

ANA CLAUDIA DAVINO DOS SANTOS

**CONTROLE DA UMIDADE DO SOLO VIA SENSORES CAPACITIVOS PARA
MANEJO DE IRRIGAÇÃO 4.0**

RECIFE – PE

2023

ANA CLAUDIA DAVINO DOS SANTOS

**CONTROLE DA UMIDADE DO SOLO VIA SENSORES CAPACITIVOS PARA
MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida

RECIFE – PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237c

Dos Santos, Ana Claudia Davino
CONTROLE DA UMIDADE DO SOLO VIA SENSORES CAPACITIVOS PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO 4.0 /
Ana Claudia Davino Dos Santos. - 2023.
70 f. : il.

Orientadora: Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2024.

1. Automação. 2. Irrigação. 3. Método gravimétrico. 4. Micro-ondas. 5. Calibração. I. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de, orient. II. Título

CDD 630

Ao meu avô Pedro Davino (*in memoriam*), pelo exemplo de humildade, sabedoria, determinação e ternura, pois sempre ensinou que do pouco se faz muito e que a família é a maior das fortalezas.

Ofereço.

Ao meu pai Claudio Alves, por sempre me fazer sonhar com esse momento e me ajudar a realizá-lo. E a minha mãe Maria José, por todo exemplo de fé, perseverança e resiliência, fazendo do meu sonho o dela.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer ao senhor Deus por sempre cuidar de mim, e me proporcionar os melhores caminhos, pelo consolo do meu coração nos momentos de aflições, e por sem colocar em meu caminho pessoas iluminadas.

Agradeço a minha família em nome de minha (Nelcy), minha avó Zezinha e a tia Eliane por sempre me apoiarem e me ajudaram a seguir meus sonhos, as quais pude me espelhar e contar nos momentos mais difíceis que passei.

Agradeço ao meu pai (Cláudio) que me ensinou que a vida é difícil, mas depois de toda tempestade existe sempre a calma, e que a alegria é a maior das forças em momentos de desespero.

Agradeço em especial a minha orientadora Ceres Duarte que desde o início escolhi como referência de profissional que queria me tornar, a qual tenho imensa admiração e respeito por toda trajetória acadêmica. Agradeço de coração por não ter desistido de mim diante todas as circunstâncias. Com ela aprendi sobre ciência, pesquisa e o mais importante a inspiração para seguir com meus objetivos.

Aos meus colegas de alojamento na ECAAC, Livia, Madson, Catiana, Karla, João e Bruna. Pois foram eles que me ajudaram nessa jornada acadêmica e pessoal, os quais pude contar para momentos de alegria e necessidade.

Aos colegas que pude contar com ajuda no desenvolvimento da minha pesquisa, Gisele, Monalisa, Caio, Evanilson, Vagner e João.

A Minha amiga Jessica que abriu as portas de sua casa para me receber nos momentos que precisei e me acolheu como se fosse sua família.

Agradeço as pessoas especiais que conheci e moram no coração desde a graduação e continuaram comigo até hoje, Anna Bia, João, Gabriel, Rafael e Jean.

Agradeço em especial ao meu namorado (Paulo) por me aconselhar, ajudar e me consolar nos momentos em que pensei em desistir, quando minhas forças acabaram, ele segurou a minha mão e seguiu comigo.

Agradeço a Deus mais uma vez pela graça de poder ser mãe, pois, mesmo no meu ventre meu filho Pedro Bernardo me fez sentir um amor tão inabalável, que me deu coragem para enfrentar o mundo, não só por mim, mas também por ele.

As minhas amigas Liliane, Larissa, Katyane e Karla, que alegraram meus dias e sempre me incentivaram.

A banca pela dedicação e disponibilidade em avaliar esta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	9
RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, HIPÓTESES, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA.....	12
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2. HIPÓTESES.....	14
3. OBJETIVO GERAL.....	15
3.1 Objetivos Específicos.....	15
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
4.1 Agricultura 4.0 na irrigação.....	15
4.2 Sensores capacitivos.....	17
4.2.1 Sensores EC-5 e 5TE.....	17
4.2.2 Sensor YL-69.....	19
4.3 Calibração de sensores capacitivos.....	19
4.4 Automação com microcontroladores no monitoramento da umidade do solo.....	21
4.5 Plataforma ThingsBoard.....	23
4.6 Caracterização dos solos de referência com maior expressividade do Estado de Pernambuco.....	23
4.6.1 Argissolo Vermelho-Amarelo.....	23
4.6.2 Neossolo Flúvicos.....	23
4.6.3 Planossolo Nátrico.....	24
4.6.4 Neossolo Litólico.....	24
4.6.5 Vertissolo.....	25
5. REFERÊNCIAS.....	25
CAPÍTULO II: CALIBRAÇÃO ESPECÍFICA DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO EM LABORATÓRIO.....	33
1. INTRODUÇÃO.....	33
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
2.1 Classes de solos estudadas.....	35
2.2 Caracterização da área experimental.....	37
2.3 Amostragem do solo e preparo das amostras.....	37
2.3.1 Cálculo da massa do solo.....	39
2.4 Procedimento para instalação e calibração dos sensores.....	40

2.5 Análises estatísticas	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4. CONCLUSÕES	49
5. REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO III: DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE UMIDADE DO SOLO COM SECAGEM EM MICRO-ONDAS	54
1. INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	55
2.1 Local de estudo	55
2.2 Amostragem e preparo do solo	55
2.3 Uso do micro-ondas	55
2.3.1 Calibração do micro-ondas	55
2.3.2 Determinação do Fator f	56
2.3.3 Curva de calibração do sensor	56
2.4 Análise estatística	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.1 Metodologia de calibração proposta	57
3.2 Curva de calibração	59
4. CONCLUSÕES	61
5. REFERÊNCIAS	62
CAPÍTULO IV: DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO	64
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAL E MÉTODOS	65
2.1 Componentes Hardware	65
2.2 Interface Arduino IDE	66
2.3 Linguagem de programação	66
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4. CONCLUSÃO	69
5. REFERÊNCIAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização geográfica do estado de Pernambuco (A), distribuição espacial dos pontos de coleta dos solos (B), localização dos pontos de coleta dos solos em cada cidade: Arcoverde (C), Cachoeirinha (D), Carpina (E), Serra Talhada (F) e Sertânia (G).	35
Figura 2. Sequência para o acondicionamento no vaso do conjunto brita+bidim+solo+sensores (1 a 5).	37
Figura 3. Curva de secagem dos solos estudados.	43
Figura 4. Curvas de calibração do Planossolo Nátrico (A), Neossolo Litólico (B), Neossolo Flúvico (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (D) e Vertissolo (E), relacionando as leituras dos sensores e a umidade volumétrica desde a saturação até a secagem.	45
Figura 5. Curva de secagem do Argissolo Vermelho-Amarelo em micro-ondas e calibração padrão (estufa).	59
Figura 6. Curvas de calibração dos sensores YL-69 e EC-5 no Argissolo Vermelho-Amarelo com base na secagem em micro-ondas.	60
Figura 7. Componentes do protótipo: sensor de umidade YL-69, relé e minibomba conectados à placa ESP8266.	67
Figura 8. Void Loopsensor, parte do código que determina o acionamento do sistema de irrigação do protótipo.	68
Figura 9. Monitoramento da umidade do solo e Status da bomba de irrigação em tempo real, utilizando IOT e plataforma Thingsboard.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características da placa ESP8266 NodeMCU.....	22
Tabela 2. Classificação de desempenho conforme o valor do coeficiente “c”.....	42
Tabela 3. Classificação de acurácia de acordo com valor do RMSE.	42
Tabela 4. Características físicas dos solos estudados.....	44
Tabela 5. Equações de calibração específicas definidas para cada tipo de solo e sensores de umidade.....	46
Tabela 6. Índices estatísticos obtidos com base na comparação da umidade volumétrica estimada pelos sensores após a calibração e a umidade volumétrica padrão, com a classificação de desempenho das equações de calibração propostas nessa pesquisa.	47
Tabela 7. Erros estatísticos para os sensores EC-5, 5TE e YL-69 e os diferentes tipos de solo.	48
Tabela 8. Valores do Fator f com secagem em estufa e em micro-ondas para o Argissolo-Vermelho-Amarelo (AVA).....	58
Tabela 9. Índices estatísticos das leituras efetuadas pelos sensores EC-5 e YL-69 no Argissolo Vermelho-Amarelo antes e depois da calibração com base na secagem em micro-ondas.	60
Tabela 10. Erros estatísticos das leituras efetuadas pelos sensores EC-5 e YL-69 no Argissolo Vermelho-Amarelo antes e depois da calibração com base na secagem em micro-ondas.	61

RESUMO

O conteúdo de água no solo é um dos parâmetros importantes para a irrigação eficiente. Com avanço da tecnologia, o monitoramento da umidade em tempo real torna-se viável, permitindo o uso racional da água e energia e aumentando a produtividade agrícola. Objetiva-se com esta pesquisa calibrar e validar os sensores capacitivos dos modelos YL-69, EC-5 e 5TE, em cinco classes de solo do estado de Pernambuco, visando o monitoramento em tempo real da umidade do solo, bem como, desenvolver metodologia simplificada para calibração dos sensores utilizando micro-ondas. Foram utilizadas cinco classes de solos de referência do estado de Pernambuco: Vertissolo, Neossolo Flúvico, Planossolo Nátrico, Neossolo Litólico, e Argissolo Vermelho-Amarelo, sendo os quatro primeiros localizados na mesorregião sertão e o último na mesorregião da Zona da Mata de Pernambuco. Para cada classe de solo foram coletadas amostras deformadas e não deformadas na profundidade de 0-0,40 m. O solo foi acondicionado em vasos de 5 L, reproduzindo a densidade do solo no campo, compostos por uma camada basal de 5 cm de brita, coberta com manta geotêxtil bidim, para facilitar a drenagem da água e evitar a perda de solo. Para cada classe de solo foram utilizadas cinco repetições, totalizando 25 vasos, nos quais foram instalados os três sensores. A metodologia simplificada de calibração, foi realizada com o Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando utensílios e equipamentos facilmente acessíveis (micro-ondas, balança e béquer). Para o monitoramento em tempo real da umidade do solo foi desenvolvido um sistema com placa micro-controladora ESP8266 para automatizar um protótipo, acionando e desligando a bomba de acordo com umidade do solo medida pelos sensores. A exatidão das medidas estimadas pelos sensores foram acima de 0,99 para o índice de concordância com a umidade real, assim todas as equações de calibração propostas foram classificadas com ótimo desempenho. A metodologia simplificada para calibração de sensores de umidade do solo, proposta nesta pesquisa, gerou uma equação de calibração em tempo reduzido e com índice de desempenho similar à equação gerada da forma tradicional, atendendo às necessidades do produtor rural. O protótipo, desenvolvido nesta pesquisa, simulou a automação de forma segura de um sistema de irrigação, representando uma solução de baixo custo, para monitorar umidade do solo e, disponibilizar os dados para tomada de decisão, por meio de uma plataforma IOT.

Palavras-Chave: Automação. Irrigação. Método gravimétrico. Micro-ondas. Calibração.

ABSTRACT

Knowing the water content in the soil is one of the important parameters to obtain efficient irrigation. With the advancement of technology, monitoring water in the soil in real time becomes feasible and accurate, allowing the rational use of water and energy, promoting increased productivity and profitability in agriculture. This research aims to calibrate and validate the capacitive sensors of the YL-69, EC-5 and 5TE models, in five soil classes in the state of Pernambuco, aiming at real-time monitoring of soil moisture, as well as developing a simplified methodology for calibration of sensors using microwaves. Five classes of reference soils from the state of Pernambuco were used: *Vertissolo*, *Neossolo Flúvico*, *Planossolo Nátrico*, *Neossolo Litílico*, and *Argissolo Vermelho-Amarelo*, the first four being in the Semiarid mesoregion and the last in the Forest Zone mesoregion of Pernambuco. For each soil class, deformed and non-deformed samples were collected at a depth of 0-0.40 m. The soil was placed in 5 L pots, reproducing the soil density in the field, composed of a basal layer of 5 cm of gravel, covered with bidim geotextile blanket, to facilitate water drainage and prevent soil loss. For each soil class, five replications were used, totaling 25 pots, in which the three sensors were installed. The simplified calibration methodology was carried out with the *Argissolo Vermelho-Amarelo* using easily accessible utensils and equipment (microwave, scale, and beaker). For real-time monitoring of soil moisture, a system was developed with an ESP8266 micro-controller board to automate a prototype activating and stopping the pump according to the soil moisture measured by the sensors. The accuracy of measurements estimated by the sensors were above 0.99 for the agreement index with the real soil moisture, then all the proposed calibration equations were classified as optimal performance. The simplified methodology for calibrating soil moisture sensors, proposed in this research, generated a calibration equation in a reduced time and with a performance index similar the equation generated in the traditional way, meeting the needs of farmers. The prototype, developed in this research, simulated the safe automation of an irrigation system, representing a low-cost solution to monitor soil moisture and make the data available for decision making, through an IOT platform.

Keywords: Automation. Irrigation. Gravimetric Method. Microwave. Calibration

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL, HIPÓTESES, OBJETIVOS E REVISÃO DE LITERATURA

1. INTRODUÇÃO GERAL

O interesse pelos sistemas agrícolas inteligente tem crescido rapidamente, impulsionado pelos aportes de novas tecnologias proporcionados pela agricultura 4.0. Através da robótica agrícola, Internet das Coisas, capacidade de comando em nuvem, bancos de dados e o uso de dados em tempo real, a agricultura inteligente pode melhorar a gestão hídrica, garantindo a sustentabilidade do ambiente (Boursianis et al., 2022; Raja & Vyas, 2018; Jayaraman et al., 2016).

O uso da água de forma sustentável é essencial para se obter sucesso na produção agrícola, assim como, evitar a escassez para as futuras gerações (Geronimo et al., 2015). Souza & Matsura (2004) já relatavam que informações sobre a distribuição de água no solo são fundamentais e afeta diretamente a produtividade das culturas. Portanto, o emprego de tecnologias que permitam aplicar água na quantidade e momento certo é fundamental no setor agrícola.

O manejo da irrigação nos cultivos requer a detecção do conteúdo de água do solo, que é um parâmetro indispensável no planejamento de irrigação, o qual se comporta de forma variável, devido ao clima, irrigação, drenagem e outras práticas agrícolas (Souza et al., 2016; Cárdenas-Lailhacar & Dukes, 2014). Dessa forma, para manter o teor de água no solo adequado ao desenvolvimento das plantas é necessário o monitoramento em tempo real (Ramos et al., 2014).

Conhecer o conteúdo de água no solo é importante para melhorar a eficiência do uso da água, auxiliar na tomada de decisão durante o cultivo, e por consequência reduzir o consumo de energia devido a facilidade na gestão da água. Para tal, existem métodos diretos e indiretos que determinam e monitoram a água presente no solo. O método direto, considerado padrão, determina a umidade gravimétrica por meio da obtenção da massa de água. No entanto, essa metodologia apresenta algumas desvantagens, como o tempo de 24h para se obter uma leitura de umidade e a necessidade de equipamentos específicos, como balança de precisão e estufa para secagem do solo.

No método padrão as amostras de solo são levadas ao laboratório para determinação da umidade gravimétrica, tornando essa técnica laboriosa (Paraskevas et al., 2012). Por outro lado, a gravimetria é adotada para calibração de métodos indiretos, os quais surgiram em contrapartida às desvantagens do método padrão. No monitoramento

indireto da umidade do solo é possível prosseguir com leituras no mesmo local, diminuir a perturbação do solo e obter respostas rápidas (Silva et al., 2020).

Os métodos indiretos mais difundidos são: a tensiometria; moderação de nêutrons; condutividade térmica; resistividade elétrica e constante dielétrica do solo, sendo este amplamente utilizado atualmente (Paraskevas et al., 2012; Souza et al., 2016; Bello et al., 2019). Vale destacar as técnicas que se baseiam na constante dielétrica do solo: reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a reflectometria no domínio da frequência (FDR).

As sondas FDR de capacitância e sensores resistivos (eletromagnéticos) se destacam no mercado pois são portáteis, possuem capacidade de operação em uma larga faixa de umidade do solo, podem automatizar a coleta de dados e não exige ajustes após a instalação no solo (Pereira et al., 2021; Silva et al., 2019). Esses equipamentos são constituídos por um par de eletrodos ou placas metálicas condutoras, dispostas em paralelo, com material isolante separando as placas, formando assim um capacitor. A capacitância modifica de acordo com a quantidade de moléculas de água livres no meio, devido a essa alteração é possível estimar indiretamente a umidade do solo (Silva et al., 2019; Bello et al., 2019).

A depender das características físicas e químicas dos solos, a medição de umidade pelos métodos eletromagnéticos pode ser comprometida e imprecisa, causando superestimativas ou subestimativas do conteúdo de água no solo (Evet et al., 2012). Segundo a literatura as principais características do solo são alto teor de matéria orgânica; maior presença de argilominerais; alta salinidade; e densidade do solo (Provenzano et al., 2016; Provenzano et al., 2020). Por isso, alguns parâmetros devem ser levados em consideração para escolher o melhor equipamento a ser utilizado, diante das limitações relacionadas à instalação, programação, custos, exatidão e precisão dos valores medidos.

Os métodos eletromagnéticos geralmente necessitam de algum tipo de calibração em campo ou laboratório, a fim de validar a exatidão e precisão dos equipamentos utilizados de acordo com os atributos do solo (Souza et al., 2013; Vaz et al., 2013; Silva et al., 2022). Assim, essa é considerada uma das desvantagens em utilizar esses equipamentos, no entanto, uma vez calibrados para um determinado tipo de solo, em laboratório ou em campo, os erros nas leituras podem ser corrigidos.

A automação nas leituras de umidade dos equipamentos citados pode promover sistema de irrigação inteligentes, que aplicam a água no momento certo e na quantidade certa buscando otimizar a produção, compensar impactos ambientais adversos e

promover o uso eficiente da água (Bwambale et al., 2022). Atualmente, sistemas tecnológicos, antes considerados complexos dentro da agricultura, têm sido inseridos na maioria dos equipamentos eletrônicos visando auxiliar as atividades agrícolas. Dentre esses sistemas pode-se destacar: inteligência embarcada, automação, IOT's, rede de sensores locais, e processamento de dados em nuvem (Kritikos, 2017; Massruhá & Leite, 2016).

Os benefícios da irrigação automatizada requerem relevantes aplicações de tecnologias que proporcionem o uso racional dos recursos hídricos e o desenvolvimento da agricultura intensiva e sustentável. A realização de pesquisas científicas que caracterizem equipamentos acessíveis, adaptados à diferentes tipos de solo é essencial, visando atender à demanda dos agricultores. Em termos de sensores de umidade do solo espera-se leituras confiáveis e a aplicabilidade no monitoramento, em tempo real, do conteúdo de água no solo, como ferramenta de auxílio ao manejo de irrigação automatizado.

