



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**JUVENALDO FLORENTINO CANJA**

**CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES DE BAIXO CUSTO  
ASSISTIDOS POR SISTEMA EMBARCADO PARA O USO EM  
AGRICULTURA SUSTENTÁVEL**

**FORTALEZA**

**2025**

JUVENALDO FLORENTINO CANJA

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENSORES DE BAIXO CUSTO  
ASSISTIDOS POR SISTEMA EMBARCADO PARA O USO EM  
AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.

Coorientador: Prof. Dr. George André Pereira Thé

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

C219c Canja, Juvenaldo Florentino.

Caracterização experimental de sensores de baixo custo assistidos por sistema embarcado para o uso em agricultura sustentável / Juvenaldo Florentino Canja. – 2025.  
84 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo.  
Coorientação: Prof. Dr. Prof. Dr. George André Pereira The.

1. Balanço hídrico. 2. calibração de sensores. 3. cicroclima agrícola. 4. arduino uno. I. Título.  
CDD 630

---

JUVENALDO FLORENTINO CANJA

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE SENsoRES DE BAIXO CUSTO  
ASSISTIDOS POR SISTEMA EMBARCADO PARA O USO EM  
AGRICULTURA SUSTENTÁVEL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 28/07/2025

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. George André Pereira The (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Michela Mulas  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Prof. Luís Gonzaga Medeiros de Figueiredo Júnior  
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

---

Prof. Dr. José Bruno Rego de Mesquita  
Centro Universitário UniFanor Wyden

---

Prof. Dr. Geocleber Gomes de Sousa  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro Brasileira (UNILAB)

A DEUS,

Aos que me deram a vida:

Ao meu amado, inesquecível e eterno pai,  
Florentino Canja (*in memoriam*), agricultor e  
homem de sabedoria ímpar, que sempre  
acreditou neste projeto de vida. Sua ausência  
deixa saudades profundas, mas a certeza de seu  
orgulho é a herança mais preciosa que deixou na  
terra.

Às minhas queridas mães, Quinta e Cecília  
(Aias), exemplos de amor, coragem e  
dedicação, que me sustentaram com afeto e  
ensinamentos ao longo desta trajetória.

Ao meu irmão, Aquilino (*in memoriam*),  
saudades eternas, irmão.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, meu guia, pela vida, que ilumina meus caminhos, sustentando-me nos momentos difíceis e por permitir que eu chegasse até aqui com fé, esperança e perseverança. À memória do meu pai, que mesmo ausente fisicamente, continua presente em minha vida por meio de seus ensinamentos, exemplos e amor incondicional. Sua dedicação ao meu futuro e seu compromisso com a minha educação foram fundamentais para que eu alcançasse este momento. Teu sonho tornou-se realidade, pois soube entregar a missão ao irmão, tio Louis (Tonton), “*Mambaranind mak*”. **Unór asi prëumb nintch’.** Obrigado eterno tio/pai.

Às minhas Aias (mães), por todo amor, força e dedicação. Seus apoios incansáveis e seus sacrifícios ao longo da vida foram pilares para que eu tivesse acesso à educação e oportunidades. As senhoras sempre foram meus alicerces e inspiração. Ao tio Honório Kaulkô, por ter aberto às portas da sua casa em Bissau e suporte dado na minha caminhada. Aos meus irmãos, compartilho esta conquista.

À Universidade Federal do Ceará, minha casa acadêmica, agradeço por ter sido o espaço onde construí meu percurso profissional e intelectual. Aqui recebi formação sólida, vivi experiências enriquecedoras e fiz amizades que levarei para a vida.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), minha gratidão pelo apoio financeiro, por meio da concessão da bolsa de doutorado, que foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao eterno orientador, Professor Benito, manifesto minha mais sincera gratidão pela orientação firme, apoio constante, palavras motivadoras e conselhos. Sua contribuição virou as chaves para meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal.

Ao prof. Dr. George, registro minha gratidão pela relevante participação e supervisão dedicada neste trabalho, pela orientação e proposição estratégicas, à profª. Drª. Michela Mulas, cuja expertise foi importante para o desenvolvimento técnico e científico da pesquisa.

À equipe da Estação Agrometeorológica da UFC, minha gratidão pelo suporte na realização deste trabalho. Em especial ao Professor Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana, pela disponibilidade e generosidade com que sempre me auxiliou. Ao professor Dr. Geocleber Gomes de Sousa, por fazer parte de minha caminhada acadêmica desde graduação, pelo apoio e suporte nesse processo.

Minha imensa gratidão ao professor Dr. Francisco Vitor Macedo Pereira por tudo que tem representado na minha vida, os conselhos, ensinamentos, valores morais sobre vida.

Ao Prof. Carlos Alberto Viliotti, pela ideia sugerida e apoio durante a disciplina de Eletrônica aplicada à Agricultura e pelo microcontrolador doado para os primeiros testes. Agradeço aos funcionários, Weverton, Fernando, Islone, Carlão, por sua acolhida e suporte.

Aos colegas e da equipe de trabalho, agradeço pelas trocas de experiências, companheirismo e pelos momentos de descontração que tornaram a trajetória mais leve e rica. Ao meu mentor de coding e construção do protótipo, Dionizio Porfírio de Assis, grato por aceitar o convite e pelas partilhas dos conhecimentos em programação, prototipagem e, acima de tudo, bom humor no que faz.

À minha querida amiga Taciana Sousa de Oliveira Ribeiro, minha gratidão mais profunda pela presença constante e companheirismo nos momentos mais desafiadores e conselhos que tem me dado. Ao José Eduardo de Oliveira Ribeiro (Campeão) e amizade e suporte ao longo dessa caminhada. Agradeço ao Jonnathan Richeds, Mádilo Lages Vieira Passos, Gilbenes Bezerra Rosal e Diogo Frazão.

## RESUMO

Um dos desafios da agricultura moderna é elaborar a inovadoras tecnologias e metodologias viáveis face a escassez hídrica e da necessidade de uma agricultura mais eficiente e sustentável. A presente pesquisa objetivou realizar a caracterização e integração de sistemas de balanço hídrico no solo, monitoramento microclimático de baixo custo, empregados no manejo de irrigação, sob perspectiva de instrumentação eletrônica, com ênfase à agricultura sustentável. A investigação foi estruturada em três experimentos complementares, que buscaram entender o comportamento e a precisão de sensores em diferentes condições de teste. Os sensores analisados foram os modelos HL-69 (resistivo) e HD-38 (capacitivo), além do sensor DHT11 (temperatura e umidade relativa do ar). No experimento I, foram desenvolvidas curvas de calibração para os sensores HL-69 e HD-38 em solo franco-argiloso, utilizando o método gravimétrico como referência. O sensor capacitivo HD-38 apresentou linearidade ( $R^2 = 0,98$ ), sensibilidade estável e boa precisão em toda a faixa de umidade testada. Por outro lado, o sensor resistivo HL-69 mostrou desempenho satisfatório apenas em baixos níveis de umidade com coeficiente de determinação  $R = 0,96$ . O segundo experimento comparou os métodos de coleta de variáveis meteorológicas entre DHT11 e métodos padrão dos registros de estações meteorológicas automáticas (EMA) e convencional (EMC). Apesar de apresentar diferenças estatisticamente significativas nas médias de temperatura e umidade relativa, o DHT11 conseguiu acompanhar a tendência diária das variáveis meteorológicas analisadas. O terceiro experimento consistiu na aplicação do sensor HD-38 em um lisímetro de drenagem, posicionado em quatro profundidades do perfil do solo (0, 12,5, 25,5 e 37,5 cm). A análise estatística dos dados indicara que a maior variação de umidade ocorreu na camada superficial antes da formação da cobertura vegetal. Os resultados desta pesquisa indicam que sensores de umidade de solo de baixo custo, quando devidamente calibrados e validados, alinham-se na proposta de custo-benefício para o manejo racional da irrigação. A integração de sensores a sistemas embarcados fornece dados confiáveis que podem auxiliar a tomada de decisão em tempo real e promover o uso eficiente da água, o aumento da produtividade e a sustentabilidade no campo. A utilização de tecnologias acessíveis e adaptáveis é especialmente promissora para pequenos e médios produtores rurais, além de fomentar a agricultura de precisão em contextos com restrições financeiras e climáticas.

**Palavras-chave:** balanço hídrico; calibração de sensores; microclima agrícola; arduino uno.

## ABSTRACT

One of the challenges of modern agriculture is developing innovative, viable technologies and methodologies in the face of water scarcity and the need for more efficient and sustainable agriculture. This research aimed to characterize and integrate soil water balance systems and low-cost microclimate monitoring systems used in irrigation management, using electronic instrumentation as a basis, with an emphasis on sustainable agriculture. The investigation was structured around three complementary experiments that sought to understand the behavior and accuracy of sensors under different test conditions. The sensors analyzed were the HL-69 (resistive) and HD-38 (capacitive) models, as well as the DHT11 sensor (temperature and relative humidity). In experiment I, calibration curves were developed for the HL-69 and HD-38 sensors in clay loam soil, using the gravimetric method as a reference. The HD-38 capacitive sensor demonstrated linearity ( $R^2 = 0.98$ ), stable sensitivity, and good accuracy across the entire moisture range tested. On the other hand, the HL-69 resistive sensor showed satisfactory performance only at low moisture levels, with a coefficient of determination of  $R = 0.96$ . The second experiment compared the DHT11 meteorological variable collection methods with standard methods from automatic (EMA) and conventional (EMC) meteorological station records. Despite presenting statistically significant differences in average temperature and relative humidity, the DHT11 was able to follow the daily trends of the analyzed meteorological variables. The third experiment consisted of applying the HD-38 sensor to a drainage lysimeter, positioned at four depths of the soil profile (0, 12.5, 25.5, and 37.5 cm). Statistical analysis of the data indicated that the greatest moisture variation occurred in the surface layer before vegetation cover formation. The results of this research indicate that low-cost soil moisture sensors, when properly calibrated and validated, align with the proposed cost-benefit for rational irrigation management. Integrating sensors into embedded systems provides reliable data that can support real-time decision-making and promote efficient water use, increased productivity, and sustainability in the field. The use of accessible and adaptable technologies is especially promising for small and medium-sized rural producers, in addition to fostering precision agriculture in contexts with financial and climate constraints.

**Keywords:** water balance; sensor calibration; agricultural microclimate; arduino uno.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Arquitetura do microcontrolador Arduino Uno e especificações técnicas.....	19
Figura 2 –	Sensores de umidade do solo, com módulo comparador e cabos do circuito: princípio capacitivo (A) e resistivo (B).....	22
Figura 3 –	Fluxograma metodológico de integração e teste de sensores de baixo custo em sistemas de monitoramento inteligente.....	25
Figura 4 –	Análise de sensibilidade à umidade de solo em dois sensores capacitivos, modelos S12 e FC-28. Laboratório da engenharia teleinformática, (UFC).....	26
Figura 5 –	Coleta por amostra composta de solo para levantamento de curva característica de água no solo e calibração da sonda de umidade capacitiva e resistiva.....	27
Figura 6 –	Retirada da massa inicial (A) e levantamento de curva característica de água no solo sob monitoramento ambiental (B).....	28
Figura 7 –	Procedimento para calibração de sondas de umidade de solo, HL-69 DH-38 (A).....	30
Figura 8 –	Módulo Sensor de Temperatura e Umidade DHT11 (A) e abrigo meteorológico padrão tipo Stevenson (B).....	33
Figura 9 –	Esquema de instalação dos sensores (a) e a visualização no campo (b).....	36
Figura 10 –	Monitoramento de variáveis meteorológicas ao longo do experimento.....	37
Figura 11 –	Curvas características de retenção de água no solo obtidas por sensores capacitivo (HD-38) e resistivo (HL-69) em função da massa do solo (Ms).....	40
Figura 12 –	Variação dos valores da sonda HL 69 em função do conteúdo hídrico (10 A) no solo e teor da umidade (10 B).....	42
Figura 13 –	Variação dos valores da sonda HD 38 em função do conteúdo hídrico (12 A) no solo e teor da umidade (12 B).	43
Figura 14 –	Temperaturas médias mensais obtidas por diferentes métodos de coleta, EMA, EMC e DHT11.....	47

Figura 15 –	Umidade relativa, médias mensais obtidas por diferentes métodos de coleta, EMA, EMC e DHT11.....	49
Figura 16 –	Média diária da lâmina aplicada (a), drenada (b) e evaporada (c), sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	54
Figura 17 –	Variação da umidade gravimétrica (Ug%) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	57
Figura 18 –	Variação de umidade sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	58
Figura 19 –	Valores médios das profundidades sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	60
Figura 20 –	Correlação de Pearson entre profundidades (p1 a p4), lâminas (LAp, LDr e LEv) temperatura e umidade relativa do ar, (n= 90). *: significativo ( $p<0,05$ ).....	61
Figura 21 –	Correlação de Pearson entre profundidades (p1 a p4), lâminas (LAp, LDr e LEv) temperatura e umidade relativa do ar, (n= 90). *: significativo ( $p<0,05$ ).....	62
.		

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Comparativo técnico e científico de pesquisas em irrigação inteligente com microcontroladores e monitoramento ambiental.....	23
Tabela 2 –	Dados do levantamento de curva característica de água no solo sob monitoramento ambiental.....	29
Tabela 3 –	Valores das leituras de sondas capacitivas e resistivas na calibração específica sob condições de ambiente controlado.....	31
Tabela 4 –	Resumo de análise de variância para médias de temperatura e umidade relativa do ar para os três métodos de estimativa, EMA, DHT11 e convencional.....	46
Tabela 5 –	Média dos valores do balanço hídrico em lisímetro de drenagem e valores da sonda, em solo franco argiloso e sonda de umidade.....	52
Tabela 6 –	Resumo da análise de variância para média diária da LAp, LDr e LEv ao longo dos meses de estudo, sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda de umidade.....	53
Tabela 7 –	Resumo da análise de variância para variável umidade gravimétrica (Ug%) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	55
Tabela 8 –	Valores médios de úmida e seca (MU e MS), respectivamente e Ug (%) e respectivo desvio médio (d. médio) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	56
Tabela 9 –	Resumo da análise de variância para média diária das profundidades dos sensores ao longo do ensaio, sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	57
Tabela 10 –	Valores médios das profundidades sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.....	59

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

ADC	Analog to Digital Converter (Conversor Analógico Digital)
ANOVA	Analysis of Variance (Análise de Variância)
ASSISTAT	Software Estatístico para Análise de Variância
BH	Balanço hídrico
CV %	Coeficiente de Variação (em porcentagem)
DHT11	Digital Humidity and Temperature Sensor 11
EMA	Estação Meteorológica Automática
EMC	Estação Meteorológica Convencional
ESP32	Microcontrolador da série ESP (Espressif)
HD38	Sensor Capacitivo de Umidade
HL69	Sensor Resistivo de Umidade
IDE Integrado)	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
LAp	Lâmina aplicada ( $\text{mm dia}^{-1}$ )
LDr	Lâmina Drenada
Lev	Lâmina evapotranspirada ( $\text{mm dia}^{-1}$ )
Ma	Massa de água
Ms	Massa seca
Mu	Massa do Solo Úmido
Mt	Massa total

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Experimento I: Levantamento da curva característica e calibração de duas sondas de umidade, em solo franco argiloso sob aquisição de dados via local.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Experimento II: Análise comparativa dos métodos de coleta de dados meteorológicos para monitoramento microclimático.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Experimento III: Caracterização estatística de uma sonda de umidade do solo capacitiva, integrada ao sistema de balanço hídrico na agricultura em região semiárida.....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Experimento I: Levantamento da curva característica e calibração de duas sondas de umidade, em solo franco argiloso sob aquisição de dados via local.</b>	<b>39</b>
<b>5.1.1</b>	<b><i>Sensor resistivo de umidade de solo HL 69.....</i></b>	<b>41</b>
<b>5.1.2</b>	<b><i>Sensor capacitivo de umidade de solo HD-38.....</i></b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Experimento II: Análise comparativa dos métodos de coleta de dados meteorológicos para monitoramento microclimático.....</b>	<b>45</b>
<b>5.3</b>	<b>Experimento III: Caracterização estatística de uma sonda de umidade do solo capacitiva, integrada ao sistema de balanço hídrico na agricultura em região semiárida.....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A – ALGORITMO E FERRAMENTAS PARA PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário das mudanças climáticas, um dos desafios da sociedade moderna é elaborar inovadoras metodologias e tecnologias que apresentem alternativas para a produção agrícola com a máxima precisão na utilização dos recursos hídricos, preservação do meio ambiente e a manutenção da soberania alimentar. A agricultura é indispensável, por ser a única via mais eficaz que se tem para responder face aos problemas da alimentação global. A expansão da agricultura irrigada tornou-se um marco na consolidação do setor agrícola como o principal consumidor de recursos hídricos no mundo.

Atualmente, a agricultura responde por aproximadamente 70% do uso global de água doce proveniente de rios, lagos e aquíferos subterrâneos, enquanto os 30% restantes são destinados ao uso urbano e industrial. O cenário reforça a importância estratégica da água para a produção agrícola, sendo ideal que haja controle e gestão eficiente para garantir a sustentabilidade da atividade. A irrigação compreende um conjunto de técnicas artificiais aplicadas com o objetivo de suprir a demanda hídrica das culturas agrícolas, em particular em regiões que carecem de condições naturais favoráveis.

A prática tem permitido ampliar fronteiras agrícolas e elevar a produtividade em áreas tradicionalmente limitadas pela escassez hídrica. O avanço tecnológico e o desenvolvimento de diferentes métodos de irrigação têm contribuído para o aumento da eficiência produtiva e da qualidade dos alimentos (GARB & FRIEDLANDER, 2020). A adoção da agricultura irrigada segue uma lógica semelhante à de outros setores econômicos, sendo impulsionada por uma convergência de fatores sociais, políticos, tecnológicos e econômicos que favorecem os investimentos tanto em escala nacional quanto internacional (RODRIGUES et al., 2023).

No entanto, a falta de acesso a tecnologias de monitoramento ainda leva muitos produtores a adotarem práticas excessivas, com receio de perdas decorrentes do estresse hídrico. Tal prática resulta em desperdícios significativos de água e energia, além de riscos de contaminação do lençol freático por percolação profunda de fertilizantes e outros insumos (SILVA et al., 2022). A busca por maior eficiência na irrigação exige a maximização da relação entre a quantidade de água efetivamente utilizada pelas plantas e a capacidade do sistema de irrigação em evitar perdas por escoamento superficial, evaporação ou infiltração profunda. Sistemas bem projetados e gerenciados são capazes de alcançar altos índices de eficiência,

promovendo a sustentabilidade hídrica e econômica da produção agrícola.

Um dos desafios da agricultura em regiões semiáridas é a gestão de água e do solo, a qual pode se beneficiar com a adoção de recursos tecnológicos e instrumentos os mais diversos. Existem diversos medidores empregados pela comunidade científica e em meio agrícola para estimativa das entradas e saídas de água em um sistema produtivo. Um lisímetro de drenagem é um dispositivo utilizado na pesquisa e na agricultura para estimar a quantidade de água que se percola através do solo, especialmente abaixo da zona radicular das plantas. Consiste em um recipiente multiformato, preenchido com solo deformado ou indeformado e um mecanismo para coletar e quantificar o volume de água que sai pelo fundo.

Outro exemplo são os sensores de umidade de solo, dispositivos eletrônicos projetados para medir a quantidade volumétrica de água presente no solo. Consistem em sondas ou eletrodos que, inseridos no solo e assistidos por dispositivos eletrônicos, microcontroladores, servem para coletar dados relevantes ao longo do tempo. São acessíveis, de baixo consumo de energia, facilidades no manuseio, entretanto, como todo sensor eletrônico, podem apresentar oscilações nas leituras (GASHAW et al., 2018; VENKATESH et al., 2011).

Realizar uma ação integrada com sensores de solo, para tornar a agricultura cada vez sustentável em campo, utilizando a instrumentação eletrônica ainda representa um desafio para entender a dinâmica da água no solo, visto que, a quantidade de água que permanece no solo após a ocorrência de chuva ou irrigação varia dependendo da cobertura presente, sendo influenciada principalmente pela vegetação existente, pelo estágio fenológico, exposição à radiação solar e consequente, aumento na temperatura do solo, pelas práticas de manejo utilizadas e pelo tipo de solo (GUADAGNIN et al., 2018). Nesse contexto, julga-se necessário a realização de estudos contínuos visando aproveitar a máxima capacidade dos sensores e microcontroladores.

Convém salientar que a aplicação de sensores de baixo custo no controle da irrigação, continua sendo um dos principais obstáculos para a adoção da tecnologia. Provavelmente, esta limitação esteja em partes, à aceitação dos agricultores, além de restrições ligadas a fatores meteorológicos. Pesquisas apontam que sensores podem ser sensíveis a fatores externos, como radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e vento, o que pode provocar alterações e resultar em inconsistências nos dados, especialmente quando instalados nas camadas mais superficiais do solo (MA et al., 2020). Zhang et al. (2018), ressaltam que, na faixa de 4 a 20 cm de profundidade, a avaliação da umidade do solo pode ser consideravelmente influenciada pela exposição à radiação solar.

A coleta de dados reais e precisos pode colaborar no processo de tomada de decisão, assim sendo, atualmente, equipamentos de Internet das Coisas (IOT) são muito empregados no processo de coleta de dados, além de possuírem um grande potencial para serem utilizados em vários domínios e ambientes. Vale destacar que, há algum tempo, um limitante para a adoção de objetos inteligentes era o custo, porém, atualmente é possível encontrar soluções como Raspberry Pi, Arduino, entre outros que são opções com bom custo-benefício (AL-FUQAH et al., 2015). O ESP32 é uma excelente opção para unidade de processamento contando desempenho e preço, pois seu desempenho é excelente devido ao seu núcleo duplo e uma significativa extensão de recursos (MAIER; SHARP; VAGAPOV, 2017).

