

CALIBRAÇÃO E ACURÁCIA DE LEITORES DE TDS EM SISTEMA HIDROPÔNICO DE BAIXO CUSTO

**CAROLINA DA SILVA DE OLIVEIRA¹; LAIRTA STEFANY DOS SANTOS¹;
CARLOS WAGNER OLIVEIRA²; BRUNO SAMPAIO DE MEDEIROS¹; EVERTON
ALENCAR PATRICIO¹ E SIRLEIDE MARIA DE MENEZES³**

¹ Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ítalo de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil, carolina.oliveira@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0005-9300-9382>; lairta.santos@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0009-3645-1000>; bruno.medeiros@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0009-3645-100X>; everton.alencar@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0001-8625-9739>.

² Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ítalo de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil. carlos.oliveira@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1013-2974>.

³ Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ítalo de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-02, Crato, Ceará, Brasil, sirleidemeneses@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1225-5572>.

1 RESUMO

O cultivo hidropônico destaca-se como uma excelente opção para produção agrícola em larga escala de base sustentável e com alto retorno econômico associado. O uso de tecnologias acessíveis que permitam o monitoramento da qualidade da solução nutritiva, contribuem para a ampliação da agricultura hidropônica. Nesse contexto, o uso de sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade da solução nutritiva, facilita a automação e permite um maior controle sobre os fatores que interferem no desenvolvimento das plantas. Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi calibrar e avaliar o desempenho do sensor TDS-Meter para monitoramento da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva. Durante o ciclo de cultivo da alface hidropônica, a CE da solução foi monitorada por um sensor de bancada (padrão) e pelo sensor alternativo TDS-Meter. Os dados foram utilizados para gerar uma equação de calibração por meio de regressão simples. A qualidade dos dados ajustados foi avaliada mediante a aplicação de índices estatísticos. A calibração do sensor TDS-Meter potencializou o uso desse equipamento em sistemas de monitoramento de solução nutritiva de baixo custo para cultivos hidropônicos. A equação de calibração melhorou a capacidade de predição dos valores de condutividade elétrica.

Palavras-chave: Condutividade elétrica, precisão, solução nutritiva.

OLIVEIRA, C. S.; SANTOS, L. S.; OLIVEIRA, C. W.; MEDEIROS, B. S.; PATRICIO, E. A.; MENEZES, S. M.

CALIBRATION AND ACCURACY OF TDS READER IN LOW-COST HYDROPONIC SYSTEM

2 ABSTRACT

Hydroponic cultivation stands out as an excellent option for large-scale agricultural production on a sustainable basis and with a high associated economic return. The use of accessible technologies that allow monitoring of the quality of the nutrient solution contributes to the expansion of hydroponic agriculture. In this context, the use of low-cost sensors for monitoring the quality of the nutrient solution facilitates automation and allows greater control over the factors that interfere with plant development. In this context, the objective of this work was to calibrate and evaluate the performance of the TDS-Meter sensor for monitoring the electrical conductivity (EC) of a nutrient solution. During the hydroponic lettuce cultivation cycle, the EC of the solution was monitored by a benchtop sensor (standard) and an alternative TDS-Meter sensor. The data were used to generate a calibration equation through simple regression. The quality of the adjusted data was evaluated by applying statistical indices. The calibration of the TDS-Meter sensor enhanced the use of this equipment in low-cost nutrient solution monitoring systems for hydroponic crops. The calibration equation improved the prediction ability of the EC values

Keywords: Electrical conductivity, accuracy, nutrient solution.

3 INTRODUÇÃO

Diante das adversidades climáticas, é de grande importância o desenvolvimento e o aprimoramento de técnicas para intensificar a produção sustentável, buscando sempre racionalizar o uso de recurso naturais e garantir a rentabilidade da produção agrícola. Nesse contexto, o cultivo hidropônico é uma alternativa promissora que pode abordar questões ambientais e alimentares, permitindo que os agricultores racionalizem os insumos, otimizando o crescimento das culturas (Richa; Fizir; Touil, 2021). Nesse sistema de cultivo, o monitoramento de fatores como pH, condutividade elétrica (CE) e concentração de nutrientes da solução nutritiva, é imprescindível para garantir a sanidade e um bom desenvolvimento das plantas. Segundo Jung *et al.* (2019), normalmente, a qualidade da solução nutritiva é avaliada por meio do monitoramento da CE.