2. HIPÓTESES

- O sensor de baixo custo (modelo YL-69) pode ser utilizado em alternativa aos outros sensores de umidade do solo com alto custo, mantendo a consistência dos resultados;
- As variações de umidade do solo podem ser monitoradas pelos sensores dos modelos YL-69, EC-5 e 5TE, com coerência e precisão em solos representativos para agricultura irrigada no estado de Pernambuco, quando especificamente calibrados;
- A calibração padrão em laboratório pode ser substituída por uma calibração simplificada, a nível de fazenda, mantendo a precisão e exatidão dos dados gerados;
- A placa ESP8266 pode ser utilizada como alternativa de baixo custo para o monitoramento de umidade do solo em conjunto com sensores capacitivos.

3. OBJETIVO GERAL

Calibrar os sensores capacitivos de diferentes modelos (YL-69, EC-5 e 5TE) em solos de referência do estado de Pernambuco, visando aprimorar a aplicação no monitoramento da umidade do solo, em tempo real, para subsidiar o manejo de irrigação.

3.1 Objetivos Específicos

- Calibrar os sensores capacitivos em função de diferentes conteúdos de água determinados pelo método gravimétrico, considerado padrão, e a tensão do sinal analógico de resposta dos sensores;
- Comparar as curvas de calibração propostas pelos fabricantes com a calibração específica, para cada tipo de solo, desenvolvida nesta pesquisa, e assim, identificar possíveis diferenças nos indicadores de acurácia;
- Avaliar a precisão e exatidão dos sensores em solos que apresentam expansão pelo umedecimento e contração devido à dessecação;
- Desenvolver metodologia simplificada para calibração dos sensores à nível da fazenda e comparar com os resultados obtidos com a calibração em laboratório sob elevado rigor científico; e,
- Desenvolver código de programação para atender diferentes curvas de calibração do sensor capacitivo YL-69 no monitoramento da umidade do solo em tempo real.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Agricultura 4.0 na irrigação

A técnica de irrigar consiste na reposição de água de maneira artificial, atendendo as demandas hídricas das culturas que não são supridas pela água da chuva. A agricultura irrigada não é dependente das variações climáticas que ocasionam irregularidades de precipitações pluviométricas, podendo dessa forma, se manter produtivo ao longo de todas as épocas do ano. Entretanto, a agricultura irrigada é uma prática agrícola intensiva e fortemente dependente de água e de energia (Rodrigues & Domingues, 2017), sendo necessário o desenvolvimento de técnicas que subsidiem o manejo racional desses recursos (Hernandez, 2024).

Ao longo das últimas décadas, as pesquisas, que envolvem a técnica de irrigação, proporcionaram um aporte de tecnologias e informações que contribuíram para desenvolver sistemas inteligentes e sustentável de produção agrícola (Silva et al., 2020).

A agricultura 4.0 apresenta a grande revolução do setor agrícola, com iniciativas e aplicações baseadas em dados remotos de várias áreas produtivas economicamente viáveis (Spanaki et al., 2021). Atualmente existe maior facilidade em comparação a agricultura de 10 anos atrás, pois aplicações associadas a sensores, armazenamento e processamento de dados em nuvens, expansão de redes móveis e a transmissão de conjuntos de dados em campo evoluíram ao redor do mundo (Mikalef et al., 2019).

Silveira et al. (2021), analisando a abordagem da Agricultura 4.0 em diferentes trabalhos, destacaram que a agricultura digital pode gerar interesse em transformar as operações e processos tradicionais em intensivos, com dados digitais analisados auxiliando na tomada de decisões práticas. Segundo Abioye et al. (2020), um sistema de monitoramento eficiente para os parâmetros que afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas é vital para projetar o controle da irrigação eficiente, pois melhoram substancialmente a produção de alimentos com perda mínima de água.

As tecnologias associadas ao manejo correto de água e solo, contribuem de maneira assertiva para sanar problemas de quando e quanto irrigar, atuando principalmente na economia dos recursos hídricos e na quantidade real necessária de água que a planta precisa para produzir. No entanto, por temor de não atingir a demanda hídrica da cultura, muitos produtores exageram no fornecimento de água, gerando desperdícios tanto de água como de energia (Bernardo et al., 2008).

A gestão da irrigação exige cuidados, pois além de problemas relacionados ao desempenho dos sistemas surge a possibilidade de salinização dos solos, como consequência da irrigação ineficiente (Andrade Junior et al., 2006). Salienta-se que a deficiência de água pode limitar a obtenção de produtividade elevada e produtos de boa qualidade, mas o excesso também pode ser prejudicial (Silva & Marouelli, 1998). Para atenuar a lacuna sobre o momento e a quantidade correta de reposição de água no cultivo, é imprescindível que tecnologias sejam utilizadas para monitorar pontualmente as variáveis climáticas e os atributos físico-hídricos do solo, fornecendo subsídios para a caracterização da área e manejo eficiente.

O monitoramento da umidade do solo, no contexto da irrigação de precisão, também envolve a coleta de dados que refletem com precisão e em tempo real o estado da relação solo-planta-clima por meio do uso de redes de sensores sem fio, programação, criação de aplicativos, e da Internet e Tecnologia das Coisas (IoT) (Abioye et al., 2020; Souza et al., 2019). Consequentemente, tem sido possível melhorar a exatidão e otimização dos sistemas empregados, auxiliando a tomada de decisão mais segura.

Diversas formas de manejar a irrigação são comumente utilizadas, sejam baseadas nas medidas de umidade do solo (via solo) (Contreras et al., 2017), sejam baseadas em dados climáticos, notadamente pela evapotranspiração (via clima) (Haghverdi et al., 2021). Os manejos via solo e via clima, consideram parâmetros essenciais que são monitorados para o controle de irrigação de precisão, deixando evidente a necessidade de equipamentos instalados na área para mensuração das variáveis de interesse.

O monitoramento espaço-temporal do teor de umidade do solo é necessário para garantir o melhor planejamento de irrigação, visando calcular a quantidade de água e o momento adequado para sua aplicação, viabilizando a automação de sistemas e do gerenciamento desses dados (Silva et al., 2020).

4.2 Sensores capacitivos

Os métodos indiretos de determinação de umidade de solo são os mais empregados nos estudos de monitoramento de água no solo, devido à facilidade, rapidez e repetibilidade de medidas em um determinado perfil do solo (Silva et al., 2008).

A estimativa de umidade do solo pode ser realizada por sensores dielétricos baseados em reflectometria no domínio da frequência (FDR), reflectometria no domínio do tempo (TDR) e capacitância. Esses equipamentos oferecem uma alternativa prática e econômica ao método gravimétrico, e a outros dispositivos baseados em moderação de nêutrons, considerados os métodos mais exatos para quantificação e estimativa do conteúdo de água do solo (Abioye et al., 2020; Dobriyal et al., 2012; Topp, 2003).

Sensores de umidade do solo baseados em capacitância são de baixo custo e podem ser acoplados a sistemas de monitoramento em tempo real. A estimativa da umidade do solo acontece por meio da alteração na constante dielétrica no meio, a qual é diretamente relacionada ao conteúdo de água no solo (Zazueta & Xin, 1994).

De acordo com Shigeta et al. (2018), a detecção de umidade do solo em tempo real usando sensores é aplicável para medição de fluxos de umidade do solo correlacionando o teor volumétrico de água do solo e a capacitância das sondas inseridas no solo. Esses equipamentos determinam a umidade do solo de maneira indireta e não destrutiva (Dobriyal et al., 2012).

4.2.1 Sensores EC-5 e 5TE

Entre os sensores capacitivos, o modelo EC-5 (Meter Group, Inc. USA) têm dimensões de 0,089 x 0,018 x 0,007 m, operam em frequência de 70 MHz e possuem facilidade de instalação em campo por apresentar duas hastes curtas (0,05 m) que

favorecem a inserção do sensor no solo (Meter Group, 2019). As hastes são formadas por sílica com a parte da placa sensível, composta por cobre e revestida em acrílico. O volume de solo medido em torno do sensor compreende $0,003 \text{ m}^3$, o tempo de resposta de cada medição é de aproximadamente 0,2 ms, e a temperatura de operação é entre -40° à 60° C (Meter Group, 2019).

O sensor EC-5 foi projetado para trabalhar de forma mais eficiente com leituras realizadas pelos dispositivos de dataloggers da Meter Group (ZL6, série EM50/60, Em5b) ou qualquer sistema de aquisição de dados capaz de excitar de 2,5 a 3,6 VCC e medir tensão de extremidade única com resolução maior ou igual a 12 bits. Além disso, esse sensor se comunica com todos os dispositivos de leitura Meter Group usando 3 ou 5 V de alimentação (Meter Group, 2019).

O sensor capacitivo de modelo 5TE (Meter Group, Inc. USA) possui funcionamento similar ao EC-5, quanto às leituras da umidade do solo, com o diferencial de possuir uma célula de dois eletrodos e um termistor embutido, que mede respectivamente a condutividade elétrica (0 à 23 dS m^{-1}) aparente do solo e a temperatura (-40° à 60° C). O sensor é composto por três hastes com dimensões de $0,1\text{m} \times 0,032\text{m} \times 0,07\text{m}$ com espaçamento de $0,01\text{m}$ entre os pinos laterais. Enquanto a célula de condutividade é formada pelo pino central e uma haste lateral, o capacitor é formado pelo pino central e pela outra haste lateral (Meter Group, 2016). O tempo de resposta para cada medição é de aproximadamente 150 ms e volume de solo medido em torno do sensor de $0,00075 \text{ m}^3$.

Ambos os sensores possuem equações de calibração sugeridas pelo fabricante para solos minerais (Meter Group, 2019; Topp et al., 1980), equações 1 e 2.

$$\theta_{EC-5} = (8,5 * 10^{-4})(RAW) - 0,48 \quad \text{Equação 1}$$

$$\theta_{5TE} = 4,3 * 10^{-6} \varepsilon_a^3 - 5,5 * 10^{-2} \varepsilon_a^2 + 2,92 * 10^{-2} \varepsilon_a - 5,3 * 10^{-2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, θ é a umidade do solo em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, RAW é o valor de saída no datalogger do fabricante, e ε_a é a permissividade dielétrica. O valor de ε_a pode ser obtido pela equação 3, para ser aplicado na equação de calibração do 5TE:

$$\varepsilon_a = \frac{RAW}{50} \quad \text{Equação 3}$$

No entanto, diversos autores sugerem que sejam realizadas calibrações específicas para diferentes tipos de solo (Saito et al., 2013; Fares et al., 2015; Gonçalves et al., 1999;

Dorneles e Ruivaro, 2012), pois reduz a incerteza de medição dos sensores em comparação com a equação padrão recomendada pelo fabricante.

4.2.2 Sensor YL-69

O sensor capacitivo do modelo YL-69 é uma alternativa de baixo custo comparado aos sensores abordados anteriormente, sendo composto por duas sondas com distância entre si de 1,3 cm, que medem a resistência que passa entre elas, um chip comparador LM939 com um potenciômetro digital que converte os sinais disponibilizados pelos sensores e envia para o microcontrolador (Gavali et al., 2016).

A estimativa da umidade do solo é realizada através do módulo do sensor que produz alto nível de resistência causando maior tensão de saída quando a umidade do solo é baixa, o que significa que quanto maior a umidade do solo menor resistência elétrica (Kolapkar et al., 2016). A tensão de saída do sensor fornece uma relação inversamente proporcional com a umidade do solo, sendo assim, a saída analógica capta 0 quando há 100% de umidade e 1024 para 0% de umidade (Katole & Umale, 2016).

Os sensores YL-69 representam uma proposta para monitoramento em pesquisas acadêmicas e em sistemas simples de irrigação, por seu baixo custo, versatilidade e uso de microcontrolador que permite a automação do sistema. Contudo, se faz necessária a calibração para diferentes tipos de solo não só para conversão da tensão de saída em umidade do solo, como também para elevar a precisão e exatidão das leituras (Jimenez et al., 2019; Cardoso et al., 2018).

4.3 Calibração de sensores capacitivos

A calibração de sensores dielétricos quando realizada especificamente para cada tipo de solo, permite a obtenção de fatores de correção para as leituras de umidade, o que estabelece estimativas com menor incerteza do conteúdo atual de água no solo. O método gravimétrico é utilizado como método padrão na calibração dos sensores de umidade do solo. Desse modo, é possível obter a relação entre conteúdo volumétrico de água e a permissividade elétrica aparente do solo, determinada pelo instrumento (Dorneles e Ruivaro, 2012). A partir das medidas gravimétricas é possível confeccionar curvas características de umidade de solo, por meio de modelos matemáticos e correlacionar com as mensurações do teor de água no solo estimado pelos sensores. A equação de calibração estabelecida especificamente para um solo, pode ser sempre utilizada para correção da determinação de umidade obtida por aquele instrumento.

Cardoso et al. (2018) calibraram sensores capacitivos construindo um modelo matemático ($R^2 = 0,99$) envolvendo diferentes níveis de umidade do solo (10, 20, 30, 40 e 50%), visando determinar a capacitância do sensor em função da porcentagem da água de cada amostra, por fim associaram os valores da umidade aos potenciais de água correspondentes no solo, por meio da curva de retenção de água do solo, tornando possível utilizar um sistema de irrigação automatizado com Arduino UNO.

Segundo Ojo et al. (2014), que utilizaram o sensor modelo EC-5 para Vertissolos com textura argilosa (67 a 76% de argila), esse sensor apresentou relação linear à variação de umidade do solo, representada pela equação $\theta = 0,0004x - 0,0752$, em que θ é a umidade volumétrica do solo em $m^3 m^{-3}$, e x é o valor do sinal de saída no datalogger do sensor em mV, obtendo $R^2 = 0,89$. Miranda et al. (2007) utilizaram sensores modelo EC-10 para o Neossolo Quartzarênico com textura arenosa (94,4% de areia) e, também observaram resposta linear à variação de umidade do solo, representada pela equação $\theta = 0,0009x - 0,2778$, com $R^2 = 0,99$. Os elevados valores de R^2 sinalizam que os sensores podem ser utilizados em solos de diferentes texturas.

Jiménez et al. (2019), calibrando sensores YL-69 em Neossolo Regolítico e Latossolo Amarelo, obtiveram resposta linear à variação de umidade com $R^2 = 0,96$ e $0,95$, respectivamente para cada tipo de solo após calibração. Os autores observaram que antes da calibração a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro absoluto médio (EAM) apresentaram valores de 0,16 e 0,06, respectivamente e, após a calibração, esses indicadores foram reduzidos para 0,01, assim como, a classificação de desempenho (c) do sensor YL-69 que passou de bom e muito bom para excelente em ambos os solos testados. Os autores ainda sugerem que o sensor YL-69 devidamente calibrado pode substituir os sensores EC-5 e 5TE para determinar o conteúdo de água nos solos estudados.

Silva et al. (2022), avaliando e calibrando dois sensores comerciais, Power Flower e Flower Care com base no método padrão (gravimétrico) e sondas de TDR, obtiveram resposta linear com precisão de $R^2 = 0,99$ e erro médio de $\pm 0,06$. Os autores também evidenciaram que a sonda TDR, desde que calibrada para o solo específico, pode substituir o método padrão (gravimétrico) dentro da metodologia de calibração de sensores de umidade do solo.

Vários autores sugerem que sensores utilizados para estimativa de umidade de solo, requerem calibrações locais (em campo ou em laboratório), a fim de melhorar a exatidão

na medição (Cruz, et al., 2010; Souza et al., 2013; Visconti et al., 2014; Mizuguchi et al., 2015; Silva et al., 2022).

4.4 Automação com microcontroladores no monitoramento da umidade do solo

A automação está envolvida na agricultura 4.0, uma vez que esta forma de produção agrícola eleva o patamar da automação ao nível de resposta imediata das atividades e/ou processos em tempo real, gerando retornos dos sistemas, a partir do recolhimento de dados do campo ou de outra fonte de dados externa (Ribeiro et al., 2018; Cosmo et al., 2022). Os sistemas de automação em tempo real na irrigação, devem ter resposta interativa, e determinada de acordo com variáveis mensuradas advindas do meio externo, como a umidade do ar e do solo, volume de chuva, temperatura, entre outras (Oliveira et al., 2016).

O processo de automação na irrigação é obtido pela integração de tecnologias de informação, comunicação e controle do sistema de irrigação, com intuito de atingir o uso eficiente dos recursos hídricos, bem como economia energética, enquanto minimiza o impacto ambiental (Zacepins et al., 2012; Capraro et al., 2018). Os sensores de capacitância são adequados para o monitoramento do conteúdo de água no solo, em sistema de irrigação automatizado na produção em ambientes protegidos devido à fácil manutenção e confiabilidade (Jones, 2004; Van Iersel et al., 2013). Esses sensores utilizados em conjunto com microcontroladores podem auxiliar na tomada de decisão, com o monitoramento e gerenciamento precisos do conteúdo de água do solo e das necessidades hídricas da cultura.

Sistemas embarcados são compostos por microcontroladores, que permitem a execução de ações que atendem diferentes necessidades, com baixo-custo e fácil implementação. A plataforma Arduino, por exemplo, é composta por hardware e software embarcado, podendo ser prototipada de forma segura e de baixo custo (Kondaveeti et al., 2021). Vários estudos detalham a aplicação do Arduino na agricultura, entre eles, Bitella et al. (2014) e Athani et al. (2017) que desenvolveram sistemas de monitoramento da umidade do solo. A plataforma Arduino é uma ferramenta aliada na agricultura de precisão (Mesas-Carrascosa et al., 2015), podendo ser utilizada para facilitar o manejo de irrigação.

Cardoso et al., (2018) utilizaram um Arduino na automação de um sistema de irrigação com fitas gotejadoras, onde o manejo de água foi baseado no potencial de água no solo, monitorado por um sensor capacitivo. Estes autores concluíram que a automação

demonstra excelente eficácia e eficiência no monitoramento de água no solo, dispensando a necessidade de interferência humana no manejo da irrigação.

Diversos modelos de placas microcontroladoras estão disponibilizadas no mercado, e podem ser programadas em diversas linguagens tradicionais. O modelo ESP8266 NodeMCU é um microcontrolador produzido pela empresa Espressif Systems, com sistema de comunicação WiFi, processador próprio e de baixo custo, o que lhe confere grande diferencial. Apesar de ter sido desenvolvido para ser programado na linguagem LUA² (Peixoto, 2021), o módulo permite utilizar a interface de desenvolvimento do Arduino (Arduino IDE), que utiliza a linguagem c++ com pequenas modificações.

O módulo ESP8266 é alimentado por uma conexão USB, com uma tensão de 5V ou então através do pino Vin, para uma conexão externa. Internamente, a tensão de trabalho do módulo é de 3,3V, provida pelo regulador de tensão AMS1117 (Peixoto, 2021). Um dos principais componentes do módulo é o chip ESP8266, que propicia a conexão WiFi com um modem e assim, permite conexão à internet. Outras características podem ser evidenciadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características da placa ESP8266 NodeMCU.

Parâmetros	ESP8266 NodeMCU
Processador	32 bits RISC Tensilica Xtensa L106
Frequência	80Mhz a 160Mhz
Memória RAM	64kB para instruções, 96kB para dados
Memória Flash	4MB
WiFi	IEEE 802.11 b/g/n WiFi
Canal Analógico	1 porta de entrada, 10 bits
Portas digitais	9 portas (tensão 3,3V, corrente máxima 15mA)

Fonte: Peixoto (2021).