De acordo com os autores, os dispositivos de sensoriamento remoto estão se tornando muito mais acessíveis e podem gerar dados em grande quantidade em tempo real ou quase real. Eles auxiliam na coleta e/ou processamento de dados de forma que consiga se utilizar destes dados em tempo real, desta maneira, possibilitando a tomada de decisão instantaneamente. A união destes sensores a técnicas de tomada de decisão consegue auxiliar em várias áreas, sendo uma delas a área da agricultura (DRURY et al., 2017). Estudos têm empregado sensores de umidade de solo e microcontroladores para gestão de água na agricultura.

Trabalhos como: *High-technology agriculture system to enhance food security: A concept of smart irrigation system using Internet of Things and cloud computing*, Morchid et al., 2024; *IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32*, Pereira et al., 2023; *Design of a smart hydroponics monitoring system using an ESP32 microcontroller and the Internet of Things*; SNEINEH et al., 2023; *SMART DRIP IRRIGATION SYSTEM FOR CORPORATE FARMING-USING INTERNET OF THINGS*, Swetha et al., 2019; *Smart Irrigation: A Smart Drip Irrigation System Using Cloud, Android And Data Mining*; Ghosh et al., 2016.

Os estudos comprovaram o uso da irrigação inteligente com IoT pode melhorar a conservação de água e a produtividade agrícola. No entanto, alguns desafios podem ser enfrentados, como altos custos iniciais, manutenção complexa e necessidade de infraestrutura de rede durável. Sob o mote da gestão eficiente de recursos hídricos face às mudanças climáticas (ZHANG et al., 2023; STOCKER et al., 2014), a perspectiva de um sistema inteligente de irrigação, com sensoriamento de variáveis de campo e clima e com tomadas de decisão assistidas por um sistema computacional demanda, nesta perspectiva, uma eficiente caracterização experimental dos dispositivos utilizados.

Assim, a caracterização de sensores da natureza baixo custo apresenta-se como uma etapa de suma valia mediante a ampla variedade de modelos disponíveis no mercado, cujas especificações técnicas nem sempre são acompanhadas por validações confiáveis em condições reais de uso. Considerando o crescente interesse por soluções acessíveis para o monitoramento agroambiental, especialmente em regiões semiáridas, julgou-se necessário conduzir um estudo comparativo de desempenho, com o objetivo de selecionar, entre as alternativas existentes, aquela que melhor atenda aos requisitos de precisão, estabilidade e adaptabilidade ao campo. Neste contexto, o foco central da pesquisa recai sobre a caracterização experimental específica dos sensores, compreendida como uma etapa preliminar para uma futura integração com sistemas baseados em Internet das Coisas (IoT), que demandam dados confiáveis e sob operação em tempo real, para subsidiar processos de automação e de sistemas agrícolas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Geral

A proposta de investigação tem como objetivo principal realizar a caracterização e integração de dois sistemas de balanço hídrico no solo, monitoramento microclimático de baixo custo, empregados no manejo de irrigação, sob perspectiva de instrumentação eletrônica, com ênfase à agricultura sustentável.

### 2.2 Específicos

- Realizar a caracterização da curva de resposta de sonda de umidade do solo, modelo HD 38, estabelecendo padrões de calibração específica, para garantir medições precisas.
- Monitorar a variação da umidade em um solo franco argiloso por intermédio de sonda de baixo custo, integrado ao sistema de balanço hídrico, sob lisimetria de drenagem, instalado em diferentes profundidades do solo.
- Compreender o comportamento do sensor de umidade utilizado por meio da análise de dados coletados por um sistema de aquisição homemade e correlação entre as variáveis.
- Comparar métodos de coleta de variáveis meteorológicas, temperatura e umidade relativa do ar, tendo como elemento chave, um módulo sensor DHT.
- Desenvolver um protótipo de circuito utilizando sensores de alta viabilidade econômica para monitorar elementos meteorológicos, considerando o microclima local.

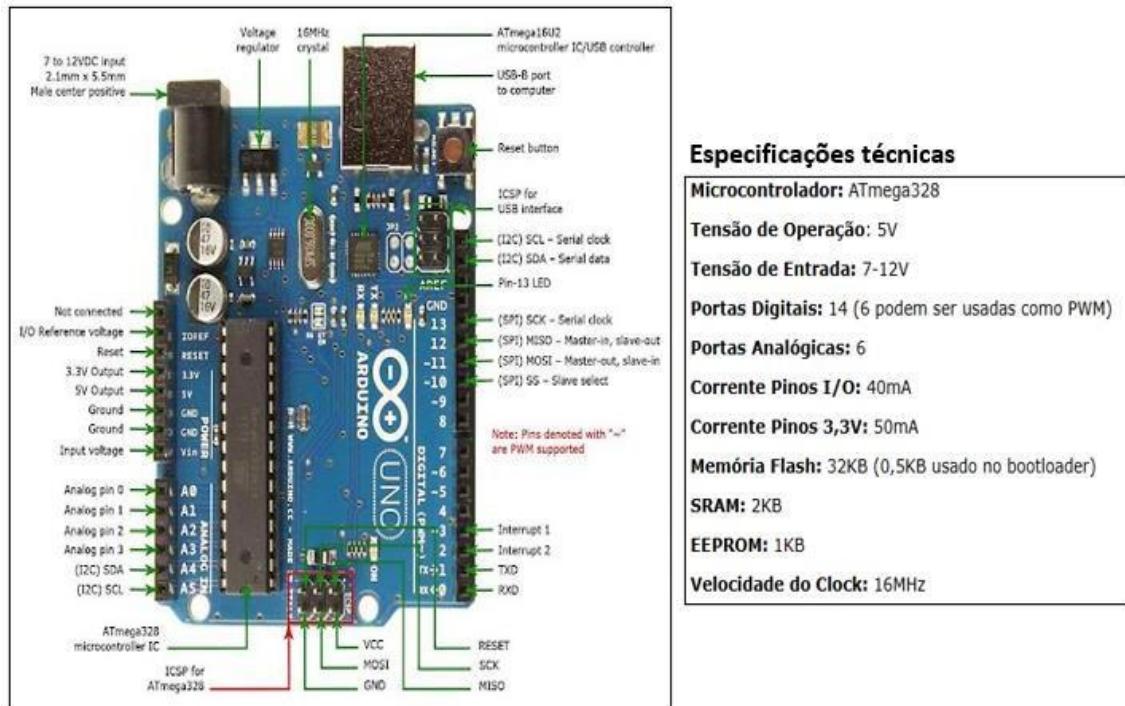
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

A pauta sobre gestão de recursos naturais finitos, em particular, água e solo para agricultura vem sendo unanimidade em diversas instâncias, sejam elas local, regional e mundial. Sob ponto de vista científico e tecnológico, inserir política de gestão hídrica no equacionamento preciso de sistemas agriculturas é de suma importância para manter a atividade de subsistência humana e de desenvolvimento socioeconômico. Desde a transição do nomadismo para o sedentarismo impulsionada pelo domínio de técnicas agrícolas e manejo de recursos água, a sua escassez motivou o desenvolvimento de tecnologias para captação, armazenamento e distribuição para locais sob demanda.

Com o aumento vertical da população mundial e o avanço na urbanização, conjugado ao fenômeno das mudanças climáticas, tudo se volta para eficiência no uso de recursos hídricos, em especial em regiões áridas e semiáridos do planeta. O avanço prático na agricultura foi acompanhado por progresso científico, onde levou o surgimento de diversos métodos voltados à quantificação de uso da água e estimativa da necessidade hídrica das culturas. Modelos matemáticos de balanço hídrico, com lisimetria, tensiometria e evaporímetros, possibilitaram a irrigação racional ou de precisão. O advento da indústria 4.0 ou agricultura numérica que, na sua essência, visa integrar tecnologias, isto é, juntar o monolítico ao microsserviços, fomentou ações mais assertivas, automação e controle de água, manejo de pragas e doenças por intermédio de plataformas locais ou via Internet das Coisas (IoT).

Hoje, com a tecnologia disponível, aliada ao barateamento de dispositivos eletrônicos, microcontroladores (Figura 1) e sensores, a agricultura pode se beneficiar-se da situação e assumir papel estratégico na busca pela soberania alimentar e sustentabilidade ambiental. Estudos têm demonstrado resultados promissores com a integração entre microcontrolador, sensores de umidade de solo e monitoramento microclimático, com geração de economia no uso de água e aumento da produtividade das culturas (MORCHID et al., 2024; PEREIRA et al., 2023).

Figura 1- Arquitetura do microcontrolador Arduino Uno e especificações técnicas.



Fonte: Silveira (2025).

A inserção de tecnologias digitais no campo, em particular sistemas embarcados de baixo custo, surge como uma alternativa concreta de otimizar recursos hídricos, aumentar a eficiência no manejo e democratizar o acesso à inovação (SANTOS et al., 2017). Godwin et al. (2025) testaram soluções para cultivo de milho em regiões tropicais da Índia e Uganda, respectivamente, e observaram incremento na produtividade de 10% a 20% devido à irrigação baseada em sensores e monitoramento em tempo real.

Por sua vez, Swetha et al. (2019), propuseram um sistema acessível com Arduino Uno e sensores DHT11, mostrando que, mesmo com limitações técnicas, o sistema foi eficaz de controlar a automação da irrigação por gotejamento. Fontes recentes têm abordado com frequência a implementação de tecnologia de microcontroladores embarcados como núcleo de sistemas inteligentes de irrigação, devido à sua capacidade de processar dados em tempo real, integrar sensores ambientais e acionar sistemas de irrigação de forma independente.

Além de serem tecnologias de baixo custo, os microcontroladores apresentam flexibilidade e é possível integrá-los a dispositivos padrões de monitoramento e de balanço hídrico na agricultura. Existem vários métodos utilizados para melhorar o manejo da água na agricultura, com foco no balanço hídrico do solo. A irrigação constitui um dos principais pilares para o aumento da produtividade agrícola, especialmente em regiões onde a distribuição

pluviométrica é irregular. Conforme destacado por Barkunan et al. (2019), o uso racional da água por meio da irrigação eficiente visa transformar áreas anteriormente improdutivas em zonas agrícolas produtivas e garantia da estabilidade no campo. Atualmente, estima-se que mais da metade da população mundial dependa direta ou indiretamente da produção agrícola oriunda de áreas irrigadas, o que justifica esforço crescente na adoção de tecnologias que possibilitem o monitoramento preciso do estado hídrico do solo e a automação dos sistemas de irrigação.

Dentre os instrumentos de monitoramento mais empregados na pesquisa agronômica e hidrológica, destaca-se o lisímetro. Um lisímetro é um dispositivo de múltiplos formatos comumente utilizados em pesquisas científicas para balanço hídrico integrado solo, plantas e atmosfera (WILCZEK et al., 2023; TISON et al., 2016). O funcionamento do equipamento baseia-se essencialmente na variável climática (precipitação) ou na aplicação de água assistida por ação humana (irrigação). Ambos os processos são classificados como entradas de água no sistema, e as saídas são o escoamento superficial ou a drenagem e o conteúdo de água evapotranspirado no solo (WILCZEK et al., 2023; TISON et al., 2016). A estimativa da evapotranspiração da cultura por intermédio de lisímetro de drenagem depende de fatores como o tipo de solo, a cultura de interesse e a área de instalação (GUADAGNIN et al., 2018; GASHAW et al., 2018; GEROY et al., 2011). Apresenta-se como alternativa para o balanço hídrico do solo, entretanto pode apresentar altos custos de instalação, além de ser trabalhoso e de difícil manutenção.

Carter et al. (2019) afirmam que a representatividade dos dados obtidos por lisímetros está diretamente associada à correta instalação, levando em consideração características como tipo de solo, profundidade e prevenção da drenagem lateral. Apesar de sua importância, os lisímetros convencionais apresentam limitações operacionais, como a dependência de coletas manuais e o alto custo de manutenção, o que pode comprometer a frequência e a confiabilidade das medições. Com o avanço da automação agrícola e da agricultura de precisão, diversas soluções tecnológicas vêm sendo integradas aos sistemas de monitoramento hídrico, objetivando diminuir as incertezas nas medições. A utilização de microcontroladores tem se destacado na perspectiva agrícola, por possibilitar o processamento e a transmissão de dados em tempo real, viabilizando o controle automatizado da irrigação.

No tocante ao monitoramento direto da umidade do solo, diversas tecnologias vêm sendo aplicadas. Os dispositivos baseados em reflectometria no domínio do tempo (TDR),

reflectometria no domínio da frequência (FDR) e os tensiômetros são referenciados em estudos científicos. No entanto, apresentam custo elevado e, em alguns casos, demandam manutenção periódica (CARTER et al., 2019). Adicionalmente, sondas de nêutrons, por utilizarem materiais radioativos, vêm sendo gradualmente substituídos devido a questões ambientais e regulatórias.

Como alternativa prática e de menor custo, módulos sensores têm sido incorporados em sistemas automatizados. Sensores são dispositivos projetados para detectar variações em grandezas físicas ou químicas do ambiente, temperatura, pressão, luminosidade, pH, umidade ou concentração de gases e convertê-las em sinais elétricos podendo ser medidos, armazenados, analisados ou utilizados em sistemas de monitoramento e controle automatizado (LI et al., 2024; POTYRAILO et al., 2015). No contexto agrícola, destacam-se pela capacidade no monitoramento de variáveis edafoclimáticas, temperatura, umidade do solo, pressão, condutividade elétrica e radiação solar (AKYILDIZ et al., 2002).

Sensores de umidade do solo, especificamente, são empregados para estimar o teor de água no solo e avaliar em tempo real, o status hídrico do solo e sua disponibilidade às plantas. Operam na relação entre o conteúdo de água e uma propriedade física do solo, podendo ser constante dielétrica, a resistência elétrica ou a tensão matricial, e estão entre os instrumentos mais usados no manejo racional da irrigação (ZHANG et al., 2020). Dentre os principais tipos de sensores de umidade, destacam-se os sensores capacitivos e resistivos.

Um sensor capacitivo (Figura 2A) mede a constante dielétrica do solo, em conformidade com conteúdo de água disponível. Opera por intermédio da construção de um capacitor cuja capacidade depende da umidade do meio em que está inserido. Como a constante dielétrica da água é significativamente maior do que a do solo seco, variações na umidade provocam mudanças mensuráveis na capacidade. Zhang et al. (2020) apontam que sensores capacitivos oferecem boa relação custo-benefício, baixa manutenção e compatibilidade com microcontroladores, sendo especialmente úteis em sistemas de automação agrícola de baixo custo.

Por outro lado, um sensor resistivo (Figura 2B) opera medindo a resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos no solo. A resistência diminui à medida que a umidade aumenta, por água ser um condutor de eletricidade. Apesar de simples e barato, um sensor resistivo é sensível à salinidade do solo, o que pode comprometer a precisão das medições em determinadas condições.

Figura 2 - Sensores de umidade do solo, com módulo comparador e cabos do circuito: princípio capacitivo (A) e resistivo (B).



Fonte: UsinaInfo

No cenário atual de disponibilidade de recursos tecnológicos para o ambiente agrícola, o manejo da água e do solo pode se beneficiar da adoção de dispositivos eletrônicos. A popularização para o monitoramento da umidade do solo, associada a sistemas embarcados, como o Arduino ESP32, tem ganhado destaque no setor agrícola, especialmente em condições em que a eficiência do uso da água é inevitável para alcançar a sustentabilidade. A literatura apresenta uma variedade de experimentos de calibração de sensores resistivos e capacitivos, destacando a diversidade de aplicações e a importância de considerar aspectos tais como textura do solo, faixa de umidade e metodologia de referência adotada. Ao reunir dados de diferentes autores, é possível comparar o desempenho de sensores HL-69 (resistivo) e o HD-38 (capacitivo), bem como de modelos similares, sob distintas condições experimentais.

A comparação visa avaliar a consistência dos resultados obtidos no presente estudo com os já publicados, além de identificar limitações e padrões recorrentes, como a tendência à saturação dos sensores resistivos em faixas elevadas de umidade ou a necessidade de calibração específica para diferentes tipos de solo. A Tabela 1 apresenta um comparativo técnico e científico de estudos recentes com plataformas de dispositivos embarcados e redes IoT para otimizar o uso da água em diferentes contextos agrícolas (GOMES et al., 2017; ZHOU et al., 2019).

Tabela 1 - Comparativo técnico e científico de pesquisas em irrigação inteligente com microcontroladores e monitoramento ambiental.

Estudo	Tipo de sensor	Destaque principais
Chowdhury et al. (2022)	Resistivo vs capacitivo, calibração gravimétrica	Capacitivos lineares e estáveis; resistivos satiram perto da capacidade de campo
Alshahri (2020)	Cinco sensores, calibração padrão em laboratório	SMT100 destacou-se com alta precisão ( $R^2 = 0,98$ ; RMSE = 1,39)
Al-Rawi (2024)	Capacitivos e resistivos em solos variados	Calibração gravimétrica; precisão variável entre sensores
Abdelmoneim et al. (2025)	Capacitivo SKU:SEN0193 em solo franco-silt	$R^2$ entre 0,85–0,87; RMSE entre 4,5–4,9%; viabilidade sensor por faixa de umidade

A síntese apresentada dos principais estudos de calibração e aplicação real em campo encontrados na literatura científica, busca não somente a validação da metodologia empregada, também reforçar a viabilidade do uso de instrumentação mais acessível e de substitutos eficazes a outros métodos e a crescente confiabilidade no campo, em particular em regiões com flutuação das condições ambientais. Portanto, o uso de sensores de baixo custo na agricultura já é realidade e, hoje, o que se busca é a própria precisão de dados face às adversidades climáticas, tipo de solo e condição em que os sensores são instalados.

Silva et al. (2016) destacam a variabilidade na eficiência da irrigação quando os sensores são instalados em diferentes posições. Os autores afirmam que o conhecimento da variabilidade na extração de água pode melhorar a confiabilidade do balanço hídrico do solo; portanto, é extremamente valioso definir a profundidade em que os sensores devem ser colocados. Embora a calibração usando uma pequena amostra de solo em condições controladas seja a abordagem mais comum ao trabalhar com mesmo tipo de instrumentação, é importante realizar o monitoramento em campo.

O monitoramento deve considerar a influência de fatores ambientais chave, especialmente ao tomar decisões sobre o acionamento do sistema de irrigação com o auxílio de dispositivos inteligentes. Zhang et al. (2018), afirmam que, em profundidades entre 4 e 20 cm, a sonda de umidade é afetada pela radiação solar, que induz altas temperaturas nas primeiras

camadas do solo. Wilczek et al. (2023) corroboram os achados, observando maiores inconsistências nas leituras, particularmente na camada de 5 cm do solo durante o dia. Seu estudo examinou a variação da umidade ao longo de um perfil de 34 cm. Outros estudos também descrevem ocorrências semelhantes, destacando a influência da temperatura na permissividade dielétrica (WILCZEK et al., 2023; SKIERUCHA, 2009; OR e WRAITH, 1999). Do ponto de vista do manejo da irrigação, entender o comportamento de referidos fatores no uso de sensores, especialmente no contexto de deficiência hídrica, requer uma investigação oportuna.

Além da temperatura, a salinidade do solo é outro fator determinante que pode interferir nas leituras de sensores capacitivos e resistivos. Em ambientes irrigados com águas de qualidade variável, como ocorre em diversas áreas do semiárido brasileiro, o acúmulo de sais na zona radicular altera a condutividade elétrica da solução do solo, como consequência, alteração no potencial hídrico. O efeito pode levar à superestimação da umidade disponível ou à leitura errática dos sensores, exigindo estratégias de correção ou filtros algorítmicos nos sistemas de aquisição de dados. Estudos recentes têm apontado que calibrações que incluem faixas de condutividade elétrica, associadas ao tipo de textura do solo, aumentam significativamente a precisão dos dados obtidos.

A compactação do solo, frequentemente resultante do tráfego de máquinas agrícolas, também afeta o desempenho dos sensores. Solos mais compactados apresentam menor porosidade e maior resistência mecânica, o que influencia tanto a retenção de água quanto a difusão térmica, alterando a resposta dielétrica medida por sensores capacitivos. No caso de sensores resistivos, a compactação pode modificar a distribuição de filmes de água ao redor dos eletrodos, interferindo no valor de resistência registrado. Assim, o conhecimento prévio do histórico de manejo do solo e o mapeamento da compactação são práticas que podem otimizar o posicionamento e a calibração dos sensores.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia para a caracterização e análise de sensores foi estruturada em três experimentos complementares, enquadrando-se no escopo da pesquisa aplicada. Pela natureza, uma pesquisa aplicada visa gerar conhecimento direcionado à solução de problemas concretos, com aplicação prática imediata (GIL, 2010). O planejamento da metodologia foi representado por um fluxograma (Figura 3), elaborado para sintetizar as etapas e a sequência lógica dos procedimentos.

Figura 3 - Fluxograma metodológico de integração e teste de sensores de baixo custo em sistemas de monitoramento inteligente.



Fonte: Autor (2025).

