

ANABEL DE LOS ÁNGELES CALVA JIMÉNEZ

**CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO MODELO YL-69
PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO**

RECIFE - PE

2018

ANABEL DE LOS ÁNGELES CALVA JIMÉNEZ

**CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO MODELO YL-69
PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, em cumprimento aos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.

RECIFE - PE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

J61c Jiménez, Anabel de los Ángeles Calva
Calibração do sensor de umidade do solo modelo yl-69 para manejo
da irrigação / Anabel de los Ángeles Calva Jiménez. – Recife, 2018.
49 f.: il.

Orientador (a): Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Recife, BR-PE, 2018.
Inclui referências.

1. Irrigação agrícola 2. Agricultura de precisão 3. Fertilidade do solo
4. Solos - Umidade I. Almeida, Ceres Duarte Guedes Cabral de, orient.
II. Título

CDD 630

**CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO MODELO YL-69
PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO.**

Anabel de los Ángeles Calva Jiménez

Dissertação defendida e aprovada em 30 de novembro pela banca
examinadora:

ORIENTADORA:

Prof^a. Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida - CODAI/UFRPE
Presidente

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Victor Wanderley Costa de Medeiros – PPGBEA/UFRPE

Prof. Dr. Alexandre Hugo Cezar Barros – EMBRAPA

Dedico

À minha mãe Elsa que está no céu, minha Irmã Denise e meu sobrinho Thiago por serem sempre minha motivação. Muito obrigada.

“Nada é suficientemente bom.

Então vamos fazer o que é certo, dedicar o melhor de nossos esforços para atingir o inatingível, desenvolver ao máximo os dons que Deus nos concedeu, e nunca parar de aprender”.

(Beethoven)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e por me ajudar a culminar com sucesso esta etapa importante. Obrigada Deus pela força que você me deu para continuar firme com este desafio enorme longe da minha família.

A minha família pelo apoio incondicional, especialmente a minha irmã Denise, meu sobrinho Thiago e meus primos Cinthya e Max, obrigada pelo carinho e a força que me deram sempre, este logro é graças a vocês.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado.

A minha orientadora Professora Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida pelo apoio incondicional sempre, obrigada pelos conhecimentos que me ajudaram a levar com sucesso meu trabalho. Agradecida pela sua amizade e pelos conselhos durante essa etapa de minha vida, sem seu apoio teria sido mais difícil estar longe de minha casa e minha família.

Agradeço ao Coordenador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Professor Dr. Ênio Farias de França e Silva, pelo apoio desde o momento que iniciei meu mestrado e pelos conhecimentos compartilhados durante este período.

Ao Professor Dr. José Amilton Santos Júnior por conceder a casa de vegetação para o desenvolvimento do experimento e pela contribuição com o conhecimento na pesquisa.

Ao Professor Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, pelas orientações e pela disposição de sempre ajudar, obrigada pelo espaço concedido no Laboratório de Física de Solos.

Aos meus colaboradores do experimento, Edjane, Plácido, Amanda e Girlayne pelo grande apoio durante o desenvolvimento do trabalho no campo.

A meus amigos José Edson, Leandro, Ladson, Caick, Jessika, Keila, Sirleide, Juliana e a todos os colegas de mestrado pelo apoio e experiências compartilhadas durante o curso.

Agradeço a todos os Professores que fizeram parte deste trabalho de pesquisa, obrigada pelos conhecimentos compartilhados que foram

fundamentais nesse processo de construção e serão de grande ajuda na minha vida profissional.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE TABELAS | ix |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| RESUMO | xi |
| ABSTRACT | xii |
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Hipóteses | 14 |
| 1.2 Objetivo Geral | 14 |
| 1.2.1 Objetivos específicos | 14 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 15 |
| 2.1 Agricultura de precisão | 15 |
| 2.2 Automação da irrigação | 16 |
| 2.3 Conteúdo de água no solo | 16 |
| 2.3.1 Métodos de determinação direta do conteúdo de água no solo | 17 |
| 2.3.2 Métodos de determinação indireta do conteúdo de água | 17 |
| 2.4 Sensores | 18 |
| 2.4.1 Sensores de umidade do solo | 19 |
| 2.4.1.1 Sensor YL-69 | 19 |
| 2.4.1.2 Sensores ECH ₂ O | 20 |
| 2.5 Redes de sensores sem fio na agricultura de precisão | 21 |
| 2.6 Arduino | 22 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 3.2.1 Solo 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) | 23 |
| 3.2.2 Solo 2 - Espodossolo Humilúvico (EK) | 24 |
| 3.2.3 Solo 3 - Latossolo Amarelo (LA) | 24 |
| 3.2.4 Solo 4 - Neossolo Regolítico (NR) | 25 |
| 3.3 Implantação e Condução do Experimento | 26 |
| 3.3.1 Amostragem dos solos e preparo das amostras | 26 |
| 3.3.2 Determinação das propriedades físicas do solo | 27 |
| 3.3.3 Cálculo da massa do solo | 27 |
| 3.3.4 Instalação e calibração dos sensores | 28 |
| 3.4 Análises estatísticas | 29 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| 4.1 | Calibração do sensor de umidade YL-69 | 31 |
| 4.2 | Comparação da exatidão do sensor YL-69 com dois sensores ECH ₂ O para a determinação da umidade do solo | 37 |
| 5 | CONCLUSÕES | 39 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Especificações do sensor YL-69..... | 20 |
| Tabela 2. Classificação da exatidão dos sensores de umidade do solo conforme à raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE)..... | 29 |
| Tabela 3. Classificação de desempenho conforme o valor do coeficiente “c”. . | 30 |
| Tabela 4. Principais características físicas dos solos estudados..... | 31 |
| Tabela 5. Índices estatísticos para o sensor YL-69 antes e depois da calibração para ambos os solos..... | 36 |
| Tabela 6. Índices estatísticos para avaliação do desempenho do sensor YL-69 em comparação com sensores ECH2O devidamente calibrados para os solos estudados. | 38 |
| Tabela 7. Principais instrumentos para a medição da umidade do solo e seus respectivos custos. | 38 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Sensor YL-69 e componentes. | 20 |
| Figura 2. Esquema da montagem do conjunto (vaso, brita, bidim e solo). | 26 |
| Figura 3. Instalação dos sensores YL-69..... | 28 |
| Figura 4. Curvas de secagem dos solos estudados conforme valores de umidade estimada pelo sensor YL-69 e umidade volumétrica obtida por pesagem..... | 32 |
| Figura 5. Umidade volumétrica, dos solos estudados, estimada pelo sensor YL-69 antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica calculada..... | 34 |

JIMÉNEZ, Anabel de los Ángeles Calva. **CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO MODELO YL-69 PARA MANEJO DA IRRIGAÇÃO.** Dissertação. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2018.

RESUMO

A agricultura irrigada contribui na produção de alimentos, porém, consome grande quantidade de água. Na irrigação, o teor de água no solo é um dos parâmetros que determina sua eficiência permitindo a otimização da água e energia. Assim, objetivou-se calibrar sensores de umidade do solo modelo YL-69 para obter equações de calibração em quatro solos de referência do estado de Pernambuco e comparar sua precisão com dois sensores ECH₂O na estimativa da umidade do solo. Amostras de solo deformadas e não deformadas foram coletadas na camada 0-0,40 m de profundidade. As amostras deformadas foram peneiradas em malha de 4,75 mm, acondicionadas em vasos com volume útil 4,66 L mantendo-se a densidade do solo em campo (1,29 Mg m⁻³ – Neossolo Regolítico, 1,45 Mg m⁻³ – Latossolo Amarelo, 1,54 Mg m⁻³ – Espodossolo Humilúvico e 1,23 Mg m⁻³ – Argissolo Vermelho - Amarelo). Para cada solo foram usados 5 vasos perfurados na base, preenchidos com 5 cm de brita e cobertos com uma manta envoltória para evitar a perda do solo durante a drenagem. Um sensor YL-69 foi instalado em cada vaso a 3,5 cm de profundidade. Os conjuntos (vaso + brita + bidim + sensor + solo) foram pesados diariamente e as leituras de umidade do solo foram coletas com auxílio de uma placa Arduino. As pesagens e leituras registradas pelos sensores foram realizadas até que a variação da umidade da massa tornasse constante. Verificou-se boa correlação entre as leituras de umidade volumétrica medida e a estimada pelo sensor YL-69 ($R^2 > 0,90$ para todos os solos). Os resultados da calibração indicaram que podem-se reduzir os erros da calibração de fábrica obtendo valores de RMSE $\leq 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para todos os solos. Após a calibração, as medidas de umidade do solo pelo sensor YL-69 e as sondas ECH₂O nos solos estudados, foram compatíveis. Concluiu-se que o sensor de umidade do solo YL-69 deve ser submetido a calibração específica para os solos em questão podendo inclusive, substituir as sondas ECH₂O na estimativa da umidade do solo.

Palavras chaves: agricultura irrigada, agricultura de precisão, conteúdo de água no solo, solos de referência.

JIMÉNEZ, Anabel de los Ángeles Calva. **CALIBRATION OF SOIL MOISTURE SENSOR YL-69 FOR IRRIGATION MANAGEMENT.** Dissertation. Federal Rural University of Pernambuco. Recife, PE, 2018.

