

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

Patrícia Tayane Alves Rodrigues

**CALIBRAÇÃO E DESEMPENHO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO
CUSTO EM SOLOS COM DIFERENTES ATRIBUTOS QUÍMICOS**

São João Evangelista

2026

PATRÍCIA TAYANE ALVES RODRIGUES

**CALIBRAÇÃO E DESEMPENHO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO
CUSTO EM SOLOS COM DIFERENTES ATRIBUTOS QUÍMICOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica.
Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista

2026

R696c Rodrigues, Patrícia Tayane Alves.
Calibração e desempenho de sensores capacitivos de baixo custo em solos com diferentes atributos químicos / Patrícia Tayane Alves Rodrigues – 2026.
34f.:il.

Orientador: Dr.Jonathan da Rocha Miranda.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2026.

1.Agricultura irrigada. 2. Sensores de umidade. 3. Calibração de sensores. 4. FDR. 5. Manejo de irrigação. I. Rodrigues, Patrícia Tayane Alves. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD631.4

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333


Patrícia Tayane Alves Rodrigues

**CALIBRAÇÃO E DESEMPENHO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO
CUSTO EM SOLOS COM DIFERENTES ATRIBUTOS QUÍMICOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia
Agrônômica do Instituto Federal de Educação
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais –
Campus São João Evangelista para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Agrônômica.


Aprovado em 10/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JONATHAN DA ROCHA MIRANDA
Data: 04/03/2026 09:25:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda (Orientador)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais–*Campus* São João
Evangelista

Documento assinado digitalmente
 RICARDO GOMES DE OLIVEIRA
Data: 04/03/2026 10:49:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Ricardo Gomes de Oliveira

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais–*Campus* São João
Evangelista

Documento assinado digitalmente
 LUCAS BARROS SOUZA
Data: 04/03/2026 19:16:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Esp. Lucas Barros Souza

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais–*Campus* São João
Evangelista

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder saúde, força e perseverança para superar cada desafio ao longo dessa caminhada.

À minha família, base e alicerce da minha vida, expresso minha mais profunda gratidão. Foram eles que me sustentaram nos momentos de incerteza, celebraram cada conquista e nunca permitiram que eu desistisse diante das dificuldades. Em especial, à minha mãe, Serafina Rodrigues Fernandes, exemplo de amor, coragem e dedicação, que com seus ensinamentos e apoio foi meu maior incentivo para seguir em frente. À minha irmã, Pâmela Alves Rodrigues, pelo companheirismo e por sempre acreditar no meu potencial. Ao meu companheiro, Paulo Sergio Soares Lima, pela paciência, compreensão, apoio constante e por estar ao meu lado em todos os momentos, tornando essa jornada mais leve.

Expresso minha sincera e profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda, pela confiança depositada em mim, pela orientação e comprometimento, pelos ensinamentos compartilhados e pela disponibilidade durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação foi fundamental para minha formação acadêmica.

Agradeço, de maneira especial, a todos os professores e servidores da instituição, que ao longo da graduação contribuíram não apenas com conhecimentos técnicos e científicos, mas também com ensinamentos que ultrapassam a sala de aula, colaborando para minha formação pessoal, ética e profissional.

Por fim, agradeço aos colegas da turma AGR 211, pela parceria, pelas trocas de experiências, apoio mútuo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa trajetória.

"É justo que muito custe o que muito vale."

- Santa Teresa d'Ávila

RESUMO

O monitoramento preciso do conteúdo de água no solo é fundamental para a eficiência do manejo da irrigação e a sustentabilidade dos recursos hídricos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho e realizar a calibração de sensores capacitivos de baixo custo, baseados na técnica de Refletometria no Domínio da Frequência (FDR), em sete classes de solos com características físico-químicas distintas. O experimento foi conduzido em laboratório, utilizando o método gravimétrico como referência padrão. As amostras foram submetidas a ciclos de saturação e secagem controlada (dessorção), correlacionando-se os sinais eletrônicos de saída dos sensores (modelos AP1 e AP2) com a umidade volumétrica real. Os resultados demonstraram que a calibração genérica de fábrica é inadequada para as condições edáficas estudadas. O sensor AP2 apresentou limitações operacionais significativas, exibindo comportamento não linear e insensibilidade em faixas de alta umidade (saturação > 80%) e baixa umidade, restringindo sua utilidade prática. O sensor AP1 apresentou melhor ajuste linear e sensibilidade, contudo, sua precisão foi influenciada pela composição da matriz do solo. Observou-se que elevados teores de potássio e alta saturação por bases aumentaram a condutividade elétrica, gerando ruídos e superestimativas nas leituras, enquanto o teor de matéria orgânica afetou os parâmetros de intercepto das equações de regressão. Conclui-se que a viabilidade técnica desses sensores de baixo custo, especialmente o modelo AP1, depende imperativamente de calibrações específicas que considerem não apenas a textura, mas também a salinidade e a densidade do solo, garantindo a confiabilidade necessária para o manejo da irrigação.

Palavras-chave: Agricultura irrigada. Sensores de umidade. Calibração de sensores. FDR. Manejo de irrigação.

ABSTRACT

Accurate monitoring of soil water content is essential for irrigation management efficiency and the sustainability of water resources. This study aimed to evaluate the performance and perform the calibration of low-cost capacitive sensors based on the Frequency Domain Reflectometry (FDR) technique across seven soil classes with distinct physicochemical characteristics. The experiment was conducted in a laboratory setting, using the gravimetric method as the standard reference. Samples were subjected to controlled saturation and drying (desorption) cycles, correlating the electronic output signals of the sensors (models AP1 and AP2) with the actual volumetric moisture. The results demonstrated that the generic factory calibration is inadequate for the studied edaphic conditions. The AP2 sensor showed significant operational limitations, exhibiting non-linear behavior and insensitivity in high moisture (saturation > 80%) and low moisture ranges, restricting its practical utility. The AP1 sensor presented a better linear fit and higher sensitivity; however, its precision was influenced by the soil matrix composition. It was observed that high potassium content and high base saturation increased electrical conductivity, generating noise and overestimates in the readings, while the organic matter content affected the intercept parameters of the regression equations. It is concluded that the technical feasibility of these low-cost sensors, especially the AP1 model, imperatively depends on specific calibrations that consider not only texture but also salinity and soil bulk density, ensuring the necessary reliability for irrigation management.