O fluxograma elaborado sintetiza, de forma sistemática, o encadeamento das etapas e o processo de seleção dos sensores mais adequados para cada finalidade, considerando critérios de desempenho, confiabilidade e aplicação prática em diferentes condições de uso. A estratégia obter uma visão integrada do processo, abrangendo desde a calibração inicial dos sensores em ambiente controlado até sua aplicação efetiva em campo, garantindo maior assertividade nas escolhas e reprodutibilidade nos resultados. Assim, futuros estudos e implementações poderão seguir o mesmo roteiro metodológico, reduzindo incertezas. Como exemplo, no Experimento I, a análise da curva característica de retenção de água no solo, aliada à calibração prévia realizada em laboratório, possibilitou identificar limitações de determinados sensores, levando à exclusão do modelo HL 69 (X) e à validação do modelo HD 38, que, por seu melhor desempenho, foi utilizado no Experimento III.

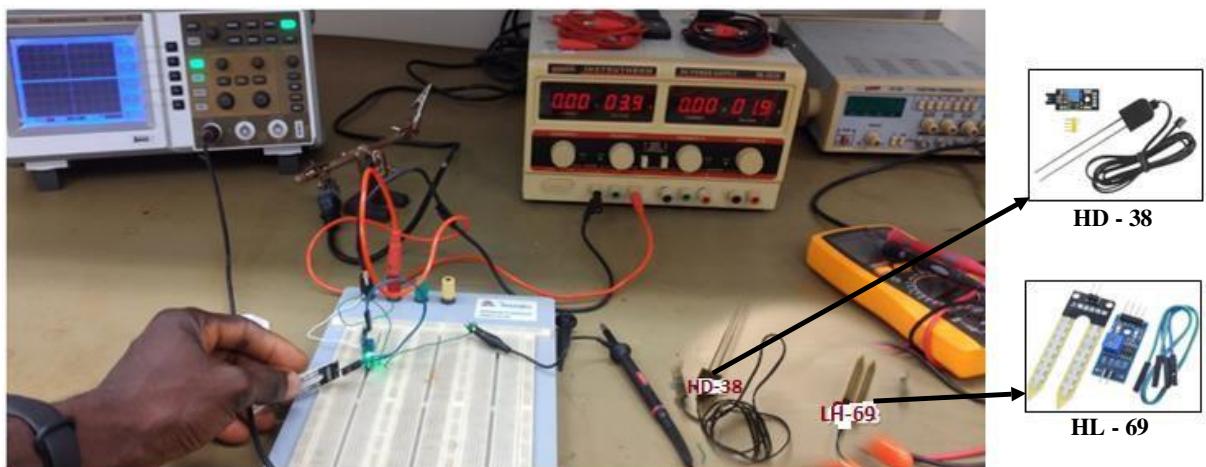
#### **4.1 Experimento I: Levantamento da curva característica e calibração de duas sondas de umidade, em solo franco argiloso sob aquisição de dados via local**

Inicialmente, foram selecionados dois tipos de sensores, modelos HL-69 e HD-38, resistivo e capacitivo, respectivamente. Os módulos sensores foram submetidos a um experimento de bancada (Figura 4), para comparar a sensibilidade de ambos à umidade. A comparação da sensibilidade dos sensores apoia-se pela necessidade de identificar alternativas de baixo custo e boa precisão para o monitoramento hídrico em sistemas agrícolas.

A natureza do caráter comparativo embasa-se em estudos anteriores e, especialmente quando envolve padrões de calibração específica (ZAWILSKI *et al.*, 2023), para permitir a aplicação com maior confiabilidade e opção viável frente a tecnologias mais caras, como sensores TDR, especialmente em projetos de irrigação voltados à agricultura familiar e de pequeno porte. Visando realizar a comparação, os sensores foram conectados separadamente ao circuito, permitindo a análise individual de seu comportamento.

Um osciloscópio foi utilizado como instrumento principal de medição, possibilitando a visualização em tempo real do sinal de saída de cada módulo sensor diante de variações na umidade. Durante os testes, os módulos foram expostos a diferentes níveis de umidade, simulados manualmente, a fim de observar a resposta elétrica gerada por cada um.

Figura 4 - Análise de sensibilidade à umidade de solo em dois sensores capacitivos, modelos S12 e FC-28. Laboratório da engenharia teleinformática, (UFC).



Fonte: Autor (2025).

As respostas obtidas por meio da avaliação permitiram realizar análise preliminar e, consequentemente, execução da etapa seguinte, isto é, a calibração específica. Para o efeito da estimativa tanto do solo úmido, próximo à capacidade de campo (UCC), quanto ao ponto de

murcha permanente (UPMP) e levantamento da curva de retenção da água no solo, iniciou-se com a coleta de amostra de solo em pontos aleatórios da área experimental da estação meteorológica, constituindo uma amostra composta (Figura 5)

Figura 5 - Figura 5 - Coleta por amostra composta de solo para levantamento de curva característica de água no solo e calibração da sonda de umidade capacitiva e resistiva.



Fonte: Autor (2025).

A mesma foi condicionada em um recipiente com massa conhecida (Figura 6), correspondendo à 1 dm<sup>3</sup>. Segundo os critérios da Legenda Brasileira de Classificação, o solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo, com textura franco-argilosa. Com o experimento, buscou-se realizar a obtenção da curva característica e calibração específica, que consiste na não utilização de instrumentação padrão, como o sistema de câmara de pressão de Richards ou secagem sob ventilação forçada (BETIOLI JÚNIOR *et al.*, 2012). A calibração específica de sensores de umidade do solo é uma estratégia que visa garantir medições precisas, especialmente em contextos com limitações técnicas ou financeiras (BOGENA *et al.*, 2017).

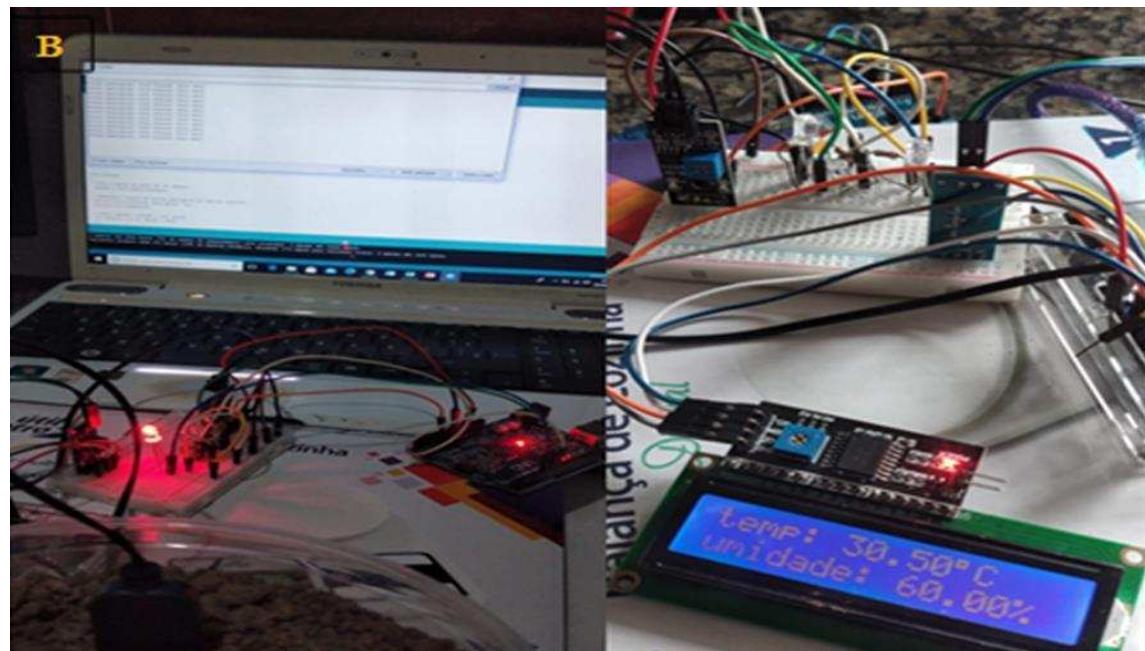
A amostra foi acondicionada em recipiente hermeticamente fechado para evitar a perda de umidade e, em seguida, conduzida à residência para análise. Para estimar a massa de água presente no solo, foi aferida a massa da amostra em uma balança digital com capacidade de 10 kg (Figura 6). Após a estimativa da massa inicial úmida, o material foi submetido à secagem ao ar livre. A metodologia é utilizada devido à sua simplicidade e aplicável a realidades com baixos recursos (BOGENA *et al.*, 2017; DEGRÉ *et al.*, 2017). Para obtenção da curva característica do solo, um algoritmo em Arduino IDE foi elaborado, coletando a variação da tensão de leitura nas sondas, em função da perda de umidade do solo, em simultâneo, fez-se

registro da temperatura e umidade relativa do ambiente, por intermédio do módulo sensor DHT11 disponível no Apêndice A.

Figura 6 - Retirada da massa inicial (A) e levantamento de curva característica de água no solo sob monitoramento ambiental (B).



Os dados obtidos de PMP foram impressos em um monitor serial da própria IDE e integrados ao módulo I2C para visualização em tempo real (Figura 6B).



Fonte: Autor (2025).

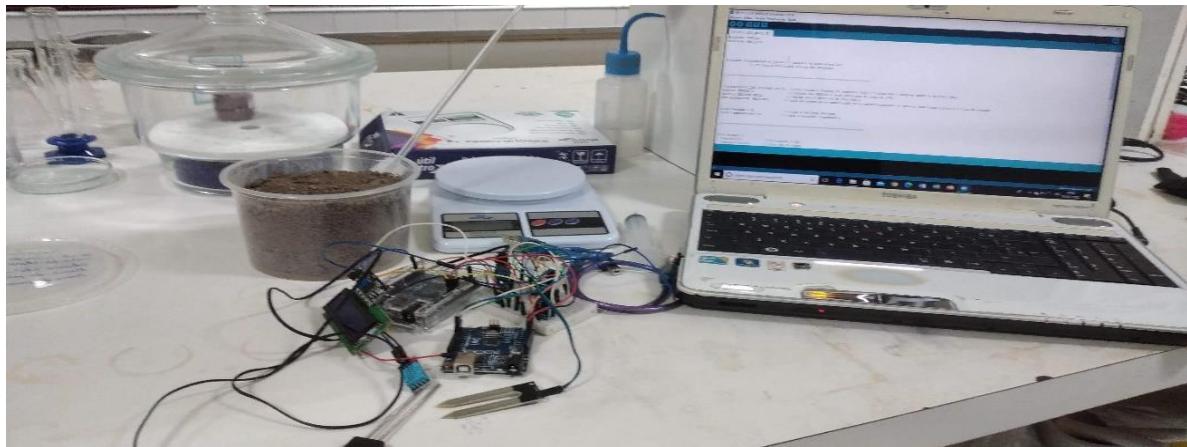
Para o efeito comparativo das sondas, os dados foram transferidos em uma planilha eletrônica, Microsoft Office Excel, visando realizar o processamento e análise do constituinte higrométrico e da curva, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do levantamento de curva característica de água no solo sob monitoramento ambiental.

Ms (g)	HL-69	HD-38	T °C	UR%
1518	300	150	30	71
1474	300	156	28,6	71
1400	300	160	31	62
1389	310	200	31,8	59
1384	400	250	31,5	65
1383	490	423	30,9	67
1382	600	500	31,7	56
1380	650	560	32,1	56
1380	800	700	31,1	62
1380	1000	850	29,5	69
1380	1023	1023	32,5	55
1380	1023	1023	30,7	61

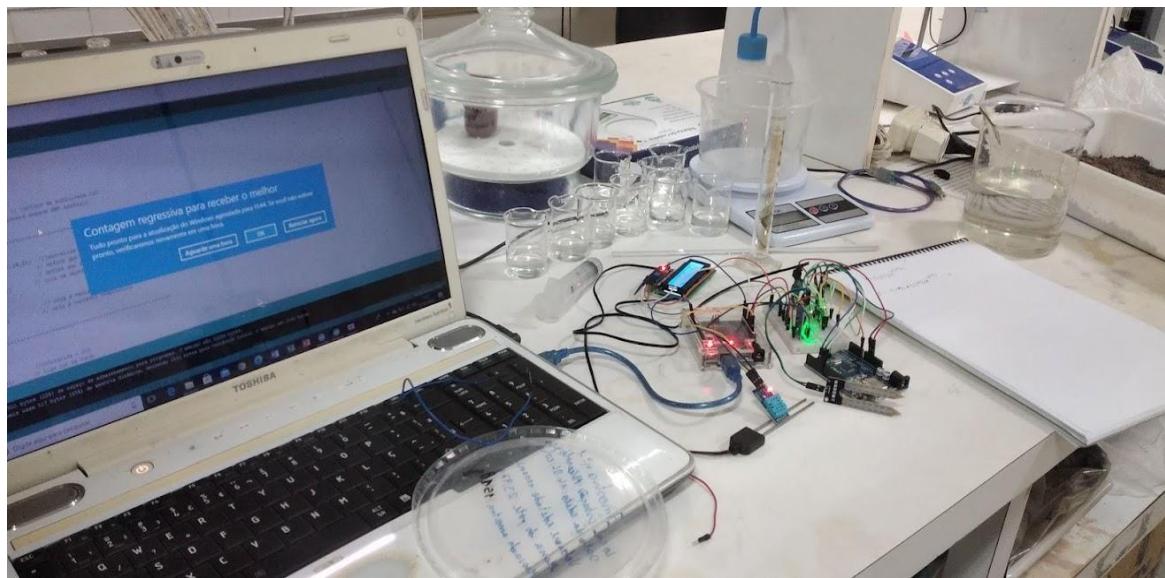
Após esta etapa e, com a massa do solo completamente seco (Ms), conforme descrito no tópico anterior e em conformidade com as recomendações da metodologia gravimétrica padrão (EMBRAPA, 2017), a Ms foi conduzida ao laboratório de relação solo-água-planta (LarSap), DENA (Figura 7).

Figura 7 - Figura 7 - Procedimento para calibração de sondas de umidade de solo, HL-69 DH-38 (A).



Para controle do percentual de água, a Ms estabilizada em 1 dm<sup>3</sup>, utilizada para o teste. Em seguida, cada sensor foi inserido individualmente na amostra seca (Figura 7B). Após a inserção dos sensores, aguardou-se um período de 10 minutos para estabilização térmica e elétrica dos dispositivos, possibilitando que a leitura refletisse de fato a umidade estática da amostra.

Preparação para aplicação de água no solo seco e registro de dados por intermédio do algoritmo no Arduino IDE.



Fonte: Autor (2025).

A primeira leitura obtida após o intervalo foi considerada como o ponto de 0% de umidade, pois não havia mais água disponível no solo (PMP). Em seguida, foi adicionada água destilada em incrementos de 1 g, equivalente a 1% de umidade gravimétrica para cada ciclo,

utilizando-se uma pipeta de precisão, seringa, proveta e balança para controle da dosagem. A cada adição, aguardou-se novamente o tempo de estabilização e foi registrada a leitura dos sensores para os valores correspondentes de umidade. O procedimento foi repetido sucessivamente, em incrementos lineares de 1%, até que as leituras dos sensores começaram a se estabilizar e não apresentaram mais variações significativas com a adição de água. O limiar é interpretado como a saturação sensorial, ou seja, a faixa de sensibilidade efetiva dos sensores para o tipo de solo em questão foi ultrapassada (GOMES et al., 2017). Da mesma forma que a etapa anterior, os dados foram registrados em monitor serial e depois, transferidos para o Excel à análise (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores das leituras de sondas capacitivas e resistivas na calibração específica sob condições de ambiente controlado.

HL-69	HD-38	Massa da água g <sup>-1</sup> (Ma)	Massa total = Mt = Ms + Ma	Umidade (%)
1023	1023	0	1000	0
890	930	25	1025	2,4
950	810	50	1050	4,8
649	750	75	1075	7,0
700	640	100	1100	9,1
600	510	125	1125	11,1
500	420	150	1150	13,0
270	270	175	1175	14,9
215	200	200	1200	16,7
199	150	225	1225	18,4

Os valores de umidade gravimétrica foram convertidos para umidade volumétrica, por meio da equação apresentada a seguir (EMBRAPA, 1997) :

$$U = \frac{Ma}{Ms} = \frac{Mt - Ms}{Ms}$$

Onde:

U = umidade do solo

(%) Ma = Massa de

água (g) Ms = Massa

seca (g)

Mt = Massa total (g)

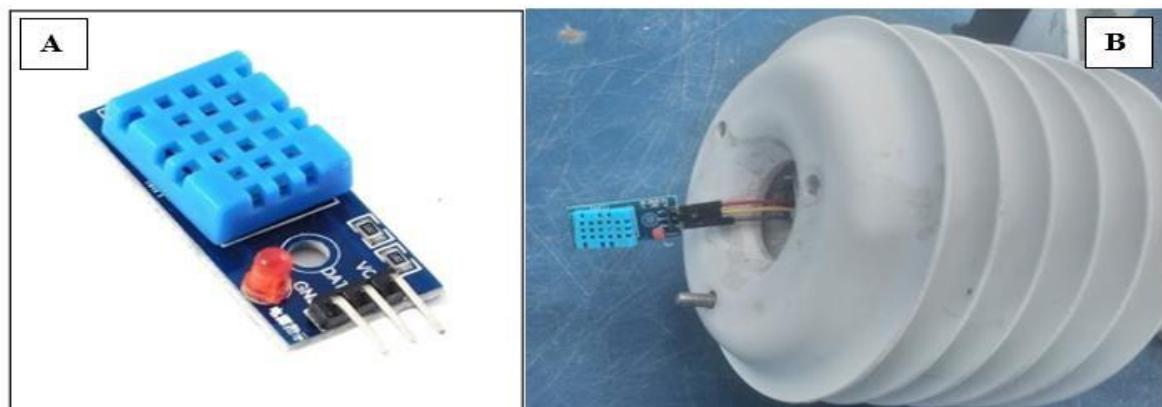
Ao reunir dados de diferentes autores, é possível comparar o desempenho de sensores HD-38 e HL-69, bem como de modelos similares, sob distintas condições

experimentais. A comparação visa avaliar a consistência dos resultados obtidos no presente estudo com os da literatura, além de identificar limitações e padrões recorrentes, a tendência à saturação dos sensores resistivos em faixas elevadas de umidade ou a necessidade de calibração específica para diferentes tipos de solo. A partir dos dados obtidos, foi construído um diagrama de dispersão entre os valores de umidade do solo e os valores de saída dos sensores. Em seguida, aplicou-se a análise de regressão linear para ajustar a equação que melhor descreve a relação. A equação pode ser utilizada para estimar a umidade do solo com base nos valores medidos pelos sensores. Os resultados são trazidos no capítulo sucessivo.

#### **4.2 Experimento II: Análise comparativa dos métodos de coleta de dados meteorológicos para monitoramento microclimático**

A metodologia empregada neste trabalho teve por objetivo principal comparar métodos de coleta e performance de um sensor de baixo custo DHT11 (Figura 7) com estações meteorológicas convencionais, tanto manuais (EMC) quanto automáticas (EMA), para aferição de temperatura e umidade relativa do ar. Como ponto de partida, realizou-se a coleta de dados na Estação Agrometeorológica da Universidade Federal do Ceará (EMC-UFC), situada no Campus do Pici em Fortaleza, CE. A coleta ocorreu entre os meses de outubro e dezembro de 2023, período considerado primavera no hemisfério sul, caracterizado como período seco na região.

Figura 8 - Módulo Sensor de Temperatura e Umidade DHT11 (A) e abrigo meteorológico padrão tipo Stevenson (B).



Fonte: Alldatasheet.com. Disponível em: <https://shorturl.at/Ryfa9> e adaptado pelo autor (2025).

Os dados meteorológicos da EMC foram coletados manualmente às 9h00, 15h00 e 21h00, por observador meteorológico, seguindo estritamente os protocolos recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2008) e validados por Chaves et al. (2022). Em paralelo, foram solicitados dados da Estação Meteorológica Automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (EMA), código A305, localizada na Latitude  $-3^{\circ}48'$ , Longitude  $-38^{\circ}30'$ , Altitude 30 m, em operação contínua desde 2003. O acesso aos dados foi realizado via plataforma online do EMA, com séries temporais contendo leituras de temperatura do ar e umidade relativa a cada cinco minutos. Os dados foram posteriormente agregados em intervalos horários, de forma a permitir uma base comparável com as demais fontes.

Simultaneamente, utilizou-se o sensor DHT11, dispositivo digital frequentemente

utilizado em aplicações de baixo custo para medição de temperatura e umidade relativa do ar. Apesar de possuir precisão moderada ( $\pm 2$  °C para temperatura e  $\pm 5\%$  para umidade), sua facilidade de integração com microcontroladores, tornou-o uma opção viável para monitoramentos microclimáticos. O sensor foi protegido contra incidência direta de radiação solar e precipitação, permanecendo abrigado em estrutura de ventilação natural similar ao abrigo meteorológico padrão tipo Stevenson, conforme descrito por Franco et al. (2022). As leituras foram armazenadas em formato de média por minuto e, em seguida, por média horária.

Diferentemente de outros estudos que aplicam modelos de regressão para calibrar sensores (SANTOS et al., 2021; SILVA et al., 2020), optou-se nesta pesquisa por um enfoque baseado em testes de médias, com o objetivo de verificar se há diferença estatisticamente significativa entre as leituras de temperatura e umidade do sensor DHT11 e aquelas fornecidas pelas estações EMC e EMA.

Para isso, os dados coletados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) unidirecional, seguida do teste de Tukey para comparação múltipla de médias, considerando um nível de significância de 5%. A escolha busca identificar quais pares de médias (DHT11 x EMA, DHT11 x EMC e EMA x EMC) apresentam diferenças estatisticamente relevantes. A ANOVA foi realizada separadamente para os dois componentes analisados (temperatura e umidade relativa), além da análise agrupada por dia para verificar tendências ao longo do período experimental. Os resultados correspondentes e os ensaios são trazidos no capítulo sucessivo.