ABSTRACT

Irrigated agriculture contributes to food production, however, it consumes a huge amount of water. In irrigation, the soil moisture is one of the parameters that determines its efficiency allowing the optimization of water and energy. Therefore, the objective was to calibrate soil moisture sensors YL-69 to obtain calibration equations in four reference soils of the State of Pernambuco and to compare its accuracy with two ECH₂O sensors in the estimation of soil moisture. Deformed and non-deformed soil samples were collected in the 0-0.40 m depth layer. The deformed samples were sifted in 4.75 mm mesh, stored in pots of 4.66 L maintaining the soil bulk density (1.29 Mg m⁻³ – Neossolo Regolítico, 1.45 Mg m⁻³ – Latossolo Amarelo, 1.54 Mg m⁻³ – Espodossolo Humilúvico and 1.23 Mg m⁻³ Argissolo Vermelho-Amarelo). For each soil, 5 pots were drilled in the base, filled with 5 cm of gravel and covered with a cover to prevent soil loss during drainage. An YL-69 sensor was installed in each vessel 3.5 cm deep. The sets (pot + gravel + bidim + soil + sensor) were weighed daily and the soil moisture readings were collected with the aid of an Arduino board. The weighings and the readings recorded by the sensors were carried out until the humidity variation of the soil mass became constant. There was a good correlation between the readings of measured volumetric moisture and the one estimated by the YL-69 sensor ($R^2 > 0.90$ for all soils). The calibration results indicated that factory calibration errors can be reduced obtaining RMSE values $\leq 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for all soils. After calibration, the soil moisture measurements by the YL-69 sensor and the ECH₂O probes in the studied soils were compatible. It was concluded that the soil moisture sensor YL-69 should be subjected to a specific calibration for the soil in question and could even replace the ECH₂O probes in the humidity estimation from soil.

Key words: irrigated agriculture, precision agriculture, soil water content, reference soils.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial ocorre de maneira gradativa, esse acréscimo vai gerando uma sequência de necessidades, dentre as quais está a produção sustentável de alimentos. Na atualidade, a agricultura é o setor produtivo mais importante para a geração de alimentos e, é um dos campos que consome a maior quantidade de água. Com o passar do tempo, a água tem se tornado um recurso cada vez mais escasso devido ao crescimento da população, contaminação das fontes de água, uso da água na irrigação, entre outros. Portanto, o conhecimento das necessidades hídricas das culturas ajuda o agricultor na obtenção de melhores resultados na qualidade e produtividade de seus cultivos diminuindo, notavelmente, o volume de água utilizado na irrigação. Assim, estudos que auxiliem no controle do manejo da quantidade de água aplicada na irrigação, podem ajudar a otimizar o uso deste recurso.

Atualmente, o conteúdo de água no solo é um parâmetro importante dentro da irrigação. Existem métodos diretos e indiretos para determinar o conteúdo de água no solo, dentre eles o método padrão, que consiste em obter uma amostra representativa de solo, e por meio de pesagem, determinar a sua umidade gravimétrica que é a razão entre a massa de água com a massa de sólidos da amostra, ou ainda, a umidade volumétrica que é a razão do volume de água da amostra e seu volume total. Uma das desvantagens do método padrão é que se necessita de aproximadamente 24 horas para obter o resultado.

Hoje em dia os avanços tecnológicos têm trazido enormes vantagens no setor agrícola, assim, os métodos indiretos tornaram-se cada vez mais eficientes para o manejo da irrigação, pois permitem determinar com exatidão e precisão, o conteúdo de água no solo. A maioria dos métodos indiretos está baseada em medidas como a tensão da água no solo, constante dielétrica, resistência do solo a passagem de corrente elétrica, entre outros. Dentre os métodos indiretos os mais utilizados na agricultura estão os sensores de umidade do solo, onde a realização de calibração destes tem importância destacável, pois incrementa a precisão nas estimativas do conteúdo de água no solo.

A calibração dos sensores de umidade do solo deve ser feita de acordo com o tipo de sensor, a sua sensibilidade aos fatores ambientais e ao tipo de

solo onde irão ser instalados, uma vez que cada solo apresenta características físicas, químicas e biológicas diferentes. A calibração pode ser realizada utilizando-se amostras de solo deformadas, com a finalidade de apresentar as condições originais no campo do solo a ser monitorado.

Atualmente, sistemas tecnológicos que eram considerados complexos dentro da agricultura, têm sido inseridos na maioria dos equipamentos eletrônicos, visando auxiliar às atividades agrícolas. Entre esses sistemas, existem plataformas que permitem ao usuário desenvolver seus próprios projetos, como a plataforma Arduino fácil de usar e de baixo custo.

Assim, diante da carência de pesquisas científicas que caracterizam sensores de baixo custo adaptados à plataforma Arduino, este trabalho foi desenvolvido para atender a demanda por calibração de sensores de umidade do solo e avaliação de sua aplicabilidade no monitoramento em tempo real do conteúdo de água no solo, como ferramenta de auxílio ao manejo de irrigação.

1.1 Hipóteses

- A calibração de sensores de umidade, modelo YL-69, em solos representativos para agricultura irrigada no Estado de Pernambuco potencializa o uso deste sensor profissionalmente.
- O sensor de baixo custo (YL-69) pode ser utilizado em detrimento aos outros sensores de umidade do solo de alto custo mantendo a consistência dos resultados.
- As variações de umidade dos solos em estudo podem ser monitoradas pelo sensor YL-69 com consistência e precisão.

1.2 Objetivo Geral

Caracterizar o sensor de resistência elétrica de baixo custo, modelo YL-69, para monitoramento em tempo real da umidade do solo.

1.2.1 Objetivos específicos

- Calibrar um sensor de umidade do solo modelo YL-69 em quatro solos de referência do Estado de Pernambuco.

- Caracterizar a precisão e exatidão deste sensor comparando com dois sensores de umidade tipo ECH₂O.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura de precisão

A agricultura de precisão é uma área ainda recente no Brasil, desenvolvida na década de 80, propõe melhor manejo das práticas agrícolas, implementando novas tecnologias para otimizar o uso dos insumos agrícolas (fertilizantes, sementes, herbicidas, etc.), bem como, quantidade e localidade adequadas, dependendo das necessidades, aumentando a eficiência e efetividade do uso dos distintos recursos, visando aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção (BONGIOVANNI et al., 2006; BONGIOVANNI e LOWENBERG-DEBOER, 2004; GUAÑA-MOYA et al., 2018; MIRHOSSEINI et al., 2017; MULLA, 2012; PIERPAOLI et al., 2013; SOARES FILHO; CUNHA, 2015).

Segundo Joshi et al. (2017), na agricultura de precisão o monitoramento do campo de cultivo é uma prática decisiva na agricultura para diminuir o desperdício de recursos e aumentar a eficiência nas atividades como a irrigação e fertilização. Essa prática permite que os agricultores tenham acesso às informações sólidas sobre as condições e variações ambientais, solo e planta para subsidiar a tomada de decisão.

A gestão da irrigação também é uma das atividades importantes na agricultura de precisão, dessa forma, Guimarães (2011) destaca a relevância desta prática em fornecer um elemento imprescindível para a planta. Porém, manejar a água de irrigação não é uma tarefa simples. Assim, a capacidade de monitorar e alterar conscientemente os parâmetros dessa irrigação torna-se de grande importância.

De acordo com Aquino-Santos et al. (2011) a agricultura de precisão é composta por sensores, redes sem fio, hardware, aplicativos de software e tecnologias de comunicação sem fio que podem reduzir significativamente o tempo necessário para a tomada de decisões importantes, relacionadas ao gerenciamento, planejamento, administração, análise de processos e avaliação de recursos.

2.2 Automação da irrigação

O setor agrícola tem sido beneficiado com o uso da computação e das tecnologias de comunicação para melhorar a precisão e a produtividade dos sistemas em que são utilizados. Dentro da agricultura irrigada, o uso de controladores automáticos na irrigação pode ser de grande utilidade na otimização e eficiência do uso da água, assim como, na diminuição de custos de mão de obra. Como exemplo de aplicações agrícolas que incorporam sistemas computacionais, podem ser citados: sensores conectados em equipamentos de manejo agrícola para a coleta de dados, posicionamento global para determinar áreas de plantio, controle automático de operação, entre outros (MELLO; CAIMI, 2008; RODRIGUEZ et al., 2017).

Os sistemas automáticos para o controle da irrigação são ferramentas úteis e geralmente de simples desenvolvimento, gerados com o objetivo de realizar um manejo eficiente da água, contribuindo para a redução dos impactos ambientais, economizando água e energia e reduzindo os custos de mão de obra, o que torna viável sua implantação em grandes, médias e até, pequenas lavouras. No campo da irrigação automatizada as medidas das variáveis do solo, planta e atmosfera podem fornecer informações importantes para a estimativa das lâminas de irrigação (MACEDO et al., 2010; RODRIGUEZ et al., 2017; ROCHA et al., 2014; ROMERO et al., 2012).

2.3 Conteúdo de água no solo

O conteúdo de água no solo define-se como a relação entre a massa de água no solo e a massa de solo seco ou ainda como a razão entre o volume de água por unidade de volume total do solo (ROMANO, 2014). O teor de água no solo é um parâmetro de grande importância que contribui na regulação dos eventos meteorológicos, hidrológicos, agrícolas e climáticos (SHUKLA et al., 2011).

Na agricultura a quantificação deste parâmetro permite definir o tempo ótimo para a execução das operações mecanizadas e o manejo adequado da irrigação (BUSKE et al., 2014). Neste sentido, existem várias técnicas para mensurar a umidade do solo e a escolha específica de cada método dependerá da aplicação e dos recursos disponíveis (ROBOCK et al., 2000).

2.3.1 Métodos de determinação direta do conteúdo de água no solo

Os métodos diretos são destrutivos, demorados e exigem a coleta das amostras de solo no campo para determinar o conteúdo de água. Dentre os métodos diretos, o mais utilizado é o método gravimétrico, cuja principal vantagem é prover medições de umidade do solo de forma precisa. Geralmente este método é utilizado como padrão para a calibração de outros métodos (VICENTE et al., 2003; WALKER et al., 2004).