O uso da automação em cultivos hidropônicos é primordial para garantir a eficiência do sistema, assegurando uma supervisão constante desses níveis de

absorção de nutrientes, evitando possíveis desequilíbrios nutricionais. A esse respeito, Cambra *et al.* (2018) afirmam que a automação de processos de irrigação por meio de sensores de baixo custo pode disseminar avanços tecnológicos em um setor muito influenciado por custos econômicos. Cunha *et al.* (2020), ressaltam a relevância da elaboração de dispositivos multiparâmetros com base em plataformas e sensores mais acessíveis, assim como a utilização de tecnologias que facilitem a coleta e acesso aos dados. Assim, os sensores de baixo custo se destacam como uma alternativa aos sensores de bancada, pois além de serem mais econômicos, apresentam maior portabilidade, permitindo o transporte e coleta de dados em campo. Além disso, possibilitam a integração com sistemas de automação e Internet das Coisas (IoT).

Já na função da coleta de dados, o software Arduino se destaca como uma ferramenta promissora, por ser uma plataforma acessível e de código aberto, permitindo o desenvolvimento de dispositivos de medição e controle. (Zafar *et*

al., 2018). No entanto, é preciso que esses sensores alternativos forneçam precisão e confiabilidades em suas leituras. Desse modo, o objetivo do trabalho foi realizar a calibração do sensor TDS-Meter (baixo custo), analisando o seu funcionamento para monitoramento de condutividade elétrica em sistema hidropônico.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) no Crato, CE, Brasil, ($7^{\circ}14'08''$ de latitude S e $39^{\circ}22'07''$ de longitude W, altitude de 420 m). Foram utilizados os laboratórios de Hidrologia e Hidráulica e Fisiologia e Bioquímica do Estresse em Plantas, como ponto de apoio na montagem do sistema de monitoramento e leitura de dados com o equipamento padrão.

A coleta de dados ocorreu durante o ciclo de cultivo da cultura da alface em sistema hidropônico de 07 a 27 de março de 2024. Para o monitoramento da condutividade elétrica da solução nutritiva, utilizou-se o equipamento TDS-Meter (Sensor Analógico de Condutividade de Água), que dá leituras da concentração de sólidos dissolvidos em solução.

Utilizou-se os seguintes itens de hardware: Arduino uno, microcontrolador baseado no Atmega 3228, display LCD, protoboard e resistores. Como software, foi utilizado Arduino IDE, para desenvolver a programação de leitura do dispositivo e processamento dos dados. Inicialmente, seguindo recomendação do fabricante, a equação de calibração que relaciona a tensão medida pelo sensor com os valores reais TDS (Total Dissolved Solids), foi determinada utilizando os seguintes passos: coletadas das tensões em soluções de baixa ($84 \mu\text{S cm}^{-1}$) e alta condutividade ($1408 \mu\text{S cm}^{-1}$), posteriormente foi calculado o fator de correção (FC) por meio da equação 1.

$$FC = \frac{TDS_{Alto} - TDS_{Baixo}}{Tensão_{Alto} - Tensão_{Baixo}} \quad (1)$$

Em que: TDSAlto - TDSBaixo representa os valores de TDS das soluções de alta e baixa de condutividade, respectivamente. TensãoAlto - TensãoBaixo são leituras de tensão correspondentes às soluções mencionadas.

Após esse processo, o sensor foi devidamente instalado no interior do reservatório da solução nutritiva destinada ao cultivo de alface-crespa (*Lactuca sativa*). Tornando possível o acompanhamento em tempo real da condutividade elétrica. A coleta dos dados em campo ocorreu durante o período de 21 dias, referentes ao ciclo de desenvolvimento vegetativo da alface. O monitoramento foi realizado diariamente, sempre no mesmo horário (às 09h00) pelo sensor tido como padrão (de bancada - modelo Oakton/Eutech CON 700), e pelo sensor alternativo TDS-Meter.