Para que ocorra a conexão do microcontrolador com a internet, algumas ações devem ser tomadas, tanto no hardware quanto no protocolo para troca de mensagens (Lavratti, 2016). Uma vez estabelecida, um sensor de temperatura e umidade pode enviar suas leituras via internet para um computador, um dispositivo mobile, ou até mesmo para um microcontrolador que irá tomar alguma ação frente a esses dados (Peixoto, 2021), caracterizando uma placa ideal para projetos envolvendo IoT.

4.5 Plataforma ThingsBoard

Para acompanhar o desenvolvimento da tecnologia, as plataformas de IoT surgem como alicerces facilitadores do gerenciamento e automação de dispositivos, tendo como característica principal adaptabilidade a diferentes projetos e equipamentos. O ThingsBoard é uma plataforma de código aberto (open source) que permite a conectividade de dispositivos por meio de protocolos IoT padrão do setor - MQTT, CoAP e HTTP, além de oferecer suporte às implantações locais e na nuvem. O ThingsBoard permite configurar dashboards de IoT personalizáveis, com vários widgets que visualizam dados de vários dispositivos conectados. Uma vez criados os widgets, o usuário pode ter acesso às informações do projeto em tempo real e em qualquer lugar do mundo (ThingsBoard, 2022).

4.6 Caracterização dos solos de referência com maior expressividade do Estado de Pernambuco

4.6.1 Argissolo Vermelho-Amarelo

O Argissolo Vermelho-Amarelo possui textura média/argilosa (SIBCS, 2018) geralmente situado em relevo suave ondulado. Segundo Ribeiro et al. (1999) esse solo pertence à ordem dos Argissolos, e são caracterizados pela presença de B textural de cor amarelada, com argila de atividade baixa, saturação por bases baixa e presença do caráter coeso.

Esses solos estão distribuídos em associações com os Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Espodossolos nos tabuleiros terciários da zona úmida costeira do litoral oriental do Nordeste. No estado de Pernambuco ocorrem nos tabuleiros ao norte da cidade de Recife, ocupando áreas dos municípios de Igarassu, Araçoiaba, Abreu e Lima, Cruz de Rebouças e Goiana (Ribeiro et al., 1999).

4.6.2 Neossolo Flúvicos

Os Neossolos Flúvicos são solos pouco desenvolvidos, derivados de sedimentos aluviais com horizonte A assente sobre o horizonte C, com caráter flúvico dentro de 1,5 m a partir da superfície do solo (SIBCS, 2018). Segundo Araújo Filho et al. (2000) essa classe de solo expressa boa fertilidade natural, no entanto, apresenta alto risco de inundação e salinização.

A distribuição geográfica se dá por todo o semiárido pernambucano, ao longo das planícies aluviais dos cursos d'água que cortam essa região, e suas principais ocorrências estão relacionadas com as planícies aluviais dos rios São Francisco, Moxotó, Pajeú e Brígida (Ribeiro et al., 1999).

4.6.3 Planossolo Nátrico

Planossolos Nátricos são solos pertencentes à ordem dos Planossolos com horizonte plânico e caráter sódico, sendo classificados como solos minerais e imperfeitamente ou mal drenados. Esses solos possuem horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve que contrasta de forma abrupta com o horizonte B imediatamente subjacente (SIBCS, 2018). A estrutura é colunar subsuperficial fortemente desenvolvida, decorrente da dispersão dos colóides de argila pela saturação por Na^+ e Mg^{2+} (Ibraimo et al., 2004). Tais solos são caracterizados por permeabilidade lenta ou muito lenta e geralmente com acentuada concentração de argila, e sua distribuição geográfica ocorre nas regiões semiárido do estado de Pernambuco (Ribeiro et al., 1999).

4.6.4 Neossolo Litólico

Os Neossolos Litólicos são solos constituídos por material mineral, apresentam características expressivas em relação ao material originário e possuem fragmentos grosseiros, devido à baixa intensidade de atuação do processo de intemperismo. Esses solos possuem contato lítico ou lítico fragmentário em torno de 0,50 m a partir da superfície, apresentando horizonte A ou hístico assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr, podendo admitir um horizonte B em início de formação. No entanto, sua espessura não satisfaz nenhum tipo de horizonte B diagnóstico (SIBCS, 2018).

Por serem solos rasos, suas características morfológicas se restringem praticamente às do horizonte A, o qual varia, em média, de 0,15 a 0,40 m de espessura, e sua cor, textura, estrutura e consistência, dependem do tipo do material de origem (Silva & Silva, 1997). A distribuição geográfica concentra-se, geralmente, na mesorregião do Sertão Pernambucano, com grande distribuição nas microrregiões Sertão Central e Sertão do Alto Pajeú (Ribeiro et al., 1999).

4.6.5 Vertissolo

Os Vertissolos são solos constituídos por material mineral com horizonte vértico iniciando dentro de 1,0 m a partir da superfície e relação textural insuficiente para caracterizar um horizonte B textural. Os Vertissolos possuem fendas verticais (slickensides) com pelo menos 0,01 m de largura, a partir da superfície até no mínimo 0,5 cm de profundidade, com exceção para solos rasos, e o teor de argila nesses solos precisam atender, nos 0,2 m superficiais, no mínimo 300 g kg⁻¹ de solo (SIBCS, 2018).

Adicionalmente, os Vertissolos apresentam alto potencial produtivo e boa fertilidade, embora suas principais limitações estejam relacionadas as propriedades físicas, tais como a textura argilosa a muito argilosa, o tipo de argila constituída em grande parte por argilominerais expansíveis 2:1, dureza quando secos, a plasticidade e pegajosidade quando úmidos, além permeabilidade e infiltração lenta (Aydinalp, 2010; FAO, 2014). Esses solos ocorrem em áreas tipicamente semiáridas, naturalmente sob vegetação de caráter xerófilo acentuado e apresentam pequena distribuição geográfica no estado de Pernambuco. Um subgrupo dessa classe de solo foi evidenciado em pequenas áreas do Sertão do Araripe, relacionado com a ocorrência de rochas da Formação Santana (Ribeiro et al., 1999).

5. REFERÊNCIAS

- Abioye, E. A.; Abidin, M. S. Z.; Mahmud, M. S. A.; Buyamin, S.; Ishak, M. H. I.; Rahman, M. K. I.A.; Otuoze, A. O.; Onotu, P.; Ramli, M. S. A. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, 105441, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>.
- Andrade Júnior, A. S.; Silva, E.F.F.; Bastos, E.A.; Melo, F.B.; Leal, C.M. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semiárido piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 38, n. 3, p. 317-321, 2006.
- Araújo Filho, J. C.; Burgos, N.; Lopes, O. F.; Silva, F. H. B. B.; Medeiros, L. A. R.; Mélo Filho, H. F. R.; Parahyba, R. B. V.; Cavalcanti, A. C.; Oliveira Neto, M. B.; Silva, F. B. R.; Leite, A. P.; Santos, J. C. P.; Sousa Neto, N. C.; Silva, A. B.; Luz, L. R. Q. P.; Lima, P.C.; Reis, R. M. G.; Barros, A. H. C. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos – UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 252 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa, 11).
- Athani, S.; Tejeshwar, C.H.; Patil, M.M.; Patil, P.; Kulkarni, R. Soil moisture observation using IoT enabled Arduino sensors with neural networks for improving soil management for farmers and predict seasonal rainfall for planning future harvest in North Karnataka-India, in: Proceedings of the 2017 International Conference on I-

SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud), pp. 43–48, **Palladam, India**, 2017. DOI: 10.1109/I-SMAC.2017.8058385.

Aydinalp, C. Some important properties and classification of vertisols under Mediterranean climate. **African Journal of Agricultural Research**, v.5, n.6, p. 449-452, 2010. DOI:10.5897/AJAR09.376.

Bello, Z. A.; Tfwala, C. M.; Van Rensburg, L. D. Evaluation of newly developed capacitance probes for continuous soil water measurement. **Geoderma**, Wageningen, v. 345, n. 1, p. 104-113, 2019.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. **Viçosa: UFV**, 2008. 596 p.

Bitella, G.; Rossi, R.; Bochicchio, R.; Perniola, M.; Amato, M. A novel low-cost open-hardware platform for observation soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**. V. 14, P. 19639–19659, 2014.

Boursianis, A.D., Papadopoulou, M.S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Karagiannidis, G., Wan, S., Goudos, S.K., 2020. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review. **Int. Things** **12**. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>.

Bwambale, E.; Abagale, F.K.; Anornu, G.K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. **Agricultural Water Management**, v. 260, n. 107324, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.

Capraro, F., Tosetti, S., Rossomando, F., Mut, V. Web-Based System For The Remote Monitoring And Management Of Precision Irrigation: a case study in. **Sensors**. v. 18, 3847, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18113847>.

Cárdenas–Lailhacar, B.; Dukes, M. D. Effect of temperature and salinity on the precision and accuracy of landscape irrigation soil moisture sensor systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 141, n. 7, p. 04014076, 2014.

Cardoso, G. G.G.; Carvalho, J.S.; Silva, J. E. F.A. Manejo da Irrigação na Cultura da Alface Via Arduino Uno R3. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 2, p. 273-285, 2018. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v23n2p273-285>.

Contreras, J. I.; Alonso, F.; Cánovas, G.; Baeza, R. Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level. Agronomic and environmental effects. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 26-34, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.025>.

Cosmo, N.; Marcos, B.; Galeriani, T. M. Introdução a Automação Agrícola: Automação nos Sistemas de Irrigação em Tempo Real. **Desafios** (Palmas), v.9.1, 179-93, 2022. Doi:10.20873/uftv9-8742.

Cruz, T.M.L.; Teixeira, A. dos S.; Canafístula, F.J.F.; Santos, C.C. dos; Oliveira, A.D.S. de; Daher, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

Dobriyal, P.; Qureshi, A.; Badola, R.; Hussain, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**. v.458–459, p. 110–117, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>.

Dorneles, J.G.L.; Ruivaro, C. Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH2O para manejo de irrigação. Vivências: **Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 8, n. 14, p. 210-218, 2012.

Evett, S.R.; Schwartz, R.C.; Casanova, J.J.; Heng, L.F. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. **Agricultural Water Management**. v. 104, p.1-9, 2012.

Fares, A.; Safeeq, M.; Awal, R.; Fares, S.; Dogan, A. Temperature and probe to-probe variability effects on the performance of capacitance soil moisture sensors in an Oxisol. **Vadose Zone Journal, Madison**, v. 3, p. 1-40, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2015.07.0098>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. p. 191, 2014. (World Soil Resources Reports 106). E-ISBN 978-92-5-108370-3.

Gavali, M.S.; Dhus, B.J.; Vitekar, A.B. A Smart Irrigation System for Agriculture Based on Wireless Sensors. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v.5, Issue 5, 2016.

Geronimo, J. A., Henriques, P. D., Carvalho, M. L. da S. Impactes do preço da água na agricultura no Perímetro Irrigado do Vale de Caxito. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.53, p.699-714, 2015. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-9479005304008>.

Gonçalves, A.C.A.; Folegatti, M.V.; Silva, A.P. Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em área irrigada por pivô central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-Brasil, v. 23, n. 1, p. 155-164, 1999.

Haghverdi, A.; Singh, A.; Sapkota, A.; Reiter, M.; Ghodsi, S. Developing irrigation water conservation strategies for hybrid bermudagrass using an evapotranspiration-based smart irrigation controller in inland southern California. **Agricultural Water Management**, v.245, 106586, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106586>.

Hernandez, F. B. T. Manejo da Irrigação. **Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos – Área de Hidráulica e Irrigação**. UNESP-Ilha Solteira-SP. 2024. Disponível em: < <https://www2.feis.unesp.br/irrigacao/curso3.htm>>. Acesso em: 11 de março de 2024.

Ibraimo, M. M.; Schaefer, C. E. G. R.; Ker, J. C.; Lani, J. L.; Rolim-Neto, F. C.; Albuquerque, M. A.; Miranda, V. J. Gênese e Micromorfologia de Solos Sob Vegetação Xeromórfica (Caatinga) na Região dos Lagos (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 695-712, 2004.

- Jayaraman, P.P., Yavari, A., Georgakopoulos, D., Morshed, A., Zaslavsky, A. Internet of things platform for smart farming: experiences and lessons learnt. **Sensors**. v.16, 1884, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16111884>.
- Jiménez, A. L. A. C.; Almeida, C.D.G.C.; Santos Junior, J. A.; Morais, J. E. F.; Almeida, B. G.; Andrade, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.195, p.104413, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104413.
- Jiménez, A. L. A. C.; Almeida, C.D.G.C.; Santos Junior, J. A.; Morais, J. E. F.; Almeida, B. G.; Andrade, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.195, p.104413, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104413.
- Jimenez, A. L. A. C.; Almeida, C.D.G.C.; Santos Junior, J. A.; Santos, C. S. Calibration of two capacitive soil moisture sensors in Ultisol. **Dyna (MEDELLÍN)**. v.87, p.75 - 79, 2020. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.75361>.
- Jones, H.G. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. **J. Expt. Bot.** v. 55, p. 2427–2436, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>.
- Katole, Y.; Umale, V. M. Automated Irrigation System using GSM and ARM. **International Journal of Modern Trends in Engineering and Research**, v. 3, n. 4, p. 709-716, 2016.
- Kolapkar, M. M.; Khirade, P. W.; Sayyad, S. B. Design and Development of Embedded System for Measurement of Humidity, Soil Moisture and Temperature in Polyhouse using 89E516RD Microcontroller. **International Journal of Advanced Agricultural Sciences and Technology**, v. 5, n. 1, p.96-110, 2016. DOI: <https://doi.org/10.23953/cloud.ijaast.230>.
- Kondaveeti, H.K.; Kumaravelu, N. K.; Vanambathina, S.D.; Mathe, S.E.; Vappangi, S. A. Systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Journal Comput. Sci. Ver.** v.40, p.100364. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>.
- Kritikos, M. Precision agriculture in Europe: Legal, social and ethical considerations. **Europäische Kommission**, Brüssel, 2017.
- Lavratti, F. Infográfico de alguns protocolos de rede para IoT. Embarcados, 15 de junho de 2016. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/infografico-protocolos-de-rede-para-iot/>. Acesso em: 29 dez. 2022.
- Massruhá, S. M. F. S.; Leite, M. A. De A. Agricultura Digital. RECoDAF – **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 2, n. 1, p. 72-88, 2016. ISSN: 2448-0452.
- Mesas-Carrascosa, F.J.; Santano, D.V.; Meroño, J.E.; De La Orden, M.S.; García-Ferrer, A. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture, **Biosyst. Eng.** V. 137, p. 73–83, 2015.
- Meter Group, 2016. 5TE Water Content, EC and Temperature Sensor: Operator's Manual. Version: March 11, 2016. METER Group. Disponível em:

http://publications.metergroup.com/Manuals/20435_5TE_Manual_Web.pdf. Acesso: 29 ago. 2022.

Meter Group. EC-5 Soil Moisture Sensors. METER Group, 2019. Disponível em: http://publications.metergroup.com/Manuals/20431_EC-5_Manual_Web.pdf Acesso: 05 dez. 2022.

Mikalef, P., Boura, M., Lekakos, G., Krogstie, J. Big data analytics capabilities and innovation: The mediating role of dynamic capabilities and moderating effect of the environment. **British Journal of Management**, v.30(2), p. 272–298, 2019. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.12343>.

Mizuguchi, J., Piai, J.C., França, J.A., França, M.B.M., Yamashita, K., Mathias, L.C. Fringing field capacitive sensor for measuring soil water content: design, manufacture, and testing. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 64, no. 1, pp. 212-220, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2014.2335911>.

Ojo, E.T.; Bullock, P.R.; Fitzmaurice, J. Field Performance of Five Soil Moisture Instruments in Heavy Clay Soils. **Sci. Soc. Am. J.** v. 79, p. 20-29, 2014. DOI:10.2136/sssaj2014.06.0250.

Oliveira, J. R.; Sasaki, K. K. T.; Pinto, P. S. P.; Costa, W. B. C. Controle de irrigação automatizado para pequenos produtores rurais com sistema de monitoramento e armazenamento de dados em tempo real e remoto. Bauru: AGB, 2016.

Oliveira, L. F. C.; Roque; C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 3, n. 4, p. 60-64, out./dez. 2016. DOI: 10.32404/rean.v3i4.1163.

Paraskevas, C.; Georgiou, P.; Ilias, A.; Panorás, A.; Babajimopoulos, C. Calibration equations for two capacitance water content probes. **International Agrophysics**. v.26, n.3, p. 285–293, 2012.

Peixoto, J. A. **ESP8266 NodeMCU: do pisca led à internet das coisas**. 1.ed. - Porto Alegre: Uergs, 2021.

Pereira, F. A. De L.; Medeiros, J. F. De; Dias, N. Da S.; Sá, F. V. Da S.; Silva, S. De L.; Ferreira Neto, M. Desenvolvimento de Sensor de Umidade do Solo Utilizando o Princípio da Resistência Elétrica. **Irriga**, v. 26, n. 1, p. 29–41, 2021. 10.15809/irriga.2021v26n1p29-41.

Provenzano, G.; Gugliuzza, G.; Almeida, C.D.G.C. Response of Decagon 10HS soil water content sensor to different porous media. In: EGU General Assembly 2020, Viena-Austria: **European Geosciences Union**, 2020.

Provenzano, G.; Rallo, G.; Ghazouani, H. Assessing field and laboratory calibration protocols for the diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 142(2), 04015040, 2016. 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000950.

Raja, L., Vyas, S. The study of technological development in the field of smart farming. In: Poonia, R.C., Gao, X.Z., Raja, L., Sharma, S., Yyas, S. (Eds.), **Smart Farming**

Technologies for Sustainable Agricultural Development. **IGI Global**, Hershey, pp. 1–24, 2018. 10.4018/978-1-5225-5909-2.ch001.

Ramos, F. T.; Pivetta, F.; De Matos, V. A. T.; Seixas, G. De B.; Campelo Júnior, J. H. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um neossolo quartzarênico cultivado com caju. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1631–1641, 2014.

Ribeiro, J. G.; Marinho, D. Y.; Espinosa, J.W. M. Agricultura 4.0: Desafios à produção de alimentos e inovações tecnológicas. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2018, Catalão. Anais.... Catalão: Sienpro – UFG, 2018. p.1-7.

Ribeiro, M. R.; Jacomine, P. K. T. E Lima, J. **Caracterização de solos de referência do Estado de Pernambuco**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco. p. 104, 1999. (Relatório Científico).

Rodrigues, L.N; Domingues, A.F. Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. INOVAGRI- Embrapa - Brasília, DF, 2017. ISBN 978-85-67668-10-9.

Saito, T.; Fujimaki, H.; Yasuda, H.; Inosako, K.; Inoue, M. Calibration of temperature effect on dielectric probes using time serie field data. **Vadose Zone Journal, Madison**, v. 12, p. 1-6, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0184>.