O método gravimétrico consiste em coletar amostras de solo no campo, colocar em recipientes herméticos e levar para o laboratório; as amostras de solo são pesadas e colocadas na estufa a 105°C por 24 h ou até que o peso seja constante, isto é realizado com o objetivo de extrair a quantidade de água presente no solo por meio de secagem. Os resultados da determinação gravimétrica podem ser expressos em base de massa (relação entre a massa de água e massa de solo) ou em base de volume (relação entre volume de água e volume de solo) (BITELLI, 2011; TEIXEIRA et al., 2017).

2.3.2 Métodos de determinação indireta do conteúdo de água

Os métodos indiretos não são destrutivos e estimam a umidade do solo a partir da medição de uma propriedade física do solo relacionada ao teor de água no solo em um determinado momento (LIMA; SILVA, 2012).

Segundo Souza et al. (2016), durante os últimos anos têm-se destacado vários métodos para estimar a umidade do solo devido a precisão e segurança para sua operação. De acordo com Khanna et al. (2014), dentre as técnicas para determinar indiretamente a umidade do solo destacam-se os seguintes métodos:

- Reflectometria no Domínio de Tempo (TDR): este método estima o conteúdo volumétrico de água no solo (θ , $m^3 m^{-3}$) com alta exatidão, sem usar radiação ionizante e apresenta pequena influência da salinidade, densidade, textura e temperatura do solo. Esses tipos de sensores estão compostos por duas ou três hastes dispostas em paralelo que são inseridas no solo.

O princípio de funcionamento consiste em determinar o tempo de

propagação t (s) do impulso eletromagnético através de um cabo coaxial até chegar na sonda metálica inserida previamente no solo. A partir de t pode-se determinar a constante dielétrica (ϵ) que é o resultado da média ponderada das constantes dielétricas das partículas do solo ($\approx 3-5$), água (80) e ar (1). Com a variação da umidade do solo ocorre variação da constante dielétrica, portanto, é possível utilizar este método para a determinação da umidade do solo por meio da calibração de ϵ e θ (MANIERI et al., 2007; SOUZA et al., 2016).

- Reflectometria no Domínio de Frequência (FDR): Este método consiste em dois eletrodos dispostos em paralelo e separados por um material isolante que funcionam como um capacitor elétrico. Os sensores de umidade FDR são compostos por um polo positivo e um negativo que produz um campo eletromagnético ao redor dos eletrodos. O sensor FDR envia uma onda eletromagnética através dos eletrodos e mede a frequência da onda refletida que varia de acordo com a umidade do solo (HAMED et al., 2006; SOUZA, et al., 2013; DECAGON DEVICES, 2014).
- Resistência elétrica: Esse método se baseia na mudança da resistência do solo a passagem de corrente elétrica, a qual varia dependendo da umidade do solo, assim quanto mais úmido o solo menor resistência à passagem de corrente elétrica ocorrendo o contrário quando o solo está seco (ROQUE, 2008; VIELMO, 2008).

2.4 Sensores

Sensores são dispositivos que têm como objetivo responder a um impulso físico e convertê-lo em um sinal elétrico mensurável (voltagem, corrente ou carga) que seja compatível com circuitos eletrônicos (FRADEN, 2010). Os sensores modernos geralmente são compostos por quatro partes básicas: dispositivo de detecção, microcontrolador, memória e um transceptor (IYENGAR et al., 2011).

Existem vários critérios para classificar os sensores, dentre os quais pode-se citar: segundo as especificações do sensor (sensibilidade, exatidão, velocidade de resposta, histerese, material, estabilidade, etc.), o material do

sensor (orgânico e inorgânico), os meios de detecção usados (químico, biológico, elétrico, magnético, etc.), o campo de aplicação (agricultura, engenharia civil e construção, energia, saúde, transporte, etc.), entre outros (FRADEN, 2003).

2.4.1 Sensores de umidade do solo

A produção agrícola requer um grande número de atividades como o monitoramento do solo e planta, umidade e temperatura do ar, sistemas de controle das pragas, que de forma integrada contribuem com um ambiente ótimo para o crescimento das culturas (HWANG et al., 2010; NAYYAR; PURI, 2016). O uso de redes de sensores na agricultura ainda está na etapa inicial e suas aplicações envolvem categorias como: a agricultura de precisão, monitoramento ambiental, controle de maquinarias e processos (WANG et al., 2006).

O conteúdo da água no solo é um parâmetro importante dentro dos processos hidrológicos, climatológicos, ambientais e ecológicos (BOGENA et al., 2017), mas sua determinação exige soluções tecnológicas com o objetivo de minimizar perdas de água e nutrientes por lixiviação no solo e melhorar a produtividade das culturas (PAJARES et al., 2013; SOUZA et al., 2013).

A maioria dos sensores que estimam a umidade do solo é composta por sondas eletrônicas, que inseridas no solo transferem impulsos elétricos para a interpretação via controladores eletrônicos, os quais apresentam os resultados de umidade em base de massa ou de volume de acordo com a calibração do fabricante. A heterogeneidade na densidade e na matriz do solo são alguns dos fatores que influenciam na exatidão das medidas (GUIMARÃES et al., 2010).

2.4.1.1 Sensor YL-69

O sensor de umidade do solo YL-69 consome pouca energia para determinar a umidade do solo (Figura 1), sendo composto por uma placa eletrônica (chip comparador LM939 e potenciômetro digital) e duas sondas S_1 e S_2 (distantes entre si em 1,3 cm) que medem a resistência que passa entre ambos (GAVALI et al., 2016; SUDHA; SINHA, 2017; BALAJI et al., 2018).

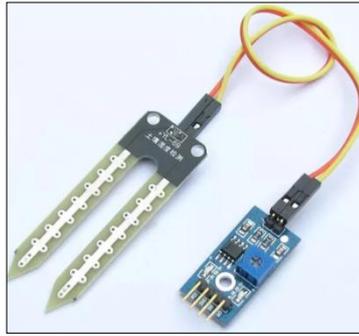


Figura 1. Sensor YL-69 e componentes.

Fonte: <https://www.electronicoscaldas.com/sensores-de-humedad-lluvia-inundacion/461-sensor-de-humedad-en-suelo-yl-69.html>

Quando a umidade do solo é baixa o módulo do sensor produz um alto nível de resistência causando uma maior tensão de saída, o que significa que quanto maior a umidade do solo menor resistência elétrica (KOLAPKAR et al., 2016). O sensor fornece saída analógica de 0 V quando há 100% de umidade e 5 V para 0% de umidade (KATOLE; UMALE, 2016).

Na atualidade o sensor YL-69 é um aparelho muito usado informalmente, no entanto, poucos estudos científicos têm sido desenvolvidos, necessitando, portanto, de maiores informações e pesquisas. As especificações do sensor de umidade YL-69 usadas para calibração são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Especificações do sensor YL-69.

| Parâmetros | Valores |
|--------------------------|-------------------|
| Fonte de alimentação | 3,3 V ou 5 V |
| Corrente | 35 mA |
| Tensão de saída do sinal | 0-4.2 V |
| Saídas digitais | 0 ou 1 |
| GND | Conectado ao solo |

Fonte: Adaptado de Priyanka et al. (2017).

2.4.1.2 Sensores ECH₂O

a) Sensor 5TE

O sensor 5TE é um sensor de capacitância de três pinos que estima a umidade do solo, mensurando a constante dielétrica dos meios usando uma propriedade física (capacitância). O sensor 5TE mede também a condutividade

elétrica e temperatura do solo, operando com uma frequência de 70 MHz. (DECAGON DEVICES, 2012a; ROSENBAUM et al., 2010).

b) Sensor EC-5

O sensor EC-5 possui dois eletrodos que medem a umidade do solo através da constante dielétrica do meio usando a capacitância operando com uma frequência de 70 MHz (DECAGON DEVICES, 2012b).

Os sensores de umidade ECH₂O (5TE e EC-5) têm sido testados em diversos estudos (KIZITO et al., 2008; MAJONE et al., 2013; PARSONS; BANDARANAYAKE, 2009; SAITO et al., 2009; SAKAKI et al., 2011; SINGH et al., 2018; VARBLE; CHÁVEZ, 2011; VAZ et al., 2013). Em geral, essas pesquisas obtiveram valores de coeficiente de determinação (R^2) numa faixa de 0,74 a 0,98, quando correlacionaram a umidade volumétrica medida e a estimada pelos sensores em solos de diferentes texturas e valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) que variaram entre 0,007 a 0,038 $m^3 m^{-3}$ após a calibração. Dessa forma, destacam a importância da calibração específica desses sensores para a estimativa do conteúdo de água no solo.

2.5 Redes de sensores sem fio na agricultura de precisão

A informação desempenha um papel importante dentro das atividades agrícolas. Para ter êxito na agricultura é importante obter, processar, avaliar e utilizar uma ampla quantidade de informações (CSÓTÓ, 2010). A tecnologia de informação tem sido vista como um fator importante para a tomada de decisão na agricultura (ARTUZO et al., 2016).

Vários autores afirmam que com os avanços na tecnologia, as comunicações sem fio têm permitido o desenvolvimento de nós sensores, que são formados pelo conjunto de dispositivos inteligentes multifuncionais de baixo custo e consumo de energia que permitem a comunicação em distâncias curtas sem interferências (AKYILDIZ, et al., 2002; OTHMAN; SHAZALI, 2012; AQEEL-UR-REHMAN et al., 2014).