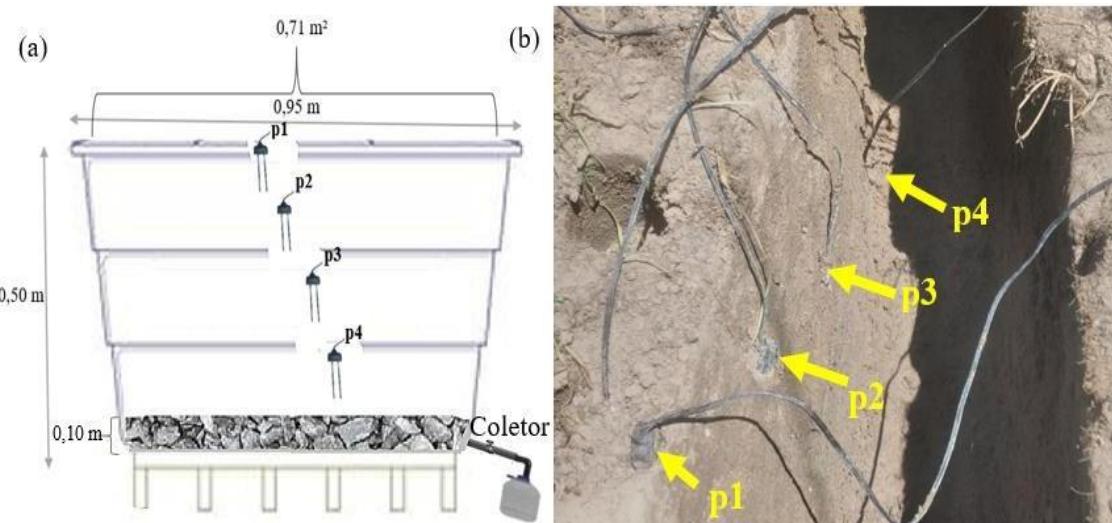
#### **4.3 Experimento III: Caracterização estatística de uma sonda de umidade do solo capacitiva, integrada ao sistema de balanço hídrico na agricultura em região semiárida**

O ensaio foi conduzido de outubro a dezembro de 2023 (primavera e início de verão, hemisfério sul) na área experimental da Estação Agrometeorológica, Campus do PICI, Universidade Federal do Ceará (UFC). A área experimental possui coordenadas geográficas 3° 44' S, 38° 34' W, com 19,5 m de altitude (em relação ao nível médio do mar). Segundo os critérios da Legenda Brasileira de Classificação, o solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo, com textura franco-argilosa. Com o experimento, buscou-se avaliar a sensibilidade da sonda quando a mesma é instalada em solo sob diferentes profundidades.

Para o efeito, houve coleta de solo em uma profundidade de 0 a 30 cm na área experimental, o qual foi passado em uma peneira com malha de 2 mm e seco em uma estufa agrícola. O lisímetro de drenagem foi construído a partir de uma caixa d'água de formato redondo, com capacidade de 250 L e de polietileno com as seguintes especificações 0,5 x 0,95 m, altura e largura, respectivamente, com uma área de 0,71 m<sup>2</sup>. Para drenagem da água percolada ao longo do perfil do solo no lisímetro, foi aberto um orifício de 30 mm de diâmetro na parte inferior, instalando uma tubulação de material PVC (Policloreto de vanila) do mesmo diâmetro para coleta da água de drenagem e um registro para controle do fluxo.

Para a sustentação do equipamento, utilizou-se tijolos e paletes de madeira à altura de 0,20 m. Uma vala foi aberta no solo a uma profundidade de 0,25 m para comportar o coletor, no caso uma garrafa de cinco litros. A partir daí iniciou-se o preenchimento da caixa, colocando a brita na primeira camada de 0,10 m na parte inferior e uma manta “bidim” por cima, objetivando impedir a descida do solo para o sistema de drenagem. Após a fase de construção e instalação do lisímetro na área do experimento, iniciou-se a fase de verificações e medições. Inicialmente irrigou-se a área do lisímetro até a drenagem, e procedeu-se até que todo o ar dos poros do solo fosse retirado, ficando o solo saturado, seguindo-se para instalação das sondas (sensores). Foram instalados quatro sensores em p1 = 0,0; p2 = 12,5; p3 = 25,5; p4 = 37,5 cm de profundidade do solo (Figura 9).

Figura 9 - Esquema de instalação dos sensores (a) e a visualização no campo (b).



Fonte: Autor (2025).

As sondas capacitivas utilizadas no teste são de modelo HD38, resistentes à corrosão, composta de circuito comparador com um conversor analógico-digital de 10 bits estabelecida em MHz (SEETHALAKSHMI et al., 2021), faixa de leitura, 0 a 1023. Os valores próximos de zero (0) indicam condições de solo úmido, ao passo que, os próximos de 1023, solo seco. Intervalos são convertidos com base nas pretensões do operador e na programação que se queira realizar para atender às demandas da cultura específica. O sensor capacitivo HD38 é categorizado no grupo dos métodos indiretos (ABDULRAHEEM et al., 2024; SZEREMENT et al., 2020; MAJCHER et al., 2021). O sistema computacional de aquisição de dados foi composto por um microcontrolador Arduino® UNO e um programa foi elaborado para fazer as leituras do sensor ao longo do tempo e armazená-las com uma tag temporal. Foram monitoradas duas variáveis meteorológicas, temperatura e umidade relativa do ar mediante a instalação de sensor higrotérmico, de baixo custo, modelo DHT11.

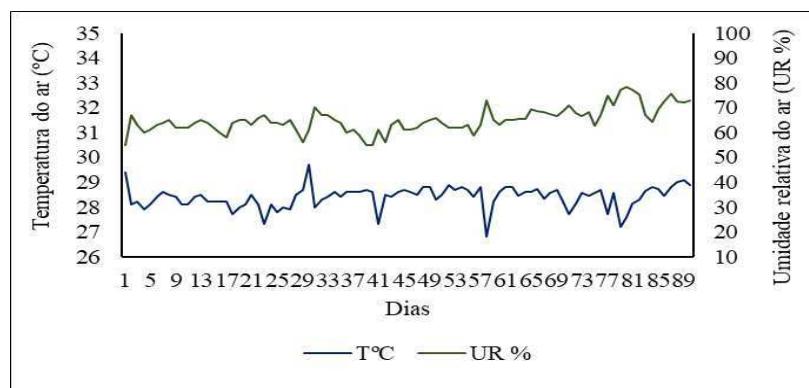
A aplicação da água no solo foi realizada em escala diária, a mesma apresentou uma média  $0,9 \text{ dS m}^{-1}$  de condutividade elétrica (CE), utilizando para a aferição, um condutivímetro, a cada 10 dias. A reposição hídrica no sistema de lisímetro foi baseada na escala diária, procedida de modo a gerar drenagem. O cálculo da água de reposição foi realizado com base em volume (L) e altura convertido em  $\text{mm dia}^{-1}$  considerando a área do lisímetro ( $0,71 \text{ m}^2$ ), entre 8:00 e 9:00h da manhã, por um período de 50 dias seguidos com solo sem cobertura. A partir desta etapa, foi semeado, sob a área do lisímetro, o coentro (*Coriandrum sativum L.*), uma quantidade de 100 gramas de semente. Da data de semeadura à colheita foram

contabilizados 40 dias, totalizando 90 dias do balanço hídrico do solo, pelas entradas e saídas de água no sistema. Registrhou-se um evento de precipitação pluvial no período, sendo contabilizada como entrada de água no sistema, juntamente com a irrigação, enquanto os volumes drenados e evaporados foram contabilizados como saídas de água no sistema. Para fins de aferir o balanço hídrico (BH) no local, empregou-se a equação do balanço hídrico no solo simplificada e proposta por Reichardt (1987), apresentada na Equação 1.

$$BH = (LAp + P) - (LDr - LEv) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: BH = balanço hídrico; P – precipitação (mm); LAp – lâmina de irrigação aplicada (mm); LDr – lâmina drenada e contabilizada no coletor (mm); LEv – lâmina da água evapotranspirada do solo, obtida pela diferença resultante entre as entradas e o valor drenado durante o período. Os dados de entradas e saídas de água no lisímetro foram analisados quanto à média diária e mensal, visando identificar ou compará-los quanto à variação nas entradas e saídas, assim como os valores lidos pela sonda durante os testes. Foi realizada correlação entre as variáveis climáticas e a resposta da sonda nas profundidades avaliadas, bem como a amostragem de solo para estimativa da umidade gravimétrica nas profundidades de instalação. Verificou-se, também, a relação dos constituintes do balanço hídrico e as variáveis ambientais monitoradas, temperatura e umidade relativa do ar, haja vista que a intensidade de tais fatores exerce influência direta sobre os processos de perda de água para atmosfera (evapotranspiração). O DHT11 foi instalado a 2 m de altura, próximo ao lisímetro, sendo os referidos dados apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Monitoramento de variáveis meteorológicas ao longo do experimento.



Fonte: Autor (2025).

Ao final da etapa de estimativa do balanço hídrico, encerraram-se as entradas de água e procedeu-se à coleta de amostras de solo. As amostras indeformadas foram coletadas por

meio de um trado manual tipo Uhland modelo TU com anel volumétrico de aço inox com bordas cortantes, tampadas hermeticamente e levados ao laboratório para estimativa da massa inicial, usando balança de precisão de três casas decimais. Posteriormente, foram submetidas a secagem em estufa até atingir massa constante. A umidade gravimétrica ( $Ug\%$ ), foi obtida por intermédio da equação 2, conforme Embrapa (1997).

$$Ug(\%) = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \times 100$$

Em que:  $Ug$  – umidade gravimétrica (%);  $Mu$  – massa do solo úmido (g);  $Ms$  – massa do solo seco (g). No total, foram coletadas oito amostras de solo em cada profundidade, perfazendo assim 34 amostras somadas, que foram utilizadas nas análises de umidade. Do ponto de vista da análise dos dados, um conjunto de ferramentas estatísticas foi selecionado. Para inferência entre as variáveis, foi proposta uma análise de correlação produto-momento de Pearson, ou simplesmente  $r$  de Pearson (Equação 3), que pressupõe distribuição gaussiana de duas ou mais amostras e comportamento linear da relação entre as variáveis (ZOU et al., 2003; NORMAN et al., 2014).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

onde  $x_1, x_2, \dots, xn$  e  $y_1, y_2, \dots, yn$  são os valores medidos de ambas as variáveis. Na equação anterior, os termos

representam as médias aritméticas de ambas as variáveis.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \text{ e } \bar{y} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i$$

Procedeu-se a normalização pela média e submetidos a análise de variância (ANOVA). A ANOVA visa comparar médias das variáveis em estudo, indicando se há diferenças significativas. A comparação de médias foi aplicada empregando o teste de Tukey, realizado por intermédio do programa ASSISTAT (SILVA & AZEVEDO, 2016). O teste de Tukey visa identificar quais leituras diferem entre si após a ANOVA, controlando a taxa de erro tipo I, tendo como base a diferença mínima significativa (dms). Para realização da análise de correlação de Pearson, os dados foram submetidos a normalização, que contou com o uso do software estatístico R (R CORE TEAM, 2016). A correlação de Pearson foi empregada para averiguar a força e a direção da relação linear entre variáveis, permitindo inferir se há variáveis redundantes e, portanto, passíveis de remoção em etapas posteriores de tratamento de dados.

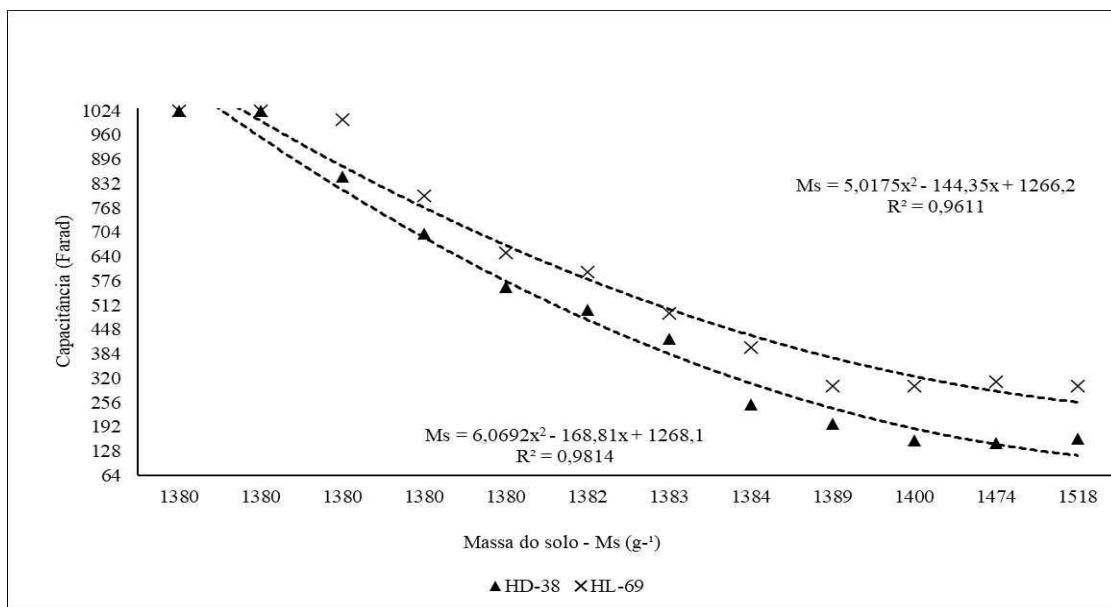
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Experimento I: Levantamento da curva característica e calibração de duas sondas de umidade, em solo franco argiloso sob aquisição de dados via local

Foi obtida a partir dos dados do solo, a curva característica de retenção de água no solo, por intermédio de método alternativo. A escolha se deu tanto por limitações estruturais quanto pela busca por soluções mais econômicas e viáveis em ambientes com menor disponibilidade de recursos. As sondas apresentaram tendências de resposta coerentes com a dinâmica de retenção de água no solo, mostrando a redução da capacidade (Farads) com o aumento da massa seca do solo ( $M_s$ ). A relação inversa entre  $M_s$  e os valores de saída dos sensores reflete o esvaziamento dos poros e a diminuição da água disponível, o que é compatível com o comportamento típico das curvas de retenção.

As equações de regressão ajustadas (de segunda ordem) revelam bom coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9814$  para o HD-38 e  $R^2 = 0,9611$  para o HL-69), indicando forte aderência dos modelos aos dados experimentais. Notadamente, o sensor resistivo HD-38 apresentou uma resposta mais sensível às variações de umidade nas faixas iniciais (mais úmidas), mantendo valores elevados de capacidade por um intervalo mais amplo de massas. Por outro lado, o sensor capacitivo HL-69 exibiu uma queda mais acentuada, especialmente em condições de menor teor de água, incando sua sensibilidade ao esvaziamento progressivo dos macroporos.

Figura 11 - Curvas características de retenção de água no solo obtidas por sensores capacitivo (HD-38) e resistivo (HL-69) em função da massa do solo (Ms).



Fonte: Autor (2025).

As diferenças refletem os princípios de funcionamento distintos entre os sensores: o HL-69, por ser resistivo, responde diretamente à variação na condutividade elétrica da solução do solo, que é componente dependente da umidade e da salinidade, enquanto o HD-38, capacitivo, mede indiretamente a umidade por meio da constante dielétrica, que tende a variar de forma mais previsível e contínua com o conteúdo hídrico (ZHOU et al., 2019).

Os sensores demonstram potencial significativo para substituição de métodos convencionais, particularmente em aplicações que demandam maior frequência de medição ou mobilidade. Estudos anteriores já apontam a eficiência desses dispositivos em diferentes condições experimentais (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; BOGENA et al., 2017), reforçando os resultados observados neste trabalho.

A Tabela 1 apresenta os dados experimentais obtidos a partir da leitura dos sensores HL-69 e HD-38 em diferentes níveis de umidade gravimétrica no solo, variando de 0% a 18,4%, com incrementos controlados de água destilada. As leituras iniciais de ambos os sensores, sob condição de solo seco, foram de 1023, valor máximo do conversor analógico-digital para Arduino UNO, indicando a condição do solo seco.

Com o aumento da umidade, observou-se uma tendência de queda nas leituras de

ambos os sensores, sendo tal variação mais suave e consistente no sensor capacitivo HD-38 e mais abrupta e irregular no sensor resistivo HL-69. Os dados servirão de base para a aplicação de modelos de regressão que visem correlacionar os valores lidos por cada sensor com o teor de umidade no solo, permitindo avaliar a sensibilidade, linearidade e faixa de resposta útil de cada tecnologia sensorial.

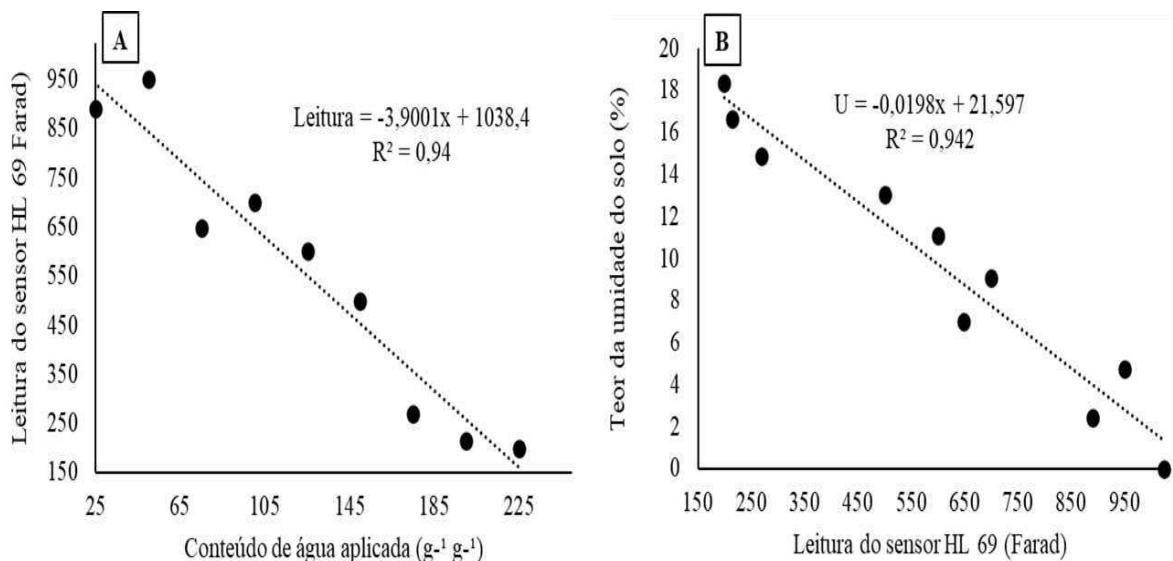
### **5.1.1 Sensor resistivo de umidade de solo HL 69**

As análises experimentais com o sensor de umidade HL-69 permitiram avaliar seu desempenho em diferentes níveis de umidade do solo, a partir de amostras previamente secas ao ar livre. Este método de secagem, embora menos controlado do que a estufa a 105 °C com ventilação forçada, é comum em experimentos preliminares e representa condições mais próximas da realidade agrícola (SOUZA et al., 2018). A Figura 11A apresenta a relação entre o conteúdo de água aplicado ( $\text{g g}^{-1}$ ) e a leitura do sensor HL-69 (Farad). Observa-se uma correlação linear negativa expressiva, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,94$ .

A equação de regressão obtida foi Leitura =  $-3,9001x + 1038,4$ , com resposta inversamente proporcional entre o aumento da umidade e a leitura do sensor. PEREIRA et al. (2022), afirmam que sensores de baixo custo (como o SKU:SEN0193) permitem ampliar o monitoramento espacial devido ao baixo preço, embora apresentem precisão média inferior a sensores comerciais. Eles podem capturar variações diárias e sazonais de umidade, sendo indicados especialmente para projetos de curto prazo ou com orçamento limitado.

Na Figura 11B, é apresentada a relação entre o teor de umidade do solo (%) e a leitura do sensor, com um modelo de regressão linear de  $R^2 = 0,942$  ( $U = -0,0198x + 21,597$ ). A alta correlação indica que o sensor pode estimar o teor de umidade do solo com boa confiabilidade dentro da faixa analisada. Contudo, a curva mostra sinais de estabilização nas leituras em umidade elevada, apontando limitação do sensor em condições de saturação. Tal comportamento também foi reportado por Costa et al. (2020), os quais observaram que sensores resistivos tendem a perder precisão em umidade acima da capacidade de campo, devido à saturação do circuito e condutividade excessiva no meio poroso.

Figura 12 - Variação dos valores da sonda HL 69 em função do conteúdo hídrico (10 A) no solo e teor da umidade (10 B).



Fonte: Autor (2025).

Vale destacar que, apesar das limitações, a perda de sensibilidade, o HL-69 não compromete sua aplicabilidade no manejo da irrigação de precisão, cujo objetivo é repor a umidade do solo até níveis próximos da capacidade de campo, mas não acima dela (SOUZA et al., 2018). Portanto, mesmo com a secagem ao ar livre, que pode apresentar variação residual de umidade, os dados obtidos são representativos e reforçam o uso do sensor HL-69 como opção de apoio à gestão hídrica em sistemas agrícolas (GOMES et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2020; SILVA et al., 2018).