Keywords: Irrigated agriculture. Moisture sensors. Sensor calibration. FDR. Irrigation management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sensor Multivariável de alta performance, modelo Gemho RS485	18
Figura 2 - Monitor digital de solo da marca KKMOON	19
Figura 3 - Saturação das amostras de solo por capilaridade.....	20
Figura 4 - Processo de secagem controlada das amostras de solo em estufa.	21
Figura 5 - Acondicionamento em ambiente dessecador para resfriamento térmico.....	21
Figura 6 - Comportamento temporal da umidade base seca e das leituras dos sensores durante o processo de secagem.....	25
Figura 7 - Dispersão dos valores lidos pelos sensores AP1 e AP2 em relação à umidade real para as diferentes classes de solo.....	26
Figura 8 - Comparação entre a umidade predita pelos modelos de calibração e a umidade real medida para os sensores AP1 e AP2.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos físico-químicos das amostras de solo utilizadas na calibração dos sensores FDR.	17
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos e equações de regressão linear para a umidade base seca (UBS) em função das leituras dos sensores AP1 e AP2 nas sete amostras de solo.	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Importância do Monitoramento da Água no Solo para a Irrigação.....	13
2.2 A Água no Solo e Métodos de Medição	14
2.3 Sensores de Baixo Custo e Automação	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Conjunto Amostral.....	17
3.2 Sensores Avaliados	17
3.3 Calibração dos Equipamentos.....	19
3.3.1 Saturação por Ascensão Capilar.....	19
3.3.2 Ciclos de Secagem e Monitoramento	20
3.4 Determinação da Umidade de Referência (UBS)	22
3.5 Análise Estatística Detalhada	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÕES.....	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada desempenha um papel estratégico na segurança alimentar global, sendo o setor que mais demanda recursos hídricos. Diante da crescente escassez de água e da necessidade de otimização energética, o manejo eficiente da irrigação tornou-se imperativo (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; ANA, 2017). Para que esse manejo seja realizado com precisão, é fundamental o monitoramento contínuo do conteúdo de água no solo, permitindo a aplicação da lâmina correta no momento oportuno, evitando tanto o estresse hídrico quanto o desperdício de água e a lixiviação de nutrientes (PIZETTA, 2015; SOUZA *et al.*, 2016).

Historicamente, o método gravimétrico é considerado o padrão de referência para a determinação da umidade do solo devido à sua exatidão. No entanto, trata-se de um método destrutivo, trabalhoso e que não permite o monitoramento em tempo real ou a automação do sistema, uma vez que exige a coleta física de amostras e um longo período de secagem em estufa (RAMOS *et al.*, 2014; TEIXEIRA *et al.*, 2017). Para superar essas limitações, métodos indiretos baseados em propriedades eletromagnéticas do solo, como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), ganharam destaque nas últimas décadas (SOUZA *et al.*, 2013; ALHADCHITI *et al.*, 2025).

O princípio de funcionamento desses sensores fundamenta-se na significativa diferença entre a constante dielétrica da água (aproximadamente 80) em comparação com a das partículas sólidas do solo (entre 3 e 5) e a do ar (próximo de 1). Assim, a variação da umidade volumétrica altera a permissividade dielétrica aparente do meio, o que é detectado pelos sensores através da variação na velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas (TDR) ou na frequência de oscilação de um circuito capacitivo (FDR) (ANDRADE JUNIOR; SILVA; DANIEL, 2007; SOUZA *et al.*, 2016).

Apesar da alta precisão dos equipamentos comerciais de TDR e FDR, o elevado custo de aquisição ainda representa uma barreira significativa para a adoção massiva dessa tecnologia, especialmente por pequenos e médios produtores (SOUZA *et al.*, 2006; MENDES *et al.*, 2021). Nesse cenário, o surgimento de sensores capacitivos de baixo custo, impulsionado pelo avanço da eletrônica e da Internet das Coisas (IoT), apresenta-se como uma alternativa promissora para democratizar o acesso à agricultura de precisão (AZEVEDO, 2021; RATTIS *et al.*, 2018).

Contudo, a utilização desses dispositivos de baixo custo impõe desafios técnicos. A literatura científica alerta que as curvas de calibração genéricas fornecidas pelos fabricantes

frequentemente falham em estimar corretamente a umidade em solos tropicais (SILVA *et al.*, 2012; GALLET *et al.*, 2025). A precisão desses sensores é fortemente influenciada por atributos físicos e químicos do solo, tais como a densidade, a textura (teores de argila), a mineralogia (óxidos de ferro) e a salinidade (condutividade elétrica), que afetam a constante dielétrica aparente e podem gerar erros significativos de leitura se não houver uma calibração local específica (BAUMHARDT; LASCANO; EVETT, 2000; SARAIVA *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2024).

Diante da necessidade de validar tecnologias acessíveis para o manejo hídrico, este trabalho propõe a calibração de sensores capacitivos de baixo custo (modelos Gemho RS485 e monitor digital KKMOON) em sete classes de solos representativas da região de São João Evangelista - MG. O estudo correlaciona a resposta dielétrica dos sensores com a umidade volumétrica real obtida pelo método padrão (gravimétrico) sob condições dinâmicas de secagem, visando obter equações de ajuste que garantam a confiabilidade dos dados para o uso prático na irrigação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância do Monitoramento da Água no Solo para a Irrigação

A agricultura irrigada desempenha um papel central na segurança alimentar e na economia, sendo responsável por uma parcela significativa do consumo de água doce disponível (MENDES *et al.*, 2021). No Brasil, a expansão da área irrigada tem sido fundamental para o aumento da produção agrícola, permitindo o cultivo em regiões com déficit hídrico e a estabilidade na oferta de alimentos (MACHADO; FERRARINI, 2023). Contudo, diante da crescente escassez de recursos hídricos e das mudanças climáticas, a eficiência no uso da água tornou-se um imperativo para a sustentabilidade (ANA, 2017).

O monitoramento preciso do conteúdo de água no solo é a base para o manejo racional da irrigação. O conhecimento do "status" da água no solo permite determinar o momento oportuno e a quantidade exata de água a ser aplicada, evitando tanto o estresse hídrico, que compromete o desenvolvimento fisiológico e a produtividade das culturas, quanto o excesso de água, que resulta em desperdício de recursos, lixiviação de nutrientes e aumento dos custos com energia elétrica (SOUZA *et al.*, 2016; ANDRADE, 2013).

Estudos indicam que a falta de critérios técnicos no manejo da irrigação é frequente, levando produtores a irrigarem empiricamente, muitas vezes em excesso, por receio de que a planta sofra com a falta de água (SILVA, 2019). A adoção de tecnologias de monitoramento, como sensores de umidade baseados na constante dielétrica (FDR e TDR), permite a obtenção de dados em tempo real sobre a dinâmica da água na zona radicular (ALHADCHITI *et al.*, 2025; SOUZA *et al.*, 2013). Essa informação é crucial para manter a umidade do solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, faixa que assegura a disponibilidade hídrica ideal para a absorção pelas raízes (PRIMO *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2018).

Além dos benefícios diretos na produtividade, o monitoramento eficiente contribui para a preservação ambiental. O controle rigoroso da lâmina de irrigação minimiza a percolação profunda e o carreamento de fertilizantes para o lençol freático, mitigando a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos (FARES; ALVA, 2000 *apud* MACHADO, 2019). Portanto, a instrumentação e a automação do monitoramento da água no solo não representam apenas um aprimoramento técnico, mas uma estratégia essencial para a viabilidade econômica e ambiental da agricultura irrigada moderna (AZEVEDO, 2021; SILVA; PESSOA; SOUZA, 2022).

2.2 A Água no Solo e Métodos de Medição

O monitoramento da água no solo é essencial para estudos de movimento e disponibilidade hídrica, erosão e, fundamentalmente, para o manejo da irrigação. O conhecimento do "status" da água no solo é primordial para determinar o momento e a quantidade correta de água a ser aplicada, visando a manutenção das culturas e a maximização da produtividade, evitando o desperdício de recursos hídricos e energéticos (Souza et al., 2016; Silva *et al.*, 2012). Além de suprir a demanda evapotranspirométrica, a água no solo influencia propriedades físicas como aeração, resistência à penetração e temperatura, afetando diretamente o desenvolvimento do sistema radicular (Klein; Libardi, 2000; Pizetta, 2015).