As tecnologias de conexão sem fio vêm crescendo cada vez mais e estão sendo amplamente utilizadas em aplicações industriais, monitoramento e controle de processos, saúde, meio ambiente e habitat, aplicações de controle

e automação residencial, controle de tráfego, monitoramento agrícola, entre outros (OTHMAN; SHAZALI, 2012; URBANO-MOLANO, 2013; ROCHA et al., 2014).

Segundo Aqeel-ur-Rehman et al. (2014), uma rede de sensores sem fio realiza três funções básicas: sensoriamento, comunicação e computação através do uso de hardware, software e algoritmo. Urbano-Molano (2013) afirma que a transmissão de dados sem fio pode reduzir e simplificar a fiação, posicionar o sensor em locais remotos e simplificar a instalação.

2.6 Arduino

Arduino é um microcontrolador de código aberto em hardware e software, econômico e disponível comercialmente, introduzido em 2005 no mercado (LOUIS, 2016). Os microcontroladores são pequenos computadores que trabalham com baixa potência e pouca memória, compostos por um microchip adaptado a uma placa de circuito com capacidade de leitura, gravação, armazenamento, entradas e saídas (GIBB, 2010).

O Arduino foi desenhado para proporcionar à população uma forma fácil de elaborar dispositivos eletrônicos que sejam capazes de interagir com o ambiente, que utilizem como entrada sensores e atuadores de variáveis ambientais, e como saída equipamentos permitindo desta forma a possibilidade ilimitadas de projetos. Além disso, o Arduino pode ser programado, apagado e reprogramado facilmente a qualquer instante de tempo. É composto por um hardware (placa Arduino) e um software (Arduino IDE) que é um programa usado para desenvolver o código (BANZI, 2008; SOUZA et al., 2011).

Existem diversas versões de Arduino que utilizam a mesma linguagem simples de programação. Todos podem ser usados para diferentes propósitos, desde o ensino até a realização de dispositivos comerciais. Graças às simplicidades da sua interfase é possível controlar qualquer dispositivo tanto digital quanto analógico (ORGANTINI, 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de ocorrência dos solos estudados

A Zona da Mata do Estado de Pernambuco é composta por 43 municípios, ocupando uma área de 8.738 km² com uma população aproximada de 1.132.544 habitantes. Atualmente, é reconhecida como uma das regiões de maior potencial econômico do Nordeste, onde se concentra a monocultura canavieira, em uma área de aproximadamente 450 mil hectares (SILVA, 2016). O clima da Zona da Mata é Tropical Úmido com temperaturas médias anuais superiores a 24 °C e com vegetação natural do tipo floresta tropical úmida, localmente chamada de Mata Atlântica (ALBUQUERQUE, 2015).

A zona Agreste do Estado de Pernambuco se estende do Rio Grande Norte até os planaltos da Bahia, sendo formada pela união de 71 municípios ocupando uma área de 24.400 km² correspondente a 24,7% do território pernambucano e conta com uma população de aproximadamente 1,8 milhão de habitantes (um quarto da população de Pernambuco). A economia diversificada dessa região é baseada, principalmente, na produção de culturas como milho, feijão, mandioca, e na pecuária leiteira e de corte (MONTEIRO et al., 2007). A zona Agreste apresenta um clima Tropical Subúmido e Semiárido com temperaturas médias anuais que oscilam entre 20 e 26°C e com tipo de vegetação floresta tropical seca (ALBUQUERQUE, 2015).

3.2 Caracterização dos solos estudados

Para a calibração dos sensores modelo YL-69 em laboratório foram utilizados três tipos de solo da Zona da Mata: Argissolo Vermelho - Amarelo (PVA), Espodossolo Humilúvico (EK), Latossolo Amarelo (LA) e um tipo de solo do Agreste: Neossolo Regolítico (NR). Os quatro tipos de solos são identificados como solos de referência do estado de Pernambuco. Os solos de referência pertencem a um grupo de solos que representam a diversidade dos fatores e processos compreendidos no desenvolvimento dos solos do Estado com nenhuma e, ou, insignificante atividade antrópica (RIBEIRO et al., 1999).

3.2.1 Solo 1 - Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)

O Argissolo Vermelho-Amarelo possui uma textura média/argilosa (SIBCS, 2013), situado em relevo suave ondulado. O perfil de referência deste tipo de solo na Zona da Mata de Pernambuco, situa-se na sede da Estação

Experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) no município de Itambé (PE). O município de Itambé localiza-se nas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) 07° 25' 00" S e 35° 06' 00" W. Segundo Ribeiro et al. (1999) este solo pertence à ordem dos Argissolos, os quais 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 costeiros 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).

3.2.2 Solo 2 - Espodossolo Humilúvico (EK)

O Espodossolo Humilúvico possui textura moderada arenosa (SIBCS, 2013), situado em relevo plano e ligeiramente ondulado. Em Pernambuco, o perfil de referência está localizado no município de Goiana nas seguintes coordenadas no sistema SAD 69 (South American Datum) 07° 38' 41" S e 34° 56' 44" W. Este solo pertence à ordem dos Espodossolos, que são caracterizados pela presença de horizonte B espódico subjacente a horizonte eluvial (RIBEIRO et al., 1999).

A distribuição geográfica destes solos ocupa estreitas faixas na baixada litorânea próximas à orla marítima ou em maior extensão nos tabuleiros costeiros da Mata Norte, nos municípios de Igarassu, Araçoiaba, Abreu e Lima, Cruz de Rebouças e Goiana (RIBEIRO et al., 1999).

3.2.3 Solo 3 - Latossolo Amarelo (LA)

O Latossolo Amarelo apresenta como material de origem sedimentos argilo - arenoso (BIONDI et al., 2011). De acordo com Ribeiro et al. (1999) a ordem dos Latossolos compreende solos formados por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial.

Dentro do Estado de Pernambuco os Latossolos Amarelos têm importante ocorrência na Zona Úmida Costeira, associados com os sedimentos da Formação Barreiras, na microrregião da Mata Norte, com áreas mais contínuas nos municípios de Igarassu e Araçoiaba.

O solo utilizado na presente pesquisa foi coletado no Campus José Ermírio de Moraes, que constitui área experimental e de produção do Colégio Agrícola Dom Agostinho Ikas (CODAI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) no município de São Lourenço da Mata – PE, cujas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) são 8° 00' 08" S e 35° 01' 06" W. A vegetação local é predominante do tipo Floresta Subperenifólia, com partes de floresta Hipoxerófila.

Optou-se por coletar o Latossolo Amarelo em São Lourenço da Mata devido à similaridade química, física e morfológica entre o solo de referência e o solo da área de coleta. As características deste solo foram comparadas com a caracterização realizada por Ribeiro et al. (1999) para o solo de referência, e, para o solo coletado utilizou-se informações da caracterização realizada por Marques (2014).

3.2.4 Solo 4 - Neossolo Regolítico (NR)

O Neossolo Regolítico caracteriza-se por possuir textura média e apresentar consistência de macia (Ap, AC, C1) a dura (C3 e C4), não plástica e não pegajosa e ótima friabilidade em todos os horizontes (ALMEIDA, 2014). São compostos de material mineral que não apresentam modificações relevantes em relação ao material originário (RIBEIRO et al., 1999).

O perfil de referência do Neossolo Regolítico está localizado no município de Caetés (PE), nas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) 08°47'27,5" S e 36°36'09,9" W, situado em Caatinga Hipoxerófila apresentando relevo suave ondulado com altitude de 855 m. Os Neossolos Regolíticos ocorrem com maior frequência no Agreste onde ocupam amplas extensões nos locais mais preservados e também no Sertão, porém em menor proporção (RIBEIRO et al., 1999; SILVA et al., 2013).

3.3 Implantação e Condução do Experimento

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE, cujas coordenadas geográficas no sistema SAD 69 (South American Datum) são 8° 01' 05" S e 34° 56' 48" O e altitude de 6,49 m.

3.3.1 Amostragem dos solos e preparo das amostras

Para cada classe de solo foram coletadas amostras de solo deformadas e não deformadas na camada de 0–0,40 m de profundidade. As amostras de solo não deformadas foram coletadas em anéis de volume de 100 cm³ (5 cm de diâmetro x 5 cm de altura) utilizando um trado adaptado tipo Uhland. Essas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo e definir assim, a quantidade de solo a ser acondicionada nos vasos.

As amostras de solo deformadas foram coletadas com auxílio de um trado tipo holandês, as quais foram secas ao ar, desterradas e peneiradas em malha 4,75 mm. Para a calibração dos sensores de baixo custo foram utilizados cinco vasos com capacidade de 5 litros (22,5 cm de altura, 15 cm de diâmetro menor, 25 cm de diâmetro maior e volume útil de 4,66 litros) para cada tipo de solo, totalizando 20 vasos. Os vasos foram perfurados na base, preenchidos com uma camada de 5 cm de brita ($\varnothing = 2$ cm), coberta com uma manta geotêxtil bidim a fim de permitir a drenagem do excesso da água sem que haja perda de solo (Figura 2).



Figura 2. Esquema da montagem do conjunto (vaso, brita, bidim e solo).

3.3.2 Determinação das propriedades físicas do solo

Uma subamostra de solo foi peneirada (malha de 2 mm) e usada para determinar a distribuição do tamanho das partículas do solo através do método do hidrômetro (GEE; OR, 2002). Para a classificação dos solos de acordo à textura utilizou-se o triângulo textural do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013).

Para o cálculo da densidade do solo foi utilizado o método do anel volumétrico (Equação 1), conforme recomendação da Embrapa (2011). As análises foram realizadas no Laboratório de Física de Solos, do Departamento de Agronomia na UFRPE, Campus Dois Irmãos, Recife-PE.