A calibração das leituras do sensor alternativo (TDS-Meter) em relação ao sensor padrão (bancada) foi realizada por meio de regressão polinomial, no qual a escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados baseou-se no maior valor do coeficiente de determinação (R^2). A análise dos resultados se deu por meio da comparação com reta 1:1 entre os dados alternativos e padrões e pela aplicação dos índices estatísticos: erro médio (EM) que indica a exatidão da estimativa, a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) que quantifica a dispersão dos valores em torno da linha de referência 1:1, o índice de concordância de Willmott (d) que é uma medida padrão para o erro de estimativa do modelo, o coeficiente de correlação de Pearson (r) que permite quantificar a associação entre variáveis analisadas, e o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) de acordo com as equações de 2 a 6, respectivamente.

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0,5} [\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]^{0,5}} \quad (5)$$

$$c = d \times r \quad (6)$$

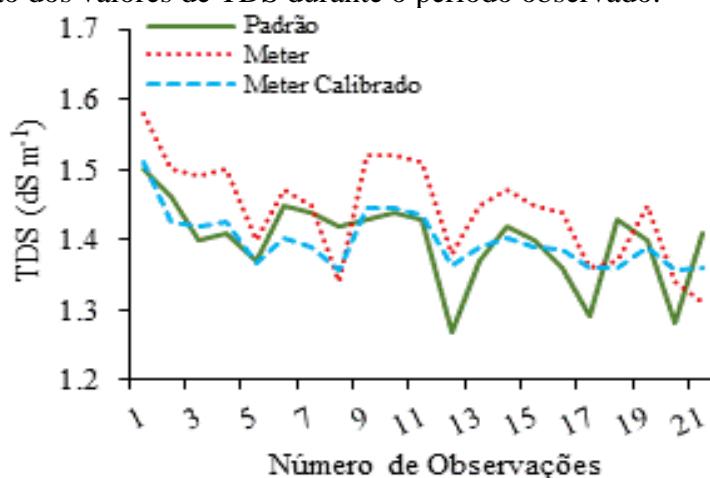
Em que: EM – erro médio; O_i – dado padrão; P_i – dado alternativo; n – número de pares de dados padrão e predito; RMSE – raiz quadrada do erro médio quadrático; O_i

– dado padrão; P_i – dado alternativo; n – número de pares de dados padrão e predito; d – Índice de concordância de Willmott; Ō – média de dados padrão; r – coeficiente de correlação; e c – coeficiente de desempenho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de condutividade elétrica obtidos pelo sensor de bancada (padrão Oakton/Eutech CON 700 - TDS) e pelo sensor alternativo (TDS-Meter), foram geradas curvas para avaliar o comportamento dos TDS da solução nutritiva utilizada durante o período do cultivo hidropônico da cultura da alface (Figura 1).

Figura 1. Variação dos valores de TDS durante o período observado.



Fonte: Autores (2025)

A faixa de leitura obtida pelo sensor TDS-Meter antes da calibração vai de 1,31 a 1,58 dS m⁻¹ e após a calibração foi de 1,36 a 1,51 dS m⁻¹. Dentro do intervalo de leitura do sensor TDS-Meter antes da calibração, houve uma tendência a superestimar os valores padrão e de não acompanhar os picos de menor valor (Figura 1). Após a calibração do sensor, nota-se uma maior aproximação dos valores alternativos com os valores padrão, porém, mesmo assim o sensor TDS-