A determinação da umidade pode ser realizada por métodos diretos e indiretos (Andrade Junior *et al.*, 2007).

O método direto padrão é a gravimetria, que se baseia na quantificação da massa de água removida de uma amostra de solo. O procedimento consiste na coleta de amostras (com estrutura deformada ou indeformada), pesagem da massa úmida e posterior secagem em estufa com circulação forçada de ar, geralmente a 105°C ($\pm 5^\circ\text{C}$) até atingir massa constante, o que ocorre habitualmente após 24 horas (Viana, 2024; Teixeira *et al.*, 2017). A umidade gravimétrica (U) é obtida pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco. Para fins de manejo de irrigação, a umidade volumétrica (θ) é a variável de interesse, sendo calculada pelo produto da umidade gravimétrica pela densidade do solo (Viana, 2024; Mendes *et al.*, 2021). Apesar de sua alta exatidão e de ser a referência obrigatória para a calibração de outros sensores (Santos *et al.*, 2006; Gallet *et al.*, 2025), o método gravimétrico apresenta limitações operacionais severas: é destrutivo, laborioso e requer um longo tempo de secagem, o que impossibilita o monitoramento contínuo, a automação do sistema e a repetição de medidas no mesmo ponto amostral, introduzindo erros devido à variabilidade espacial do solo (Crubelatti, 2020; Oliveira, 2018; Trintinalha *et al.*, 2001).

Para superar essas limitações, utilizam-se métodos indiretos que estimam a umidade através de outras propriedades físicas do solo que se correlacionam com o teor de água (Souza *et al.*, 2016). Entre estes, destacam-se a tensiometria, que mede o potencial matricial (energia de retenção da água), e os métodos baseados na moderação de nêutrons e nas propriedades dielétricas, como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) ou capacitância (SOUZA *et al.*, 2016; Andrade Junior *et al.*, 2007).

Atualmente, há uma tendência consolidada de utilização de sondas baseadas na constante dielétrica (permissividade relativa) devido à facilidade de acoplamento a sistemas automáticos de coleta de dados (dataloggers), rapidez de leitura e segurança operacional (Pizetta, 2015; Silva *et al.*, 2022). O princípio físico desses sensores fundamenta-se na grande diferença entre a constante dielétrica da água livre (aproximadamente 80) em comparação com a dos constituintes sólidos do solo (entre 3 e 5) e do ar (próximo de 1) (Alhadchiti *et al.*, 2025; Pizetta, 2015). Assim, a variação no conteúdo de água provoca alterações significativas na constante dielétrica aparente (K_a) do volume de solo influenciado pelo sensor, permitindo estimar a umidade volumétrica com alta precisão, desde que realizada a devida calibração para as condições específicas de solo (densidade, textura e salinidade) (Brum *et al.*, 2025; Gallet *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2013).

2.3 Sensores de Baixo Custo e Automação

A evolução da eletrônica e a popularização da "Internet das Coisas" (IoT) impulsionaram o desenvolvimento de sensores de umidade do solo de baixo custo, tornando a tecnologia de monitoramento acessível a pequenos e médios produtores e pesquisadores (Azevedo, 2021; Brum *et al.*, 2025). Esses dispositivos são frequentemente integrados a plataformas de prototipagem de código aberto, permitindo a criação de sistemas de aquisição de dados (dataloggers) personalizados, automação da irrigação e transmissão de dados em tempo real (Oliveira, 2018; Mendes *et al.*, 2021).

No mercado de baixo custo, predominam duas tecnologias principais para a estimativa da umidade do solo: os sensores resistivos e os sensores capacitivos (FDR - Frequency Domain Reflectometry).

Os sensores resistivos (e.g., modelos HL-69, FC-28) funcionam monitorando a variação da resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos no solo; a resistência medida é inversamente proporcional à umidade, pois a água facilita a condução elétrica (Mendes *et al.*, 2021; Oliveira, 2018). Apesar de seu custo extremamente reduzido, esses sensores apresentam desvantagens significativas: os eletrodos expostos sofrem rápida corrosão devido à eletrólise quando uma corrente contínua é aplicada, degradando o sensor e alterando as leituras ao longo do tempo (Oliveira, 2018; Alhadchiti *et al.*, 2025). Além disso, são fortemente influenciados pela salinidade do solo, o que pode mascarar os resultados de umidade (Mendes *et al.*, 2021).

Em contrapartida, os sensores capacitivos de baixo custo (e.g., modelos capacitivos v1.2, HW-390, SMT100) baseiam-se no princípio da constante dielétrica (permissividade), similar às sondas comerciais de alta precisão (FDR e TDR) (Pereira & Souza, 2023; Bogena *et al.*, 2017). Esses sensores operam gerando um campo elétrico oscilatório no solo; a frequência de oscilação ou a voltagem de saída varia conforme a capacitância do meio, que é dominada pela presença de água (constante dielétrica ≈ 80) (Brum *et al.*, 2025; Pizetta, 2015).

A principal vantagem construtiva dos sensores capacitivos em relação aos resistivos é o isolamento dos eletrodos (geralmente cobertos por máscara de solda ou resina epóxi), o que evita o contato elétrico direto com o solo, eliminando o problema da corrosão e aumentando significativamente a vida útil do dispositivo no campo (Pereira & Souza, 2023; Azevedo, 2021). Estudos indicam que, quando devidamente calibrados, esses sensores apresentam boa sensibilidade e correlação com a umidade volumétrica, especialmente em intervalos de umidade abaixo da saturação (Brum *et al.*, 2025; Ratts *et al.*, 2018).

No entanto, a precisão dos sensores de baixo custo é afetada pela variabilidade construtiva (variabilidade sensor-a-sensor). Bogena *et al.* (2017) e Oliveira (2018) alertam que unidades do mesmo modelo podem apresentar respostas diferentes para a mesma condição de umidade devido a tolerâncias nos componentes eletrônicos baratos, exigindo, portanto, a calibração individual para garantir a confiabilidade dos dados. Além disso, a leitura desses sensores pode ser influenciada pela temperatura e pela tensão de alimentação, exigindo sistemas de regulação de voltagem estáveis no microcontrolador (Azevedo, 2021).

Apesar dessas limitações, a viabilidade econômica é um fator determinante. Ratts *et al.* (2018) estimam que o custo de um sistema de monitoramento montado com sensores de baixo custo e microcontroladores pode ser inferior a 5% do valor de equipamentos comerciais importados (como TDRs ou sondas de nêutrons), democratizando o acesso ao manejo técnico da irrigação. A integração desses sensores com módulos de comunicação sem fio (Bluetooth, Wi-Fi, LoRa) possibilita o envio de dados para nuvem e o controle automatizado de válvulas de irrigação, inserindo a agricultura familiar no contexto da Agricultura 4.0 (Gallet *et al.*, 2025; Azevedo, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Conjunto Amostral

Para a realização dos ensaios de calibração, foram selecionadas sete amostras de solo com características físico-químicas distintas, provenientes do acervo do Laboratório de Solos do Instituto Federal de Minas Gerais - Campus São João Evangelista (IFMG-SJE). A seleção das amostras foi realizada de forma a garantir uma variabilidade representativa de atributos que interferem diretamente na constante dielétrica do meio e, conseqüentemente, na resposta de sensores baseados em Refletometria no Domínio da Frequência (FDR).