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

Onde: D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}), M_s é a massa do solo seco (g) e V_t é o volume total (cm^3).

3.3.3 Cálculo da massa do solo

O fator de correção “f” calculado por meio da razão entre terra fina seca ao ar e terra fina seca em estufa (Equação 2). Dessa forma, foi possível calcular a massa de solo úmido equivalente à massa de sólidos para uma determinada densidade do solo.

$$f = \frac{TFSA}{TFSE} \quad (2)$$

Onde: TFSA é a terra fina seca ao ar (g), TFSE é a terra fina seca em estufa (g).

Para tanto, a quantidade do solo (massa úmida) a ser acondicionada em cada vaso foi calculada por meio da equação 3, resultando nos seguintes valores: Argissolo Vermelho-Amarelo: 6,030 kg, Espodossolo Humilúvico: 7,564 kg, Latossolo Amarelo: 7,249 kg e Neossolo Regolítico: 6,035 kg, de modo a manter a respectiva densidade do solo no campo.

$$M_{su} = D_s \times f \times V \quad (3)$$

Onde: D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}), f é o fator de correção e V o volume útil do vaso (cm^3).

3.3.4 Instalação e calibração dos sensores

Após o acondicionamento do solo, os vasos foram submetidos a saturação por capilaridade e organizados sobre uma bancada, a fim de permitir a drenagem da água gravitacional. Ao cessar a drenagem cada vaso foi pesado, representando a umidade equivalente à capacidade de campo.

Os sensores YL-69 foram pesados e instalados verticalmente (Figura 3) no centro de cada vaso (3,5 cm abaixo da superfície do solo) para posterior registro do conteúdo de água no solo.



Figura 3. Instalação dos sensores YL-69.

As pesagens e leituras de umidade do solo foram realizadas diariamente às 8:00 h. Antes das medições diárias da umidade do solo realizadas pelos sensores, os vasos foram pesados para calcular a massa de água presente no solo, por meio da diferença das pesagens diárias e a massa do conjunto (vaso + brita + bidim + solo seco). Para calcular o conteúdo gravimétrico de água no solo foi utilizado o método padrão, adotando-se a equação (4).

$$U = \frac{M_a}{M_{ss}} \quad (4)$$

Onde: U é o conteúdo gravimétrico de água no solo (g g^{-1}), M_a é a massa da água da amostra (g), M_{ss} representa a massa de solo seco da amostra (g).

As leituras de umidade do solo, registradas pelos sensores, foram enviadas a uma placa Arduino Pro Mini ATmega328p e armazenadas em um cartão de memória para posterior processamento utilizando o software Microsoft Excel. Tanto as pesagens como as leituras da umidade do solo foram coletadas até que a variação da umidade da massa do conjunto (vaso, brita, bidim e solo) tornou-se constante.

Para avaliação da exatidão das medidas de umidade do solo estimadas pelos sensores YL-69, após a calibração, essas foram comparadas com duas sondas ECH_2O (5TE e EC-5) utilizando-se equações de calibração obtidas por Silva (2016) e Jimenez et al. (2018).

3.4 Análises estatísticas

A análise de regressão foi utilizada para relacionar o conteúdo volumétrico de água calculado (Y , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e o conteúdo de água estimado pelos sensores (X , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). As avaliações dos modelos de estimativa da umidade do solo foram baseadas nos seguintes índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), Erro absoluto médio (“mean bias error”, MBE) usando a equação 5, raiz quadrada do erro quadrático médio (“root mean square error”, RMSE) (Equação 6). Para a interpretação dos resultados do RMSE utilizou-se a classificação proposta por Fares et al. (2011) (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação da exatidão dos sensores de umidade do solo conforme à raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

| RMSE | Exatidão |
|--------------------------------|-------------|
| $\text{RMSE} \geq 0,1$ | Muito fraca |
| $0,1 > \text{RMSE} \geq 0,05$ | Fraca |
| $0,05 > \text{RMSE} \geq 0,01$ | Razoável |
| $\text{RMSE} < 0,01$ | Boa |

Fonte: Adaptado de Fares et al. (2011).

Assim também, foi utilizado o índice de concordância de Willmott (1981) expresso pela equação 7:

$$MBE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \right] \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (7)$$

Onde: n é o número de observações, O_i são os valores calculados com base no método gravimétrico e P_i são os valores estimados pelos sensores ($i = 1, 2, \dots, n$), \bar{O} é a média dos valores medidos.

O índice de Willmott varia entre 0 e 1; onde o valor 1 apresenta uma concordância perfeita entre os valores medidos e estimados, e valor 0 indica nenhuma concordância entre esses valores (WALKER et al., 2004). Finalmente foi determinado o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) foi determinado por meio da equação (8).

$$c = r \times d \quad (8)$$

Onde: r é o coeficiente de determinação e d o índice de concordância. Para a interpretação dos resultados deste índice utilizou-se a classificação proposta por Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 3).

Tabela 3. 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).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do sensor de umidade YL-69

Com base na análise granulométrica dos solos estudados as classes texturais foram classificadas como franco argilo arenoso para o Argissolo Vermelho-Amarelo, areia franca para o Espodossolo Humilúvico, areia para o Neossolo Regolítico e argila arenosa para o Latossolo Amarelo (Santos et al., 2005) (Tabela 4).

Tabela 4. Principais características físicas dos solos estudados.

| Solos | Prof. m | Dens. de | Dens. | Porosidade | Areia | Silte | Argila |
|-------|------------|----------------------------------|---------|---|--------|--------|--------|
| | | partículas Mg m ⁻³ | do solo | Total m ³ m ⁻³ | | | |
| PVA | 0-0,40 | 2,51 | 1,23 | 0,51 | 620,41 | 131,28 | 248,30 |
| EK | | 2,67 | 1,54 | 0,42 | 860,82 | 35,06 | 104,13 |
| LA | | 2,63 | 1,45 | 0,45 | 502,15 | 131,55 | 366,30 |
| NR | | 2,72 | 1,29 | 0,53 | 895,61 | 74,33 | 30,05 |

*PVA = Argissolo Vermelho Amarelo; EK = Espodossolo Humilúvico; LA = Latossolo Amarelo; NR = Neossolo Regolítico.

Fonte: Os autores

Curvas de secagem para cada solo foram geradas a partir dos dados de umidade volumétrica dos solos e o número de observações, essas curvas foram geradas para avaliar o comportamento do conteúdo de água desde o ponto de saturação até a estabilização da umidade (Figura 4).

O tempo necessário para atingir a estabilidade na variação da umidade na base de massa, ou seja, até a secagem foi de 47, 34, 44 e 41 dias para o Argissolo Vermelho-Amarelo, Espodossolo Humilúvico, Neossolo Regolítico e Latossolo Amarelo, respectivamente.

Assim, o Espodossolo Humilúvico e Latossolo Amarelo apresentaram menor tempo de secagem devido à sua menor porosidade (Tabela 3), conseqüentemente capacidade de retenção de água baixa, ao contrário do Argissolo Vermelho-Amarelo e o Neossolo Regolítico que por possuir porosidade maior retém mais água e, conseqüentemente, o tempo de secagem aumentou.

As faixas de umidade volumétrica estimada pelo sensor YL-69 antes de ser calibrado, vão de 0,01 a 0,72 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para o Argissolo Vermelho-Amarelo, de 0,00 a 0,62 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para o Espodossolo Humilúvico, de 0,00 a 0,78 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para o Neossolo Regolítico e de 0,01 a 0,76 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para o Latossolo Amarelo. Como se pode observar na figura 4, os valores da umidade volumétrica estimada pelos sensores, antes de serem calibrados, estão distantes dos calculados para todos os solos, sem embargo, para o Neossolo Regolítico os valores de umidade abaixo de 0,38 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ estão próximos aos valores reais.

Contudo, o comportamento da umidade volumétrica estimada pelos sensores depois de ser corrigida com a calibração, apresentou valores próximos aos calculados (Figura 4). Pode-se dizer que o sensor YL-69 precisa ser calibrado para ser usado nesses tipos de solos a fim de obter valores de umidade volumétrica mais exatos.