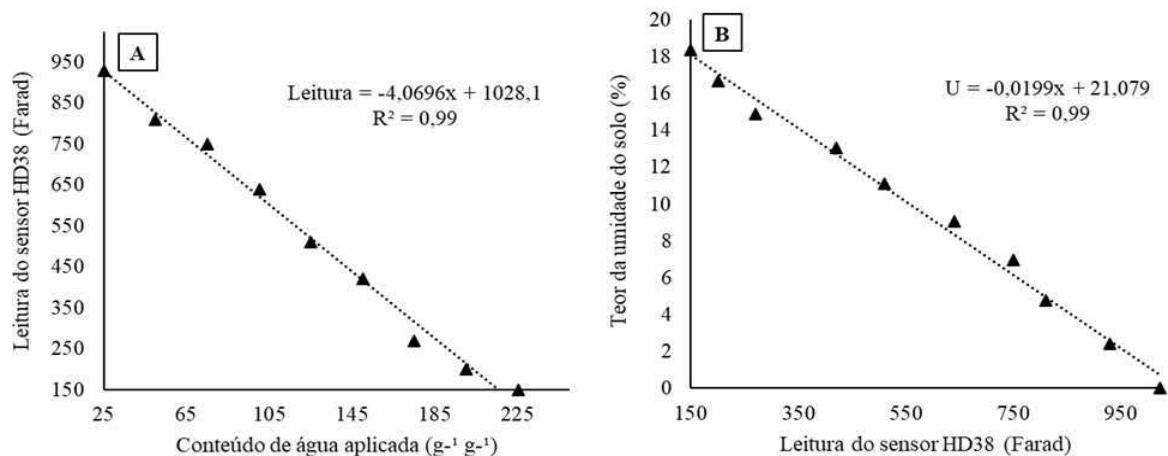
### 5.1.2 Sensor capacitivo de umidade de solo HD-38

Os testes realizados com o HD-38 demonstraram bom desempenho na estimativa da umidade do solo sob diferentes níveis de água aplicada. Diferentemente do HL-69, de natureza resistiva, o HD-38 opera com base na variação da constante dielétrica do meio, o que o torna menos suscetível a interferências, proporcionando-o maior precisão nas medições (FERREIRA et al., 2022; ZHOU et al., 2019). A Figura 12A, apresenta a relação entre o conteúdo de água aplicado ( $\text{g}^{-1}$ ) e a leitura do sensor HD-38. Os dados mostram um comportamento linear ao longo da execução do ensaio. A equação de regressão ajustada ( $-4,0696x + 1028,1$ ), com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,99$ , demonstra uma dependência

entre a resposta da sonda e o teor de umidade do solo.

A literatura confere a sonda uma elevada confiabilidade para aplicações em campo, especialmente em projetos que demandam alta precisão, como sistemas de irrigação controlada por sensores (Smart Farming), conforme discutido por Ferreira et al. (2022). Complementarmente, a Figura 2B exibe a curva de calibração do sensor HD-38 em função do teor de umidade do solo (%), cuja equação de regressão linear ( $-0,0199x + 21,079$ ), com  $R^2 = 0,99$ . O resultado permite a conversão direta das leituras capacitivas em porcentagens de umidade volumétrica, o que facilita a integração com sistemas embarcados e sua aplicabilidade e automação agrícola.

Figura 13 - Variação dos valores da sonda HD 38 em função do conteúdo hídrico (12 A) no solo e teor da umidade (12 B).



Fonte: Autor (2025).

Em termos comparativos, o HL-69 apresentou certa perda de precisão próximo à saturação do solo, enquanto o HD-38 manteve desempenho estável. Fato característico evidencia uma faixa útil mais ampla de operação, o que é especialmente vantajoso para solos com elevada capacidade de retenção hídrica, como o usado para o presente teste. Outra vantagem observada foi a baixa dispersão dos dados, indicando repetibilidade nas leituras. Segundo Ferreira et al. (2022), sensores capacitivos, por dependerem da constante dielétrica do solo e não da condução elétrica, são menos influenciados por variações iônicas e mais adequados a ambientes agrícolas com uso intensivo de fertilizantes.

Segundo Zawilski et al. (2023), sensores capacitivos e resistivos de baixo custo apresentam desempenho variável conforme as características físico-químicas do solo, sendo

indispensável sua calibração individualizada para garantir a confiabilidade das medições. Neste contexto, avaliar a resposta dos sensores frente a diferentes condições edáficas possibilita selecionar dispositivos mais adequados para aplicações em larga escala, especialmente em projetos de irrigação voltados à agricultura familiar e de pequeno porte. Conforme destacam Bettioli Júnior et al. (2012), apesar da câmara de pressão ser comumente utilizada para caracterizar o comportamento hídrico do solo, o processo é demorado e requer equipamentos caros e especializados, o que limita sua aplicabilidade em condições operacionais de campo. Bogená et al. (2017) propuseram uma metodologia eficaz para calibrar sensores de baixo custo, como o SMT100, utilizando meios de referência com permissividade dielétrica conhecida.

Estratégia baseada nos princípios propostos por autores permite uma calibração precisa sem a necessidade de equipamentos sofisticados, tornando-a adequada para aplicações em larga escala e em ambientes com recursos limitados. Outro ponto importante é que o efeito da textura e da estrutura do solo na resposta dos sensores não deve ser subestimado. Solos franco-argilosos, tal como o utilizado no presente estudo, apresentam boa capacidade na retenção de água e distribuição relativamente uniforme da umidade ao longo do perfil, podendo favorecer leituras mais consistentes.

No entanto, em solos arenosos, a resposta dielétrica pode ser mais instável devido à menor capacidade de retenção e maior variabilidade na distribuição da água, exigindo ajustes de calibração mais frequentes (SILVA et al., 2022). A adoção de metodologias de calibração que incorporem simulação de diferentes condições edafoclimáticas pode ampliar a aplicabilidade dos sensores e reduzir a necessidade de ajustes frequentes em campo. O uso de materiais de referência com constante dielétrica conhecida, aliado a protocolos padronizados de coleta e análise, é possível integrar sensores.

Adla et al. (2020), sob condições laboratoriais, propuseram a calibração e avaliação de desempenho de sensores capacitivos e de resistivos sob condições de solo deformado, testando também sensibilidade à temperatura e salinidade. O estudo demonstrou melhor eficiência e precisão nos sensores capacitivos e resposta mais consistente entre solos; os resistivos foram aceitáveis pelo custo, mas mostraram forte saturação em faixas altas de umidade e maior sensibilidade a salinidade. Os autores recomendam calibrações por solo e teste de sensibilidade térmica/conduvidade para aplicações de campo.

## 5.2 Experimento II: Análise comparativa dos métodos de coleta de dados meteorológicos para monitoramento microclimático

As variáveis meteorológicas, em particular temperatura e umidade relativa do ar, expressam a dinâmica dos processos atmosféricos e no equilíbrio hídrico dos ecossistemas. A temperatura influencia diretamente a energia disponível utilizada na evapotranspiração, enquanto a umidade relativa atua na capacidade do ar em absorver vapor d'água, regulando o fluxo de evatranspiratórios.

A variação temporal destas variáveis, sob escalas diárias ou sazonais, é de suma valia para entender o comportamento microclimático local e realizar estimativas da evapotranspiração, componente chave para o manejo agrícola, conservação ambiental e planejamento hídrico. A ciência que estuda estas relações meteorológicas permite, por intermédio de estudos, o desenvolvimento de métodos e tecnologias para monitoramento contínuo, proporcionando dados essenciais para modelagem climática e otimização do uso dos recursos naturais.

A partir dos dados do presente estudo, é apresentado a partir Tabela 5 o resumo da análise de variância (ANOVA) para as médias de temperatura do ar ( $T^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa do ar (UR %) obtidas a partir de três métodos de estimativa, respectivamente, padrão EMA, DHT11 e EMC (convencional) ao longo do período avaliado. Os resultados indicam que houve diferenças estatísticas significativas entre os métodos para a variável temperatura em todos os meses avaliados.

Os valores associados ao fator "método" apresentaram significância ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ) para outubro, novembro e dezembro. Para a variável umidade relativa do ar, observaram-se diferenças significativas entre os métodos nos meses de outubro e novembro, com significância ao nível de 5% ( $p < 0,05$ ) e não significativo em dezembro. Vale frisar que as diferenças observadas entre os métodos ajudam a entender e propor a necessidade de calibração específica do DHT11 para as condições locais de operação, considerando fatores como temperatura média, amplitude térmica e umidade relativa predominante.

Tabela 4 - Resumo de análise de variância para médias de temperatura e umidade relativa do ar para os três métodos de estimativa, EMA, DHT11 e convencional.

FV	GL	QM					
		Outubro		Novembro		Dezembro	
		<i>T °C</i>	UR %	<i>T °C</i>	UR %	<i>T °C</i>	UR %
Método	2	5,58 **	17,20 *	3,33 **	45,72 *	2,28 **	15,09 ns
Resíduo	27	0,08	4,0	0,14	11,49	0,22	16,6
Total	29						
CV (%)		1,03	3,27	1,35	5,19	1,66	5,76

Os dados apontam a existência de variabilidade sensível à escolha do equipamento de medição, evidenciada ainda pelos coeficientes de variação (CV), que se mantiveram baixos, destacando boa precisão das medições dentro de cada método. Na Figura 14 são apresentadas médias mensais de temperatura para padrão EMA, DHT11 e EMC. Na análise comparativa, considerando o método DHT11 como método para possível substituição, pode-se observar as diferenças percentuais nos valores registrados pelos métodos EMA e EMC.

Em outubro, EMA registrou temperatura aproximadamente 0,7% inferior em relação ao DHT11, enquanto o método EMC, uma temperatura cerca de 4,3% mais elevada. Em novembro, a EMA registrou uma temperatura de 1,8% mais baixa que o DHT11, enquanto o método EMC mostrou um aumento de 3,5%. Já em dezembro, a EMA apresentou aproximadamente 0,7% mais baixa que o DHT11, por outro lado, o método EMC registrou acréscimo de 2,8%.

Os achados indicam a tendência mais estável no padrão EMA, com valores ligeiramente inferiores, enquanto a EMC tende à superestimação em relação ao DHT11. As variações podem estar atreladas a diversos fatores, como a localização dos sensores, calibração e tipo de instrumento utilizado. Sensores de baixo custo, tal como utilizado no presente estudo, embora acessíveis, possuem menor sensibilidade e precisão, conforme demonstrado por estudos de validação (SILVA et al., 2021; SOUZA et al., 2019). Por outro lado, os institucionais como utilizados pelo EMA seguem protocolos rigorosos de calibração e instalação, o que garante maior confiabilidade nas medições (EMA, 2020).

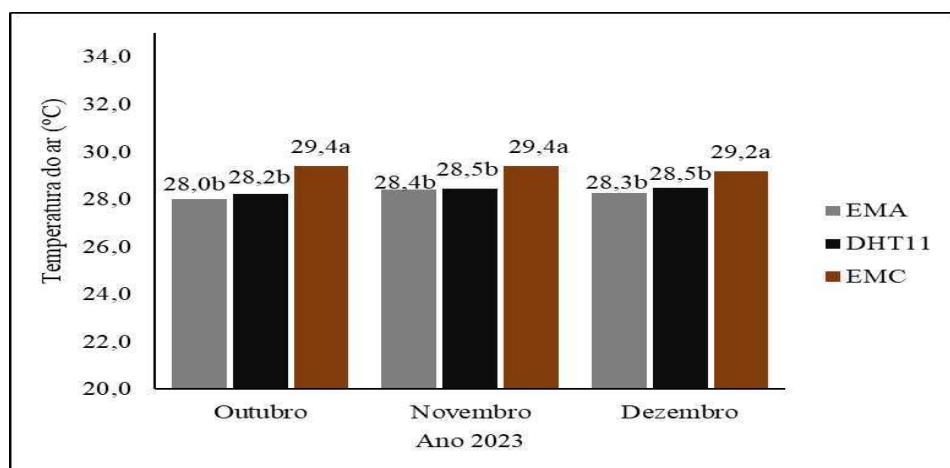
Resultados similares aos deste estudo foram igualmente identificados em investigações realizadas no Brasil e em outros países, apontando um padrão consistente de

discrepâncias entre sensores de baixo custo e equipamentos oficiais. Os sensores comerciais como o DHT11 apresentaram desvios médios de até 2 °C em comparação com estações meteorológicas padronizadas operadas por instituições oficiais.

Embora o desvio possa parecer pequeno, ele se torna significativo em aplicações que requerem maior precisão, como estudos climáticos, modelagem hidrológica ou monitoramento de condições ambientais críticas. Além disso, fatores como a falta de ventilação forçada e o posicionamento inadequado dos sensores, frequentemente próximos a superfícies refletoras ou diretamente expostos ao sol, tendem a agravar os erros nas medições.

Wilhite e Glantz (1985), revelou que fatores aparentemente simples, como o posicionamento dos sensores, a exposição ao vento e a ventilação natural, podem gerar variações significativas nos dados coletados, especialmente durante eventos climáticos extremos, como ondas de calor ou frentes frias. Foi demonstrado que sensores instalados em locais com pouca ventilação ou expostos diretamente à radiação solar registraram temperaturas artificialmente elevadas, prejudicando a qualidade dos dados obtidos. Os resultados ressaltam a importância de adotar critérios técnicos rigorosos na instalação de equipamentos de medição e de garantir uma validação contínua dos dados gerados.

Figura 14 - Temperaturas médias mensais obtidas por diferentes métodos de coleta, EMA, EMC e DHT11.



Fonte: Autor (2025).

Estudos têm investigado a eficácia de termohigrômetros digitais de baixo custo, em comparação às estações meteorológicas automáticas (EMA) e às convencionais (EMC), com diferenças significativas que podem interferir nas análises microclimáticas e nas estimativas hidrológicas. Amorim et al. (2014), apontaram inconsistências nas medições da umidade relativa, destacando as limitações do sensor para estudos relacionados à precisão. Além disso, Lima et al. (2022), reforçam a relevância de uma instalação adequada dos sensores para reduzir erros sistemáticos, destacando que as diferenças nas operações e na tecnologia influenciam diretamente os dados meteorológicos utilizados para estimar a evapotranspiração.

As variações são possivelmente influenciadas por diferentes fatores operacionais. O DHT11, apesar de seu baixo custo em termos de acessibilidade, apresenta limitações em termos de exatidão e resposta temporal. Silva et al. (2021), afirmam que termohigrômetro DHT11 pode apresentar variações de até  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  em condições extremas de temperatura, além de lentidão em sua resposta a mudanças rápidas do ambiente. Contudo, segundo os autores, esta faixa é consideravelmente aceita, sobretudo quando o monitoramento não exclui o limiar e, na ausência de outros equipamentos, pode-se utilizá-lo em análises microclimáticas.

Além disso, observações visuais apontam que sensores DHT11 são frequentemente instalados em locais desprotegidos ou com pouca ventilação, o que agrava os erros de medição. Já as estações convencionais, embora tradicionalmente confiáveis, como observado no método EMC, estão mais sujeitas a erros derivados da má instalação ou de leitura do próprio observador. Em ambientes urbanos ou em transição de urbanização, onde ocorre o afogamento urbano, ou seja, pela proximidade de construções e asfalto, pode haver risco acentuado de sobreaquecimento local e distorções nos registros. Segundo Oke (2006), o efeito pode alterar a leitura em até  $5^{\circ}\text{C}$ , dependendo do grau de impermeabilização do entorno.

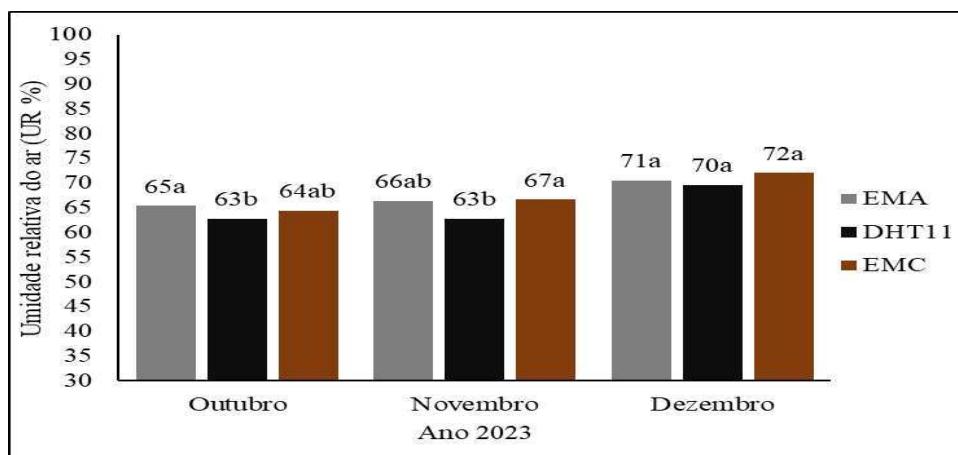
As estações posicionadas fora dos padrões da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), com recomendação de distância mínima de 100 metros de construções e presença de cobertura vegetal, podem perder seu caráter representativo regional. Recomenda-se, também a instalação de termômetros de temperatura e umidade, a sua proteção em abrigo meteorológico a 1,5 m do solo em área gramada e plana, longe de interferências. No entanto, em muitos projetos, a prática nem sempre segue a mesma norma. Lima et al. (2022) demonstraram que desvios podem chegar a  $3,2^{\circ}\text{C}$  em comparação com

sensores instalados adequadamente.

Os dados médios mensais ilustrados na Figura 15 mostram que a EMA e a EMC apresentaram leituras próximas entre si em todos os meses, com variações de apenas 1 a 2%, enquanto o sensor DHT11 registrou valores consistentemente mais baixos. Em outubro, EMA mediu 65%, EMC 64% e DHT11 63%; em novembro, EMA e EMC mediram, respectivamente, 66% e o DHT11 63%; em dezembro, as leituras foram de 71% (EMA), 72% (EMC) e 70% (DHT11). A proximidade entre EMA e EMC, apesar da diferença no método entre os métodos de medição, apresentam ligeira concordância. Por outro lado, os valores consistentemente inferiores do DHT11. Souza et al. (2019), destacam que o módulo sensor DHT11, tem resolução limitada ( $\pm 5\%$ ) e sensibilidade reduzida em ambientes com alta umidade ou variações bruscas, assim como a lenta resposta do sensor podem contribuem para ligeiros desvios observados (Silva et al., 2021).

O mês de novembro mostra leituras muito próximas entre os métodos, com EMA e Convencional registrando 66% e o DHT11, 63%. Já em dezembro, EMA e Convencional registram valores semelhantes (71% e 72%, respectivamente), enquanto o DHT11 mostra uma leitura ligeiramente mais baixa (70%). A precisão e confiabilidade dos métodos EMA e Convencional são frequentemente consideradas superiores, enquanto o DHT11 pode apresentar variações na precisão de suas leituras. Portanto, a escolha do método de medição depende do contexto de uso e das necessidades específicas de cada aplicação, levando em consideração fatores como precisão, confiabilidade e custo.

Figura 15 - Umidade relativa, médias mensais obtidas por diferentes métodos de coleta, EMA, EMC e DHT11.



Fonte: Autor (2025).

A análise dos erros médios absolutos (EMA) para temperatura e umidade relativa do ar mostraram diferenças entre os métodos de coleta avaliados. Para a temperatura do ar, o sensor DHT11 apresentou menor erro médio ( $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) em relação ao padrão EMA, enquanto o método EMC apresentou erro superior ( $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), indicando uma tendência de superestimação. Já para a umidade relativa, o EMC foi o que mais se aproximou da estação padrão, com erro médio de apenas 0,67%, ao passo que o DHT11 apresentou maior desvio, com EMA de 2%. Tais discrepâncias são influenciadas e podem estar relacionadas não apenas pela tecnologia e calibração dos sensores, como também pela dinâmica climática regional.

O segundo semestre, especialmente, inverno e primavera caracterizam-se por marcante variabilidade, sendo mais pronunciada a variação no semiárido e em regiões tropicais de transição, com destaque para a redução da umidade relativa do ar e aumento da evapotranspiração, em particular no mês de outubro, período de maior déficit hídrico e predominância de ventos secos. A instabilidade pode interferir diretamente na exatidão dos sensores, sobretudo os de menor custo, cuja resposta pode ser afetada por alterações bruscas de temperatura, baixa ventilação ou elevada radiação solar.

Em novembro e, principalmente, em dezembro, observa-se uma tendência à estabilização das condições atmosféricas, com aumento gradual da umidade e diminuição dos ventos, favorecendo uma leitura mais estável e coerente dos sensores, especialmente pela maior formação de nuvens e proximidade com a quadra chuvosa. Os erros observados podem estar intimamente ligados a fatores como instrumental e às condições meteorológicas locais, reforçando a necessidade de considerar o contexto climático, assim como as normas estabelecidas.

As variações sazonais nas condições climáticas locais, em especial a temperatura e umidade relativa do ar podem influenciar diretamente a calibração e o desempenho de sensores de baixo custo, que apresentam maior sensibilidade a extremos térmicos e baixa umidade. Em condições de calor intenso e ar seco, típicas do semiárido no final do inverno e início da primavera, pode ocorrer um deslocamento da faixa operacional ideal, resultando em sub ou superestimação das medições.

### **5.3 Experimento III: Caracterização estatística de uma sonda de umidade do solo capacitiva, integrada ao sistema de balanço hídrico na agricultura em região semiárida**

Na Tabela 5 estão presentes o resumo geral dos constituintes do balanço hídrico (BH) ao longo do estudo, levando em consideração a lâmina aplicada (LAp), drenada (LDr) e evaporada (LEv), em mm dia<sup>-1</sup>, valores impressos pelos sensores em diferentes profundidades (leituras analógicas), assim como os valores acumulados (BH). Os elementos de escoamento superficial e a alteração de armazenamento foram excluídos da análise, dado que a irrigação foi realizada evitando o transbordamento de água.