Shigeta, R., Kawahara, Y., Goud, G.D., Naik, B.B. Capacitive-touch-based soil monitoring device with exchangeable sensor probe. **In: 2018 IEEE SENSORS, IEEE**, pp. 1–4. 2018. <https://doi.org/DOI:10.1109/icsens.2018.8589698>.

SIBCS -Sistema Brasileiro de Classificação de Solos / Humberto Gonçalves dos Santo, et al. 5. ed., rev. e ampl. **Brasília, DF** : Embrapa, 2018.

Silva, A. L. B. de O.; Pires, R. C. de M.; Ohashi, A. Y. P.; Pavão, G. C.; Blain, G. C. Calibration and accuracy of two electromagnetic methods of soil moisture measurement in Oxisol. **Irriga**, v. 24, n. 4, p. 747–757, 2019. 10.15809/irriga.2019v24n4p747-757.

Silva, A.O.; Silva, B.A.; Souza, F.C.; Azevedo, B.M.; Bassoi, L.H.; Bonfim, G.V.; Juarez, J.M.; Santos, A.F.; Carneiro, F.M. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207695, 2020. DOI: 10.5935/1806-6690.20200090.

Silva, C.R.; Andrade Júnior, A.S.; Souza, C.F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: Souza CF (Ed.) **Aplicações de Técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental**. Universidade de Taubaté. p.25-45, 2008.

Silva, J. R. C.; Silva, F. J. da. Produtividade de um solo litólico associado ao controle de erosão por cordões de pedra em contorno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.435-440, 1997.

Silva, S.M.; Pessoa, J.G.; Souza, C.F. Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, vol. 12, e12217, 2022. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.12217>.

- Silva, W.L.C.; Marouelli, W.A. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: FARIA, M.A. (Coord.) **Manejo de irrigação Lavras: UFLA; SBEA**. p.311-351, 1998.
- Silveira, F.; Lermen, F. H.; Amaral, F. G. An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. **Computers and Electronics in Agriculture**, V.189, 106405, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106405>.
- Souza, C. F.; Conchesqui, M. E. S.; Silva, M. B. Semiautomatic irrigation management in tomato. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. esp, p. 118-125, 2019.
- Souza, C. F.; Matsura, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.7-15, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100002>.
- Souza, C. F.; Silva, C. R.; Andrade Júnior, A. S.; Coelho, E. F. Monitoring of soil water content in real time with TDR and FDR technique. **Irriga**, Botucatu, v. especial, n. 1, p. 26-42, 2016.
- Souza, C.F., Pires, R.C.M., Miranda, D.B. Varallo, A.C.T. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, vol. 18, no. 4, pp. 597-606, 2013. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>.
- Spanaki, K.; Karafili, E.; Despoudi, S. AI applications of data sharing in agriculture 4.0: A framework for role-based data access control. **International Journal of Information Management**, V. 59, 102350, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102350>.
- ThingsBoard. Open-source IoT Platform. 29 de dezembro de 2022. Disponível em: <<https://thingsboard.io/>>. Acesso em: 29 dez. 2022.
- Topp, G.; Clarke, J.L.; Davis, A.; Peter, A. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. **Water Resources Research** 16, no.3: 574–582, 1980.
- Topp, G.C. State of the art of measuring soil water content. **Hydrological Processes**. v. 17, p. 2993–2996, 2003.
- Van Iersel, M.W.; Chappell, M.; Lea-Cox, J.D. Sensors for improved efficiency of irrigation in greenhouse and nursery production. **HortTechnology**. v.23, p. 735–746, 2013. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.23.6.735>.
- Vaz, C. M. P., Jones, S., Meding, M., Tuller, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, 12(2), 2013. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>.
- Visconti, F.; Paz, J. M.; Martínez, D.; Molina, M.J. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils, **Agricultural Water Management**, v.132, P. 111-119, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.005>.

Zacepins, A.; Stalidzans, E.; Meitalovs, J. Application of information Technologies in precision agriculture. In: **Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture** (ICPA 2012).

Zazueta, F.S.; Xin, J. Soil Moisture Sensors. Bulletin. Florida Cooperative Extension Science, **Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida**. vol. 292. 1994.

Miranda, F. R.; Santana, M. G. S.; Souza, C. C. M.; Oliveira, C. H. C. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 3, p. 317-321. 2007.

CAPÍTULO II: CALIBRAÇÃO ESPECÍFICA DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO EM LABORATÓRIO

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção agrícola estão sendo transformados em sistemas mais inteligentes (Lioutas et al., 2019) usando métodos precisos e tecnologia IoT para fornecer informações momentâneas (Boursianis et al., 2022). Essas mudanças são atribuídas à agricultura 4.0, que exigem na cadeia de produção agrícola o aumento da produtividade, bem como apoiar a agricultura mais sustentável, usando informações que ajudarão a tomar decisões estratégicas (Silveira et al., 2021). Tendo em vista que a agricultura irrigada global é responsável por 70% do consumo de água doce (Saccon, 2018), é importante fazer uso de ferramentas e tecnologias que favoreçam o uso racional da água, monitorando e aplicando a quantidade real necessária de água no cultivo.

O conhecimento do movimento da água no solo em sistemas que envolvam as relações solo-água-planta é necessário para otimizar a produção e amenizar a perda por percolação e lixiviação (Coelho et al., 2006; Souza et al., 2013). A abordagem padrão de determinação do teor de água no solo é feita através da gravimetria, que destroem a estrutura original do solo e, portanto, impedem o monitoramento contínuo no mesmo local (Robinson et al., 2008; Seneviratne et al., 2010). Além disso, a umidade gravimétrica não é determinada de maneira instantânea (Quintino et al., 2015; Matos et al., 2017).

Os métodos indiretos surgiram como alternativa ao método padrão, por meio do uso de equipamentos como as sondas capacitivas que avaliam a constante dielétrica do solo, que por sua vez, responde à variação da umidade do solo (Bello et al., 2019). A constante dielétrica é afetada pelas propriedades físicas e químicas do solo (Topp et al., 1980), portanto quando as propriedades do solo nos locais de medição do sensor diferem daquelas em que a equação recomendada pelo fabricante foi desenvolvida, a precisão da mesma pode ser consideravelmente reduzida (Provenzano et al., 2020; Kim et al., 2020).

Bingze et al. (2022) citam que o teor de água em solos de partículas finas é significativamente maior do que em solos que possuem partículas predominantemente grossas. Este fato está relacionado à maior área superficial que as partículas finas possuem (Jacobsen e Schjønning, 1993). Bircher et al. (2015) utilizando sondas capacitivas encontraram um desvio significativo nas leituras de umidade em solos ricos em matéria orgânica (M.O. > 30%). Essas particularidades não são avaliadas em equações de

calibrações generalistas dos fabricantes dos sensores, assim sendo, é necessário realizar calibrações específicas para cada tipo de solo (Bingze et al., 2022; Kim et al., 2020).

Silva et al. (2022) avaliando sensores de capacitância Power Flower e Flower Care em Latossolo Vermelho de textura argilosa, observaram superestimativas dos resultados encontrados pelo TDR em comparação ao método gravimétrico, indicando a necessidade da calibração. Jiménez et al. (2019), calibrando sensores YL-69 em Neossolo Regolítico e Latossolo Amarelo, obtiveram resposta linear à variação de umidade com $R^2 = 0,96$ e $0,95$, respectivamente para cada tipo de solo após calibração. Os autores observaram que antes da calibração a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro absoluto médio (EAM) apresentaram valores de 0,16 e 0,06, respectivamente e, após a calibração, esses indicadores foram reduzidos para 0,01, assim como, a classificação de desempenho (c) do sensor YL-69 que passou de bom e muito bom para excelente em ambos os solos testados.

O sensor de umidade modelo YL-69 é um sensor resistivo que mede a umidade do solo indiretamente por meio da variação de resistência elétrica, além de possuir baixo custo e disponibilizar os valores de umidade em tempo real (Gavali et al., 2016; Jimenez et al., 2020). Outros sensores muito utilizados na determinação de umidade do solo são os sensores capacitivos dos modelos 5TE e EC-5 (Meter Group, Inc. USA). O sensor modelo 5TE mede temperatura ($^{\circ}\text{C}$), condutividade elétrica (dS m^{-1}) e umidade volumétrica do solo (mV , %, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), enquanto o sensor modelo EC-5 registra apenas a umidade volumétrica do solo (mV , %, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (Ojo et al., 2014; Jimenez et al., 2020).

A calibração pode ser uma desvantagem, apesar de fácil superação (Silva et al., 2022) pois, uma vez realizada poderá sempre ser utilizada para aquele determinado solo. Conseqüentemente, os sensores calibrados obtêm estimativas precisas e rápidas da umidade do solo, visando a agilidade na tomada de decisão no manejo da agricultura irrigada. Diante desse contexto, esta pesquisa teve o objetivo de avaliar e calibrar três sensores comerciais, 5TE, EC-5 (Meter Group, Inc. USA) e YL-69 (Arduino) em cinco classes de solos de referência do estado de Pernambuco, com base no método gravimétrico (padrão).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Classes de solos estudadas

Nesta pesquisa foram utilizadas cinco classes de solos de referência do estado de Pernambuco: Planossolo Nátrico, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Vertissolo. Sendo os três primeiros localizados na mesorregião Sertão Pernambucano, o quarto no Agreste Pernambucano, e o último na mesorregião da Zona da Mata de Pernambuco (Figura 1).

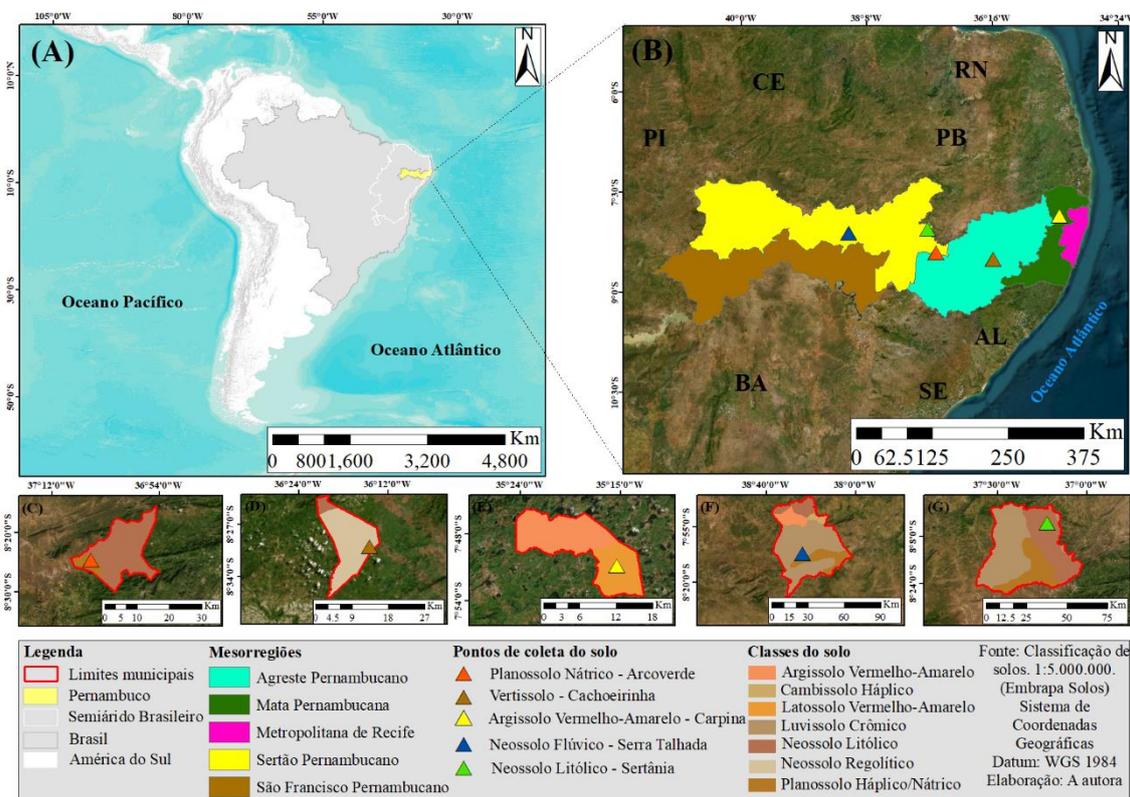


Figura 1. Localização geográfica do estado de Pernambuco (A), distribuição espacial dos pontos de coleta dos solos (B), localização dos pontos de coleta dos solos em cada cidade: Arcoverde (C), Cachoeirinha (D), Carpina (E), Serra Talhada (F) e Sertânia (G).

O Planossolo Nátrico foi coletado na cidade de Arcoverde-PE, sob as coordenadas $8^{\circ} 24' 33.455''$ S e $22^{\circ} 5' 31.6094''$ W (Figura 1C), seguindo pela BR -232, depois da cidade de Arcoverde, sentido interior do estado, próximo a pista de pouso do aeroporto local, lado esquerdo da rodovia (Ferreira, 2011). O Vertissolo foi coletado no município de Cachoeirinha-PE, sob as Coordenadas $08^{\circ} 29' 53''$ S e $36^{\circ} 14' 25''$ W (Figura 1D), lado esquerdo da BR-423 sentido Cachoeirinha – Lajedo (Lima et al., 2015). O Argissolo Vermelho-Amarelo foi coletado no município de Carpina-PE, sob as coordenadas $7^{\circ} 50' 45''$ S, $35^{\circ} 15' 18''$ W, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC)

pertencente à UFRPE, distante 56 km da cidade de Recife (Figura 1E). O Neossolo Flúvico foi coletado na cidade de Serra Talhada sob as coordenadas 8° 07' 06.72" S e 38° 23' 55.51" W (Figura 1F). O acesso a este local é pela rodovia estadual PE 390 km 20, na região da Serra da Lagartixa, nos limites entre os municípios de Serra Talhada e Floresta (Melo et al., 2008). A área selecionada para amostragem do Neossolo Litólico foi próxima à cidade de Sertânia, sob as coordenadas 8° 3' 27.12486" S e 22° 13' 18.58477" W (Figura 1G).

A mesorregião da Zona da Mata Norte do estado de Pernambuco é composta por cobertura vegetal original da Mata Atlântica, mas atualmente a atividade agrícola e econômica predominante é a monocultura canavieira (Silva, 2016). O clima da região é do tipo As', megatérmico tropical (tropical úmido) de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação média é de 1.082 mm ano⁻¹, sendo o período chuvoso concentrado entre as estações outono e inverno; com temperatura média anual de 24 °C (Tavares et al., 2017).

O Agreste Pernambucano é caracterizado por um clima semiárido quente de baixas latitudes. Segundo a classificação de Köppen, esse clima enquadra-se no tipo BSHs'. A temperatura média anual é de 25°C e a precipitação pluviométrica anual é de 600mm, com chuvas distribuídas irregularmente durante o ano. A vegetação natural consiste em floresta tropical seca do tipo caatinga arbórea hiperxerófila, a qual se caracteriza pela presença de espécies xerófitas e decíduas, bem como de representantes das famílias Cactaceae e Bromeliaceae que contribuem na formação da paisagem (Albuquerque & Andrade, 2002).

A mesorregião do Sertão Pernambucano possui características peculiares que gerou a divisão em três territórios: o Território do Araripe, o Território do São Francisco e o Território do Sertão do Pajeú. O bioma da região é a Caatinga, caracterizada como floresta arbórea ou arbustiva, com algumas características xerofíticas (Prado, 2003). De acordo com Köppen, o clima é do tipo BSw'h' muito quente e semiárido, com temperatura do mês mais frio superior a 18°C e chuvas concentradas nas estações verão-outono. O período chuvoso inicia em novembro, com término em abril, precipitação média anual é de 653 mm, distribuídos entre os meses de inverno e déficit no verão, com temperatura média anual de 25,2°C (LAMEPE/ITEP, 2017; Bezerra et al., 2020).

2.2 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina-PE (Figura 1), distando 56 km da capital Recife. Situando-se entre as coordenadas 7° 50' 45" de latitude Sul, 35° 15' 18" de longitude Oeste e 178 m de altitude em relação ao nível do mar, de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum). O clima da região é do tipo As', megatérmico tropical (tropical úmido) de acordo com a classificação de Köppen (Tavares et al., 2017). A precipitação média é de 1.082 mm ano⁻¹, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno; com temperatura média anual de 24 °C.

2.3 Amostragem do solo e preparo das amostras

Para cada classe de solo foram coletadas amostras deformadas na profundidade de 0-0,40 m, nos respectivos perfis de referência. O solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha 4,75 mm. Após esse procedimento o solo foi acondicionado em vasos de 5 L, compostos por uma camada basal de 5 cm de brita, coberta com manta geotêxtil bidim, para facilitar a drenagem da água e evitar a perda de solo. O conjunto (vaso+brita+bidim+sensores) (Figura 2) foi previamente pesado nas etapas de preenchimento, para determinar o volume útil do vaso onde foi acondicionada a respectiva massa de sólidos (mantendo a densidade do solo original em campo).

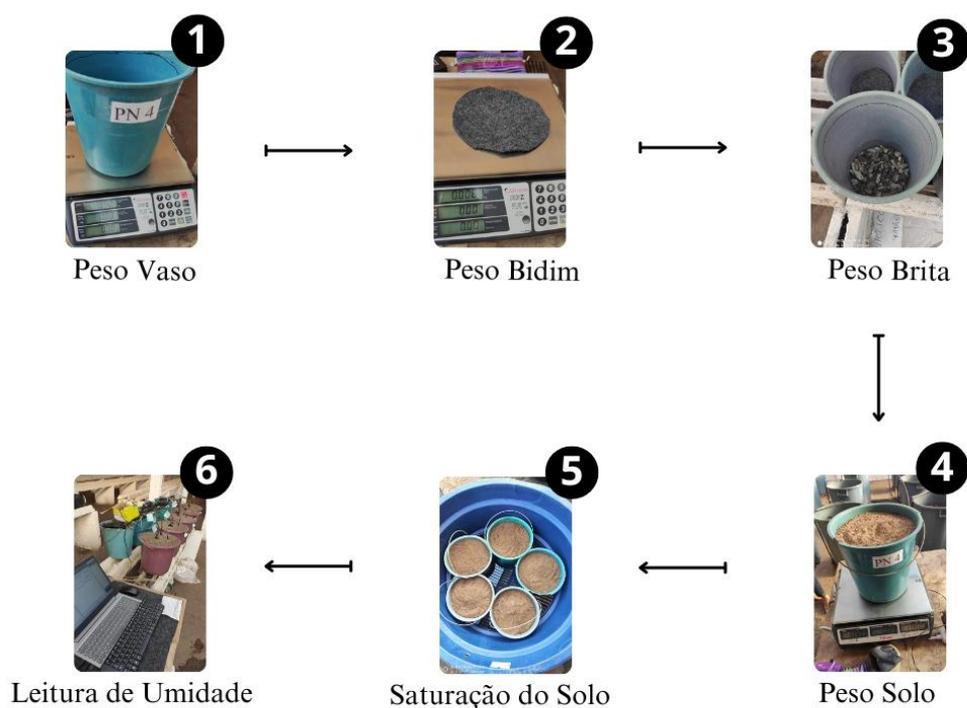


Figura 2. Sequência para o acondicionamento no vaso do conjunto brita+bidim+solo+sensores (1 a 5).