Os principais atributos considerados para a caracterização do conjunto amostral foram o teor de Matéria Orgânica (M.O.), a granulometria (Argila), o teor de Potássio (K) e a Saturação por Bases (V%), conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos físico-químicos das amostras de solo utilizadas na calibração dos sensores FDR

Amostra	pH (H ₂ O)	P (mg/dm ³)	K (mg/dm ³)	M.O. (dag/kg)	V (%)	Al (cmolc)
1	6.1	81.1	310	1.41	76.86	0
2	5.7	13.37	170	1.54	72.38	0
3	4.9	2.5	50	1.18	23.37	0.76
4	5.6	23.22	170	3	60.14	0
5	4	2.17	40	2.74	9.37	1.05
6	6.1	48	180	1.64	74.72	0
7	4.5	2.33	30	4.93	1.8	2.75

pH (H₂O) = potencial hidrogeniônico em água; P (mg/dm³) = fósforo disponível; K (mg/dm³) = potássio trocável; M.O. (dag/kg) = matéria orgânica; V (%) = saturação por bases; Al (cmolc/dm³) = alumínio trocável. Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

3.2 Sensores Avaliados

A experimentação compreendeu a avaliação de dois dispositivos de medição de umidade baseados na tecnologia de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR). Os sensores selecionados apresentam arquiteturas tecnológicas e finalidades distintas, visando abranger desde o monitoramento industrial automatizado até o uso portátil simplificado.

O dispositivo designado como AP1 é um sensor multivariável de alta performance, modelo Gemho RS485, construído em polímero resistente para operação contínua em

condições de campo. Este sensor opera por meio de sondas que emitem sinais de rádio frequência para a determinação da permissividade dielétrica do solo.

Figura 1 - Sensor Multivariável de alta performance, modelo Gemho RS485



Fonte: google Imagens, 2026.

As características técnicas integradas ao dispositivo incluem:

- Capacidade de Medição de Umidade: Faixa operacional de 0% a 100% de conteúdo volumétrico de água, com tempo de resposta inferior a 1 segundo.
- Monitoramento Químico: Detecção de potencial hidrogeniônico (pH) em escala de 3 a 9 (precisão de pm 0,3) e mensuração de macronutrientes (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) via método de detecção rápida.
- Parâmetros Físicos e Elétricos: Medição de condutividade elétrica entre 0 e 10.000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ e temperatura do solo, operando em ambiente de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Comunicação de Dados: Saída via protocolo RS485, permitindo a integração com sistemas de aquisição de dados e automação via modulação digital.

O segundo sensor, identificado como AP2, é um monitor digital de solo da marca KKMOON, caracterizado como um dispositivo portátil e de leitura direta, voltado para aplicações em floricultura, estufas e experimentos didáticos. O equipamento é fabricado em PC e ABS, possuindo duas sondas metálicas estendidas para inserção direta no perfil do solo.

Figura 2 - Monitor digital de solo da marca KKMOON



Fonte: google Imagens, 2026.

Suas especificações funcionais compreendem:

- Detecção de Umidade: Faixa de leitura entre 0% e 90%, com uma precisão nominal declarada pelo fabricante de pm 10%.
- Análise de pH e Temperatura: Determinação da acidez do solo em escala de 3 a 9 (precisão de pm 0,2) e temperatura térmica entre -10 °C e 90 °C.
- Interface e Autonomia: Unidade equipada com display digital LCD retroiluminado para visualização instantânea dos dados.

3.3 Calibração dos Equipamentos

O procedimento de calibração dos sensores AP1 e AP2 foi conduzido em ambiente laboratorial, seguindo protocolos de saturação e secagem progressiva para estabelecer a correlação entre as leituras eletrônicas e a umidade gravimétrica. O processo foi dividido em duas fases principais:

3.3.1 Saturação por Ascensão Capilar

Inicialmente, as amostras de solo foram acondicionadas em recipientes individuais dotados de perfurações na base e protegidos por um elemento filtrante para evitar a perda de material sólido. Para promover a saturação, estes recipientes foram dispostos em uma bancada nivelada e submersos em um reservatório contendo uma lâmina de água constante de 1,5 cm. A hidratação das amostras ocorreu exclusivamente por meio do avanço da água por

capilaridade, garantindo o preenchimento gradual dos poros até que o solo atingisse a capacidade de saturação total.

Figura 3 - Saturação das amostras de solo por capilaridade.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

3.3.2 Ciclos de Secagem e Monitoramento

Após a confirmação da saturação plena, procedeu-se à pesagem inicial das amostras e à coleta das primeiras leituras de umidade com os sensores AP1 e AP2. Subsequentemente, os solos foram submetidos ao processo de secagem em estufa de circulação forçada a uma temperatura controlada de 60 °C.

O monitoramento foi realizado em intervalos cíclicos de 2 horas, conforme o seguinte protocolo:

- Remoção das amostras da estufa para cessar o processo térmico.
- Acondicionamento em um ambiente dessecador (ambiente específico anti-umidade) para resfriamento térmico das amostras, evitando a reidratação por umidade atmosférica.
- Realização das pesagens em balança de precisão para determinação da perda de massa de água.
- Coleta simultânea das leituras dos sensores de umidade em cada recipiente.
- Retorno das amostras à estufa para continuidade do processo de desidratação.

Figura 4 - Processo de secagem controlada das amostras de solo em estufa.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Figura 5 - Acondicionamento em ambiente dessecador para resfriamento térmico.



Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

Este ciclo de pesagens e leituras foi repetido sucessivamente até que as amostras atingissem o peso constante, caracterizando a secagem total do solo e permitindo o cálculo posterior da Umidade Base Seca (UBS) para cada ponto experimental registrado.

Após a conclusão do ciclo de secagem total, as amostras foram submetidas a um processo de calibração invertido, visando avaliar a sensibilidade e o tempo de resposta dos sensores AP1 e AP2 à medida que o solo recuperava sua umidade por ascensão capilar.

O monitoramento do ganho de umidade foi realizado utilizando intervalos de tempo pré-definidos para a coleta das leituras em ambos os sensores simultaneamente:

- **Fase Inicial (Segundos):** Leituras instantâneas nos intervalos de 3 s, 10 s, 20 s e 30 s, destinados a captar a resposta imediata dos eletrodos ao contato inicial da água com a base da amostra.
- **Fase Intermediária (Minutos):** Coletas realizadas aos 1, 2, 3, 4 e 5 minutos, para observar a progressão da curva de umedecimento e a estabilidade das leituras durante a fase de maior fluxo capilar.
- **Fase de Estabilização:** Leituras em intervalos fixos de 10 minutos, mantidas até que o sistema atingisse um patamar de saturação que permitisse a comparação com os valores de referência gravimétrica obtidos na fase inicial do experimento. Para cada intervalo temporal, registrou-se a resposta bruta de ambos os sensores, correlacionando-as posteriormente com a variação de massa de água absorvida por capilaridade

3.4 Determinação da Umidade de Referência (UBS)

A variável de referência utilizada para a calibração dos sensores foi a Umidade Base Seca (UBS %), determinada por meio do método gravimétrico padrão. Durante a execução dos ensaios de secagem e saturação, os dados brutos coletados consistiram exclusivamente na pesagem das amostras em balança de precisão (0,01g).