A análise de dados de BH e as leituras analógicas revelam padrões diários distintos que podem ser atribuídos tanto às condições climáticas, quanto às mudanças na cobertura do solo. Nas leituras diárias, até antes da presença da cobertura viva do solo, todos os componentes estudados vinham apresentando padrão crescente e, a partir da semeadura (18 de novembro), conforme realçado na tabela, começou-se a observar outra dinâmica no sistema, com valores tendendo à estabilização, com destaque para o sensor instalado próximo à superfície (p1).

Os comportamentos são explicados no decorrer da apresentação dos resultados. Por outro lado, os totais acumulados ajudam a explicar como foi a distribuição da água ao longo do teste. Nota-se, nos totais acumulados, a crescente LAp ao longo dos meses, iniciando-se com 221,7 para 253,6 mm, em dezembro. A LDr diminui de 45,4 para 31,1. Por sua vez, a LEv subiu de 176,3 para 222,5 mm, em dezembro.

De modo geral, há uma tendência geral de aumento em LAp e LEv, bem como diminuição em LDr. Os dados, conforme apresentado na tabela, destacam, ao longo dos dias de ensaio, a dinâmica dos processos, tanto do balanço hídrico, como das leituras registradas pelos sensores. As medidas podem ser empregadas para extrair informações relacionadas à gestão dos processos hidrológicos no solo, em particular a estimativa da sua umidade. No presente estudo, as leituras registradas serviram de referência para caracterização do sensor, em termos de sua resposta à detecção da umidade, quando instalado em profundidades, buscando, com isso, ter uma referência de posicionamento em ensaios posteriores.

Tabela 5 - Média dos valores do balanço hídrico em lisímetro de drenagem e valores da sonda, em solo franco argiloso e sonda de umidade.

Dias	Outubro				Novembro								dezembro								
	LAp	LDs	LEv	p1	p2	p3	p4	LAp	LDs	LEv	p1	p2	p3	p4	LAp	LDs	LEv	p1	p2	p3	p4
1	7.0	2.0	5.0	234	116	121	117	7.3	1.0	6.3	301	117	125	103	8.9	1.0	7.9	210	153	134	133
2	7.0	2.0	5.0	210	119	124	125	7.6	1.3	6.3	277	115	122	96	9.2	1.1	8.1	202	146	142	138
3	7.0	1.8	5.2	162	117	125	131	7.9	1.8	6.1	288	117	110	99	8.7	1.3	7.4	224	158	141	135
4	7.9	1.8	6.1	193	112	119	126	8.5	1.7	6.8	255	115	114	108	8.7	1.4	7.3	242	153	149	141
5	7.0	1.4	5.6	214	112	121	126	7.0	1.8	5.2	287	120	110	112	7.7	1.3	6.4	259	145	151	144
6	7.9	1.8	6.1	264	116	119	124	7.0	1.5	5.5	295	124	115	113	9.7	1.2	8.5	135	131	151	136
7	7.0	2.0	5.0	239	118	119	123	7.3	1.3	6.0	302	122	140	106	9.2	1.1	8.1	125	122	151	145
8	7.0	1.3	5.7	236	116	116	126	7.5	1.6	5.9	261	117	139	112	9.2	1.2	8.0	129	122	147	142
9	7.0	1.3	5.7	236	117	121	124	7.6	1.5	6.1	231	128	122	114	9.2	1.3	7.9	154	120	151	139
10	7.0	0.9	6.1	225	116	119	124	7.0	1.3	5.7	218	128	122	119	7.9	1.1	6.8	146	116	152	141
11	7.0	0.8	6.2	235	117	120	128	7.2	1.3	5.9	262	138	138	126	8.0	1.0	7.0	159	121	143	134
12	7.0	0.9	6.1	240	115	121	130	7.0	1.3	5.7	275	139	154	137	9.2	1.2	8.0	177	118	143	134
13	7.6	1.3	6.3	242	111	121	129	7.3	1.4	5.9	303	139	142	129	8.6	1.2	8.0	174	120	150	137
14	8.3	1.5	6.8	245	114	120	130	7.5	1.3	6.2	310	129	125	115	9.6	1.3	8.3	181	117	151	136
15	7.0	1.5	5.5	193	113	117	134	8.6	1.7	6.9	337	123	122	118	9.2	1.4	7.8	149	119	142	131
16	7.5	1.7	5.8	177	118	103	127	7.3	1.1	6.2	281	130	127	117	8.2	1.0	7.7	164	117	143	136
17	7.0	1.3	5.7	165	126	121	137	7.2	1.6	5.6	326	140	132	117	7.3	0.9	6.4	156	118	144	134
18	7.0	1.3	5.7	164	137	151	151	7.0*	1.9	5.1	310	153	130	118	7.9	1.1	6.8	141	121	150	140
19	7.0	1.6	5.4	152	137	142	149	7.0	1.6	5.4	298	174	147	123	8.2	1.0	7.2	136	124	150	143
20	7.0	1.5	5.5	150	138	152	145	7.9	1.2	6.7	282	175	166	124	7.9	1.1	6.8	131	121	134	129
21	7.0	1.0	6.0	151	146	146	144	6.9	1.6	5.3	293	175	183	129	8.7	1.0	7.7	136	121	148	134
22	7.0	1.2	5.8	174	146	153	144	7.0	2.1	4.9	277	198	203	136	8.7	1.0	7.7	145	118	154	129
23	7.3	1.2	6.1	172	158	160	143	7.0	1.3	5.7	263	183	204	127	9.2	1.1	8.1	146	116	162	131
24	7.0	1.6	5.4	191	141	149	141	7.0	1.9	5.1	295	183	200	133	9.2	1.0	8.2	146	120	154	139
25	7.0	1.6	5.4	281	128	138	133	7.0	1.4	5.6	322	188	199	129	9.2	1.0	8.2	142	121	157	128
26	7.2	1.7	5.5	289	109	133	110	8.7	1.9	6.8	317	189	206	134	9.0	0.9	8.1	142	111	150	125
27	7.0	1.6	5.4	304	110	129	111	8.5	1.5	7.0	286	153	153	146	9.2	0.7	9.0	136	110	153	133
28	7.0	1.5	5.5	294	112	128	122	8.3	1.8	6.5	253	144	154	140	8.6	0.6	8.0	139	112	153	128
29	7.0	1.4	5.6	288	116	134	130	7.2	1.9	5.3	182	153	147	146	7.7	0.6	7.1	177	115	168	128

(\*) Data da semeadura do coentro em lisímetro de drenagem, 18/11/2023.

Ainda na tabela anterior, o total da lâmina aplicada (LAp) acumulada ao fim do ensaio foi de 700 mm, sendo 123,1 mm drenado e 576,9 mm utilizados na evapotranspiração, o que representa 82,4% da devolução em relação à lâmina total utilizada. Visando obter a relação da dinâmica hídrica durante o ensaio, ma análise estatística foi feita com o intuito de comparar o BH, levando em consideração as medidas feitas a partir da escala diária.

Assim, por intermédio da Tabela 6, o teste F constatou que houve significância estatística para os efeitos dos meses sobre (LAp), lâmina drenada (LDr) e lâmina evaporada (LEV) com  $p < 0,01$  (\*\*). A significância revela a dinâmica dos fatores meteorológicos e cobertura do solo como sendo elementos importantes no balanço hídrico e nos processos evapotranspiratórios, especialmente em regiões onde a sazonalidade das condições climáticas é pronunciada (região semiárida do Nordeste, Brasil).

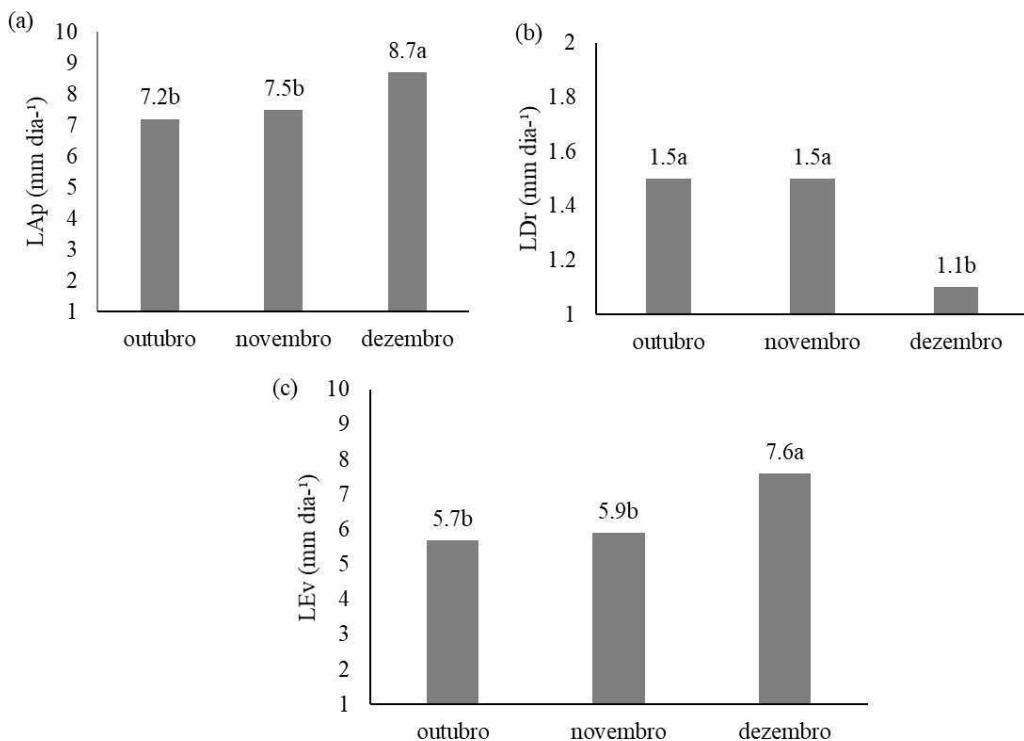
Tabela 6 - Resumo da análise de variância para média diária da LAp, LDr e LEv ao longo dos meses de estudo, sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda de umidade.

FV	GL	LAp	LDr	LEv
Meses	2	19.55 **	1.67 **	32.42 **
Resíduo	84	0.27	0.09	0.28
Total	86			
CV (%)		6,67	22.63	8.35

FV – fonte de variação; GL – grau de liberdade; CV – coeficiente de variação; \*\* – significativo a 0.01 pelo teste de Tukey.

A Figura 16 (a, b, c) apresenta o desdobramento sobre os valores médios dos constituintes do BH. A LAp média foi de 7,2; 7,5 e 8,7 ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), respectivamente, outubro, novembro e dezembro, correspondendo a 20,83% de aumento no período. Por outro lado, a LDr, 1,5 (outubro), 1,6 (novembro) e 1,1 (dezembro),  $\text{mm dia}^{-1}$ , decréscimo de -26,66% em relação a maior lâmina drenada no período.

Figura 16 - Média diária da lâmina aplicada (a), drenada (b) e evaporada (c), sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.



Fonte: Autor (2025).

A diferença entre as entradas (LAp) e saídas (LDr) resultou no saldo diário LEv, que corresponde ao conteúdo hídrico utilizado nos diversos processos, incluindo a regulação térmica dos constituintes do solo e na evapotranspiração.

De outubro a dezembro, foi observado aumento de 33,33% na evapotranspiração, sendo mais acentuada quando da presença da cultura viva no solo, conforme mencionado anteriormente. A região de estudo é conhecida por apresentar maior taxa de evapotranspiração nessa época do ano (segundo semestre), em função de elevado saldo de radiação diário, alta temperatura, baixa umidade, aumento na velocidade do vento e longos períodos de estiagem, criando condições favoráveis para demanda atmosférica (HOLANDA *et al.*, 2016; MOURA *et al.*, 2013).

Ainda, em ambientes de cultivo, a cobertura e a irrigação podem atenuar as influências da temperatura sobre o solo e promover aumento do potencial de água, modificando a amplitude térmica (CARNEIRO, 2014), o que favorece maior tempo de retenção hídrica na solução do solo e, consequentemente, sua disponibilidade às plantas. Vale lembrar que a retenção de água em forma de umidade no solo não é uniforme, podendo sofrer variabilidade

em função do tipo do solo, como havia sido apontado e, aplicando o método de extração, é possível obter sua estimativa.

A Tabela 7 apresenta o resumo da análise de variância para umidade gravimétrica em diferentes profundidades. As amostras coletadas não constataram diferenças significativas nas médias dentro dos perfis coletados (repetições), todavia observou-se efeitos significativos entre mesmas profundidades, conforme evidenciado pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância para variável umidade gravimétrica ( $Ug\%$ ) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.

FV	GL	QM
		$Ug$
Repetições	7	11334,703 ns
Profundidades	3	12711,6974 **
Resíduo	21	11.700
Total	31	-
CV (%)		6,67

FV – Fonte de variação; GL – grau de liberdade; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo; \*\* – significativo a 0,01 pelo teste de Tukey.

A partir das médias das amostras, o nível de solo da camada inicial apresentou baixo conteúdo de água, quando comparado a outros níveis (Tabela 8). O fato ocorrido é possível que esteja relacionada a fatores externos, uma vez que, na ausência da cobertura, os solos descobertos tendem a perder rapidamente seu conteúdo hídrico nas primeiras camadas (SINGH *et al.*, 2023). Por outro lado, à medida que a profundidade do solo vai aumentando, sua umidade foi diretamente proporcional ao aumento. Na camada superficial, correspondente à sonda p1 (0,0 cm), foi constatado menor teor de conteúdo hídrico (12,26%).

Estudos envolvendo a umidade do solo têm observado comportamentos similares, justificando que as camadas superficiais do solo tendem a apresentar baixo teor de umidade (SINGH *et al.*, 2023), por ser início de zona de transição para atmosfera. Na profundidade final, p4 (37,5 cm), o solo apresentou 16,45% de umidade. Comparando os extremos, constata-se uma diferença de 24,86%. Comparando, a partir da segunda profundidade (p2) em diante, apesar das diferenças nos valores médios, o teste estatístico realizado não constatou diferenças significativos, portanto, houve, no início da camada uma tendência relativamente uniforme na

distribuição de água.

Tabela 8 - Valores médios de úmida e seca (MU e MS), respectivamente e Ug (%) e respectivo desvio médio (d. médio) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.

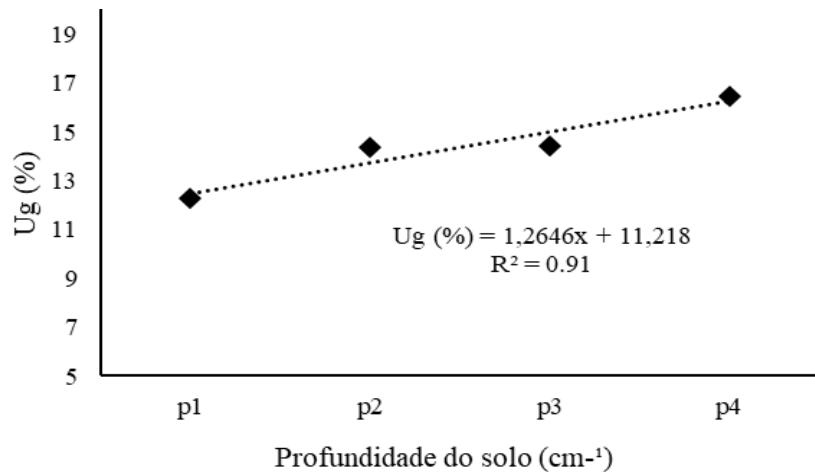
Profundidades (cm <sup>-1</sup> )	UM (g <sup>-1</sup> )	MS (g <sup>-1</sup> )	Ug (%)	d. médio (MS)
p1	162,74	144,96	12,26 b	13,9
p2	200,10	174,94	14,38 a	4,4
p3	185,33	161,95	14,43 a	5,3
p4	193,74	166,36	16,45 a	6,9
-	-	-	57,5	-

Valores seguidos com as mesmas letras (coluna Ug) não diferem estatisticamente entre si.

Observou-se, por intermédio da análise de regressão, que com a profundidade do solo, houve maior retenção do conteúdo hídrico e, o melhor ajuste foi o modelo linear crescente, com coeficientes de determinação de 0,91 (Figura 17). Solos fracos argilosos são caracterizados por apresentarem boa distribuição de água ao longo do perfil (ZHANG *et al.*, 2023), no entanto pode haver pequenas variações conforme observado no presente estudo de caso. A amostra do solo identificou que, na profundidade p1 (0 cm), após a secagem continha 12,26% de sua estrutura preenchido com umidade, p2 (12,5 cm), p3 (25,5 cm) e p4 (37,5 cm), com somatório de 57,5%, isto indica uma ótima capacidade do solo em reter água após cada evento de irrigação.

A partir das condições observadas, a distribuição de umidade no solo estudado pode proporcionar uma boa capacidade de retenção hídrica, reduzindo a necessidade de irrigações frequentes e favorecer o desenvolvimento das plantas. O aumento gradual do teor de água em camadas mais profundas também demonstra a eficiência da infiltração e o potencial para a recarga hídrica do solo, aspectos que devem ser considerados no planejamento de sistemas de irrigação.

Figura 17 - Variação da umidade gravimétrica ( $U_g\%$ ) sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.



Fonte: Autor (2025).

Com base nas informações da umidade do solo a distintas profundidades, a análise de variância (Tabela 9) mostra que, à medida que a profundidade variava, as sondas foram capazes de detectar a variabilidade, sugerindo ser uma boa alternativa para monitoramento de umidade de solo.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância para média diária das profundidades dos sensores ao longo do ensaio, sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.

FV	GL	Sonda
Dias	89	1436.9 ns
Profundidades	3	179782.8 **
Resíduo	267	1183.7
Total	359	
CV (%)		22.08

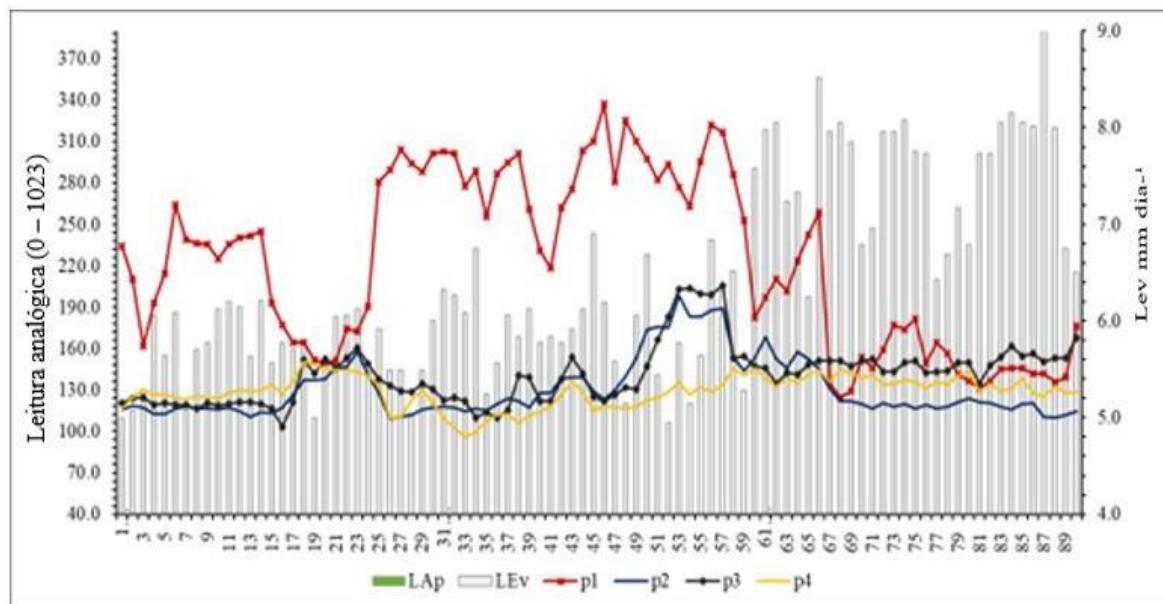
FV – Fonte de variação; GL – grau de liberdade; CV – coeficiente de variação; ns – não significativo; \*\* – significativo a 0.01 pelo teste de Tukey.

Buscando tirar percepções sobre o comportamento das sondas em função das profundidades, a Figura 18 apresenta a variação diária dos valores medidos pelos sensores ao durante o ensaio. As barras representam estimativa de evapotranspiração ( $LEv \text{ mm dia}^{-1}$ ). As linhas p1 a p4 representam respectivamente, as profundidades de instalação dos sensores de

umidade. O sensor instalado na camada superficial (p1) apresentou maior oscilação em relação aos demais. Comportamento dessa natureza é possível que esteja atrelado ao rápido secamento do solo nas primeiras camadas, motivado pela interferência de fatores de natureza ambiental, como radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento (SINGH et al., 2023; MA et al., 2020; ZHANG et al., 2018).

A estratégia para melhorar estas flutuações poderia englobar uso de cobertura do solo (ZHANG et al., 2023). No presente estudo, após a semeadura do coentro (18/11/2023), a p1 diminuiu a sua flutuação, mantendo as leituras próximas às demais sondas até o fim do experimento. Vale ressaltar que, as leituras baixas indicam aumento da umidade e consequentemente, aumento na condutividade elétrica da solução (SCHIMANSKI et al., 2015). Quando da situação inversa, isto é, a diminuição da umidade pela evapotranspiração ou percolação profunda, ocorre aumento do efeito dielétrico do sensor, causando aumento na resistência do solo, sendo mais evidenciado na profundidade inicial.

Figura 18 - Variação de umidade sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.



Fonte: Autor (2025).

Importante justificar que, após a emergência da cultura do coentro, notou-se a redução na flutuação de leituras. O fato dá entender que a cobertura consegue atenuar as elevadas taxas de variabilidade das condições térmicas do solo, favorecendo a redistribuição de água ao longo do perfil do solo (ZHANG et al., 2023), através de maior distribuição do sistema

radicular.