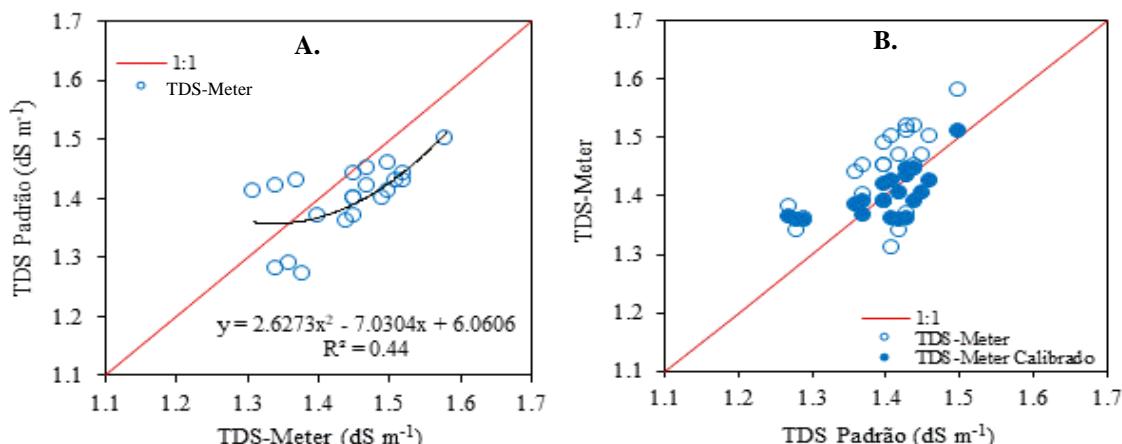
Meter não conseguiu acompanhar os picos de menor valor.

A equação de calibração para o sensor de condutividade elétrica foi obtida por meio da correlação entre os valores de TDS obtidos pelo sensor padrão e pelo sensor alternativo (TDS-Meter) (Figura 2A). O modelo que se ajustou aos dados foi o polinomial com R² de 0,44. Observa-se que o sensor alternativo de TDS (TDS-Meter) antes da calibração superestima os valores padrão na faixa de leitura de 1,40 a 1,58 dS

m^{-1} , que corresponderia a faixa padrão de 1,37 a 1,50 dS m^{-1} (Figura 2B). Após a calibração, o sensor apresentou maior exatidão das leituras, com valores mais próximos da reta 1:1, porém, com tendência

a superestimativa em valores mais baixos (igual ou inferiores a 1,42 dS m^{-1}), conferindo baixa sensibilidade de leitura nessas concentrações.

Figura 2. Equação de calibração obtida pela correlação entre os valores padrões de TDS e os valores do sensor TDS-Meter (A), e valores de TDS obtido pelo sensor TDS-Meter antes e depois da calibração, correlacionados com os respectivos valores padrões (B).



Fonte: Autores (2025)

De acordo com Jiménez *et al.* (2019), a calibração em laboratório de sensores alternativos (baixo custo) melhora significativamente a precisão das leituras. A calibração não incidiu expressivamente no valor do RMSE, que já era considerado baixo e reduziu em mais 43%, contudo seu desempenho era considerado “Péssimo” e evoluiu apenas para “Sofrível” (Tabela 1).

Tal resultado pode estar associado com as incertezas associadas ao modelo escolhido para a calibração dos dados, que pode ser influenciado pela curta série de dados analisada. Passos *et al.* (2023) obtiveram valor de RMSE de 165,14 para o TDS, o que, segundo o autor, representa uma baixa acurácia dos dados.

Tabela 1. Índices estatísticos para o sensor de TDS (TDS-Meter) antes e depois da calibração

Sensor	Índices						
	r	R ²	D	c	Desempenho	RMSE	EM
TDS-Meter	0,62	0,39	0,34	0,21	Péssimo	0,07	-0,04
TDS-Meter Calibrado	0,67	0,44	0,76	0,51	Sofrível	0,04	0,0001

O índice de concordância de Wilmontt (d) melhorou significativamente após a calibração, representando uma boa concordância entre os valores padrão e os obtidos pelo sensor alternativo após a calibração. Semelhantemente ocorreu com os valores de EM, onde para o sensor alternativo de TDS após a calibração o valor

do EM aproximou-se ainda mais de zero. A esse respeito, Passos *et al.* (2023) obtiveram índice d 0,95 para TDS, resultados superiores aos obtidos nesse estudo. Pangestu, Sani e Mutiara (2023), avaliando a calibração de um sensor de TDS, obtiveram taxas de erro variando de 19 e 41 para o TDS. A calibração dos sensores de pH

e TDS também melhorou a correlação (r de 0,85 e 0,67) entre os valores obtidos pelo equipamento padrão e os valores obtidos pelo sensor alternativo, resultando também em aumento no valor do R^2 . Constatou-se, portanto, que a calibração foi eficiente em melhorar a precisão e a exatidão do sensor alternativo de TDS.