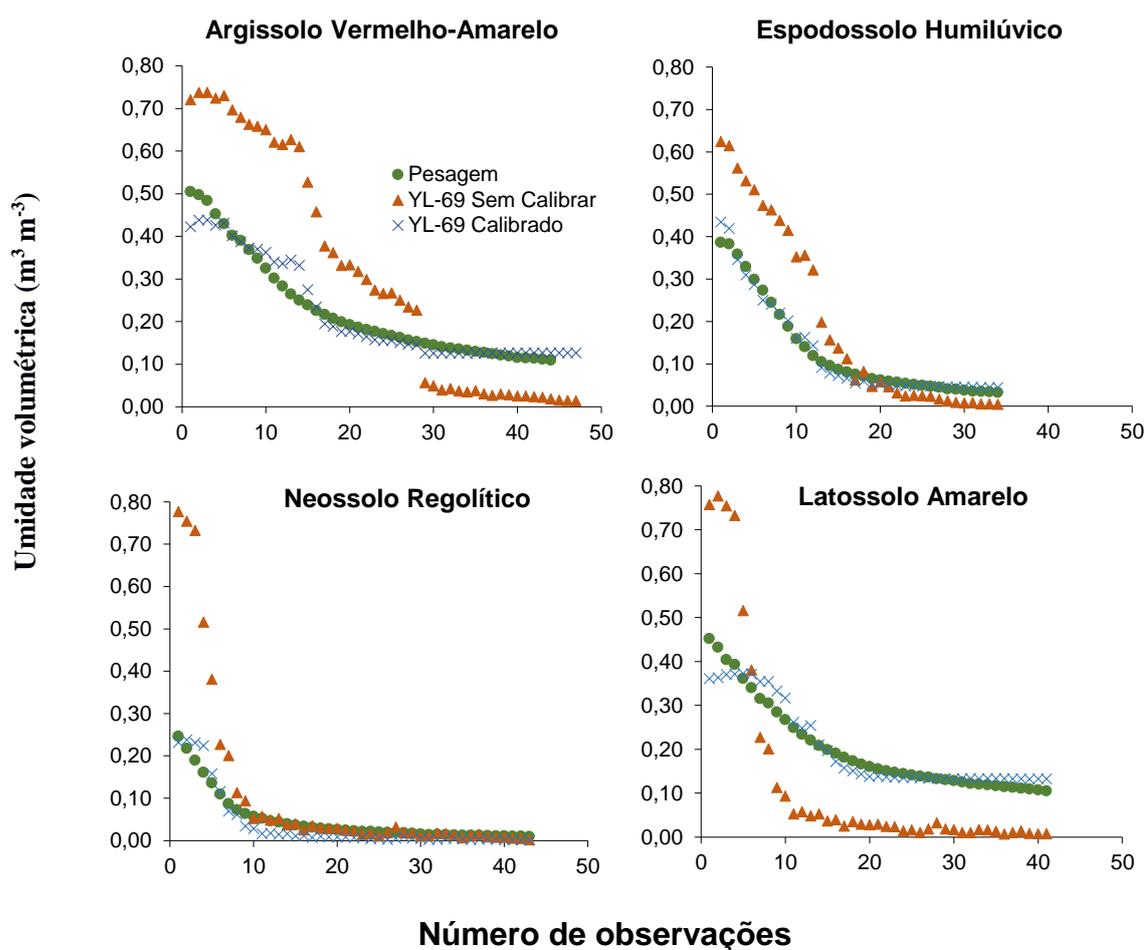


Figura 4. Curvas de secagem dos solos estudados conforme valores de umidade estimada pelo sensor YL-69 e umidade volumétrica obtida por pesagem.

As equações de calibração para os solos estudados foram obtidas por meio da correlação entre a média do conteúdo volumétrico de água calculado para os cinco vasos, com base na densidade do solo e a média do conteúdo volumétrico de água estimado pelo sensor. A melhor equação de regressão foi escolhida de acordo com o coeficiente de determinação (R^2) mais alto, assim, para o Argissolo Vermelho-Amarelo ajustou-se melhor o modelo polinomial (Equação 9) ($R^2= 0,94$), para o Espodossolo Humilúvico o exponencial (Equação 10) ($R^2= 0,96$), já para o Neossolo Regolítico e o Latossolo Amarelo ajustaram-se equações lineares (Equação 11 e 12, respectivamente) alcançando valores de coeficiente de determinação de 0,96 e 0,97, respectivamente.

$$\text{PVA : } \theta = 0,6743 \times \theta_{\text{YL-69}}^2 - 0,0777 \times \theta_{\text{YL-69}} + 0,1279 \quad (9)$$

$$\text{EK: } \theta = 0,0441 e^{3,6646 \times \theta_{\text{YL-69}}} \quad (10)$$

$$\text{NR: } \theta = 0,2761 \times \theta_{\text{YL-69}} + 0,0189 \quad (11)$$

$$\text{LA: } \theta = 0,2393 \times \theta_{\text{YL-69}} + 0,142 \quad (12)$$

Onde θ o conteúdo volumétrico de água corrigido expresso em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e $\theta_{\text{YL-69}}$ o conteúdo volumétrico de água dado pelo sensor YL-69 sem calibrar.

Os valores estimados pelos sensores de baixo custo apresentaram boa correlação quando comparado com os valores calculados obtidos com base no método padrão (gravimétrico) alcançando valores de coeficiente de determinação (R^2) altos. Resultados similares foram encontrados por Souza et al. (2013), quando calibraram sondas FDR (Diviner 2000) alcançando valores de 0,94 para solo de textura média e 0,91 para um solo de textura argilosa. Wu et al. (2014) avaliaram sensores FDR (EC-5) em solos arenosos obtendo uma relação quadrática entre as leituras do sensor e o conteúdo volumétrico de água no solo medido, obtendo um coeficiente de determinação de 0,95.

Da mesma forma, Miranda et al. (2007) calibraram sensores capacitivos para dois solos arenosos (Neossolo Quartzarênico e Cambissolo) onde foram ajustados modelos lineares para o Neossolo Quartzarênico alcançando um valor de $R^2 = 0,98$, e para o Cambissolo o R^2 também foi alto (0,94)

apresentando uma resposta quadrática à variação de umidade do solo. Todos os resultados obtidos por esses autores confirmam que a calibração específica de sensores de umidade do solo permite obter medições exatas.

É possível verificar que para o Argissolo Vermelho-Amarelo (Figura 5) o sensor YL-69 antes da calibração subestimou os valores de umidade volumétrica calculada na faixa de 0,01 a 0,06 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, valores correspondentes a uma faixa real de 0,10 a 0,15 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. No intervalo entre 0,23 a 0,74 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ o sensor superestimou os valores de umidade volumétrica real.

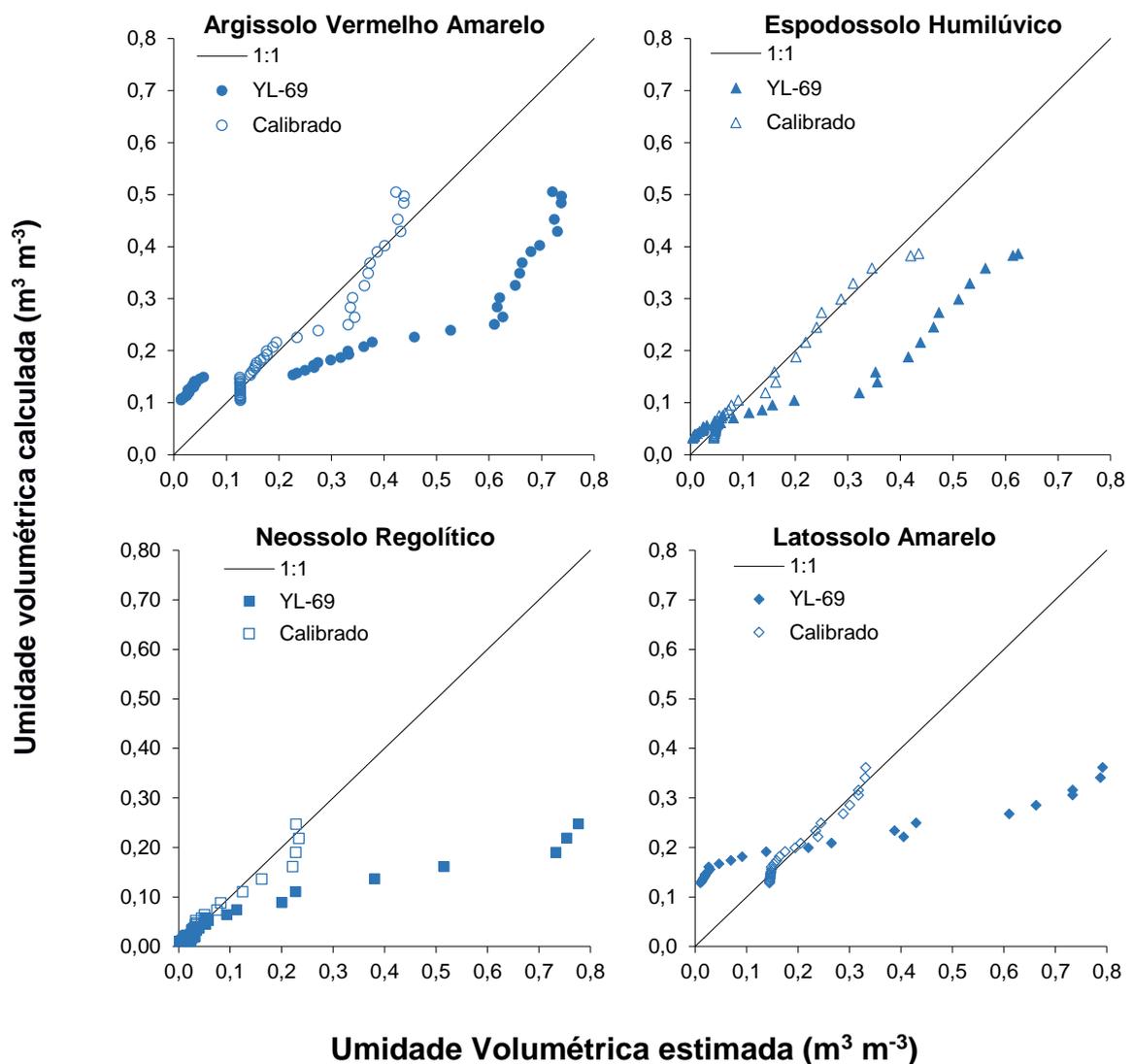


Figura 5. Umidade volumétrica, dos solos estudados, estimada pelo sensor YL-69 antes e depois da calibração e sua correlação com a umidade volumétrica calculada.

Após a calibração do sensor para esse tipo de solo, o conteúdo volumétrico de água corrigido com a equação específica aproximou-se ao

calculado (próximo à reta 1:1), porém, nas umidades inferiores a 0,13 e na faixa compreendida entre 0,27 e 0,37 m³ m⁻³ os valores de umidade volumétrica do solo calculada foram superestimados, já para os valores de umidade superiores a 0,43 m³ m⁻³ o sensor perdeu sensibilidade, como resultado disso, subestimou os valores de umidade volumétrica calculados.