No presente estudo, o que se observou foi redução na lâmina drenada, combinada com a crescente lâmina aplicada e evapotranspirada. A ocorrência da redução na lâmina de drenagem, em particular no último mês dos testes coincidiu com o crescimento expressivo do coentro, o que cria uma camada protetora contra evaporação rápida, maior distribuição do sistema radicular e o fluxo de vapor da água para atmosfera ocorre especialmente por transpiração.

É apresentado na Tabela 10 a significância nas diferenças das leituras em virtude das profundidades. Percebe-se que a sonda (sensor) instalado na p1 apresentou maior valor, indicado menor teor de umidade na camada quando comparada às demais sondas. Por outro lado, a partir da p2, apesar dos distintos valores registrados, estatisticamente, não diferem entre si. Isso pode refletir nas características do solo estudado.

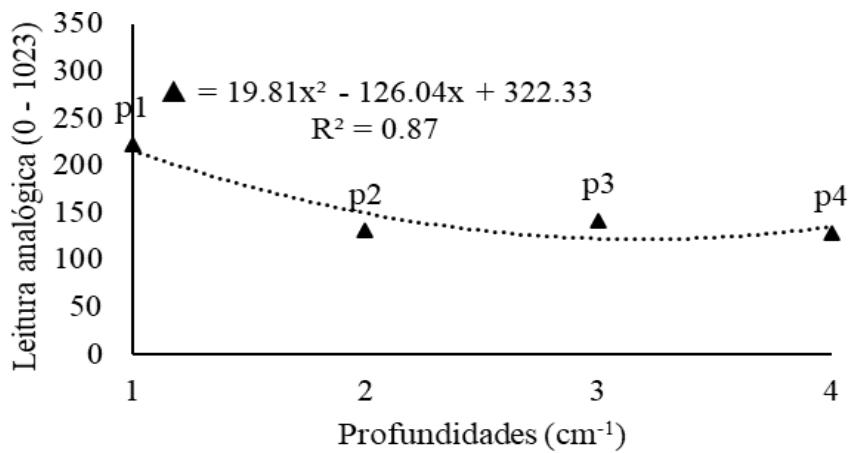
Tabela 10 - Valores médios das profundidades sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.

Profundidades	Leitura analógica (0 – 1023)
p1	222.34 a
p2	130.74 b
p3	141.23 b
p4	128.87 b

Valores seguidos com as mesmas letras (coluna) não diferem estatisticamente entre si.

Apesar das flutuações constatadas, a sonda apresentou padrão de leitura regular, excetuando, no entanto, a sonda instalada na p1 que, conforme destacado anteriormente, elementos meteorológicos podem estar ocasionando as perturbações (DENG et al., 2021; ZHANG et al., 2018). O modelo quadrático (Figura 19) teve melhor ajuste para explicar o comportamento das sondas. Ao longo de todo o estudo, a sonda instalada na profundidade inicial foi a que mais apresentou valores elevados, indicando menos conteúdo hídrico, assim como maior sujeição a fatores externos (MA et al., 2020; ZHANG et al., 2018).

Figura 19 - Valores médios das profundidades sob lisímetro de drenagem em solo franco argiloso e sonda capacitiva.



Fonte: Autor (2025).

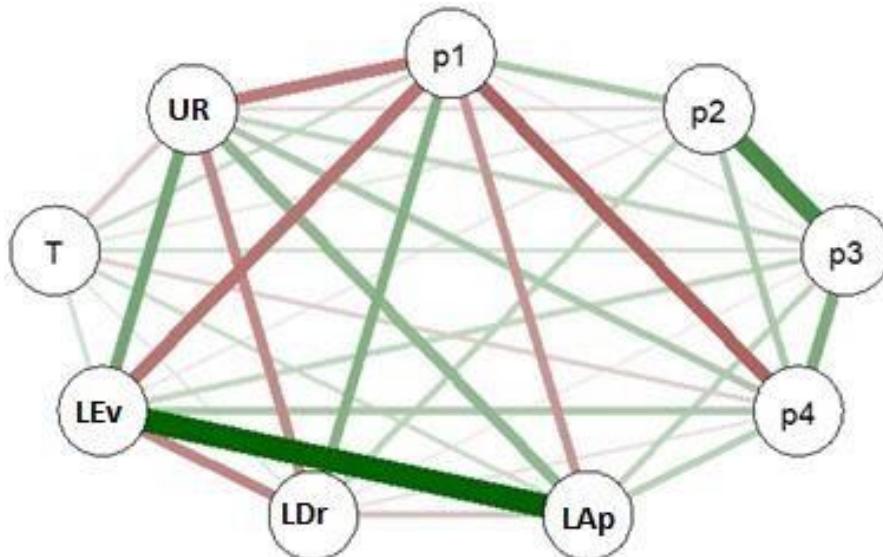
Moura & Querino, (2010), afirmam que a variação da temperatura do solo é resultante do fluxo de calor, sendo um componente importante no balanço de energia oriunda da superfície que, por sua vez, atua no processo de transferência de calor (CARNEIRO, 2014; CARVALHO et al., 2011) e, como consequência, leva à ocorrência de oscilações na emissão do sinal (ZHANG et al., 2018).

Buscando compreender o comportamento dos elementos que constituem variáveis em estudo, empregou-se o teste de correlação de Pearson, para evidenciar a linearidade dos dados observados nas variáveis. Para o efeito, uma rede de matriz de correlação (Figura 20) foi plotada, com linhas indicando as tendências dentro do sistema. As linhas verdes indicam correlação positiva e, as vermelhas, negativa. As voltadas à cor cinza tende para uma correlação nula. É possível elucidar, a partir da rede, as prováveis inferências entre as variáveis. Tomando-se como exemplo a p1 (profundidade inicial = 0 cm), nela se percebe a forte correlação negativa para com UR (umidade relativa do ar), LEv (lâmina evapotranspirada) e p4 (profundidade final = 37,5 cm). Uma das eventuais causas das referidas ocorrências pode ser associada às influências dos fatores externos, como havia sido mencionado na introdução desse artigo.

A UR influenciou negativamente a LDr, tendo o referido efeito acentuado após a emergência do coentro. Por outro lado, a LEv apresentou uma rede positiva para com UR e LAp (lâmina aplicada), isso aponta para uma relação de dependência positiva, ou seja, à medida que uma sobe, a outra acompanha o ritmo. A correlação explica o comportamento

meteorológico da região em estudo, ou seja, durante segundo semestre, há uma maior demanda atmosférica em que, evapotranspiração potencial supera a recarga vinda da precipitação pluvial. Com aplicação de água feita via manual, percebe-se que, ao longo do ensaio, há um aumento na LAp.

Figura 20 - Correlação de Pearson entre profundidades (p1 a p4), lâminas (LAp, LDr e LEv) temperatura e umidade relativa do ar, ( $n= 90$ ). \*: significativo ( $p<0.05$ ).

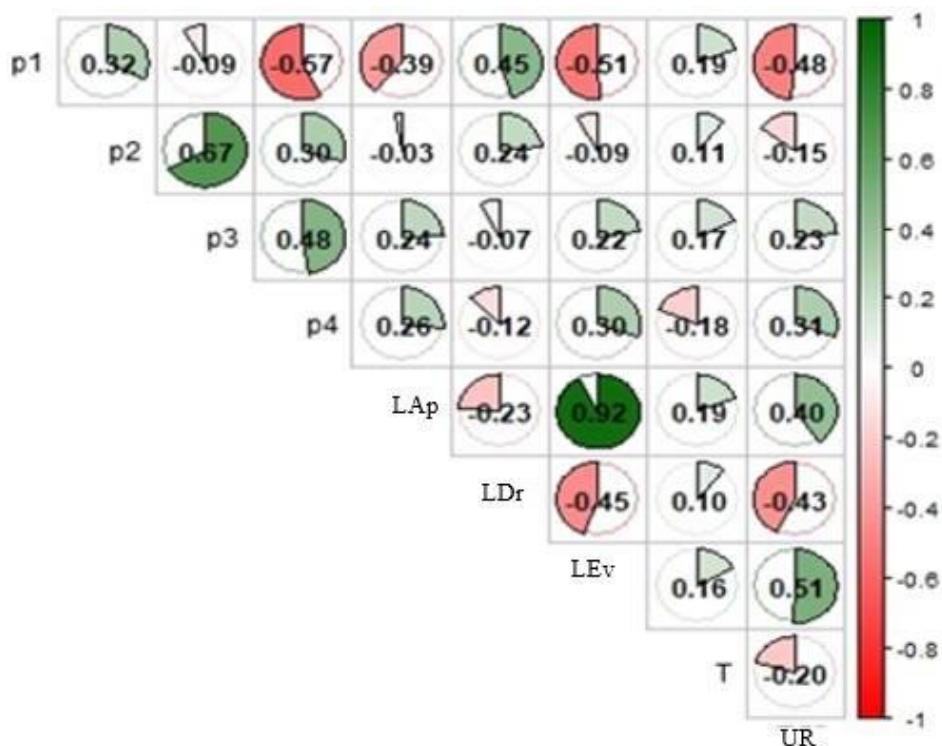


Fonte: Autor (2025).

A outra forma de interpretar a rede é por intermédio de um intervalo de maneira numérica. Segundo Moore (2007), “a correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas” (Moore, 2007). Cohen (1988), afirma que, valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; escores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes.

Dancey e Reidy (2005), apontam para uma classificação ligeiramente diferente:  $r = 0,10$  até  $0,30$  (fraco);  $r = 0,40$  até  $0,6$  (moderado);  $r = 0,70$  até  $1$  (forte). Utilizando os critérios do último autor, a Figura apresenta, através da ilustração gráfica, a correlação entre as variáveis: as duplas ( $p1$  vs  $p4$ ,  $r = 0.57$ ;  $p3$  vs  $p4$ ,  $r = 0.48$ ;  $LDr$  vs  $p1$ ,  $r = 0.45$ ;  $LEv$  vs  $p1$ ,  $r = 0.51$ ;  $LEv$  vs  $LDr$ ,  $r = 0.45$ ;  $UR$  vs  $p1$ ,  $r = 0.48$ ;  $UR$  vs  $LAp$ ,  $r = 0.4$ ;  $UR$  vs  $LDr$ ,  $r = 0.45$ ;  $UR$  vs  $LEv$  =  $0.51$ ) se enquadram no nível moderado de correlação, tanto negativa quanto positivamente. Já as duplas  $p2$  vs  $p3$ ,  $r = 0.67$  e  $LAp$  vs  $LEv$ ,  $r = 0.92$ , apresentaram forte correlação, as demais correlações foram classificadas como fracas.

Figura 21 - Correlação de Pearson entre profundidades (p1 a p4), lâminas (LAp, LDr e LEv) temperatura e umidade relativa do ar, ( $n= 90$ ). \*: significativo ( $p<0,05$ ).



Fonte: Autor (2025).

A correlação entre profundidades do solo, lâmina de água aplicada, drenada e evaporada, temperatura e umidade relativa do ar fornecem importantes elementos sobre a dinâmica hídrica e climática no estudo. A análise revela como variáveis ambientais influenciam o conteúdo hídrico e a evapotranspiração sob condições estudadas. LAp e LEv apresentam uma correlação muito forte ( $r = 0,92$ ), demonstrando que, o aumento na aplicação de água está diretamente relacionado ao aumento na evapotranspiração. Esta relação pode ser atribuída ao incremento na demanda atmosférica.

Além disso, a correlação moderada entre a profundidade p1 e outras variáveis, como LDr ( $r = 0,45$ ) e LEv ( $r = 0,51$ ), sugere que a umidade superficial do solo é fortemente afetada pela drenagem e evapotranspiração. A camada superficial (p1) mostrou maior oscilação em relação às outras profundidades, refletindo sua maior exposição a fatores ambientais e práticas agrícolas, como cobertura do solo, que pode atenuar as referidas flutuações (MA et al., 2020; ZHANG et al., 2018). A análise de variância na Tabela 3 também revela que há uma diferença significativa no conteúdo hídrico entre as profundidades, destacando que as camadas mais

profundas (p2 a p4) mantêm maior umidade em comparação à camada superficial. Este comportamento é consistente com a capacidade de retenção de água pelo solo, conforme evidenciado pelo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,91$ ) do modelo linear crescente.

Uma particularidade do coeficiente  $r$  de Pearson é que o quadrado do seu valor representa uma estimativa do percentual de variabilidade dos valores de uma variável explicado pela variabilidade da outra (Miot, 2018). Por exemplo, na correlação LAp vs LEv, ( $r = 0,92$ ) indica que aproximadamente 84,64% da variabilidade de uma variável pode ser explicada pela variação dos valores da outra nos dados em análise.

A correlação de Pearson entre as variáveis sugere que práticas agrícolas, como a cobertura do solo e irrigação, podem influenciar significativamente o balanço hídrico, contribuindo para a manutenção da umidade do solo e a modificação da amplitude térmica. A presença de cobertura viva no sistema a partir de dezembro demonstrou reduzir a flutuação da umidade na camada superficial, mantendo leituras mais estáveis até o final do experimento.

Vale observar o cenário da correlação entre as profundidades intermediárias (p2 e p3) e as variáveis climáticas. É possível observar condições estáveis, isso ocorre possivelmente, por representarem camadas de tampão ou zonas de amortecimento hídrico. Nota-se que elas não sofreram mudanças bruscas no teor de umidade diante de variações rápidas na evapotranspiração ou na precipitação, o que pode ser vantajoso para manter umidade disponível às raízes por mais tempo.

As interações observadas podem ajudar no desenvolvimento de modelos preditivos capazes de estimar a necessidade hídrica futura com base em condições climáticas projetadas, contribuindo para práticas agrícolas mais eficientes. A estratégia integrada, associada ao uso de sensores calibrados, amplia as possibilidades de aplicação de tecnologias de agricultura de precisão.

## 6 CONCLUSÕES

Sob condições experimentais testadas, a presente pesquisa confirmou a aplicabilidade dos sensores avaliados. A calibração realizada no Experimento I mostrou que ambos os sensores respondem de maneira adequada às variações de umidade, com destaque para o HD-38, o qual obteve um comportamento linear consistente ( $R^2 = 0,99$ ), favorecendo sua adoção em sistemas de irrigação baseados em dados. No Experimento II, o sensor DHT11 foi avaliado quanto à sua capacidade de monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar, sendo comparado com métodos meteorológicos convencionais.

Apesar das diferenças estatísticas nos valores absolutos, o sensor demonstrou boa capacidade de acompanhar as tendências diárias das variáveis climáticas, reforçando seu uso em sistemas de baixo custo para monitoramento microclimático, especialmente em áreas com infraestrutura limitada. Já o Experimento III evidenciou a eficiência do HD-38 sob lisímetro de drenagem, registrando com precisão as alterações de umidade ao longo do perfil do solo. A sensibilidade do sensor nas diferentes profundidades avaliadas comprova sua utilidade em aplicações de campo, com potencial para apoiar estratégias de irrigação inteligente baseadas em dados em tempo real.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a integração dos sensores com tecnologias com microcontroladores e sistemas autônomos de energia apresenta um caminho viável para a modernização da agricultura em contextos de escassez hídrica. O uso de sensores calibrados, aliados a soluções tecnológicas sustentáveis, pode promover uma agricultura mais eficiente, resiliente e ambientalmente responsável, ampliando o acesso à agricultura de precisão em diferentes realidades produtivas.

## REFERÊNCIAS

- ABDULRAHEEM, Muhammad I.; CHEN, H.; LI, L.; MOSHOOD, A. Y.; ZHANG, W.; XIONG, Y.; et al. Recent Advances in Dielectric Properties-Based Soil Water Content Measurements. **Remote Sensing**, v. 16, p. 1328, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs16081328>.
- ADLA, Soham; RAI, Neeraj Kumar; KARUMANCHI, Sri Harsha; TRIPATHI, Shivam; DISSE, Markus; PANDE, Saket. Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 2, p. 363, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20020363>.
- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, v. 38, p. 393–422, 2002.
- AL-FUQAHÀ, Ala; et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper** 56, 1998
- AL-RAWI, M. A. M. Low-cost soil moisture sensors' assessment for their accuracy after calibration through the gravimetric method. **SABRAO Journal of Breeding and Genetics**, v. 56, n. 1, p. 353–369, 2024. Disponível em: <http://doi.org/10.54910/sabao2024.56.1.32>.
- ALSHAHRI, Abdulla. Assessing the applicability of low-cost soil moisture sensors. In: **IASTEM International Conference**, Praga, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340687370\\_Assessing\\_the\\_applicability\\_of\\_low-cost\\_soil\\_moisture\\_sensors](https://www.researchgate.net/publication/340687370_Assessing_the_applicability_of_low-cost_soil_moisture_sensors).
- ANANDKUMAR, V.; KALAIARASAN, T. R.; BALAKRISHNAN, S. IoT based soil analysis and irrigation system. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 119, n. 12, p. 1127-1134, 2018.
- ARNELL, N. W.; LOWE, J. A.; CHALLINOR, A. J.; OSBORN, T. J. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. **Climatic Change**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02464-z>.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P.; GIROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971–982, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300027>.
- BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; SCHILLING, B.; WEUTHEN, A.; VEREECKEN, H. Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 208, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s17010208>
- BRONSON, K. Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with

digital farming. **NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90–91, 2019.

CAMARGO, A. P. de. Evapotranspiração potencial em Campinas. **Instituto Agronômico**, 1962.

CANET-MARTÍ, A.; MORALES-SANTOS, A.; NOLZ, R.; LANGERGRABER, G.; SUMPP, C. Quantification of water fluxes and soil water balance in agricultural fields under different tillage and irrigation systems using water stable isotopes. **Soil and Tillage Research**, v. 231, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105732>.

CARTER, A. et al. (2019). The use of drainage lysimeters for evaluating evapotranspiration in arid environments. **Agricultural Water Management**, 225, 105734. Disponível em: DOI:10.1016/B978-0-12-818032-7.00007-2.

CARNEIRO, R. G. **Perfil da Temperatura do Solo nos Biomas Florestais da Amazônia e Mata Atlântica com Aplicação da Transformada em Ondoletas**. 2014. 79f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

CARVALHO, J. F.; MONTENEGRO, A. A. A.; SOARES, T. M.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Cabbage Productivity Using Mulch and Different Irrigation Intervals with Moderately Saline Water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 256-263, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300006>.

CERDÀ, A.; DOERR, S. H. Soil Wettability, Runoff and Erodibility of Major Dry-Mediterranean Land Use Types on Calcareous Soils. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 2325-36, 2007. <https://doi.org/10.1002/hyp.6755>

CEPUDER, P.; NOLZ, R. Irrigation Management by Means of Soil Moisture Sensor Technologies. **Journal of Water and Land Development**, v. 11, n. 1, p. 79-90, 2007. <https://doi.org/10.2478/vd10025-000-0007-0>.

COELHO, R. D., OLIVEIRA, R. A., & SILVA, T. J. A. (2005). Desenvolvimento e avaliação de lisímetro de pesagem com sistema hidráulico. **Engenharia Agrícola**, 25(2), 489–497. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000200024>.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. **Hillsdale**: Erlbaum, 1988.

CHOWDHURY, S.; SEN, S.; JANARDHANAN, S. Comparative analysis and calibration of low cost resistive and capacitive soil moisture sensor. **arXiv**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03019>

DANCEY, C.; REIDY, J. Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Artmed, 2005.

DAVIS, S. L.; DUKES, M. D. Irrigation scheduling performance by evapotranspiration-based controllers. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 1, p. 19–28, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.006>.

DE FRAITURE, C.; WICHELNS, D. Satisfying future water demands for agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 502–511, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.008>.

Degré, A.; Van der Ploeg, M. J.; Caldwell, T.; Gooren, H. P. A. Comparison of soil water potential sensors: a drying experiment. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2016.08.0067>.

DIMITROVA, A.; INGOLE, V.; BASAGAÑA, X.; RANZANI, O.; MILÀ, C.; BALLESTER, J.; TONNE, C. Association between ambient temperature and heat waves with mortality in South Asia: systematic review and meta-analysis. **Environment International**, v. 146, p. 106170, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106170>

DRURY, Brett; VALVERDE-REBAZA, Jorge; MOURA, Maria-Fernanda; LOPES, Alneu de Andrade. A survey of the applications of Bayesian networks in agriculture. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 65, p. 29–42, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.07.003>

EMBRAPA. Centro Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de Métodos de Análises de Solo. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 1997. 212p.

EMBRAPA. Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**, 2017.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all. **FAO**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb4474en>

FLEMING, Aysha; JAKKU, Emma; LIM-CAMACHO, Lilly; TAYLOR, Bruce; THORBURN, Peter. Is big data for big farming or for everyone? Perceptions in the Australian grains industry. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, p. 24, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0501-y>.

GAŁĘZEWSKI, Lech; JASKULSKA, Iwona; JASKULSKI, Dariusz; LEWANDOWSKI, Arkadiusz; SZYPŁOWSKA, Agnieszka; WILCZEK, Andrzej; SZCZEPAŃCZYK, Maciej. Analysis of the need for soil moisture, salinity and temperature sensing in agriculture: a case study in Poland. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 16660, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96182-1>.

GASHAW, T.; TULU, T.; ARGAW, M.; WORQLUL, A. W.; TOLESSA, T. Estimating the Impacts of Land Use/Land Cover Changes on Ecosystem Service Values: The Case of the Andassa Watershed in the Upper Blue Nile Basin of Ethiopia. **Ecosystem Services**, v. 31, p. 219-228, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.05.001>.