A conversão dos pesos registrados em valores de umidade percentual foi realizada utilizando a seguinte expressão (Equação 1):

$$UBS(\%) = \left(\frac{M_{atual} - M_{seco}}{M_{seco}} \right) \times 100$$

Em que M_{atual} representa a massa da amostra no momento da coleta e M_{seco} a massa final do solo após atingir peso constante em estufa. Este cálculo permitiu normalizar os dados de diferentes texturas de solo para uma escala comparativa comum.

3.5 Análise Estatística Detalhada

Os dados coletados nos ensaios de secagem e saturação foram submetidos a um tratamento estatístico para quantificar a performance, a sensibilidade e a acurácia das predições realizadas pelos sensores AP1 e AP2.

Para avaliar a força e a direção da relação entre a leitura bruta dos sensores e a umidade real (UBS) calculada pelo método gravimétrico, aplicou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson. A significância estatística dessa associação foi verificada pelo cálculo do p-valor, adotando-se um nível de significância de $\alpha = 0,05$ (confiança de 95%). Valores de $p < 0,05$ foram utilizados para confirmar se a relação observada não era fruto do acaso, validando a funcionalidade do sensor para aquele tipo de solo específico.

Desenvolveram-se modelos de Regressão Linear Simples para descrever matematicamente a relação entre as variáveis. Foram geradas equações de calibração seguindo o modelo matemático:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

Onde Y é a Umidade Base Seca (UBS %) estimada, β_0 é o intercepto (umidade residual teórica quando a leitura é zero), β_1 é o coeficiente angular (sensibilidade do sensor à variação hídrica) e epsilon representa o erro experimental. As regressões foram processadas em dois níveis:

1. Modelos Individuais: Uma equação específica para cada um dos sete solos, visando capturar as particularidades físico-químicas de cada amostra.
2. Modelos Globais: Uma equação geral para cada aparelho, integrando todos os dados de secagem ou saturação, para avaliar a versatilidade do sensor em condições de campo com solos heterogêneos.

A validação dos modelos e a comparação entre os aparelhos fundamentaram-se em dois indicadores de performance:

- Coeficiente de Determinação (R^2): Utilizado para quantificar a proporção da variabilidade da umidade do solo que é explicada pela resposta do sensor. Quanto mais próximo de 1,0, maior a capacidade preditiva do modelo de calibração.
- Erro Médio Absoluto (MAE): Calculado para fornecer uma métrica real do desvio médio das predições em relação aos valores esperados, expressa na mesma unidade da variável dependente (UBS %). O MAE foi determinado pela fórmula:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

Onde n é o número de observações, y_i é o valor observado (referência) e \hat{y}_i é o valor predito pelo sensor.

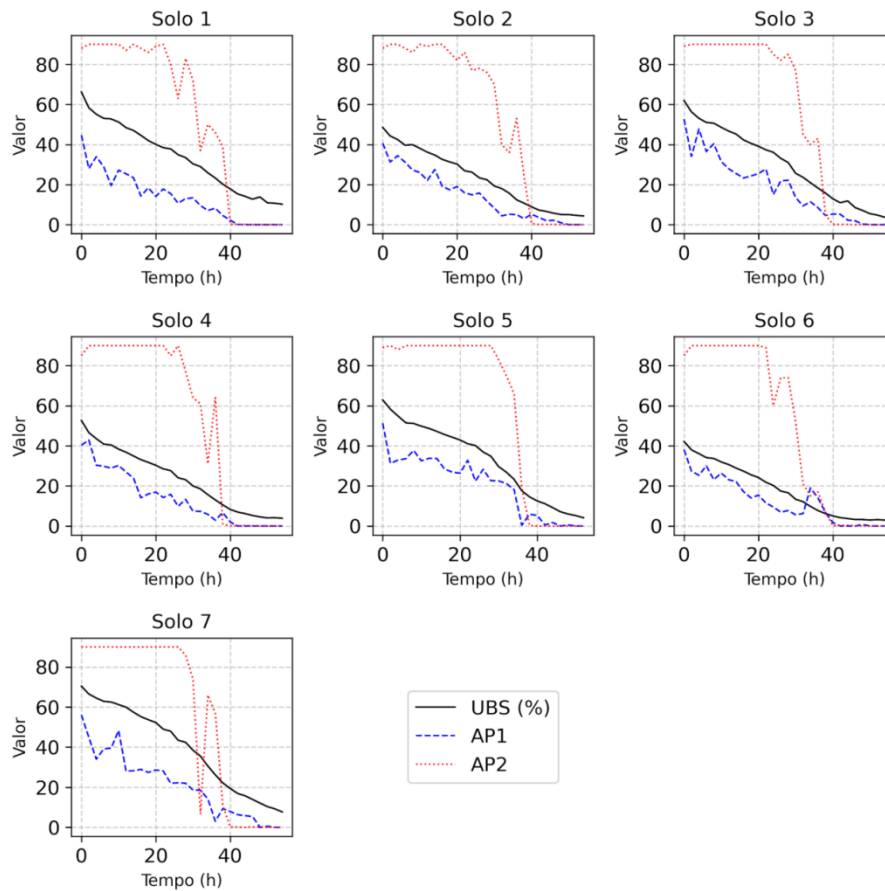
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das curvas de secagem permitiu identificar um comportamento tripartido e não linear no sensor AP2, caracterizado por estágios de saturação, queda abrupta e estabilização final, padrão consistente em todas as amostras avaliadas. A literatura aponta que sensores capacitivos de baixo custo frequentemente demandam ajustes polinomiais ou multiparte para descrever adequadamente a relação entre o sinal de saída e a umidade volumétrica em toda a faixa de água disponível no solo (MENDES *et al.*, 2021).

Durante a fase inicial do monitoramento, enquanto o solo mantinha elevados teores de água, o dispositivo registrou valores de umidade quase constantes e superiores a 80%, demonstrando uma incapacidade técnica de discriminar variações volumétricas em condições de alta disponibilidade hídrica. Este fenômeno corrobora os resultados obtidos por Oliveira (2018), que observou a estabilização das leituras de sensores similares quando submetidos a umidades superiores à capacidade de campo, independentemente da textura do solo, indicando uma limitação na sensibilidade do equipamento em faixas próximas à saturação.

Este padrão indica que a permissividade dielétrica do meio excedeu o limite operacional do circuito FDR do sensor. O princípio de funcionamento baseia-se na variação da frequência de oscilação de um circuito LC (indutor-capacitor) em resposta à alteração da constante dielétrica do meio, onde a água possui um valor dielétrico (~80) significativamente superior ao das partículas sólidas do solo (~4 a 5) (ANDRADE JUNIOR; SILVA; DANIEL, 2007; SOUZA *et al.*, 2016). Portanto, o patamar de leitura observado sugere que a capacitância gerada pelo excesso de água saturou a resposta do circuito, impedindo a detecção da perda real de massa ocorrida nas primeiras horas de secagem.