Resultados similares foram encontrados por Varble e Chávez (2011), que calibraram um sensor eletromagnético CS616 para um solo franco argiloso obtendo valores de umidade volumétrica mais exatos em faixas inferiores de umidade (0,11 – 0,20 m³ m⁻³), mas não para conteúdo mais altos (0,25 – 0,36 m³ m⁻³), resultados que corroboram os encontrados neste estudo.

Para o Espodossolo Humilúvico a umidade volumétrica na faixa de 0,00 a 0,07 m³ m⁻³ subestimaram os valores da umidade calculada, porém, na faixa de 0,08 a 0,62 m³ m⁻³ o sensor superestimou os dados de umidade volumétrica calculada (Figura 5). Após a implementação da equação de calibração, os valores de umidade volumétrica estimados pelos sensores aproximaram-se aos valores reais, porém em umidades menores a 0,14 e superiores a 0,30 m³ m⁻³ os sensores perderam sensibilidade.

É possível verificar na figura 5 que para o Neossolo Regolítico a faixa de 0,00 a 0,06 m³ m⁻³ mostrou maior proporcionalidade com os valores reais (mais próximos à reta 1:1) o que indica que para faixa de valores de umidade baixos, o sensor não precisa ser calibrado. Acima dessa faixa (0,09 – 0,78 m³ m⁻³) o sensor perdeu sensibilidade e superestimou os valores de umidade volumétrica calculados. Após a calibração específica para esse solo, os valores de umidade corrigidos ficaram próximos à reta 1:1, porém, mesmo após a calibração, o sensor superestimou os valores de umidade volumétrica calculada na faixa de 0,12 a 0,23 m³ m⁻³, já que os valores reais correspondem a uma faixa de 0,11 a 0,22 m³ m⁻³. Em valores superiores a 0,22 m³ m⁻³ o sensor subestimou os valores de umidade real.

Da mesma forma, é possível observar na figura 5 que para o Latossolo Amarelo antes da calibração a umidade volumétrica estimada pelos sensores na faixa de 0,01 a 0,14 m³ m⁻³ subestimou os valores de umidade volumétrica calculada correspondente uma faixa de 0,13 a 0,19 m³ m⁻³. A partir de 0,22 até 0,79 m³ m⁻³ o sensor superestimou o conteúdo volumétrico de água no solo.

Depois de corrigir os dados de umidade usando a equação de calibração para esse tipo de solo, os valores de umidade volumétrica estimada pelos sensores melhoraram significativamente aproximando-se dos valores reais.

Porém, em umidades menores a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e na faixa de $0,24$ a $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o sensor superestimou os valores de umidade volumétrica calculada. Já na faixa de umidade de $0,16$ a $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e em valores superiores a $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ o sensor perdeu sensibilidade e subestimou os valores de umidade volumétrica calculada.

A calibração de específica melhorou significativamente a exatidão do sensor YL-69 (Tabela 5), resultando em valores de RMSE baixos ($\leq 0,03$) para todos os solos, variando a precisão do sensor de muito pobre a razoável de acordo com a classificação de Fares et al. (2011). Vários estudos realizados mostraram resultados semelhantes onde depois da calibração de sensores capacitivos os valores de RMSE e índices de concordância melhoraram significativamente corroborando a necessidade de fazer a calibração do sensor YL-69 para estes tipos de solos (SILVA, 2016; VARBLE; CHAVEZ 2011).

Tabela 5. Índices estatísticos para o sensor YL-69 antes e depois da calibração para ambos os solos.

| Solo | RMSE | | Willmott (d) | | Desempenho (c) | |
|------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|
| | Sem calibração | Calibrado | Sem calibração | Calibrado | Sem calibração | Calibrado |
| PVA | 0,19 | 0,03 | 0,77 | 0,99 | 0,74 | 0,95 |
| EK | 0,13 | 0,02 | 0,85 | 0,99 | 0,83 | 0,98 |
| LA | 0,22 | 0,01 | 0,85 | 0,99 | 0,84 | 0,98 |
| NR | 0,16 | 0,01 | 0,65 | 0,99 | 0,63 | 0,97 |

*PVA = Argissolo Vermelho Amarelo; EK = Espodossolo Humilúvico; LA = Latossolo Amarelo; NR = Neossolo Regolítico.

Fonte: Os autores

Os índices de desempenho (c) para cada solo (Tabela 5) foram considerados segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), como ótimos, pois apresentaram valores $> 0,85$. Da mesma forma, os índices de concordância (d) para todos os solos (Tabela 5) resultaram no valor de $0,99$, apresentando uma ótima concordância entre os valores de umidade volumétrica calculada e os estimados pelos sensores após serem calibrados.

Resultados semelhantes foram encontrados em estudo realizado por Silva Junior et al. (2013) quando depois de calibrar uma sonda de capacitância (PR2/6, Delta-T Devices) em um Latossolo Vermelho obtiveram valores de índice de concordância (d) superiores a 0,99 confirmando que a calibração específica de sensores de umidade eleva seu desempenho.

4.2 Comparação da exatidão do sensor YL-69 com dois sensores ECH₂O para a determinação da umidade do solo

Para a comparação da exatidão do sensor YL-69 depois de ser calibrado, foram utilizadas equações de calibração para sensores dos modelos 5TE e EC-5 obtidas por Silva (2016) e Jimenez et al. (2018) para os solos estudados. Os dados considerados padrão foram os valores de umidade volumétrica estimados pelos sensores 5TE e EC5 após calibrados.

Uma elevada correlação foi encontrada em função dos valores mais altos de R^2 ($\geq 0,90$) entre os valores de umidade do solo estimados pelo sensor YL-69 e os valores estimados pelos sensores EC-5 e 5TE (Tabela 6) para todos os solos em estudo, sinalizando a possibilidade de que o sensor YL-69 pode substituir os sensores 5TE e EC-5 para a determinação da umidade nos solos utilizados neste estudo. Pode-se verificar ainda, que o sensor YL-69 resultou em uma precisão razoável ($0,05 > RMSE > 0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para todos os solos, segundo a escala de Fares et al. (2011), ao comparar os resultados de umidade volumétrica estimada pelo sensor YL-69 com os sensores 5TE e EC-5 (Tabela 6).

Resultados similares foram encontrados em estudo realizado por Fares et al. (2011) quando calibraram vários sensores de umidade (EC-10, EC-20 e ML2x) em solos francos atingindo valores de RMSE de 0,019 a 0,025 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, classificando a precisão dos sensores como razoáveis, resultados que confirmam os descobertos neste estudo.

Os índices de concordância (d) (Tabela 6) apresentaram valores próximos a 1, representando uma concordância perfeita entre os valores de umidade dados pelos sensores YL-69 e os valores medidos pelos ECH₂O (5TE e EC-5). Da mesma forma, observa-se que os métodos para estimativa da umidade do solo apresentaram ótimo desempenho ($c \geq 0,85$) mostrando alta confiabilidade

do sensor YL-69 na estimativa do conteúdo de água no solo para os todos os solos estudados.

Tabela 6. Índices estatísticos para avaliação do desempenho do sensor YL-69 em comparação com sensores ECH2O devidamente calibrados para os solos estudados.

| Solo | R ² | | RMSE | | Willmott (d) | | Desempenho (c) | |
|------|----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| | 5TE x YL-69 | EC-5 x YL-69 | 5TE x YL-69 | EC5 x YL-69 | 5TE x YL-69 | EC5 x YL-69 | 5TE x YL-69 | EC5 x YL-69 |
| PVA | 0,90 | 0,93 | 0,03 | 0,03 | 0,96 | 0,97 | 0,91 | 0,94 |
| EK | 0,94 | 0,97 | 0,02 | 0,02 | 0,99 | 0,99 | 0,96 | 0,98 |
| LA | 0,99 | 0,98 | 0,02 | 0,02 | 0,99 | 0,99 | 0,98 | 0,98 |
| NR | 0,98 | 0,92 | 0,03 | 0,03 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,93 |

*PVA = Argissolo Vermelho Amarelo; EK = Espodossolo Humilúvico; LA = Latossolo Amarelo; NR = Neossolo Regolítico.

Fonte: Os autores

O sensor YL-69 além de apresentar uma diferença mínima de erro na estimativa da umidade do solo quando comparado com os sensores ECH₂O, apresenta uma diferença elevada em termos de custos (Tabela 7). Além disso, para realizar as leituras de umidade do solo utilizando as sondas ECH₂O (5TE ou EC-5) é necessário um registrador portátil (Pro-check ou EM50) o que significa um aumento nos custos na implementação desde tipos de sensores no campo (\cong 28 vezes). Desta forma, o sensor YL-69 possui grande vantagem econômica frente a esses sensores.

Tabela 7. Principais instrumentos para a medição da umidade do solo e seus respectivos custos.

| Item | Valor Unitário (US\$) |
|--------------------------------------|-----------------------|
| Sensor de umidade YL-69 + datalogger | 25,00 |
| Sensor de umidade 5TE | 255,00 |
| Sensor de umidade EC-5 | 125,00 |
| Pro-check | 521,00 |
| EM50 | 510,00 |

Fonte: Os autores

Assim, os resultados desta pesquisa apontam para a possibilidade de substituir os sensores ECH₂O pelos sensores YL-69, desde que devidamente

calibrados, já que se apresenta como um instrumento viável economicamente, de fácil operação, preciso e exato na estimativa da umidade do solo. É importante considerar que o sensor YL-69, por apresentar custos consideravelmente baixos, expressa uma vida útil menor em comparação com os outros sensores testados cientificamente, sendo necessário realizar mais estudos que determinem a durabilidade deste sensor.