GARCÍA, Laura; PARRA, Lorena; JIMENEZ, Jose M.; LLORET, Jaime; LORENZ, Pascal. IoT-based smart irrigation systems: an overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. **Sensors**, v. 20, n. 1042, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s20041042>.

Goap, A.; Sharma, D.; Shukla, A. K.; Rama Krishna, C. An IoT based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 41–49, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>.

GOMES, Flávio H. F.; CUNHA, Fernando N.; LOPES FILHO, Luiz C.; VIDAL, Vitor M.;

SOARES, Frederico A. L.; TEIXEIRA, Marconi B. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, v. 11, n. 4, p. 1509-1516, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n400605>.

GEROY, Ian J.; GRIBB, Michael M.; MARSHALL, Harry P.; CHANDLER, David G.; BENNER, Scott G.; MCNAMARA, Joseph P. Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 25, p. 3836-3842, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hyp.8281>.

GHOSH, S.; SAYYED, S.; WANI, K.; MHATRE, M.; HINGOLIWALA, H. A. Smart Irrigation: A Smart Drip Irrigation System Using Cloud, Android and Data Mining.

**International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT)**, p. 1-5, 2016. <https://doi.org/10.1109/ICAECCT.2016.7942570>.

GONZÁLEZ-SOSA, Maximiliano; GONZÁLEZ-BARRIOS, Pablo; BENTANCUR, Oscar José; PÉREZ-BIDEGAIN, Mario. Differential effects on soil water repellency of Eucalyptus and Pinus plantations replacing natural pastures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230070>

GUADAGNIN, Clístenes Antônio; SCHÖFFEL, Edgar Ricardo; CASALINHO, Helvio Debli; BACIC, Ivan Luiz Zilli; VEIGA, Milton. Hydro-physical properties of three soils conducted under no-tillage, minimum cultivation and perennial pasture. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 1, p. 124–131, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v19i1.5484>

HOLANDA, José Sebastião. Irrigation Water Quality. In: Salinity Management in Agriculture: Basic and Applied Studies. 2. ed. Fortaleza: INCTSAL, 2016. Cap. 4, p. 35-50.

JIMÉNEZ, Andrés-F.; ORTIZ, Brenda V.; LENA, Bruno P. Real-time mapping of crop canopy temperature using a wireless network of infrared thermometers on a central pivot. **Measurement**, v. 230, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114570>.

LOUREIRO, Gláucio Ferreira; COLOMBO, Alberto; DE ARAÚJO, Daniel Soares Ambrósio. Calibration of an MPX5700 Sensor Connected to an Arduino Uno Model. **Revista Foco**, v. 16, n. 11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n11-153>

MAJCHER, Jacek; KAFARSKI, Marcin; WILCZEK, Andrzej; SZYPŁOWSKA, Agnieszka; LEWANDOWSKI, Arkadiusz; WOSZCZYK, Aleksandra; SKIERUCHA, Wojciech. Application of a Dagger Probe for Soil Dielectric Permittivity Measurement by TDR. **Measurement**, v. 178, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109368>

MAIER, Alexander; SHARP, Andrew; VAGAPOV, Yuriy. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. **Internet Technologies and Applications (ITA)**, 2017.

MIOT, H. A. Correlation Analysis in Clinical and Experimental Studies. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 17, n. 4, p. 275–279, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1677-5449.174118>.

MOREIRA, Wagner Henrique; TORMENA, Cássio Antonio; KARLEN, Douglas L.; SILVA, Álvaro Pires da; KELLER, Thomas; BETIOLI JÚNIOR, Edner. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 53–64, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.02.007>.

MORCHID, Ahmed; JEBABRA, Reda; KHALID, H. M.; EL ALAMI, Redouane; QJIDAA, H.; JAMIL, M. O. IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing. **Results in Engineering**, v. 21, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102829>

MOORE, D. S. *The Basic Practice of Statistics*. New York: Freeman, 2007.

MOURA, Maria Aparecida L.; QUERINO, Carlos Alberto S. Seasonal Variation of Soil Heat Flux Inside a Tropical Mangrove. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 296–302, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300009>

NORMAN, Geoffrey R.; STREINER, David L. *Biostatistics: The Bare Essentials*. 4. ed. Shelton: **People's Medical Publishing House**, 2014.

OR, Daniel; WRAITH, John M. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model. **Water Resources Research**, v. 35, n. 2, p. 371–383, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/1998WR900008>.

O'SHAUGHNESSY, Sarah A.; EVETT, Steven R. Canopy temperature based system effectively schedules and controls center pivot irrigation of cotton. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 9, p. 1310–1316, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.03.012>.

PEREIRA, Edeglêdo Duarte; FILHO, Newton de Castro; SOUSA, Manoel Wedson de Araújo; ARAÚJO, Antônio Evandro de; CABALLERO, Rolando Ismael Corrales; CHAGAS, Ramon Ernesto Santos; OLIVEIRA, Emily Cristina Pereira; MORAIS, Marcelo Oliveira; CUNHA, Mário César de Souza; SOARES, José Roger Silva; LIMA, Francisco Renan Pereira; SILVA, Débora José da. Performance assessment and calibration of low-cost moisture sensors at multiple Oxisol depths. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 4, e32511427420, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27420>.

PERERA, Frederica P. Multiple threats to child health from fossil fuel combustion: Impacts of air pollution and climate change. **Environmental Health Perspectives**, v. 125, n. 2, p. 141–148, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1289/EHP299>.

SILVA, Samuel M.; PESSOA, João G.; SOUZA, Carlos F. Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v. 12, e12217, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2359-6643.12217>.

PEREIRA, Paulo; CRUVINEL, Paulo. Development of an automatic agricultural data collection system based on LoRa network and ESP32 microprocessor. In: REGIONAL SCHOOL OF INFORMATICS OF MATO GROSSO, 10., 16 out. 2019, Cuiabá, Brazil. **Proceedings...** Porto Alegre: SBC, 2019. p. 43–48. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/erimt.2019.8592>.

- REICHARDT, K. Water in agricultural systems. São Paulo: **Manole**, 1987. 181 p.
- SILVA, Fernando de A. S. E.; AZEVEDO, Carlos A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and Its Use in the Analysis of Experimental Data. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3733–3740, 2016. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>.
- SINGH, Manish; SINGH, S.; DEB, S.; RITCHIE, Graham. Root distribution, soil water depletion, and water productivity of sweet corn under deficit irrigation and biochar application. **Agricultural Water Management**, v. 279, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108192>.
- SHEPHERD, Michael; TURNER, John A.; SMALL, B.; WHEELER, D. Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the “digital agriculture” revolution. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>.
- SCHIMANSKI, S.; SCHROEDER, T. F.; SPITTHÖVER, C.; MÖLLER, R. Contactless sensor technology for measuring soil moisture. In: IEEE **International Conference on Consumer Electronics (ICCE)**, 2015, p. 385–387. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICCE.2015.7066456>.
- SKIERUCHA, Wojciech. Temperature dependence of time domain reflectometry–measured soil dielectric permittivity. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 2, p. 186–193, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.200625216>.
- SNEINEH, Ahmed A.; SHABANEH, Ahmad A. A. Design of a Smart Hydroponics Monitoring System Using an ESP32 Microcontroller and the Internet of Things. **MethodsX**, v. 11, p. 102401, 2023.
- SKIERUCHA, Wojciech. Temperature dependence of time domain reflectometry–measured soil dielectric permittivity. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 2, p. 186–193, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.200625216>.
- SZEREMENT, J.; SAITO, H.; FURUHATA, K.; YAGIHARA, S.; SZYPŁOWSKA, A.; LEWANDOWSKI, A.; et al. Dielectric Properties of Glass Beads with Talc as a Reference Material for Calibration and Verification of Dielectric Methods and Devices for Measuring Soil Moisture. **Materials**, v. 13, n. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13081968>.
- TZOUNIS, A., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., & KITTAS, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, 164, 31–48. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: A new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems**, v. 148, p. 71–74, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001>.
- WILHITE, Donald A.; GLANTZ, M. H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **Water International**, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/02508068508686328>.

WILCZEK, Andrzej; KAFARSKI, Marcin; MAJCHER, Jacek; et al. Temperature dependence of dielectric soil moisture measurement in an Internet of Things system – a case study. **International Agrophysics**, v. 37, n. 4, p. 443–449, 2023. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.31545/intagr/177243>.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; et al. Big data in smart farming – a review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69–80, 2017.

ZHANG, Qiyong; CHEN, Wenwu; CHU, Jian. Effect of Soil Hydrophobicity on Soil-Water Retention Curve of a Silt Loam Soil. **Soil & Tillage Research**, v. 234, p. 105855, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105855>.

ZHANG, Ting; SHEN, Shi; CHENG, Changxiu; SONG, Changqing; YE, Sijing. Long-Range Correlation Analysis of Soil Temperature and Moisture on A'rou Hillsides, Babao River Basin. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, p. 12606–12620, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2018JD029094>.

## APÊNDICE A – ALGORITMO E FERRAMENTAS PARA PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Algoritmo para Coleta de Dados de Umidade e Temperatura com Arduino – código-fonte em Arduino IDE, baseado na linguagem C/C++ utilizado para a leitura dos sensores. O algoritmo realiza a média das leituras a cada minuto.

```
/*=====
```

Projeto: Coleta de Dados de umidade e temperatura com Arduino Descrição: Leitura de 4 sensores de umidade de solo (análogicos) e 1 sensor DHT11 para temperatura e umidade do ar. O sistema calcula a média de cada variável ao longo de 60 segundos e exibe no monitor serial.

Autor:[Juvenaldo Florentino Canja]

Instituição:[Universidade Federal do Ceará – UFC/ Dep. da Eng. Agrícola, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola - PPGEA]

Curso:[Doutorado em Engenharia Agrícola]

Orientador:[Prof. Dr. Benito Moreira de

Azevedo] Coorientador:[Prof. Dr. George

Andre Pereira The] Data:[10-09-2023]

Versão:2.0

Notas:

- Os sensores de umidade estão conectados aos pinos A0 a A3.
- O sensor DHT11 está conectado ao pino digital 2.
- As leituras são feitas a cada segundo por 60 segundos para gerar médias confiáveis.

Linguagem: C/C++ (Plataforma

Arduino) IDE: Arduino IDE

```
=====*/
```

```
#include <DHT.h>
// Definição dos pinos dos
sensores const int sensorPin1 =
A0;
```

```

const int sensorPin2 = A1;

const int sensorPin3 = A2; // Novo
sensor 1 const int sensorPin4 = A3; //

Novo sensor 2 const int DHTPin = 2;
// Definição do tipo de sensor
DHT const int DHTType =
DHT11;

DHT dht(DHTPin,
DHTType); void setup() {
// Inicialização do monitor serial
Serial.begin(9600);
// Inicialização do sensor DHT11
dht.begin();
}

void loop() {
// Variáveis para acumular as leituras e o
contador int umidade1_acumulada = 0;
int umidade2_acumulada = 0;
int umidade3_acumulada = 0; // Acumulador para o novo sensor 1 int umidade4_acumulada
= 0; // Acumulador para o novo sensor 2 float temperatura_acumulada = 0;
int umidadeAr_acumulada
= 0; int contador = 0;
// Loop para fazer as leituras durante 1 minuto (60
segundos) while (contador < 60) {
// Leitura dos sensores de umidade de
solo int umidade1 =
analogRead(sensorPin1); int umidade2
= analogRead(sensorPin2);
int umidade3 = analogRead(sensorPin3); // Novo
}
}

```

```

sensor 1 int umidade4 = analogRead(sensorPin4); //  

Novo sensor 2  

// Leitura do sensor DHT11  

float temperatura =  

dht.readTemperature(); int umidadeAr  

= dht.readHumidity();  
  

// Adicionar as leituras às variáveis de acumulação  

umidade1_acumulada += umidade1;  

umidade2_acumulada += umidade2;  

umidade3_acumulada += umidade3; // Novo sensor 1  

umidade4_acumulada += umidade4; // Novo sensor 2  

temperatura_acumulada += temperatura;  

umidadeAr_acumulada += umidadeAr;  
  

// Incrementar o contador  

contador++;  
  

// Aguardar um segundo antes da próxima leitura  

delay(1000);  

}  
  

// Calcular as médias  

float media_umidade1 = umidade1_acumulada /  

60.0; float media_umidade2 =  

umidade2_acumulada / 60.0;  

float media_umidade3 = umidade3_acumulada / 60.0; // Média do novo sensor 1 float  

media_umidade4 = umidade4_acumulada / 60.0; // Média do novo sensor 2 float  

media_temperatura = temperatura_acumulada / 60.0;  

float media_umidadeAr = umidadeAr_acumulada / 60.0;  

// Enviar as médias para o monitor serial

```

```
Serial.print("\t");
Serial.print("MS1P12.5cm:
"); Serial.print("\t");
Serial.print(media_umidade
1); Serial.print("\t");
Serial.print("MS2P35.5c
m: "); Serial.print("\t");
Serial.print(media_umidade
2); Serial.print("\t");
Serial.print("MS3P25.5: "); // Novo
sensor 1 Serial.print("\t");
Serial.print(media_umidade3);
Serial.print("\t");

Serial.print("MS4P0: "); // Novo
sensor 2 Serial.print("\t");
Serial.print(media_umidade4);
Serial.print("\t");

Serial.print("Média T°C: ");
Serial.print("\t");
Serial.print(media_temperatura);
Serial.print("\t");

Serial.print("Média UR(%): ");
Serial.print("\t");
Serial.print(media_umidadeAr);
Serial.println("");

// Aguardar um breve intervalo antes de recomeçar o loop
delay(1000);
```

```
}
```

Pré-processamento de dados em Python: Padronização e Normalização – bibliotecas utilizadas para o pré-processamento dos dados em Python, com foco na padronização (StandardScaler) e normalização (MinMaxScaler) dos dados.

```
import pandas
as pd import
numpy as np
from matplotlib import pyplot
as plt # Biblioteca para
padronização
from sklearn.preprocessing import
StandardScaler # Biblioteca para
normalização
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
```

Análise de correlação em R – apresentação dos pacotes e comandos utilizados para realização da análise de correlação entre variáveis numéricas a partir de um conjunto de dados importado via R. Utilizou-se os pacotes corrgram e corrplot para gerar visualizações gráficas que auxiliam na interpretação das correlações existentes.

```
#CORRELAÇÃO
install.packages('corrgr
am')
install.packages('corrpl
ot')
library(corrplot)
#library(leaflet)
library(corrgram)
corrBHsonda <- read.csv("CORRECAO_DADOS_BALANCO SONDA.csv", na.strings
= ", sep = ';')
print(corrBHsonda)

corrDados <-
```

```

cor(corrBHsonda) corrDados

Código-fonte para levantamento de curva característica de umidade de solo.

#include <DHT.h>

// Definição dos pinos dos
sensores const int sensorPin1 =
A0;
const int sensorPin2 =
A1; const int DHTPin
= 2;
// Definição do tipo de sensor
DHT const int DHTType =
DHT11; DHT dht(DHTPin,
DHTType); void setup() {
// Inicialização do monitor serial
Serial.begin(9600);
// Inicialização do sensor DHT11
dht.begin();
}
void loop() {
// Variáveis para acumular as leituras e o
contador int umidade1_acumulada = 0;
int umidade2_acumulada =
0; float
temperatura_acumulada = 0;
int umidadeAr_acumulada =
0; int contador = 0;
// Loop para fazer as leituras durante 1 minuto (60
segundos) while (contador < 60) {
// Leitura dos sensores de umidade de
solo int umidade1 =
analogRead(sensorPin1); int umidade2

```

```
= analogRead(sensorPin2);

// Leitura do sensor DHT11

float temperatura = dht.readTemperature();
int umidadeAr = dht.readHumidity();

// Adicionar as leituras às variáveis de acumulação
umidade1_acumulada += umidade1;
umidade2_acumulada += umidade2;
temperatura_acumulada += temperatura;
umidadeAr_acumulada += umidadeAr;

// Incrementar o contador
contador++;

// Aguardar um segundo antes da próxima leitura
delay(1000);

}

// Calcular as médias

float media_umidade1 = umidade1_acumulada /
60.0; float media_umidade2 = umidade2_acumulada
/ 60.0; float media_temperatura =
temperatura_acumulada / 60.0; float
media_umidadeAr = umidadeAr_acumulada / 60.0;

// Enviar as médias para o monitor
serial Serial.print("MS1P12.5cm:
\t"); Serial.print(media_umidade1);
Serial.print("\t");
Serial.print("MS2P35.5cm: \t");
Serial.print(media_umidade2);
Serial.print("\t");
Serial.print("Média T°C: \t");
Serial.print(media_temperatura
); Serial.print("\t");
Serial.print("Média UR(%):
```

```
\t");
Serial.println(media_umidade
Ar); delay(1000);
}
*****
```

Projeto: Algoritmo de monitoramento e comunicação via ThingSpeak

Descrição:

Código para leitura de sensores de temperatura (DS18B20), umidade do ar (DHT11) e umidade do solo, HD 38 via entradas analógicas, com envio dos dados para a plataforma ThingSpeak através de conexão WiFi.

Sensores utilizados:

DS18B20 (2 sensores de temperatura: ambiente e tanque)

DHT11 (temperatura e umidade do ar)

Sensores analógicos de umidade do solo (4 canais)

Comunicação:

- WiFi para conexão com rede "Meteorologia"

- Envio de dados para canal ThingSpeak (canal nº

2587833) Bibliotecas utilizadas:

- \* - ThingSpeak.h

- \* - WiFi.h

- \* - DallasTemperature.h e OneWire.h

- \* - DHT.h

- \*

- \* Autor: [Seu nome aqui]

- \* Data: [Data do desenvolvimento]

```
*****/
##### DEFINES #####
//***** ThingSpeak
*****/
#include "ThingSpeak.h"
```

```

char endereco_api_thingspeak[] = "api.thingspeak.com";
//*****BIBLIOTECA THINGSPEAK*****
unsigned long myChannelNumber1 = 2587833;/////////Canal Dionizio
const char * myWriteAPIKey1 =
    "S7DUJWZHQQK4U0TE";/////////Canal Juvenaldo|ThingSpeak
//*****


//***** Fim ThingSpeak *****/
//***** WiFi *****/
#include "WiFi.h"
#define SECRET_SSID
"Meteorologia" #define
SECRET_PASS "estacaoleao"
char ssid[] = SECRET_SSID; // your network SSID
(name) char pass[] = SECRET_PASS; // your network
password
int keyIndex = 0; // your network key Index number (needed only for
WEP) WiFiClient client;
//***** WiFi *****/
//***** DS18B20
*****// #include
<DallasTemperature.h> #include
<OneWire.h>
#define ONE_WIRE_BUS 14
OneWire
oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1 = {0x28, 0x4C, 0x3C, 0x92, 0x4D, 0x20, 0x1, 0xEB }; //ambiente
DeviceAddress sensor2 = {0x28, 0xE1, 0x17, 0x94, 0x0, 0x0, 0x0, 0xC2}; //Tanque livre
//***** Fim DS18B20 *****/
//***** DHT11
*****// #include

```

```

"DHT.h"
#define DHTPIN 25
#define DHTTYPE
DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

//***** Fim DHT11 *****/
//***** FUNÇÕES *****/
//***** WiFi
*****// void
verificaWiFi(){
WiFi.mode(WIFI_STA);
ThingSpeak.begin(client); // Initialize ThingSpeak
// Connect or reconnect to WiFi
if(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
Serial.print("Attempting to connect to SSID:");
"); Serial.println(SECRET_SSID);
while(WiFi.status() != WL_CONNECTED){
WiFi.begin(ssid, pass); // Connect to WPA/WPA2 network. Change this line if using
open or WEP network
Serial.print(".");
delay(3000);
}
Serial.println("\nConnected.");
}
}

//***** Fim WiFi
*****// void setup() {
Serial.begin(115200);
sensors.begin();

```

```
dht.begin()
;

verificaWi
Fi();
}

void loop()
{
verificaWi
Fi();
sensors.requestTemperatur
es(); float s1,s2;
s1 =
sensors.getTempC(sensor1);
s2 =
sensors.getTempC(sensor2);
float h =
dht.readHumidity(); float t =
dht.readTemperature();
float umidadeSolo1 = analogRead(32);

float      umidadeSolo2      =
analogRead(33);          float
umidadeSolo3 = analogRead(35);
float      umidadeSolo4      =
analogRead(34);

////////////////Mostrando temperaturas lidas/////////////////
Serial.print("Solo 1 = ");
Serial.println(s1);
Serial.print("Solo 2 = ");
Serial.println(s2);
Serial.print("Temp DHT = ");
```

```
Serial.println(t);
Serial.print("Umidade DHT =
");
Serial.println(h);
Serial.print("Umidade Solo 1
=");
Serial.println(umidadeSolo1);
Serial.print("Umidade Solo 2
=");
Serial.println(umidadeSolo2);
Serial.print("Umidade Solo 3
=");
Serial.println(umidadeSolo3);
Serial.print("Umidade Solo 4
=");
Serial.println(umidadeSolo4);
ThingSpeak.setField(1, s1);
ThingSpeak.setField(2, s2);
ThingSpeak.setField(3, t);
ThingSpeak.setField(4, h);
ThingSpeak.setField(5,
umidadeSolo1);
ThingSpeak.setField(6,
umidadeSolo2);
ThingSpeak.setField(7,
umidadeSolo3);
ThingSpeak.setField(8,
umidadeSolo4);
int x = ThingSpeak.writeFields(myChannelNumber1,
myWriteAPIKey1); if(x == 200){
Serial.println("Channel 2 update successful.");
}
```

```
else{
    Serial.println("Problem updating channel. HTTP error code " +
String(x)); delay(10);
}
delay(5000);

Serial.println();
}
```