Para tanto, foi considerado o volume útil do reservatório descontando o volume ocupado pela camada de brita, do bidim e dois centímetros antes da borda. Para cada classe de solo foram utilizadas cinco repetições, totalizando 25 vasos, nos quais foram instalados os sensores YL-69, EC-5 e 5TE.

A caracterização física dos solos selecionados para essa pesquisa está disponível na literatura (Ferreira, 2011; Melo et al., 2008; Lima et al. 2015). No entanto, considerando a dinâmica da densidade do solo em virtude do manejo do solo, foi realizada sua determinação para cada classe pelo método do torrão parafinado (Equação 4), devido à dificuldade de coleta com anel, com exceção do Argissolo Vermelho-Amarelo que foi determinada pelo método do anel volumétrico (Equação 5). Essas análises foram realizadas seguindo a metodologia recomendada pela Embrapa (2017) no Laboratório de Física de Solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

$$Ds(t) = \frac{\frac{M_{tu}}{1+b}}{\left((V_a - V_{at}) - \frac{(M_{tp} - M_{tor})}{0,9} \right)} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

$Ds(t)$ – densidade do solo pelo método do torrão, em $g\ cm^{-3}$.

M_{tu} – massa do torrão úmido, em g.

b – umidade da subamostra, em $g\ g^{-1}$.

V_a – volume total de água do béquer, em cm^3 .

V_{at} – volume de água adicionado ao béquer com o torrão, em cm^3 .

M_{tp} – massa do torrão parafinado, em g.

M_{tor} – massa do torrão seco ao ar, em g.

Valor 0,9 – densidade da parafina comercial (0,89 a 0,93 $g\ cm^{-3}$).

$$Ds(c) = \frac{M_{ss}}{V} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$Ds(c)$ – densidade do solo pelo método do cilindro, em $g\ cm^{-3}$.

M_{ss} – massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g.

V – volume do cilindro, em cm^3 .

Genericamente, as equações 4 e 5 podem ser escritas na forma da equação 6,

$$Ds = \frac{Mss}{Vt} \quad \text{Equação 6}$$

em que:

Ds - densidade do solo, em g cm⁻³;

Mss - massa do solo seco, em g; e,

Vt - volume total, em cm³.

2.3.1 Cálculo da massa do solo

A quantidade do solo úmido acondicionado nos vasos para calibração foi obtida com base na umidade gravimétrica determinada a partir de uma subamostra de solo seca em estufa a 105 °C por 24 h (Equação 7). De posse da umidade gravimétrica foi calculado o fator de correção “f” por meio da razão da terra fina seca ao ar e terra fina seca em estufa (Equação 8). Assim, a massa de solo úmido foi calculada com base na Equação 9, reproduzindo sempre a mesma densidade do solo em campo.

$$U = \frac{(Msu - Mss)}{Mss} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

U - umidade gravimétrica, em g g⁻¹;

Msu - massa do solo úmido, em g; e,

Mss - massa de solo seco, em g.

$$f = \frac{TFSA}{TFSE} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

TFSA - terra fina seca ao ar, em g; e,

TFSE - terra fina seca em estufa, em g.

$$Msu = Ds * f * V \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

Ds - densidade do solo, em g cm⁻³;

f - fator de correção, adimensional; e,

V - volume útil do vaso, em cm³.

2.4 Procedimento para instalação e calibração dos sensores

Posteriormente à montagem dos vasos, os solos foram submetidos a saturação por capilaridade e dispostos sobre uma bancada, a fim de permitir a drenagem natural da água do solo. Após cessada a drenagem, o conjunto (vaso+brita+bidim+solo) foi pesado para determinação da umidade na condição de vaso, correspondente à capacidade de campo. Em seguida, foram instalados os sensores YL-69 e ECH2O modelos EC-5 e 5TE, os quais foram pesados e instalados com distância de 5 cm entre si e 10 cm da parede do vaso, conforme recomendação do fabricante. Os sensores foram inseridos verticalmente a 2 cm abaixo da superfície do solo.

Na condução da calibração, os conjuntos (vaso+brita+bidim+sensor+solo) foram pesados diariamente em uma balança digital com precisão de ± 2 g em horário fixo às 8:00 h, por um período médio de 43 dias até que houvesse a estabilização na massa dos mesmos em pesagens sucessivas. As leituras dos sensores foram realizadas no mesmo horário estabelecido para as pesagens dos vasos. Para os sensores YL-69 as leituras das tensões foram obtidas por meio de uma placa ESP8266 e uma fonte externa ou computador. As leituras dos sensores ECH2O foram realizadas com o dispositivo Procheck, do mesmo fabricante, na forma de dados não processados (RAW).

A umidade gravimétrica (Equação 7) foi determinada com os dados da massa de água obtida pela diferença das massas diárias (descontando as massas dos conjuntos vasos+sensor+bidim+brita) e a massa de solo seco acondicionado nos vasos. Com base na umidade gravimétrica e a densidade do solo foi determinada a umidade volumétrica (Equação 10).

$$\theta = U * Ds \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

θ – umidade volumétrica, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; U - umidade gravimétrica, em g g^{-1} ; e, Ds - densidade do solo, em g cm^{-3} .

As equações que definem as curvas de calibração de todos os sensores para cada tipo de solo foram obtidas por meio da relação do conteúdo volumétrico de água medido ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e o respectivo valor do sinal de saída (RAW) dos sensores. As equações de calibração, propostas nessa pesquisa, foram comparadas, com as equações de calibração recomendadas pelo fabricante dos sensores EC-5 e 5TE (Equações 1 e 2 citadas no Capítulo 1).

2.5 Análises estatísticas

As curvas de calibração foram desenvolvidas por meio de análise de regressão relacionando o conteúdo gravimétrico da água medido (X) e convertido em umidade volumétrica, e o conteúdo de água estimado pelos sensores (Y). Para avaliação da precisão e exatidão das medidas estimadas pelos sensores, foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação de Pearson (r) para precisão (Equação 11), o índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985) para exatidão (Equação 12), o de Camargo e Sentelhas (1997) para expressar confiança ou desempenho do modelo proposto (c), por meio da Equação 13.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \left[(O_i - \bar{O}) \times (P_i - \bar{P}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}}$$

Equação 11

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

Equação 12

$$c = rxd$$

Equação 13

Em que: P_i é o valor estimado pelos sensores, \bar{P} é a média dos valores estimados pelos sensores, O_i é o valor observado gravimetricamente, \bar{O} é a média dos valores observados gravimetricamente, e, N é o número total de dados.

O coeficiente de correlação Pearson (r) pode variar de -1 a 1, onde a correlação perfeita igual a -1 indica que as variáveis são inversamente proporcionais, e 1 indica que o estudo de uma variável pode determinar exatamente a outra. No oposto, uma correlação igual ou próxima zero indica que não há relação linear entre as variáveis. O índice (d) varia de 0 a 1, em que o valor 1 significa uma perfeita exatidão entre os dados estimados e o adotado como padrão, enquanto o valor zero significa que não há concordância entre os valores analisados. Camargo e Sentelhas (1997) propõem a interpretação do desempenho do modelo matemático proposto, a partir do índice (c), que o classifica de péssimo a ótimo (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação de desempenho conforme o valor do coeficiente “c”.

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Além dos índices estatísticos apresentados, outros índices também foram adotados: o erro absoluto médio (EAM), equação 14, o erro padrão da estimativa (EPE), equação 15 e a raiz quadrada do erro médio (RMSE), equação 16. Na avaliação pelo RMSE a acurácia do sensor pode ser considerada de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3. Classificação de acurácia de acordo com valor do RMSE.

Classificação	Valor de RMSE (cm ³ cm ⁻³)
Bom	< 0,01
Regular	0,05 a 0,01
Ruim	0,1 a 0,05
Muito Ruim	≥ 0,1

Fonte: Fares et al. (2011).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n}$$

Equação 14

$$EPE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{(n-1)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Equação 15

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}}$$

Equação 16

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3 está representada a curva de secagem de cada solo, com base na umidade volumétrica registrada ao longo do tempo de monitoramento dos solos estudados. O número de dias de leituras variou de acordo com cada tipo de solo, desde a umidade equivalente à capacidade de campo até atingir umidade mínima constante (considerado seco). O período necessário para se atingir a estabilidade da umidade foi maior para o Vertissolo (55 dias), seguido pelo Argissolo Vermelho-Amarelo (45 dias), e para o Planossolo Nátrico, Neossolo Litólico e Neossolo Flúvico (42 dias).

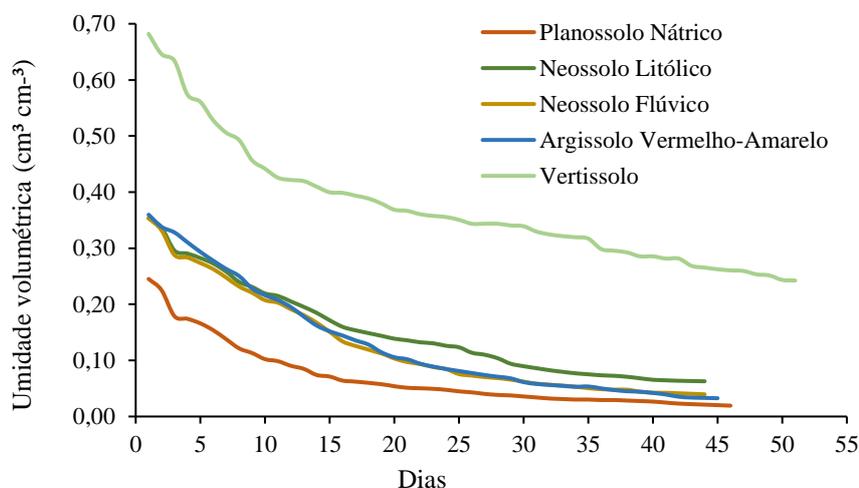


Figura 3. Curva de secagem dos solos estudados.

O Vertissolo apresentou maior tempo de secagem, devido a sua maior porosidade (Tabela 4) e capacidade de retenção de água em relação aos demais. Segundo Cunha et al. (2010), os Vertissolos apresentam altos valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente, em razão da expansividade e contração da mineralogia do tipo 2:1. Devido a essas características, à medida que este solo começa a secar, mais difícil fica a saída de água, ficando retido com muita energia nos colóides de alta atividade.

O Neossolo Flúvico e o Neossolo Litólico apresentaram menor tempo de secagem devido à sua menor porosidade (Tabela 4), consequentemente baixa capacidade de retenção de água, explicada pela maior quantidade da fração areia (Tabela 4). Segundo Parahyba et al. (2015) nos solos arenosos em geral há grande limitação quanto à capacidade de armazenamento de água disponível.

Tabela 4. Características físicas dos solos estudados.

Atributos	PN ¹ (0-0,20 m)	NL2 ⁴ (0-0,40m)	NF ³ (0-0,10 m)	AVA ² (0-0,20 m)	VE ² (0- 0,40 m)
Dens. Solo (g cm ⁻³)	1,78	1,58	1,49	1,36	1,79
Areia (g kg ⁻¹)	748	809	750	700	125,76
Silte (g kg ⁻¹)	101	67	150	90	746,10
Argila (g kg ⁻¹)	148	124	100	210	128,74
Porosidade Total (%)	26,54	-	38	48,17	77

Fonte: Melo et al. (2008)¹. Os autores². Ferreira (2011)³. Franca (2010)⁴.

As faixas de umidade volumétrica estimadas pelo sensor EC-5, após calibração, vão de 0,03 a 0,27 m³ m⁻³ para o Planossolo Nátrico, de 0,09 a 0,42 m³ m⁻³ para o Neossolo Litólico, de 0,02 a 0,31 m³ m⁻³, para o Neossolo Flúvico, de 0,00 a 0,25 m³ m⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 0,20 a 0,48 m³ m⁻³ para o Vertissolo. Os valores de RAW medidos pelo EC-5, em comparação a umidade volumétrica, possuem maior dispersão para a faixa de umidade próxima a capacidade de campo em todos os solos selecionados nesta pesquisa (Figura 4). Para os valores de umidade abaixo de 0,25 m³ m⁻³, as leituras realizadas pelo senso EC-5 tendem a ser muito próximas das leituras de umidade padrão, em todos os solos estudados.

Com relação ao sensor 5-TE as faixas de umidade, após calibração, corresponderam à 0,03 a 0,27 m³ m⁻³ para o Planossolo Nátrico, de 0,05 a 0,35 m³ m⁻³ para o Neossolo Litólico, de 0,02 a 0,31 m³ m⁻³, para o Neossolo Flúvico, de 0,03 a 0,31 m³ m⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 0,21 a 0,58 m³ m⁻³ para o Vertissolo. Vale destacar que, a calibração do sensor 5TE para o Vertissolo resultou em leituras de umidade mais próximas à umidade padrão com relação aos outros sensores, comportamento evidenciado pela menor dispersão das leituras (Figura 4D).

Para o sensor YL-69 as faixas de leituras de umidade antes da calibração correspondem: 0,05 a 0,29 m³ m⁻³ para o Planossolo Nátrico, de 0,04 a 0,30 m³ m⁻³ para o Neossolo Litólico, de 0,01 a 0,28 m³ m⁻³, para o Neossolo Flúvico, de 0,02 a 0,32 m³ m⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 0,29 a 0,50 m³ m⁻³ para o Vertissolo. Quando comparamos as faixas de leitura da umidade volumétrica padrão em relação as estimativas de umidade volumétrica pelo YL-69 calibrado, é evidenciado a correção desses valores, com valores próximos da umidade real (Figura 4 e Tabela 6).

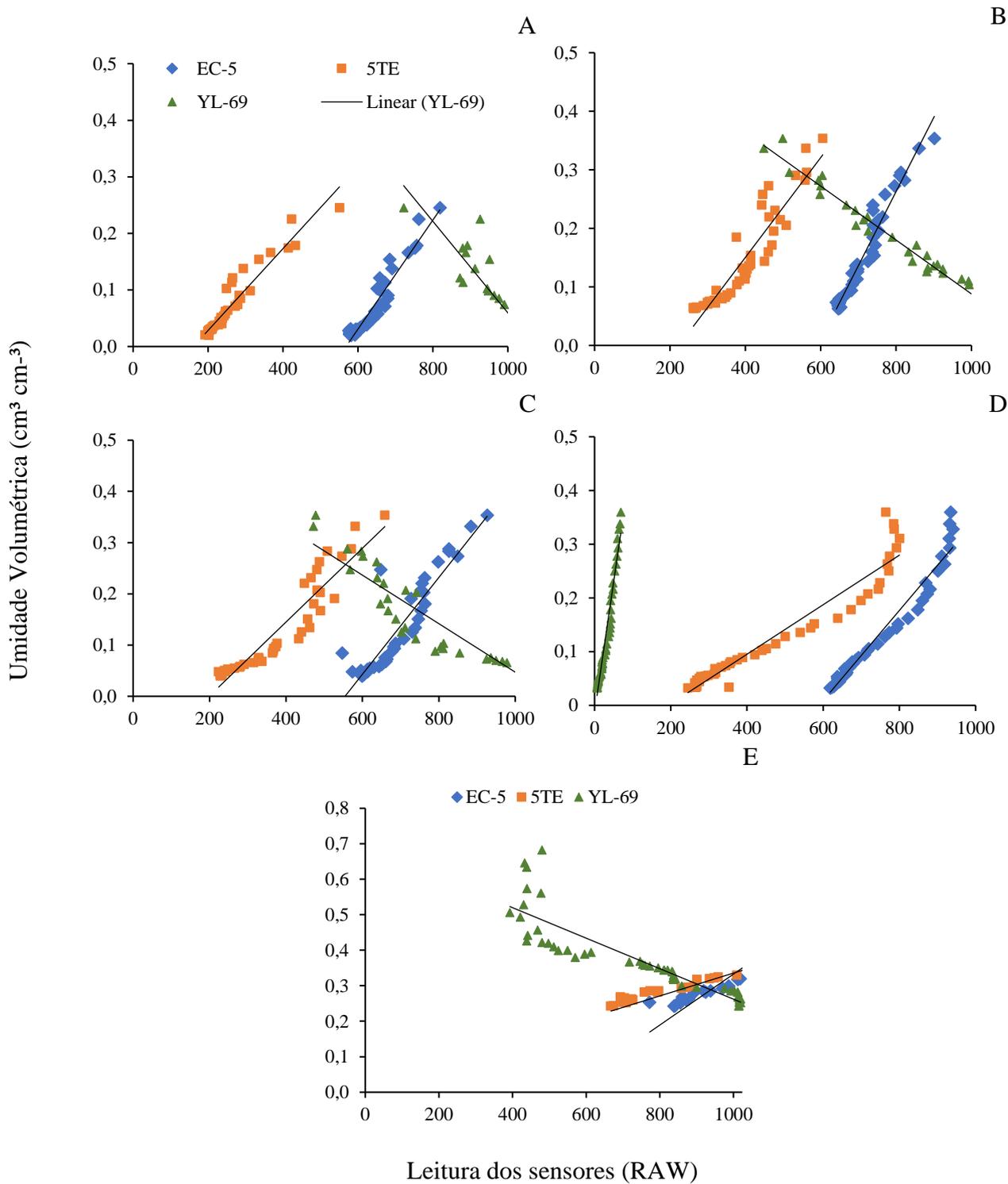


Figura 4. Curvas de calibração do Planossolo Nátrico (A), Neossolo Litólico (B), Neossolo Flúvico (C), Argissolo Vermelho-Amarelo (D) e Vertissolo (E), relacionando as leituras dos sensores e a umidade volumétrica desde a saturação até a secagem.

Na Tabela 5 é possível verificar as equações de calibração para os três sensores em todos os cinco solos estudados, as quais foram obtidas por meio da correlação entre a média do conteúdo volumétrico de água pelo método padrão e a média do conteúdo

volumétrico de água estimado pelo sensor. O modelo de equação escolhido foi o linear para todas as correlações.

Tabela 5. Equações de calibração específicas definidas para cada tipo de solo e sensores de umidade.

Solo	EC-5	5TE	YL-69
Planossolo Nátrico	$\theta_{EC-5} = 0,001_{RAW} - 0,5481$	$\theta_{5TE} = 0,0007_{RAW} - 0,1163$	$\theta_{YL} = -0,0008_{RAW} + 0,8648$
Neossolo Litólico	$\theta_{EC-5} = 0,0013_{RAW} - 0,7495$	$\theta_{5TE} = 0,0009_{RAW} - 0,1911$	$\theta_{YL} = -0,0005_{RAW} + 0,5484$
Neossolo Flúvico	$\theta_{EC-5} = 0,0009_{RAW} - 0,5239$	$\theta_{5TE} = 0,0007_{RAW} - 0,1432$	$\theta_{YL} = -0,0005_{RAW} + 0,5207$
Argissolo Vermelho-Amarelo	$\theta_{EC-5} = 0,0008_{RAW} - 0,4943$	$\theta_{5TE} = 0,0005_{RAW} - 0,0894$	$\theta_{YL} = 0,0049_{RAW} - 0,0134$
Vertissolo	$\theta_{EC-5} = 0,0007_{RAW} - 0,3844$	$\theta_{5TE} = 0,0003_{RAW} - 0,014$	$\theta_{YL} = -0,0004_{RAW} + 0,6917$

Para o sensor EC-5 é possível verificar que as leituras de umidade foram superestimadas na faixa de umidade 0,17 a 0,25 cm³ cm⁻³ para o Planossolo Nátrico, e de 0,27 a 0,35 cm³ cm⁻³, para o Neossolo Litólico. No entanto, para o Neossolo Flúvico, Argissolo Vermelho-Amarelo e Vertissolo as leituras de umidade foram subestimadas quando comparadas a umidade padrão, correspondendo às faixas de 0,17 a 0,35 cm³ cm⁻³, de 0,18 a 0,36 cm³ cm⁻³, e de 0,44 a 0,68 cm³ cm⁻³, respectivamente. Os maiores valores subestimados para o Vertissolo alcançaram variação de 0,20 cm³ cm⁻³ para os valores próximos à capacidade de campo. Possivelmente, o sensor perdeu sensibilidade para realizar leituras próximas à 0,50 cm³ cm⁻³ de umidade.

