigor Using the Biospeckle Laser Technique. **AgriEngineering**, 7(1), 3. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7010003>. Acesso em: 04 ago. 2025.

ENES, A. M. et al. **Dispositivo portátil para análise de biospeckle laser**. 2022. DOI: 10.37423/221006629. Disponível em: <<http://api.conhecimentolivres.org/ecl-api/storage/app/public/L.600-2022.pdf>>.

CARVALHO, André Mundstock Xavier de; MATSUO, Éder; MAIA, Marcelo da Silva. Avaliação da normalidade, validade dos testes de médias e opções não-paramétricas: contribuições para um debate necessário. **Revista Ciência e Natura**, v. 45, p. 1–28, 2023. DOI: 10.5902/2179460X67509.

CARDOSO, et al. Biospeckle laser for assessing tomatoes ripeness indexes. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 55, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240022>

CHOWDHURY, S.; SEN, S.; JANARDHANAN, S. **Comparative Analysis and Calibration of Low Cost Resistive and Capacitive Soil Moisture Sensor**. arXiv preprint arXiv:2210.03019, 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2210.03019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2210.03019>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p. Acesso em: 04 ago. 2025.

OLEANDRO, E.; GRILLI, S.; REGA, R.; MUGNANO, M.; BIANCO, V.; VALENTINO, M.; MANDRACCHIA, B.; NAZZARO, F.; COPPOLA, R.; FERRARO, P. Biospeckle analysis and biofilm electrostatic tests, two useful methods in microbiology. **Applied Microbiology**, v. 1, n. 3, p. 557–572, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol1030036>

PANDISELVAM, R., MAYOOKHA, V. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., Thirumdas, R., & Juvvi, P. (2020). Biospeckle Laser Technique – A Novel Non-destructive Approach for Food Quality and Safety Detection. **Trends in Food Science & Technology**, 97, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.028>.

RAHMANIAN, A., MIREEI, S. A., SADRI, S., GHOLAMI, M., & NAZERI, M. (2020). Application of biospeckle laser imaging for early detection of chilling and freezing disorders in orange. **Postharvest Biology and Technology**, 162, 111118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111118>.

SANTOS, A. P., Silva, M. F., & Pereira, J. C. (2019). **Mapeamento de valores e compreensão do jeitinho brasileiro em estudantes do ensino fundamental do Distrito Federal** (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília.

THAKUR, Puneet S.; CHATTERJEE, Amit; RAJPUT, L. S.; et al. Laser biospeckle technique for characterizing the impact of temperature and initial moisture content on seed germination. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 153, p. 106999, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2022.106999>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p. Acesso em: 04 ago. 2025.

KESHAVARZ, R.; SHARIATI, N. **High-Sensitivity and Compact Time-domain Soil Moisture Sensor Using Dispersive Phase Shifter for Complex Permittivity Measurement**. arXiv:2408.10462, 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2408.10462. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2408.10462>.

SINGH, D. N.; PAL, D. B.; SINGH, V. P. A **critical review of soil moisture measurement**. **Measurement**, v. 54, p. 92 105, 2014. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.04.007.