Figura 6 - Comportamento temporal da unidade base seca e das leituras dos sensores durante o processo de secagem.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

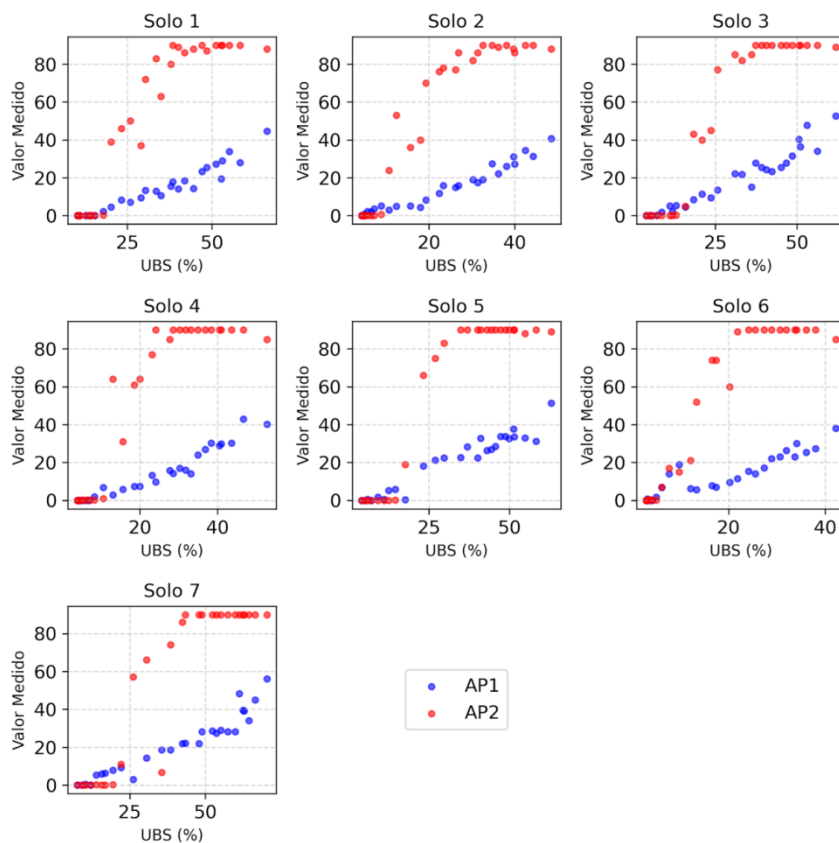
Embora a tendência geral de comportamento do sensor tenha sido observada em todo o conjunto amostral, os solos 1 e 2 apresentaram variações singulares no sinal eletrônico durante a fase de saturação inicial. Diferentemente das demais amostras, que mantiveram leituras estáticas no limite superior, esses solos registraram oscilações acentuadas. Este fenômeno pode ser atribuído à composição química distinta dessas amostras, uma vez que a precisão de sensores eletromagnéticos é influenciada por fatores como a salinidade e a temperatura do solo (SILVA *et al.*, 2012; PIZETTA, 2015).

O solo 1, em particular, apresenta a maior concentração de potássio (310 mg/dm^3) e a maior saturação por bases ($V = 76,86\%$) entre as amostras. Esses fatores elevam a condutividade elétrica da solução do solo, o que interfere na permissividade dielétrica aparente medida pelo equipamento. Estudos indicam que a frequência de oscilação dos sensores de capacitância, embora diminua com o aumento da umidade, também é afetada pelo conteúdo de minerais e sais dissolvidos, que polarizam os íons na solução do solo e aumentam a constante

dielétrica aparente (K_a) (PIZETTA, 2015; BATISTA *et al.*, 2016; SILVA; PESSOA; SOUZA, 2022).

Essa maior atividade iônica interfere diretamente no campo eletromagnético do sensor FDR, gerando ruídos e flutuações na leitura que não correspondem necessariamente a alterações no teor de água. A literatura corrobora que, em solos com elevada condutividade elétrica ou salinidade, a parte imaginária da permissividade dielétrica (relacionada à perda de energia e condutividade) pode mascarar a parte real (relacionada ao armazenamento de energia e umidade), resultando em superestimativas ou leituras instáveis (SOUZA *et al.*, 2013). Portanto, a sensibilidade do sensor a interferências químicas externas em solos de alta fertilidade evidencia a necessidade de calibrações específicas para garantir a acurácia das medições em diferentes condições edáficas (SOUZA *et al.*, 2016).

Figura 7 - Dispersão dos valores lidos pelos sensores AP1 e AP2 em relação à umidade real para as diferentes classes de solo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A análise comparativa das métricas de regressão evidenciou uma discrepância estatística entre os dispositivos avaliados. Embora o sensor AP2 tenha apresentado um Erro Médio Absoluto (MAE) numericamente inferior ao do sensor AP1, seu coeficiente de determinação (R^2) foi insatisfatório. A literatura especializada preconiza que a validação de sensores capacitivos não deve se basear isoladamente em um único índice estatístico, sendo necessária a análise conjunta de parâmetros de precisão e exatidão, como o R^2 , o índice de concordância "d" de Willmott e o índice de desempenho "c" de Camargo e Sentelhas, para garantir a robustez da calibração (AZEVEDO, 2021; PEREIRA; SOUZA, 2023).

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos e equações de regressão linear para a umidade base seca (UBS) em função das leituras dos sensores AP1 e AP2 nas sete amostras de solo.

Amostra	Equação de Regressão	R^2	r	MAE %
1	$UBS=11,7004+0,3966 \cdot AP2$	0.836	0.945	3,19
	$UBS=15,2672+1,3433 \cdot AP1$	0.928	0.944	5,23
2	$UBS=4,5061+0,3407 \cdot AP2$	0.848	0.959	2,77
	$UBS=6,7378+1,1468 \cdot AP1$	0.952	0.947	4,10
3	$UBS=7,6291+0,4080 \cdot AP2$	0.847	0.945	3,89
	$UBS=9,0235+1,1372 \cdot AP1$	0.927	0.945	5,62
4	$UBS=5,0380+0,3310 \cdot AP2$	0.795	0.945	3,02
	$UBS=8,0620+1,1101 \cdot AP1$	0.933	0.925	4,94
5	$UBS=8,1185+0,4137 \cdot AP2$	0.835	0.961	3,96
	$UBS=7,8715+1,2071 \cdot AP1$	0.928	0.941	5,88
6	$UBS=3,3861+0,2950 \cdot AP2$	0.861	0.911	3,61
	$UBS=4,5005+1,0814 \cdot AP1$	0.853	0.95	3,31
7	$UBS=14,2037+0,4547 \cdot AP2$	0.834	0.936	4,80
	$UBS=13,4094+1,2474 \cdot AP1$	0.913	0.928	6,79

Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

A aparente superioridade do AP2 no MAE mascara sua ineficiência funcional, uma vez que o dispositivo manteve leituras praticamente estáticas, oscilando entre 88% e 90%, enquanto a umidade volumétrica real do solo decrescia significativamente de 66% para 37%. Este comportamento caracteriza uma insensibilidade do sensor às variações da constante dielétrica do meio na faixa de água disponível, o que inviabiliza sua aplicação prática em campo, corroborando estudos que apontam a inaplicabilidade de sensores quando há grande dispersão ou falta de resposta coerente à secagem do solo (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004; SOUZA *et al.*, 2013).