O sensor 5TE apresentou umidades subestimadas na faixa de umidade 0,10 a 0,23, e de 0,21 a 0,35 cm³ cm⁻³ para o Planossolo Nátrico e Neossolo Flúvico, respectivamente. Para o vertissolo o sensor 5TE foi o que obteve menor subestimava com os valores de umidade na faixa de 0,46 a 0,68 cm³ cm⁻³, e menor dispersão comparado com os outros sensores no mesmo solo.

O sensor YI-69 demonstrou umidades subestimadas para o Planossolo Nátrico na faixa de umidade 0,15 a 0,25 cm³ cm⁻³, de 0,20 a 0,35 cm³ cm⁻³ para o Neossolo flúvico, de 0,36 a 0,31 cm³ cm⁻³ para o Argissolo Vermelho-Amarelo, e de 0,68 a 0,53 cm³ cm⁻³ para o vertissolo. Para o Neossolo Litólico as leituras de umidade foram subestimadas ao longo da curva de calibração.

Na análise dos índices estatísticos para os sensores EC-5 e 5TE em todos os solos estudados, o Coeficiente r não demonstraram pouca melhora após calibração, fato que sugere que mesmo sem calibração existe uma correlação forte e baixa variabilidade nas

leituras de umidades dos sensores, acima de 0,92 (Tabela 6). Quando comparadas com as leituras estimadas pelo sensor YL-69 e a umidade padrão em todos os solos, a maior variabilidade encontrada foi de 0,88, para o Vertissolo (Tabela 6), pois o sensor mostra uma certa perda de sensibilidade em leituras acima de $0,58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

O índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985) para exatidão, foi o que apresentou melhoras significativas nos valores após calibração, com valores acima 0,99 para todos os sensores em todos os solos estudados (Tabela 6). Esse comportamento como também o do parágrafo anterior demonstra que os sensores são precisos nas leituras de umidade, mas para melhorar a exatidão das medidas será necessário realizar a calibração. O índice de desempenho (c) para cada solo (Tabela 6) foram considerados segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), como ótimos, pois apresentaram valores $> 0,85$, após calibração

Tabela 6. Índices estatísticos obtidos com base na comparação da umidade volumétrica estimada pelos sensores após a calibração e a umidade volumétrica padrão, com a classificação de desempenho das equações de calibração propostas nessa pesquisa.

Solo	EC-5				5TE				YL-69			
	R ²	r	d	Class*.	R ²	r	d	Class.	R ²	r	d	Class.
PN	0,908	0,953	0,998	Ótimo	0,913	0,956	0,999	Ótimo	0,819	0,905	0,998	Ótimo
NL	0,953	0,976	0,999	Ótimo	0,862	0,929	0,999	Ótimo	0,977	0,989	0,999	Ótimo
NF	0,839	0,916	0,998	Ótimo	0,879	0,937	0,999	Ótimo	0,885	0,941	0,999	Ótimo
AVA	0,957	0,978	0,999	Ótimo	0,922	0,960	0,999	Ótimo	0,958	0,979	0,999	Ótimo
VE	0,895	0,9462	0,998	Ótimo	0,921	0,959	0,99	Ótimo	0,778	0,882	0,998	Ótimo

*Camargo & Sentelhas (1997).

Os erros estatísticos foram significativamente reduzidos após calibração dos sensores nos solos estudados (Tabela 7). O sensor YL-69 demonstrou maior impacto da calibração na precisão e exatidão nas leituras, indicando necessidade deste procedimento. Jiménez et al. (2019), também calibrando sensores YL-69 em dois tipos de solo (Neossolo Litólico e Latossolo Amarelo) concluíram que, após a calibração, o desempenho do sensor YL-69 foi significativamente melhorado em ambos os solos testados, ratificando que não é recomendado usá-lo sem calibração específica.

O RMSE indicou a acurácia do sensor YL-69 como muito ruim antes da calibração, e após calibração reduziu o suficiente para ser considerada como regular, para o Planossolo Natrico, Neossolo Litólico, Neossolo Flúvico e Argissolo (Tabela 7).

Tabela 7. Erros estatísticos para os sensores EC-5, 5TE e YL-69 e os diferentes tipos de solo.

Solo	Calibração	EC-5			5TE			YL-69		
		EAM	EPE	RMSE	EAM	EPE	RMSE	EAM	EPE	RMSE
Planossolo Nátrico	Sem	0,024	0,028	0,028	0,027	0,029	0,028	0,039	0,044	0,043
	Com	0,014	0,019	0,019	0,009	0,018	0,017	0,017	0,025	0,024
Neossolo Litólico	Sem	0,027	0,041	0,040	0,040	0,050	0,050	0,078	0,094	0,092
	Com	0,027	0,032	0,031	0,030	0,036	0,036	0,033	0,037	0,036
Neossolo Flúvico	Sem	0,032	0,048	0,048	0,042	0,048	0,048	0,098	0,116	0,115
	Com	0,028	0,043	0,043	0,028	0,033	0,032	0,035	0,038	0,038
Vertissolo	Sem	0,065	0,077	0,076	0,030	0,052	0,051	0,144	0,165	0,164
	Com	0,042	0,062	0,062	0,030	0,039	0,039	0,044	0,056	0,055
Argissolo Vermelho- Amarelo	Sem	0,029	0,035	0,035	0,050	0,054	0,053	0,165	0,196	0,194
	Com	0,026	0,035	0,035	0,024	0,034	0,033	0,016	0,020	0,019

Visconti et al. (2014) avaliando sensores capacitivos 10HS e 5TE observaram que a resposta das leituras modifica em função do teor de água do solo e textura do solo, concluindo que cada sensor requer calibração específica para um determinado solo. estes autores, ainda destacam que a validação de campo confirmou o melhor desempenho do sensor 5TE após a calibração, quando apresentou um RMSE de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor acima ao encontrado nesta pesquisa (Tabela 7).

Kim et al. (2020) calibrando sondas de umidade em três solos com fração arenosa acima de 63%, concluíram que os equipamentos são adequados para estimar umidade após a correção das leituras por meio da equação de calibração específica. Sena et al. (2020) analisando sensores EC-5 para leituras de umidade em solos com diferentes texturas, evidenciaram menores valores do índice “c” ($< 0,89$) para solos com textura argilosa. Teores elevados de argila podem influenciar as propriedades dielétricas do solo, resultando em super e subestimação do teor de água (Gasch et al., 2017).

Dessa forma, os resultados desta pesquisa em conjunto com os encontrados na literatura sugerem que os sensores capacitivos são equipamentos eficientes na medição do volume de água do solo, quando devidamente calibrados independentes das características físicas do solo estudado.

4. CONCLUSÕES

A calibração dos sensores capacitivos em diferentes tipos de solos proporcionou melhorias na capacidade de estimar de umidade do solo otimizando seu desempenho.

O sensor Y1-69 respondeu significativamente melhor à calibração comprovado pelas medidas de precisão e exatidão nas leituras de umidade do solo, não sendo, portanto, recomendado seu uso sem calibração prévia. Em solos de elevada porosidade, como é o caso do Vertissolo, foi identificado que há uma certa redução da sensibilidade do sensor em realizar leituras precisas em faixas elevadas de umidade.

Diante da redução dos erros estatísticos calculados após a calibração, é possível afirmar que as curvas de calibração propostas pelos fabricantes são generalistas e a calibração específica, para cada tipo de solo, é essencial para obter melhoras nos indicadores de acurácia.

De um modo geral, os resultados similares obtidos pelos sensores, nos cinco solos estudados, sugerem que é possível usar qualquer um dos sensores para qualquer tipo de solo. No entanto, vale destacar que para o Planossolo Nátrico os sensores EC-5 e 5TE geraram resultados ligeiramente melhores em termos de precisão e exatidão na estimativa de umidade do solo. Nesse sentido, o sensor 5TE é o sensor mais recomendado para estimar as leituras de umidade no Vertissolo, devido a melhores resultados na acurácia após calibração.

5. REFERÊNCIAS

Achilles D.; Boursianis, M. S. Papadopoulou; Panagiotis, D.; Barouchas, A.L.; Pantelis; Salahas, G.; Karagiannidis, G.; Wan, S.; Goudos, S. K.; Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. **Internet of Things**, V.18, 100187, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>.

Albuquerque, U.; Andrade, L. Conhecimento botânico tradicional e conservação em uma área de caatinga no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Acta Botânica Brasilica*, 16, 273-285, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062002000300004>.

Bello, Z.A.; Tfwala, C.M.; Van Rensburg, L.D. Evaluation of newly developed capacitance probes for continuous soil water measurement. **Geoderma**. v.345, p. 104-113, 2019. [10.1016/j.geoderma.2019.03.030](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.030).

Bezerra, A. C.; Silva, J. L. B.; Silva, D.A.O.; Batista, P.H.D.; Pinheiro, L.C.; Moura, G.B.A. Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de

Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.13, n.01, 286-301.2020.

Bingze Li, Chunmei Wang, Xingfa Gu, Xiang Zhou, Ming Ma, Lei Li, Zhuangzhuang Feng, Tianyu Ding, Xiaofeng Li, Tao Jiang, Xiaojie Li, Xingming Zheng, Accuracy calibration and evaluation of capacitance-based soil moisture sensors for a variety of soil properties. **Agricultural Water Management**, v.273, 107913, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107913>.

Bircher, S.; Andreasen, M.; Vuollet, J.; Vehviläinen, J. Y.H. Kerr. Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers. **Geosci. Instrum. Methods**, v.5 (2), p. 447-493, 2015.

Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

Coelho, E. F.; Vellame, L. M.; Coelho Filho, M. A.; Ledo, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.23-30, 2006.

Cunha, T. J. F.; Petrere, V. G.; Silva, D. J.; Mendes, A. M. S.; Melo, R. F. De; Oliveira Neto, M. B. De; Silva, M. S. L. Da; Alvarez, I. A. Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e Manejo. (Ed.) **Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação. Petrolina: Embrapa Semiárido**, 2010. Disponível em:
<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/861913>>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solos**. 3.ed.rev.e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

Fares, A.; Abbas, F.; Maria, D.; Mair, D. Improved Calibration Functions of Three Capacitance Probes for the Measurement of Soil Moisture in Tropical Soils. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4858-4874, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110504858>.

Ferreira, J. T. P. **Caracterização de Planossolos Desenvolvidos em Diferentes Condições Geoambientais do Estado de Pernambuco**. Dissertação, Pós-Graduação em Ciências do Solo- Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE. P. 103. 2011.

Franca, M. V. "Georreferenciamento, Classificação e Uso do Solo da Fazenda Arizona, Sertânia-Pe." Dissertação de Mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. UFRPE, 2010.

Gasch, C.K.; Brown, D.J.; Brooks, E.S.; Yourek, M.; Poggio, M.; Cobos, D.R.; Campbell, C.S. A pragmatic, automated approach for retroactive calibration of soil moisture sensors using a two-step, soil-specific correction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.137, p. 29–40, 2017.

Gavali, M.S.; Dhus, B.J.; Vitekar, A.B. A Smart Irrigation System for Agriculture Based on Wireless Sensors. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v.5, Issue 5, 2016.

- Jacobsen, O.H.; Schjønning, P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, v. 151 (2–4), p. 147-157, 1993.
- Jiménez, A. L. A. C., Almeida, C.D.G.C., Santos Junior, J. A., Morais, J. E. F., Almeida, B. G., Andrade, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.195, p.104413, 2019. 10.1016/j.still.2019.104413.
- Jimenez, A. L. A. C.; Almeida, C.D.G.C.; Santos Junior, J. A.; Santos, C. S. Calibration of two capacitive soil moisture sensors in Ultisol. **Dyna (MEDELLÍN)**. v.87, p.75 - 79, 2020. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.75361>.
- Kim, H.; Cosh, M. H.; Bindlish, r.; Lakshmi, V. Field evaluation of portable soil water content sensors in a sandy loam. **Vadose Zone J.**p. 19, e 20033, 2020. DOI:10.1002/vzj2.20033.
- Kim, H.; Cosh, M.H.; Bindlish,R.; Lakshmi,V. Field evaluation of portable soil water content sensors in a sandy loam. **Vadose Zone J.**, p. 19, 2020. 10.1002/vzj2.20033.
- LAMEPE/ITEP. Informações climáticas do Estado de Pernambuco, 2017. Disponível em: <http://www.itep.br/LAMEPE.asp>. Acesso em 26 de novembro de 2022.
- Lima, G. K.; Corrêa, M.M.; Junior, V.S.S. Mineralogia de Vertissolo Ebânico do Nordeste Brasileiro. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo- Natal-RN**. 2015.
- Lioutas,E.D.; Charatsari, C.; La Rocca, G.; Rosa, M. de. Key questions on the use of big data in farming: an activity theory approach. **NJAS – Wageningen J. Life Sci.**, 90, 2019. 10.1016/j.njas.2019.04.003.
- Matos, R.M.; Dantas Neto, J.; Lima, A.S.; Silva, P.F.; Borges, V.E.; Sobrinho, T.G. Teor de umidade por diferentes métodos em Neossolo do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, nº.4, p. 1588 - 1597, 2017. 10.7127/rbai.v11n400622.
- Melo, R. O.; Cantalice, J.R.B.; Araújo, A.M.; Filho, M.C. Produção De Sedimento Suspenso De Uma Típica Bacia Hidrográfica Semi-Árida. **VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos- Campo Grande-MS**. 2008.
- Ojo, E.T.; Bullock, P.R.; Fitzmaurice, J. Field Performance of Five Soil Moisture Instruments in Heavy Clay Soils. **Sci. Soc. Am. J.** v. 79, p. 20-29, 2014. 10.2136/sssaj2014.06.0250.
- Parahyba, R. da B. V.; Almeida, B. G. de; Neto, F. C. R.; Araújo, M. S. B. de; Silva, M. S. L. da. Retenção de água em solos arenosos da Bacia Sedimentar do Tucano, Bahia. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**. Natal-RN, 2015.
- Prado, D.E. As Caatingas da América do Sul. In: LEAL, R.I.; TABARELLI, M.; SILVA, J.M.C. da. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Ed. Universitária da UFPE. p. 823, 2003.

- Provenzano, G.; Gugliuzza, G.; Almeida, C.D.G.C. Response of Decagon 10HS soil water content sensor to different porous media. In: EGU General Assembly 2020, Viena-Austria: **European Geosciences Union**, 2020.
- Quintino, A. C.; Andrade, P. J.; Silva, T. J.; Caneppele, M. A.; Abreu, J. G. Métodos de Determinação de Umidade nos Solos de Cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, v.11, n.22, p. 2202-2213, 2015. <http://dx.doi.org/10.18677>.
- Robinson, D.A.; Campbell, C.S.; Hopmans, J.W.; Hornbuckle, B.K.; Jones S.B.; Knight, R.; Ogden, F. J.; Selker, O. Wendroth. Soil moisture measurements for ecological and hydrological watershed scale observatories: a review. **Vadose Zone J.**, v.7, pp. 358-389, 2008. 10.2136/vzj2007.0143.
- S.I. Seneviratne, T. Corti, E.L. Davin, M. Hirschi, E.B. Jaeger, I. Lehner, B. Orlowsky, A.J. Teuling Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review. **Earth Sci. Rev.**, v.99, p. 125-161, 2010. 10.1016/j.earscirev.2010.02.004.
- Saccon, P. Water for agriculture, irrigation management. **Applied Soil Ecology**, v.123, p. 793-796, 2018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0929139317311642>.
- Sena, C. C. R. S., Junior, J. A., Domingos, M. V. H., Junior, E. de J. A., Battisti, R., Evangelista, A. W. P., & Casaroli, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo / Calibration of the EC-5 capacitive soil moisture sensor in response to soil granulometry. *Brazilian Journal of Development*, 6(4), 17228–17240, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-043>.
- Silva, D. M. O. de. Calibração de sensores dielétricos ECH₂O para solos de referência na Zona da Mata de Pernambuco. 2016. 50 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.
- Silva, S.M.; Pessoa, J.G.; Souza, C.F. Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, vol. 12, e12217, 2022. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.12217>.
- Silveira, F., Lermen, F. H., Amaral, F.G. An overview of agriculture 4.0 development: systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.189, 106405, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106405>.
- Souza, C.F., Pires, R.C.M., Miranda, D.B.; Varallo, A.C.T., Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, vol. 18, no. 4, pp. 597-606, 2013. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, Ê. F. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.11, p.752-757, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p752-757>.

Topp, G.; Clarke, J.L.; Davis, A.; Peter, A. "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines." **Water Resources Research** 16, no.3: 574–582, 1980.

Topp, G.C.; Davis, J.L.; Annan, A.P.. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resour. Res.**, v.16 (3), p. 574-582, 1980. 10.1029/WR016i003p00574.

Visconti, F.; Paz, J. M.; Martínez, D.; Molina, M.J. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils, *Agricultural Water Management*, v.132, P. 111-119, 2014.DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.005>.

Willmott, C. J.; Ckleson, S. G.; Davis, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005. 1985.

CAPÍTULO III: DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE UMIDADE DO SOLO COM SECAGEM EM MICRO-ONDAS

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na agricultura digital tem evoluído significativamente nas últimas décadas, convergindo para o aprimoramento de tecnologias que fornecem subsídios para a tomada de decisão. Na irrigação não é diferente, sistemas mais simples, eficientes e com grande facilidade de conexão e coleta de dados, possibilitam a automação do manejo da irrigação (Feitosa et al, 2018).

Diversos equipamentos podem ser utilizados para o monitoramento da água no solo, com diferentes métodos e princípios de funcionamento (Singh et al., 2018; Topp, 2003; Silva et al., 2020;). Os métodos de determinação da umidade do solo podem ser diretos ou indiretos. Entre os métodos diretos a gravimetria, é considerada o método padrão por ser simples e preciso, porém, demorado e não pode ser repetido no mesmo local por se tratar de um método destrutivo. Por outro lado, os indiretos possuem respostas rápidas, no entanto, em geral necessitam de algum tipo de calibração específica em diferentes solos para otimizar a qualidade das leituras (Santos et al., 2006; Kim et al., 2020).