De modo geral, os sensores portáteis que apresentam baixo custo de aquisição constituem-se em equipamentos funcionais e indispensáveis em sistemas de produção hidropônicas. Em relação ao sensor TDS-Meter, tal equipamento permitiu o monitoramento da CE da solução nutritiva, porém, também é preciso atentar-se a detalhes como a limpeza do sensor após o uso com água deionizada, calibrar regularmente e realizar verificações dos resultados com sensores padrões, afim de manter a exatidão das leituras e a integridade do sensor.

6 CONCLUSÕES

A calibração do sensor TDS-Meter potencializou o uso desse equipamento em sistemas de monitoramento de solução nutritiva de baixo custo para cultivos hidropônicos. A equação de calibração melhorou a capacidade de predição dos valores de CE. Não sendo recomendado seu uso sem calibração prévia. Os valores condutividade elétrica, obtidos pelo sensor alternativo após a calibração, correlacionam-se com os valores obtidos pelo equipamento padrão.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) pela logística para realização do trabalho, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível

Superior – Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas participantes desta pesquisa e ao PROJETO: Edital n. 162022, PDPG – Pós-doutorado Estratégico, também ao grupo LEMGE – Laboratório de Estatística Modelagem e Geoprocessamento da UFCA, pela orientação e supervisão da pesquisa.

8 REFERÊNCIAS

- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMBRA, C.; SENDRA, S.; LLORET, J.; LACUESTA, R. Smart system for bicarbonate control in irrigation for hydroponic precision farming. **Sensors**, Basel, v. 18, n. 5, article 1333, p. 1-16, 2018.
- CUNHA, R. A.; SILVA, A. G.; NASCIMENTO, L. D.; LIMA, L. S.; BANDEIRA, M. L. F. S. Polypus: sonda de baixo custo para análise de parâmetros físico-químicos em águas superficiais. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Palhoça, v. 9, n. 4, p. 653-671, 2020.
- JIMÉNEZ, A. D. L. A. C.; ALMEIDA, C. D. G. C.; JÚNIOR SANTOS, J. A. S.; MORAIS, J. E. F.; ALMEIDA, B. G.; ANDRADE, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, article 104413, p. 1-5, 2019.
- JUNG, D. H.; KIM, H. J.; CHO, W. J.; PARK, S. H.; YANG, S. H. Validation testing of an ion-specific sensing and control system for precision hydroponic macronutrient management. **Computers and Irriga**, Botucatu, v. 29, p. 134-140, janeiro-dezembro, 2024

Electronics in Agriculture, Amsterdam, v. 156, p. 660-668, 2019.

PANGESTU, D. A.; SANI, M. I.; MUTIARA, G. A. Water quality measurement system for bottled drinking water using linear regression comparison analysis. *In: 2023 IEEE ASIA PACIFIC CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE*, 2023, Bali. **Proceedings** [...]. Bali: IEEE, 2023, p. 208-213.

PASSOS, M.; MARIANO, A. B. R.; SILVA, D. A.; SOUSA, A. B. O. Performance of sensors for quality analysis of irrigation water. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, Tupã, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2023.

RICHA, A.; FIZIR, M.; TOUIL, S. Advanced monitoring of hydroponic solutions using ion-selective electrodes and the internet of things: a review.

Environmental Chemistry Letters, Xian, v. 19, n. 4, p. 3445-3463, 2021.

ZAFAR, S.; MIRAJ, G.; BALOCH, R.; MURTAZA, D.; ARSHAD, K. An IoT based realtime environmental monitoring system using arduino and cloud service.

Engineering, Technology & Applied Science Research, Patras, v. 8, n. 4, p. 3238-3242, 2018.