A incapacidade de detectar a variação hídrica em uma amplitude de aproximadamente 30% compromete diretamente o manejo da irrigação, pois impede a monitorização do consumo

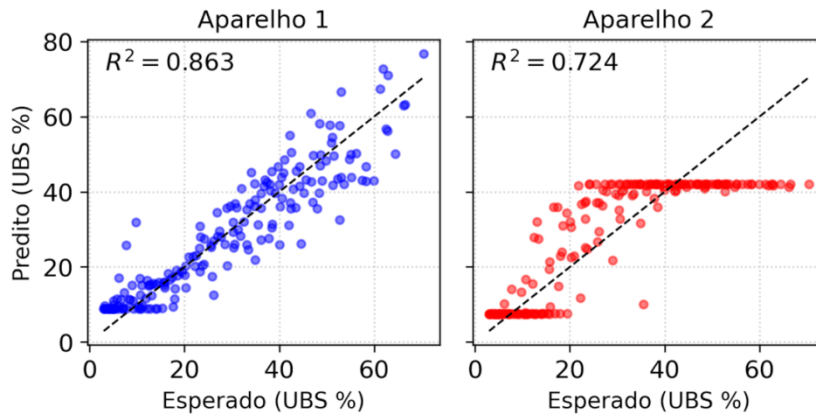
de água pela cultura e a identificação do momento correto de intervenção. Para uma gestão hídrica eficiente, é imprescindível que o equipamento apresente sensibilidade dinâmica às alterações de umidade, permitindo determinar com precisão a água prontamente disponível no solo e evitar o estresse hídrico das plantas (PIZETTA, 2015; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

A análise dos parâmetros de regressão linear permitiu aprofundar a compreensão sobre os limites de detecção e a sensibilidade dos dispositivos frente às variações físico-químicas dos solos. A literatura indica que a calibração específica é fundamental para mitigar erros, uma vez que os coeficientes da equação de regressão (angular e linear) explicam a tendência dos sensores em subestimar ou superestimar a umidade em função das características intrínsecas da matriz do solo (PEREIRA; SOUZA, 2023).

No que tange ao intercepto da reta, que representa a capacidade de detecção de valores mínimos, o sensor AP1 demonstrou uma performance superior na identificação de baixos teores de água nos solos 2 e 6, conseguindo detectar umidades residuais abaixo de 7%, em média. Em contrapartida, para os solos 1 e 7, este limiar de detecção foi elevado para valores superiores a 14% no AP1 e acima de 10% no AP2. Este comportamento evidencia que solos com alta concentração de potássio ou matéria orgânica tendem a elevar a linha de base de leitura dos sensores FDR.

Estudos corroboram que a presença de sais dissolvidos (que alteram a condutividade elétrica) e o teor de matéria orgânica interferem na permissividade dielétrica aparente do meio (BATISTA *et al.*, 2016; OLIVEIRA, 2018). Essa interferência gera uma variação no sinal elétrico de saída ou na impedância medida que não corresponde apenas à água, resultando em deslocamentos na curva de calibração e exigindo ajustes nos modelos matemáticos para garantir a acurácia em solos com tais particularidades (AZEVEDO, 2021; SILVA *et al.*, 2012).

Figura 8 - Comparação entre a umidade predita pelos modelos de calibração e a umidade real medida para os sensores AP1 e AP2.



Fonte: elaborado pelo autor, 2026.

$$UBS = 8,8865 + 1,2101 \cdot AP1$$

- **Coefficiente de Determinação (R^2): 0,8634**

$$UBS = 7,5123 + 0,3838 \cdot AP2$$

- **Coefficiente de Determinação (R^2): 0,7239**

Os resultados que apresentaram maior proximidade com a umidade real foram obtidos nos solos 2 e 6. Esta maior acurácia pode ser atribuída ao equilíbrio químico e físico dessas amostras, que possuem pH mais próximo da neutralidade e teores moderados de argila. A literatura indica que solos com texturas médias e sem extremos de salinidade favorecem a propagação do campo eletromagnético dos sensores FDR, minimizando distorções na leitura da constante dielétrica aparente ($\$K_a\$$) e resultando em coeficientes de determinação mais elevados (SOUZA *et al.*, 2013; SILVA; PESSOA; SOUZA, 2022).

Em contrapartida, as maiores discrepâncias entre o valor predito e o real foram observadas nos solos 1 e 7, evidenciando a sensibilidade do sensor AP1 a atributos específicos da matriz do solo. No solo 1, a elevada discrepância correlaciona-se com a alta concentração de potássio (310 mg/dm^3) e a elevada saturação por bases (76,86%). O aumento da concentração de íons na solução do solo eleva a condutividade elétrica, o que afeta a parte imaginária da permissividade dielétrica e causa perdas de energia no sinal, resultando em erros na estimativa da umidade (BATISTA *et al.*, 2016; PIZETTA, 2015).

Já no solo 7, o erro acentuado decorre do alto teor de matéria orgânica (4,93 dag/kg). A matéria orgânica altera a densidade do solo e aumenta a superfície específica, elevando a proporção de água adsorvida (água ligada) em detrimento da água livre. Como a água adsorvida possui uma constante dielétrica significativamente menor que a da água livre, o sensor tende a subestimar o volume de água total retido na matriz do solo, exigindo calibrações específicas para compensar esse efeito (SILVA *et al.*, 2012; OLIVEIRA, 2018).

5. CONCLUSÕES

A análise dos sensores capacitivos de baixo custo demonstrou que a utilização direta com calibração de fábrica é inadequada para os solos estudados, confirmando a forte influência das características físico-químicas na constante dielétrica e na precisão das leituras.

O sensor AP1 mostrou-se superior ao AP2, apresentando resposta linear consistente entre 9% e 70% de umidade. Sua capacidade de detectar variações em condições de secagem e saturação o qualifica para o manejo da irrigação, desde que submetido a calibração específica para corrigir a subestimativa observada. Em contrapartida, o sensor AP2 revelou limitações severas, com "pontos cegos" e estabilização de leituras em extremos de umidade (saturação e seca), restringindo sua utilidade a uma faixa estreita (10% a 40%) e tornando-o pouco confiável para decisões de manejo.

Os resultados evidenciaram que atributos do solo, como a alta concentração de potássio e a saturação por bases, elevaram a condutividade elétrica, causando superestimativas e ruídos nas leituras. Da mesma forma, o alto teor de matéria orgânica exigiu ajustes nos interceptos das equações devido às alterações na densidade e retenção de água

Conclui-se que a viabilidade do uso desses sensores de baixo custo, especialmente o modelo AP1, depende imperativamente de calibrações locais que considerem a textura, salinidade e matéria orgânica, garantindo a acurácia necessária para a eficiência do uso da água na agricultura.

REFERÊNCIAS

ALHADCHITI, A. *et al.* Identification and analysis of key factors limiting the performance of electrical soil sensors: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 237, 110480, 2025. Disponível em: <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/35193/1/1-s2.0-S0168169925005861-main.pdf> Acesso em: 12 fev. 2026.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, 2017. Disponível em <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c639ac44-8151-421d-a1ed-c333392d76a9> Acesso em: 12 fev. 2026.