Dentre os métodos indiretos vale destacar as técnicas eletromagnéticas, exemplificadas pelas sondas capacitivas. Estas funcionam com base na emissão de ondas eletromagnéticas e sua propagação pelo solo, alterando as leituras em função do conteúdo de água presente no solo, resultando na leitura indireta da umidade do solo (Souza et al., 2016; Silva et al., 2020).

Entre os sensores capacitivos, o modelo EC-5 (METER Group, Inc. USA) possui facilidade de instalação em campo por apresentar duas hastes curtas que favorecem a inserção do sensor no solo, pode medir um volume de solo em torno $0,003 \text{ m}^3$, e tempo de resposta de cada medição é de aproximadamente 0,2 ms (METER Group, 2019). O que lhe torna um método rápido, não destrutivo e preciso se devidamente calibrado (Ojo et al., 2014).

O sensor capacitivo do modelo YL-69 é uma alternativa de baixo custo comparado ao sensor EC-5. A estimativa da umidade do solo é realizada através do módulo resistivo do sensor, causando maior tensão de saída quando a umidade do solo é baixa, e menor quanto maior a umidade do solo (Kolapkar et al., 2016). Esses sensores representam uma

proposta para auxílio no monitoramento de umidade e gestão da irrigação (Cardoso et al., 2018), desde que sejam devidamente calibrados.

A principal desvantagem da utilização desses equipamentos é a necessidade de calibração para os diferentes solos (Silva et al., 2022), pois a depender da metodologia utilizada pode demorar vários dias para se obter uma curva de calibração. Pensando nessa problemática, objetivou-se com esta pesquisa desenvolver uma metodologia rápida e acessível de calibração para sensores capacitivos utilizando um forno micro-ondas para secagem do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de estudo

O experimento foi conduzido no laboratório de solos, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC), localizada no município de Carpina-PE, distando 56 km da capital Recife. Situando-se entre as coordenadas 7° 50' 45" de latitude Sul, 35° 15' 18" de longitude Oeste e 178 m de altitude em relação ao nível do mar, de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum). O clima da região é do tipo As', megatérmico tropical (tropical úmido) de acordo com a classificação de Köppen (Tavares et al., 2017). A precipitação média é de 1.082 mm ano⁻¹, sendo que a maior concentração ocorre entre o outono e o inverno; com temperatura média anual de 24 °C.

2.2 Amostragem e preparo do solo

O Argissolo Vermelho-Amarelo foi selecionado diante da predominância de ocorrência na Estação Experimental. Amostras de solo deformadas foram coletadas na profundidade de 0-0,40 m. O solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha 4,75 mm. Em seguida, o solo foi acondicionado em vidraria tipo béquer com 1L de capacidade e em cinco repetições. No acondicionamento do solo, em cada béquer de peso conhecido, foi considerado o volume útil de 700 mL e calculada a respectiva massa de solo úmido para manter a densidade do solo original em campo. Os cálculos de densidade foram realizados conforme descritos no Capítulo II, tópico 2.3.

2.3 Uso do micro-ondas

2.3.1 Calibração do micro-ondas

Para secagem do solo em micro-ondas inicialmente foi necessário realizar a calibração do equipamento, a fim de saber a potência real. Seguindo a metodologia

descrita pela Oliveira e Roque (2016) e Embrapa (2002), com algumas modificações. Com o auxílio de um balão volumétrico foi acondicionado 1 kg de água em um béquer de polipropileno de 1 L, em temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) medida por termômetro digital de precisão $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Em seguida o recipiente foi coberto e levado forno de micro-ondas durante 2 min (120 s) à potência indicada como máxima (100%). Após esta etapa o recipiente foi retirado imediatamente do micro-ondas e agitado vigorosamente, para realizar a leitura da temperatura 30 s após o aquecimento. Este procedimento foi realizado para as potências 80% e 60%.

Para cada medida de potência foram realizadas três repetições e por fim, obtidas as respectivas médias. Com o emprego das condições experimentais descritas, 2 min e 1 kg de água destilada (capacidade calorífica a $25^\circ\text{C} = 0,9997 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), a equação de calibração pode ser simplificada para:

$$P = 34,86 \Delta T \quad \text{Equação 17}$$

Em que: P é a potência aparente absorvida pela amostra em Watts, e ΔT é a temperatura final menos a inicial ($^\circ\text{C}$).

Os resultados obtidos na etapa de calibração do micro-ondas indicam que a potência real do equipamento utilizado nessa pesquisa varia entre 474 e 660 W, correspondendo a 60 e 100% da potência estabelecida, respectivamente.

2.3.2 Determinação do Fator f

Para determinação do Fator f sem utilizar a estufa, foi necessário secar 20 g de solo, na umidade residual, em béquer de 200 mL até peso mínimo constante. Com intuito de encontrar um tempo médio para secagem do solo, foram utilizadas quatro repetições para o Argissolo-Vermelho-Amarelo (AVA). As leituras das pesagens das amostras de solo, secas em micro-ondas, foram comparadas com as pesagens obtidas na secagem de 20 g de solo, de cada classe, em estufa por 24h à 105°C . De posse do valor do Fator f, foi calculada a massa de solo úmido a ser colocada em cada béquer, de acordo com a respectiva densidade do solo.

2.3.3 Curva de calibração do sensor

A curva de secagem do solo é essencial para geração da equação de calibração de sensores de umidade do solo. Dessa forma, o solo foi acondicionado em béquer de 1000 mL e elevada a umidade próxima a capacidade de campo, por meio de um borrifador,

resultando em um volume de água de 160 mL. Posteriormente foi iniciado o processo de secagem com o auxílio do micro-ondas. Inicialmente, o equipamento foi ajustado em potência máxima por um período de 6 min, para as 3 primeiras sessões de secagem. Em seguida, por um tempo de 12 min de secagem, com intuito de se obter uma perda de água maior, por mais 3 sessões de secagem. A cada sessão de secagem o peso do conjunto solo+béquer foi registrado, para cálculo da respectiva umidade volumétrica (Equações 7 e 10 dos tópicos 2.3.1 e 2.4 do Capítulo II), bem como foram realizadas as leituras com sensores EC-5 e YL-69. Nessa etapa da pesquisa não foi utilizado o sensor 5TE devido a limitação de espaço disponível no béquer para acondicionar os três sensores respeitando as recomendações do fabricante em termos de distância das paredes do recipiente.

Os sensores foram inseridos no solo após o devido resfriamento do mesmo, tempo em torno de 40 min. Dessa forma, foram coletados seis pontos de umidade volumétrica para confecção da curva de calibração, desde a umidade inicial, após borrifar água, até a umidade mínima obtida após as sessões de secagem.

As curvas de calibração foram desenvolvidas por meio de análise de regressão relacionando o conteúdo volumétrico da água calculado (X), e o conteúdo de água estimado pelos sensores (Y).

2.4 Análise estatística

Para avaliação da precisão e exatidão das medidas estimadas pelos sensores, foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação de Pearson (r) para precisão, o índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985) para exatidão, o de Camargo & Sentelhas (1997) para expressar confiança ou desempenho do modelo proposto (c). Além dos índices estatísticos apresentados, outros índices também foram adotados: o erro absoluto médio (EAM), o erro padrão da estimativa (EPE) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Fares, et al. 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Metodologia de calibração proposta

A primeira etapa desenvolvida neste trabalho foi a secagem do solo em micro-ondas para a determinação do fator f, o qual foi utilizado para correção da massa de solo nas determinações analíticas em laboratório, correspondente a umidade residual do solo seco ao ar (Embrapa, 2017). Na Tabela 8, é possível verificar a comparação entre os

valores do fator f para o Argissolo-Vermelho-Amarelo (AVA) seco em estufa à 105°C por 24 h e seco em micro-ondas por tempo médio de 4 min.

Previamente foram testados diversos tempos de secagem, inferiores e superiores a 4min. Tempos menores de secagem resultaram em perdas de umidade insignificantes quando comparados com os valores obtidos em estufa. Quando o tempo de 6 min foi aplicado verificou-se o início de um processo de carbonização, provavelmente, devido a quantidade pequena de solo e a baixa umidade. Sendo assim, foi padronizado o tempo de secagem de 4 min, pois foi o que mais se aproximou do fator f obtido em estufa, com uma diferença média de 0,004 (Tabela 8). Uma vez obtido o fator f foi calculada a massa de água residual, a qual foi descontada para obtenção da massa de solo seco para confecção da curva de calibração.

Oliveira et al. (2016) verificaram que secagem de 8 e 10 minutos em micro-ondas, independente da textura do solo, retirar quantidades de água superiores ao método padrão de secagem em estufa, justificando que o método de micro-ondas tenha retirado água higroscópica.

Tabela 8. Valores do Fator f com secagem em estufa e em micro-ondas para o Argissolo-Vermelho-Amarelo (AVA).

Método de secagem	Fator f
Estufa (padrão)	1,018
Micro-ondas	1,014

Para construção da curva de secagem do solo em micro-ondas foi utilizada uma massa de solo seco de 1043 g, determinada após preenchimento do recipiente, de volume conhecido, mantendo a distância mínima, entre o sensor e as paredes do recipiente, recomendada pelo fabricante. Posteriormente, o solo foi submetido a sessões de secagem com tempos determinados e realizadas as leituras de umidade na base de massa (padrão) e por meio dos sensores. Para comparação da curva de secagem em micro-ondas foi utilizada uma curva de secagem do solo em vasos secos ao ar. Dessa forma foi possível verificar que o comportamento das curvas de secagem foi similar, indicando que o micro-ondas pode ser utilizado como forma alternativa e rápida para construção da curva de secagem (Figura 5). A obtenção dos dados para confecção da curva de secagem em micro-ondas demandou um tempo de aproximadamente 4 horas, enquanto a curva obtida pelo método padrão (secagem ao ar) demorou aproximadamente 30 dias.

3.2 Curva de calibração

As leituras de umidade efetuadas pelos sensores EC-5 e YL-69, após a calibração, demonstram similaridades com aquelas obtidas pelo método de secagem em micro-ondas (Figura 6). O sensor EC-5 demonstrou melhor performance em comparação ao sensor YL-69 para o solo estudado, representada pelos melhores índices estatísticos, resultando em uma classificação ótima para o coeficiente “c” de Camargo & Sentelhas (1997) após calibração (Tabela 9).

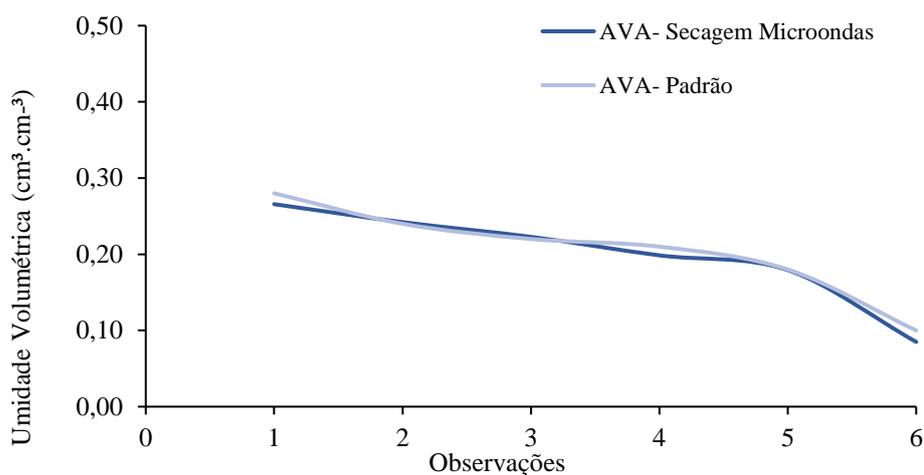


Figura 5. Curva de secagem do Argissolo Vermelho-Amarelo em micro-ondas e calibração padrão (estufa).

O sensor YL-69 demonstrou melhora considerável nas leituras de umidade após calibração com coeficiente de concordância (d) passando de 0,897 para 0,983, e classificação muito boa para ótima (Tabela 9). Considerando que o sensor YL-69 é um sensor de baixo custo e que, após calibrado, pode ser utilizado com segurança para leituras de umidade do solo, este sensor em conjunto com a metodologia de calibração de solo em micro-ondas pode ser uma alternativa em situação que necessitam agilidade, praticidade e economia, especialmente para agricultura familiar.

O índice de exatidão “d” refletiu a melhora significativa nas leituras dos sensores, após calibração, elevando os valores para 0,99 e 0,98 para os sensores EC-5 e YL-69, respectivamente. Dessa forma, observa-se uma ótima concordância entre os valores de umidade volumétrica padrão e os estimados pelos sensores após serem calibrados.

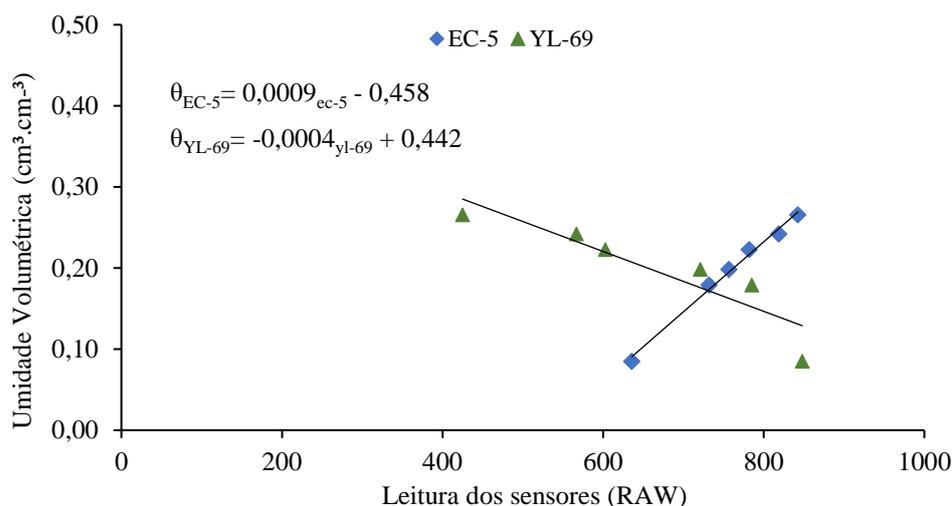


Figura 6. Curvas de calibração dos sensores YL-69 e EC-5 no Argissolo Vermelho-Amarelo com base na secagem em micro-ondas.

Tabela 9. Índices estatísticos das leituras efetuadas pelos sensores EC-5 e YL-69 no Argissolo Vermelho-Amarelo antes e depois da calibração com base na secagem em micro-ondas.

Solo	EC-5					YL-69			
	Calibração	R ²	r	D	Class.*	R ²	r	d	Class.*
Argissolo Vermelho-Amarelo	Sem	0,992	0,996	0,982	Ótimo	0,819	0,9052	0,897	Muito Bom
	Com	0,992	0,996	0,990	Ótimo	0,819	0,9052	0,983	Ótimo

*Camargo & Sentelhas (1997)

Os erros calculados para estimativa da umidade do solo pelos sensores indicam que houve maior dispersão dos valores gerados pelo sensor YL-69, comprovado pelo maior erro médio absoluto (EMA), erro máximo absoluto (EMAX) e a raiz quadrática média (RMSE), os quais foram reduzidos após calibração (Tabela 10). Os valores de umidade do solo estimados pelo sensor EC-5 também refletiram menor dispersão após a calibração, correspondente a < 0,003.

Tabela 10. Erros estatísticos das leituras efetuadas pelos sensores EC-5 e YL-69 no Argissolo Vermelho-Amarelo antes e depois da calibração com base na secagem em micro-ondas.

Solo	EC-5			YL-69			
	Calibração	EAM	EPE	RMSE	EAM	EPE	RMSE
Argissolo Vermelho-Amarelo	Sem	0,032	0,035	0,032	0,157	0,199	0,181
	Com	0,028	0,032	0,029	0,028	0,035	0,032

Diversos pesquisadores estudaram a secagem de solo em micro-ondas, e relatam que o tempo de secagem depende do teor de umidade inicial, da massa da amostra e textura do solo (Oliveira et al., 2016; Buske et al., 2001; Santos & Filho, 2019). Portanto, como o intuito desta pesquisa foi utilizar o micro-ondas para proporcionar a secagem mais rápida do solo visando a construção de uma curva de secagem, observa-se que é possível recomendar o uso do equipamento para tal finalidade.

O tempo de secagem pode ser relativo de acordo com a faixa de umidade que se deseja obter para cada ponto da curva, devendo ser observado os parâmetros citados anteriormente. Esta metodologia pode ser adotada como alternativa à metodologia padrão, em situações que exijam agilidade e diante da ausência de equipamentos sofisticados, como por exemplo, à nível de fazenda sendo plenamente acessível ao produtor rural, para determinação de umidade do solo com sensores capacitivos devidamente corrigida.

4. CONCLUSÕES

A metodologia simplificada para calibração dos sensores à nível da fazenda utilizando materiais de baixo custo e, acessíveis ao produtor rural, mostrou-se eficiente pois, os valores obtidos após a calibração foram similares àqueles resultantes da metodologia padrão de secagem em estufa. Associado à esta ideia, o sensor YL-69, em virtude do menor custo de aquisição e praticidade, representa uma ferramenta viável na determinação da umidade do solo para fins de irrigação, desde que devidamente calibrado.

5. REFERÊNCIAS

- Buske, T.C; Robaina, A. D; Pelter, M. X; Braga, F.U.A. Determinação da umidade do solo por diferentes fontes de aquecimento. **Irriga**, Botucatu-SP, v. 19, n. 02, p. 315 - 324, 2014 DOI: 10.15809/irriga.2014v19n2p315.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Cardoso, G. G.G.; Carvalho, J.S.; Silva, J. E. F.A. Manejo da Irrigação na Cultura da Alfaca Via Arduino Uno R3. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 2, p. 273-285, 2018. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2018v23n2p273-285>.
- Embrapa, 2017. **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF.
- Embrapa. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de micro-ondas doméstico. **Circular Técnica**. São Carlos-SP, ISSN 1516-411X, Dez. 2002.
- Fares, A.; Abbas, F.; Maria, D.; Mair, D. Improved Calibration Functions of Three Capacitance Probes for the Measurement of Soil Moisture in Tropical Soils. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4858-4874, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110504858>.
- Feitosa, R.; Silva, É.; Vásquez, M.; Santos, F. Smartirrigation: um Sistema de Gerenciamento Remoto da Irrigação Localizada e por Aspersão. **Irriga**. 2018. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n2p60-65>.
- Kim, H., M.H. Cosh, R. Bindlish, V. Lakshmi. Field evaluation of portable soil water content sensors in a sandy loam. **Vadose Zone J.**, v. 19, 2020. 10.1002/vzj2.20033.
- Kolapkar, M. M.; Khirade, P. W.; Sayyad, S. B. Design and Development of Embedded System for Measurement of Humidity, Soil Moisture and Temperature in Polyhouse using 89E516RD Microcontroller. **International Journal of Advanced Agricultural Sciences and Technology**, v. 5, n. 1, p.96-110, 2016. DOI: <https://doi.org/10.23953/cloud.ijaast.230>.
- METER Group. EC-5 Soil Moisture Sensors. METER Group, 2019. Disponível em: http://publications.metergroup.com/Manuals/20431_EC-5_Manual_Web.pdf Acesso: 27 Dez. 2021.
- Ojo, E.T.; Bullock, P.R.; Fitzmaurice, J. Field Performance of Five Soil Moisture Instruments in Heavy Clay Soils. **Sci. Soc. Am. J.** v. 79, p. 20-29, 2014. 10.2136/sssaj2014.06.0250.
- Oliveira, L. F. C.; Roque; C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 3, n. 4, p. 60-64, out./dez. 2016.
- Oliveira, L. F. C.; Roque; C. G. Determinação da umidade do solo por micro-ondas e estufa em três texturas de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 3, n. 4, p. 60-64, out./dez. 2016.

Santos, S. L. M.; Filho, E. P. S. Determinação da Umidade de Solo pelos Métodos Estufa e Forno Micro-Ondas em Diferentes Texturas de um Latossolo Vermelho Amarelo Sul-Amazônico. **Geografia** (Londrina) v. 28. n. 2. pp. 41-60, 2019. DOI: 10.5433/2447-1747.2019v28n2p41.

Silva, A.O.; Silva, B.A.; Souza, F.C.; Azevedo, B.M.; Bassoi, L.H.; Bonfim, G.V.; Juarez, J.M.; Santos, A.F.; Carneiro, F.M. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, Special Agriculture 4.0, e20207695, 2020. DOI: 10.5935/1806-6690.20200090.

Silva, S.M.; Pessoa, J.G.; Souza, C.F. Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, vol. 12, e12217, 2022. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.12217>.

Singh, J. L. T.; Rudnick, D. R.; Dorr, T. J.; Burr, C. A.; Werle, R.; Muñoz-Arriola, F. Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil. **Agricultural Water Management**, v.196, 87–98, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.020>.

Souza, C.F.; Silva, C.R.; Andrade Junior, A.S.; Coelho, E.F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, vol. 1, no. 1, pp. 26-42, 2016. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>.

Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Simões Neto, D. E.; Pedrosa, E. M. R.; Magalhães, A. G.; Silva, Ê. F. F. Aggregate stability and penetration resistance after mobilization of a dystrocohesive Ultisol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.11, p.752-757, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n11p752-757>.

Topp, G.C. State of the art of measuring soil water content. *Hydrological Processes*. v. 17, p. 2993–2996, 2003.

Willmott, C. J.; Ckleson, S. G.; Davis, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005. 1985.

CAPÍTULO IV: DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA PARA MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A IoT (Internet das Coisas) é a tecnologia que proporciona a criação de projetos físicos conectados à internet, permitindo a troca de informações, enviando e recebendo comandos via rede. Em conjunto com a automação os sistemas IoT vem mudando a rotinas das atividades diárias, e impactando fortemente em áreas como a educação, negócios, medicina, comunicação, governos, e na agricultura (Muxito et al., 2018). A agricultura tem se caracterizado como uma das principais áreas prospectivas para projetos baseados em IoT, por ser um setor produtivo bastante evoluído, e principalmente necessitar de tecnologias que reduzam a mão de obra em operações simples.

O Arduino é uma ferramenta que pode auxiliar no comando de sistemas agrícolas, como por exemplo: Sistemas de irrigação, com monitoramento de dados em tempo real, gestão de processos e racionalização de recursos (Basso et al., 2019; Farooq et al., 2019). O Arduino atua no processamento de dados de sensores e toma decisões com base nesses dados. Na hidroponia e sistemas de irrigação, as variáveis temperatura, vazão, pH, umidade do ar e condutividade elétrica podem ser monitoradas usando IoT, por meio de sensores e controladores como ESP8266, Arduino e Raspberry (Mehra et al., 2018). Para integrar IoT, ao Arduino precisa de uma conexão com a internet, a qual pode ser realizada utilizando um módulo Wi-Fi ou Ethernet. Atualmente no mercado existem placas que já possuem Ethernet em sua composição (ESP8266), facilitando a criação de projetos. A integração com a internet permite o Arduino enviar os dados dos sensores e receber comandos de controle por meio dessa conexão.

A aquisição de dados pode ser realizada utilizando o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), projetado para comunicação leve, em redes com largura de banda limitada e recomendado para cenários com troca de informações frequente e mensagens reduzidas (Farooq et al, 2019). Este protocolo é frequentemente utilizado em rede de sensores e dispositivos embarcados, apresentado como solução para monitoramento, rastreamento, análise e coleta de dados no setor agrícola (Jaishetty & Patil, 2016; Kodali & Sarjerao, 2017). A comunicação pode ser assíncrona, permitindo a interação dos dispositivos estáveis sem a necessidade de uma conexão contínua.

Para tornar o sistema de automação acessível remotamente, você pode usar uma plataforma IoT, como por exemplo, a ThingsBoard que permite a conectividade de

dispositivos por meio de protocolos IoT padrão do setor (MQTT, CoAP e HTTP). Assim, é possível configurar dashboards de IoT personalizáveis, com vários widgets que visualizam dados de vários dispositivos conectados. Dessa forma, o usuário pode ter acesso às informações do projeto em tempo real e em qualquer lugar do mundo (ThingsBoard, 2023). Plataformas como esta permite que você armazene e visualize os dados coletados pelos sensores, além de controlar por exemplo, sistema de irrigação remotamente por meio de um aplicativo ou interface web (Ferrández-Pastor, 2016).

Contudo, sistemas embarcados em conjunto com a IoT permitem criar um sistema de automação da irrigação que coleta dados, toma decisões com base nesses dados e pode controlar um sistema remotamente melhorando a eficiência na tomada de decisão. Objetiva-se nesta pesquisa desenvolver uma aplicação para acesso e monitoramento remota da umidade do solo baseado na interação da plataforma ESP8266 e IOT, com intuito de facilitar a tomada de decisão em quando e quanto irrigar.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a condução da pesquisa foi desenvolvido um protótipo que compõe o sistema embarcado utilizando o módulo ESP8266, o qual é bastante utilizado devido à sua capacidade de conectividade Wi-Fi, baixo custo e ideal para projetos de IoT.

As principais funcionalidades do protótipo desenvolvido nesta pesquisa são: leitura de umidade do solo, históricos de leituras realizadas, apresentação de gráfico com leituras de umidade em função do horário, acionamento do sistema de bombeamento de irrigação com base na umidade do solo, acesso remoto aos dados via site web ou aplicativo móvel de celular.

2.1 Componentes Hardware

Na composição do sistema hardware foi utilizado um Modulo ESP8266, que é semelhante ao Arduino Uno com entrada micro USB para alimentação e programação. Esta placa é o controlador do sistema, e envia os comandos para realização das leituras dos sensores. O sensor de umidade do solo YL-69, composto por duas sondas que medem a resistência que passa entre elas, um chip comparador LM939 com um potenciômetro digital que amplia os sinais disponibilizados pelos sensores e envia para o microcontrolador, foi utilizado no protótipo.

Para simular o controle de um sistema de bombeamento para irrigação, foi utilizada uma minibomba com um relé no microcontrolador que atuou como uma chave.

Quando o módulo ESP8266 enviava um sinal para o relé, este fecha ou abre um circuito elétrico, permitindo o controle dos dispositivos com cargas de maior tensão do que o próprio microcontrolador pode fornecer. A minibomba de aquário de 12 V foi instalada para fazer a sucção por meio de um tubo flexível em um reservatório. O recalque desse minissistema era composto por um tubo flexível perfurado sob um vaso cultivado, para simular um sistema de irrigação. Para alimentação do protótipo foram utilizadas duas fontes, uma de 5 V para o microcontrolador e outra, de 12 V para a minibomba.

2.2 Interface Arduino IDE

A comunicação com o protótipo foi realizada por meio da Integrated Development Environment (IDE- Arduino), que permite efetuar a programação. Inicialmente, é necessário definir as configurações da placa e da porta para permitir o upload código. Esta conexão é feita através do cabo USB no modem para o PC.

2.3 Linguagem de programação

A programação foi desenvolvida utilizando a linguagem C++ com algumas modificações específicas para Arduino. Algumas bibliotecas disponíveis para a IDE Arduino foram utilizadas, tais como: *ESP8266WiFi.h*, responsável por fazer a conexão da placa ESP8266 com a rede wi-fi local; *PubSubClient.h*, para estabelecer a liberação da rede wi-fi; *TimeAlarms.h*, para definir períodos de tempos em determinadas funções e *TimeLib.h*, para definir o horário programado.

O protocolo MQTT foi utilizado para aplicações da internet das coisas, realizando a função padrão publicação/assinatura para o tráfego de mensagens entre dispositivos (Neri et al., 2019). Com isso, foi possível fornecer informações em tempo real para o protótipo em rede com código simplificado e baixo consumo de banda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo foi desenvolvido com intuito de automatizar o acionamento e desligamento de uma bomba no sistema de irrigação com base na umidade do solo. Inicialmente, os equipamentos envolvidos no hardware foram montados (Figura 7) por meio das conexões de todos os componentes à placa ESP8266 com jumpers.

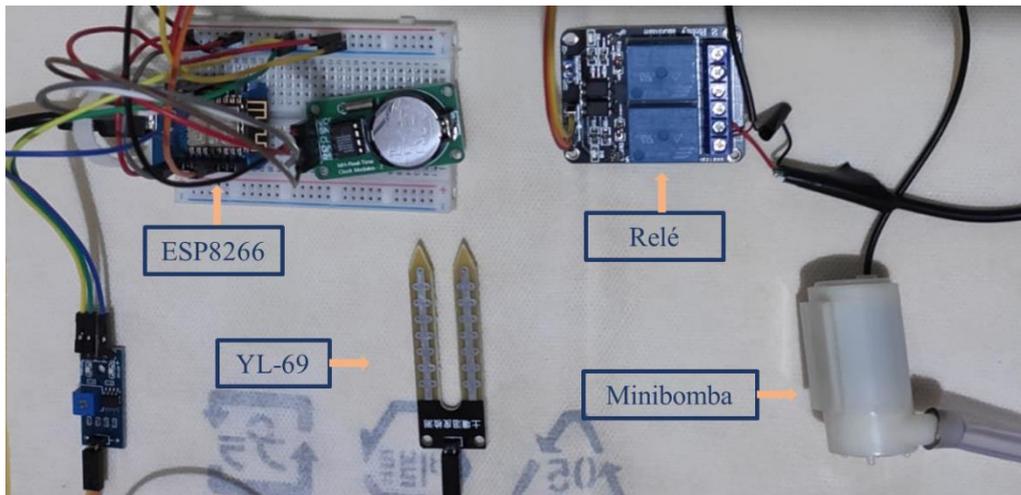


Figura 7. Componentes do protótipo: sensor de umidade YL-69, relé e minibomba conectados à placa ESP8266.

A ligação do sensor de umidade YL-69 é realizada diretamente na placa ESP8266 com dois pinos, sendo um deles para o terra (porta digital) e o outro em uma porta analógica. O relé também é conectado à placa Arduino por uma porta digital, além de ser alimentado com uma fonte externa, uma vez que o relé realiza a energização da minibomba quando recebe o comando da placa para acionamento. O relé é necessário pois a minibomba atua com uma voltagem (12 V) diferente da placa ESP8266 (5 V).

O código de programação (Figura 8) foi desenvolvido com os seguintes comandos: realizar a leitura analógica do sensor de umidade do solo, acionar LED quando a minibomba for ligada, processar o valor do sensor, em função dos limites pré-estabelecidos pelo usuário e acionar ou não o relé de acordo com a umidade do solo, estabelecer comunicação via Wi-Fi com a plataforma ThingsBoard, monitorar os valores da umidade do solo medidos pelo sensor na plataforma ThingsBoard e por fim verificar e exibir o status da bomba de irrigação (on/off).

Nesta pesquisa foi definido que o acionamento da bomba de irrigação acontece quando a umidade do solo for menor que 20%, permanecendo ligada pelo tempo necessário para elevar a umidade do solo ao nível da capacidade de campo. Em seguida, a umidade do solo é verificada novamente para conferir se a irrigação realmente aconteceu, caso contrário seria irrigado novamente.

```

void loopsensor (){
  //Serial.println("antespublish");

  //LER O VALOR DO PINO A0 DO SENSOR
  valor_analogico = analogRead(PINO_SINAL_ANALOGICO);
  umidade0 = map(valor_analogico, 0,1024,100,0);//1(SG1)

  //umidade0 = (valor_analogico*100)/1023;
  //umidade0 = analogRead(A0);

  if (umidade0 <= LIMIAR){ //SE A LEITURA DO PINO FOR MENOR OU IGUAL 30%
    digitalWrite(D4, LOW); //ACENDE O LED
  }else{ //SENÃO, FAZ
    digitalWrite(D4, HIGH); //APAGA O LED

  }

  if (umidade0 <= LIMIAR) { // Se a porcentagem for maior ou igual à
    Serial.println("Planta Irrigando ..."); // Imprime a frase no monitor serial
    if(bombadesligada){
      ligarbomba();
      Serial.println("bomba ligada ..."); // Imprime a frase no monitor serial
      bombadesligada = false;
      Alarm.timerOnce(120, desligarbomba);
    }
  }
}

```

Figura 8. Void Loopsensor, parte do código que determina o acionamento do sistema de irrigação do protótipo.

A plataforma de Iot ThingsBoard se mostrou uma ótima ferramenta para monitoramento em tempo real da umidade do solo e status da bomba, pois demonstrou com fidelidade as ações que aconteciam no protótipo (Figura 9). Além da versão web, também foi possível fazer o download e instalação do aplicativo da plataforma no smartfone e monitorar o funcionamento do protótipo por meio do celular.

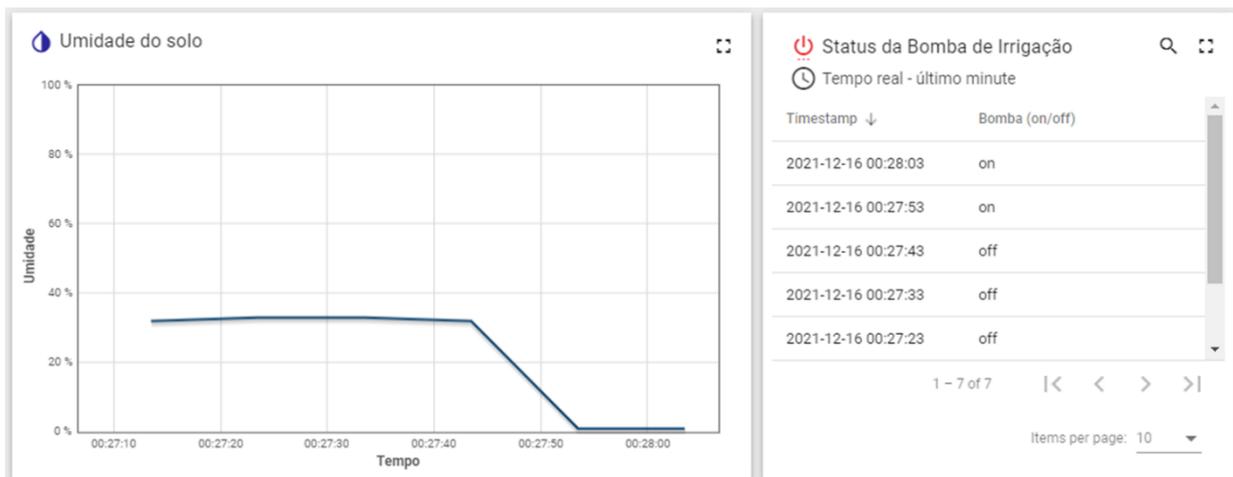


Figura 9. Monitoramento da umidade do solo e Status da bomba de irrigação em tempo real, utilizando IOT e plataforma Thingsboard.

O protótipo foi testado simulando um sistema de irrigação utilizando um reservatório com água, uma minibomba e uma mangueira perfurada sobre um vaso com uma planta ornamental. Dessa forma, foi verificado pleno êxito no acionamento da irrigação com base na umidade do solo, bem como da duração do tempo de irrigação determinado.

O custo aproximado da placa ESP8266, um sensor de umidade YL-69 e dois relés é de US\$ 25.00. Portanto, pode ser considerado um sistema de baixo custo, sendo indicado para automatizar sistemas de irrigação em pequenas propriedades rurais. O custo da bomba não foi considerado uma vez que, sua seleção depende da vazão do sistema de irrigação e altura manométrica total sendo, portanto, variável de acordo com cada situação.

4. CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido nesta pesquisa demonstrou potencial para automação de um sistema de irrigação, de forma segura e confiável representando uma solução de baixo custo, para monitorar a umidade do solo e, disponibilizar os dados para tomada de decisão, por meio de uma plataforma IOT.

5. REFERÊNCIAS

Bassoi, L. H.; Inamasu, R. Y.; Bernardi, A. C. C.; Vaz, C. M. P.; Speranza, E. A.; Cruvinel, P. E. Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, v. 1, n. 20, p. 17-36, 2019. Doi:<https://orcid.org/0000-0001-9469-8953>.

Farooq, M. S.; Riaz, S.; Abid, A.; Abid, K.; Naeem, M. A. A survey on the role of IoT in agriculture for the implementation of smart farming. **IEEE Access**, Nova Jersey, v. 7, p. 156237-156271, 2019. Doi: 10.1109/ACCESS.2019.2949703.

Ferrández-Pastor, F. J.; García-Chamizo, J. M.; Nieto-Hidalgo, M.; Mora-Pascual, J.; Mora-Martínez, J. Developing Ubiquitous Sensor Network Platform Using Internet of Things: Application in Precision Agriculture. **Sensors**, v. 16, 1141, 2016. doi:10.3390/s16071141.

Jaishtetty, S. A.; Patil, R. IoT sensor network based approach for agricultural field monitoring and control, **Int. J. Res. Eng. Technol.**, vol. 5, no. 6, pp. 14, 2016.

Kodali, R. K.; Sarjerao, B. S. A low cost smart irrigation system using MQTT protocol. in Proc. IEEE Region 10 Symp. (TENSYP), pp. 15. Jul. 2017. Doi:10.1109/TENCONSpring.2017.8070095.

Mehra, M.; Saxena, S.; Sankaranarayanan, S.; Tom, R. J.; Veeramanikandan, M. IoT based hydroponics system using Deep Neural Networks. **Computers and electronics in agriculture, Amsterdã**, v. 155, p. 473-486, 2018. Doi: 10.1016/j.compag.2018.10.015.

Muxito, E. M.; Silva, A. M.; Duarte, C.; Eduardo, A. A. A.; Sambongo, E. T. IoT na Agricultura – Automação de Pivôs e Canais de Irrigação com Arduino e Webservice. In: CONGRESSO INTERNACIONAL ADVENTISTA DE TECNOLOGIA – CIAT, 3., 2018, Hortolândia. Anais [...]. Hortolândia: Centro Universitário Adventista de São Paulo. 2018.

Neri, R.; Lomba, M.; Bulhões, G. Mqtt. Departamento de Eletrônica Escola Politecnica UFRJ, 2019. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/mqtt/>. Acesso em: 21 Ago. 2023.

ThingsBoard. Open-source IoT Platform. 17 de junho de 2023. Disponível em: <<https://thingsboard.io/>>. Acesso em: 17 de jun. 2023.