ANDRADE, I. P. de S. **Manejo da irrigação na cultura da figueira (Ficus carica L.) utilizando o balanço de água no solo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013. Disponível em: <https://rima.ufrj.br/jspui/bitstream/20.500.14407/10677/3/2013%20-%20Irineu%20Pedro%20de%20Sousa%20Andrade.pdf> Acesso em: 12 fev. 2026.

ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SILVA, C. R. da; DANIEL, R. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 4, p. 303-307, 2007. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v2i4a156> Acesso em: 17 fev. 2026.

AZEVEDO, A. T. **Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos para auxílio no manejo da irrigação via IoT**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-06102021-140537/publico/Angelo_Tiago_Azevedo_versao_revisada.pdf Acesso em: 17 fev. 2026.

BATISTA, L. S. *et al.* Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522-532, 2016. Disponível em: https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/388/pdf_258 Acesso em: 15 fev. 2026.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1940–1946, 2000. Disponível em: [https://www.scrip.org/\(S\(czeh4tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/reference/referencespapers?referenceid=2033141](https://www.scrip.org/(S(czeh4tfqyw2orz553k1w0r45))/reference/referencespapers?referenceid=2033141) Acesso em: 15 fev. 2026.

BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; SCHILLING, B.; WEUTHEN, A.; VERECKEN, H. Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. **Sensors, Basel**, v. 17, n. 1, p. 208, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/208> Acesso em: 12 fev. 2026.

BRUM, M. L.; RODRIGUES, P. E. C.; MARTINS, J. D.; SWAROWSKY, A. New insights on measuring soil water content with low-cost sensor. **Water Supply**, v. 25, n. 3, p. 424-437, 2025. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/389188415_New_insights_on_measuring_soil_water_content_with_low-cost_sensor Acesso em: 17 fev. 2026.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 72-78, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/JwMR4Dst9qgyVMnGJK3Y3Rh/?lang=pt> Acesso em: 12 fev. 2026.

CRUBELATTI, G. H. **Avaliação de sensores capacitivos para determinação da umidade de substratos de cultivo**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020. Disponível em [file:///C:/Users/55339/Downloads/Crubelatti,%20GuilhermeHideo_TCC%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/55339/Downloads/Crubelatti,%20GuilhermeHideo_TCC%20(1).pdf) Acesso em: 17 fev. 2026.

GALLET, D. da S. *et al.* Calibração de sensores para estimativa da umidade de solo do Cerrado Mineiro. In: **XXXIV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, 2025. Disponível em: https://icolibri.com.br/meeting2025/public/___anais/TC1790212.pdf Acesso em: 09 fev. 2026.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 6, p. 959-964, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/98DFdgjy7ZPVBVD6myQSp9R/?lang=pt> Acesso em: 12 fev. 2026.

MACHADO, E. S. **Irrigation and nitrogen best management practices in corn production**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002965184> Acesso em: 17 fev. 2026.

MACHADO, V. F.; FERRARINI, A. dos S. F. A importância da irrigação e do gerenciamento dos recursos hídricos no crescimento econômico do Matopiba. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, 2023. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/34073> Acesso em: 09 fev. 2026.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. Disponível em: <https://ifrs.pergamum.com.br/acervo/33861> Acesso em: 17 fev. 2026.

MENDES, J. P. P. *et al.* Calibração de sonda de baixo custo para monitorar umidade em substrato comercial. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 3, n. 1, p. 89-95, 2021. Disponível em: [file:///C:/Users/55339/Downloads/admin,+8-112-571-1-CE%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/55339/Downloads/admin,+8-112-571-1-CE%20(1).pdf) Acesso em: 12 fev. 2026.

OLIVEIRA, C. L. **Calibração de sensores de umidade do solo de baixo custo**. 2018. 50 f. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2018. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/1132> Acesso em: 17 fev. 2026.

PEREIRA, A. C.; SOUZA, L. de O. **Calibração e avaliação de sensor capacitivo para uso na agricultura irrigada**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5941> Acesso em: 17 fev. 2026.

PIZETTA, S. C. **Calibração de sensores de capacitância (FDR) para estimativa da umidade em diferentes solos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/items/ba80d15e-00cb-4593-8315-bcbcb0faedb> Acesso em: 17 fev. 2026.

PRIMO, J. T. de A. *et al.* Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 62, n. 1, p. 20-29, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/GrH9ky4dhbYV53SpzVFQjSN/?lang=pt> Acesso em: 17 fev. 2026.

RAMOS, F. T. *et al.* 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. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/21874> Acesso em: 12 fev. 2026.

RATTS, L. *et al.* Desenvolvimento e calibração de sensores de baixo custo para a medição da umidade do solo. *In: 10º Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão - SIEPE*, 2018. Disponível em: https://guri.unipampa.edu.br/uploads/evt/arq_trabalhos/18139/seer_18139.pdf Acesso em: 12 fev. 2026.

SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, A. S.; VELLAME, L. M.; BRANDÃO, F. J. C. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/5w4GcqsDPBrjGpdZCXhGfyB/?format=html&lang=pt> Acesso em: 12 fev. 2026.

SARAIVA, S. E. L. *et al.* Calibração do FDR em topossequência na região dos Campos Gerais, Paraná. *In: INOVAGRI Meeting Virtual*, 2020. Disponível em: <https://icolibri.com.br/2020/public/biblioteca/inovagri-meeting-virtual-2020?page=4> Acesso em: 12 fev. 2026.

SILVA, B. M. *et al.* Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/BmHRHGwdByZhJBwZp8gjmPw/?format=html&lang=pt> Acesso em: 17 fev. 2026.

SILVA, J. A. G. **Sistema inteligente de baixo custo para o monitoramento automatizado da umidade do solo**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/64e9b576-9972-4259-aaaa-8a7792a79e6c> Acesso em: 17 fev. 2026.

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**, v. 12, e12217, 2022. Disponível em: <https://www.revistacta.ufscar.br/index.php/revistacta/article/view/217> Acesso em: 12 fev. 2026.

SOUZA, C. F. *et al.* Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3222> Acesso em: 17 fev. 2026.

SOUZA, C. F.; PIRES, R. C. M.; MIRANDA, D. B. de; VARALLO, A. C. T. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/321> Acesso em: 09 fev. 2026.

SOUZA, C. F. *et al.* Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 26-42, 2016. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1060967/1/160391591PB.pdf> Acesso em: 09 fev. 2026.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em <file:///C:/Users/55339/Downloads/ManualdeMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf> Acesso em: 12 fev. 2026.

TRINTINALHA, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; TORMENA, C. A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1165-1171, 2001. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/2615> Acesso em: 17 fev. 2026.

VIANA, J. H. M. Protocolo para a calibração e a aferição de sensores de umidade de solo. Sete Lagoas, MG: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2024. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 262). Disponível em <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1170710> Acesso em: 17 fev. 2026.

YANG, H. *et al.* Performance of Soil Moisture Sensors at Different Salinity Levels: Comparative Analysis and Calibration. **Sensors**, v. 24, 6323, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/384496983_Performance_of_Soil_Moisture_Sensors_at_Different_Salinity_Levels_Comparative_Analysis_and_Calibration Acesso em: 17 fev. 2026.