5 CONCLUSÕES

A calibração de sensores de umidade, modelo YL-69, em solos representativos para agricultura irrigada no Estado de Pernambuco potencializou o uso deste sensor profissionalmente.

As equações de calibração para os solos estudados melhoraram a capacidade de medição dos sensores YL-69 proporcionando valores de R^2 superiores a 0,90 e baixos valores de $RMSE \leq 0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ mostrando que o sensor YL-69 apresentou desempenho muito bom. Não se recomenda seu uso sem calibração prévia.

A correlação entre os valores de umidade volumétrica corrigidos com as equações de calibração para os sensores 5TE e EC-5 em comparação com os valores estimados pelo sensor YL-69 após a calibração foi alta, apresentando valores de $R^2 \geq 0,90$.

A precisão do sensor YL-69 para a determinação da umidade volumétrica nos solos em estudo foi considerada boa, em virtude do erro mínimo encontrado ($RMSE \leq 0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) ao comparar os valores medidos, após a calibração, com aqueles oriundos dos sensores EC5 e 5TE também calibrados.

O sensor de baixo custo (YL-69) pode substituir os sensores 5TE e E-C5 na determinação do conteúdo de água em solos caracterizados como Argissolo Vermelho-Amarelo, Espodossolo Humilúvico, Neossolo Regolítico e Latossolo Amarelo.

O sensor YL-69 apresentou custos consideravelmente baixos para que possam ser adquiridos pelos agricultores no manejo da irrigação.

6 BIBLIOGRAFIA

AKYILDIZ, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4).

ALBUQUERQUE, E. R. G. M. **Biomassa de raízes em áreas com diferentes usos da terra e tipos de solos**. 2015. 134 f. Tese (Doutorado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

ALMEIDA, A. V. D. L. de. **Caracterização morfológica, química e físico-hídrica de Neossolos Regolíticos no agreste meridional de Pernambuco**. 2014. 75 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Produção Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2014.

AQEEL-UR-REHMAN. et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. **Computer Standards & Interfaces**, v. 36, n. 2, p. 263-270, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csi.2011.03.004>.

AQUINO-SANTOS, R. et al. Developing a New Wireless Sensor Network Platform and Its Application in Precision Agriculture. **Sensors**, v. 11, n. 1, p. 1192-1211, 2011. DOI: <https://doi.org/10.3390/s110101192>.

ARTUZO, F. D. et al. Utilização da tecnologia de informação em propriedades rurais: um caso no município de Getúlio Vargas (RS). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 2, p. 305-322, 2016. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2016v9n2p305-322>.

BALAJI, G. N. et al. IOT Based Smart Crop Monitoring in Farm Land. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research**, v. 4, n. 1, p. 89-92, 2018.

BANZI, M. **Getting Started with Arduino**. 1. ed. s.l.: O'Reilly Media Inc., 2009. 110p. ISBN: 978-0-596-15551-3, 2008.

BIONDI, C. M. et al. Teores naturais de bário em solos de referência do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1819-1826, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500036>.

BITELLI, MARCO. Measuring Soil Water Content: A Review. **HortTechnology**. v. 21. n. 3, p. 293-300, 2011.

BOGENA, H. R. et al. Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 208-220, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17010208>.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision Agriculture and Sustainability. **Precision Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 359-359, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000040806.39604.aa>.

BONGIOVANNI, R. et al. **Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable**. Montevideo: PROCISUR, 2006. 244 p.

BUSKE, T. C. et al. Determinação da umidade do solo por diferentes fontes de Aquecimento. **Irriga**, v. 19, n. 2, p. 315-324, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n2p315>.

CAMARGO, A. P., SENTELHAS P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CSÓTÓ, M. Information flow in agriculture – through new channels for improved effectiveness. **Agricultural Informatics**, v. 1, n. 2, p. 25-34, 2010.

DECAGON DEVICES, 2012a. **5TE Operator's Manual**. Version 7. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA. Acesso em: 15/08/2018.

DECAGON DEVICES, 2012b. **EC-5 Soil Moisture Sensor User's Manual**. Version 2. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA. Acesso em: 15/08/2018.

DECAGON DEVICES, 2014. **Princípio de Funcionamento de Sensores de Umidade FDR**. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA. Acesso em: 02/12/2018.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FARES, A. et al. 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>.

FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: Physics, Designs and Applications**. 4 ed. New York, Springer, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6466-3>.

FRADEN, J. **Handbook of modern sensors: Physics, Designs and Applications**. 3 ed. New York, Springer, 2003.

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, n. 5, p. 6893-6899, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2016.0505039>.

GEE, G. W., OR, D. Particle size analysis. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), SSSA book series: **Methods of soil analysis Part 4-Physical methods** (pp. 255-293). Madison, WI: Soil Science Society of America Inc, 2002.

GIBB, A. M. **New media art, design, and the Arduino microcontroller: a malleable tool**. 2012. 72 f. Dissertação (Masters of Science in Art History) – Pratt Institute, Brooklyn.

GUAÑA-MOYA, J.; ALMEIDA-SÁNCHEZ, T.; SALGADO-REYES, N. Measurement of agricultural parameters using wireless sensor network (WSN). In: International Conference on Electrical, Electronics and Applied Science. **Anais Eletronicos**. AIP Conference Proceedings, v. 1952, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5031971>

GUIMARÃES, P. L. O. et al. Proposta de procedimento para calibração de sensores e medidores de umidade do solo (Soil Moisture). In: Congresso da Qualidade em Metrologia, 2010. São Paulo, **Anais...**São Paulo: ENQUALAB, 2010.

GUIMARÃES, V.G. **Automação e monitoramento de sistema de irrigação na agricultura**. 2011. 74 f. Dissertação (Curso de Graduação em Engenharia

de Controle e Automação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

HAMED, Y.; SAMY, G.; PERSSON, M. Evaluation of the WET sensor compared to time domain reflectometry. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 4, p. 671-681, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.671>.

HWANG, J.; SHIN, C.; YOE, H. Study on an Agricultural Environment Monitoring Server System using Wireless Sensor Networks. **Sensors**, v. 10, n. 12, p. 11189-11211, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/s101211189>.

IYENGAR, S. S. et al. **Fundamentals of Sensor Network Programming: Applications and Technology**. Edição ilustrada, 2011. 344 p. ISBN: 9780470876145. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470890158>.

JIMENEZ, A. A. C. et al. Calibração de dois sensores capacitivos de umidade do solo em Neossolo Regolítico. **Irriga**, 2018. Em avaliação.

JOSHI, P. P.; KANADE, S. S.; JOSHI, S. P. Wireless Sensor Network and Monitoring of Crop Field. **Journal of Electronics and Communication Engineering**, v. 12, n. 1, p. 23-28, 2017. DOI: <https://doi.org/10.9790/2834-1201022328>.

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.

KHANNA, N.; SINGH, G.; JAIN, D. K.; KAUR, M. Design and Development of soil moisture sensor and response monitoring system. **International Journal of Latest Research in Science and Technology**, v. 3, n. 6, p. 142-145, 2014.

KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 367-378, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.021>.

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>.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Avaliação do Desempenho de Sonda de Capacitância no Monitoramento da Umidade de Latossolos do Cerrado em Condições de Campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 1, p. 23-32, 2012. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n1.p23-32>.

LOUIS, L. Working principle of Arduino and using it as a tool for study and research. **International Journal of Control, Automation, Communication and Systems**, v. 1, n. 2, p. 21-29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5121/ijcacs.2016.1203>.

MACEDO, A. B. M. et al. Desempenho de um sistema de irrigação automatizado através da tensão de água no solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 2, p.78-81, 2010. DOI: <https://doi.org/10.7127/RBAI.V4N200410>.

MAJONE, B. et al. Wireless Sensor Network deployment for monitoring soil moisture dynamics at the field scale. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 426-435, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.049>.

MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; MARIA, I. C. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 191-198, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200001>.

MARQUES, K. P. P. **Utilização de superfícies geomórficas no levantamento pedológico de uma microbacia do Rio Capibaribe**. 2014. 35 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

MELLO, B. A.; CAIMI, L. L. Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n. 6, p. 666-675, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000600015>.

MIRANDA, F. R. et al. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 3, p. 317-321. 2007.

MIRHOSSEINI, M.; BARANI, F.; NEZAMABADI-POUR, H. Design Optimization of Wireless Sensor Networks in Precision Agriculture Using Improved BQIGSA. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 16, p. 38-47, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2017.08.006>.

MONTEIRO, A. A. et al. Características da produção leiteira da região do agreste do estado de Pernambuco, Brasil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 28, n. 4, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2007v28n4p665>

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.

NAYYAR, A., PURI, V. Smart farming: IoT based smart sensors agriculture stick for live temperature and moisture monitoring using Arduino, cloud computing & solar technology. Conference Paper. p. 673-680, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315364094-121>.

ORGANTINI, G. **Scientific Arduino programming**. Roma: Sapienza Univesità di Roma, 2016. 67 p.

OTHMAN, M. F.; SHAZALI, K. Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System. **Procedia Engineering**, v. 41, p. 1204-1210, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.302> .

PAJARES, G.; PERUZZI, A.; GONZALEZ-DE-SANTOS, P. Sensors in Agriculture and Forestry. **Sensors**, n. 13, v. 9, p. 12132-12139, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/s130912132>.

PARSONS, L. R.; BANDARANAYAKE, W. M. Performance of a New Capacitance Soil Moisture Probe in a Sandy Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 4, p. 1378-1385, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0264>.

PIERPAOLI, E. et al. Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. 6th International Conference on Information and

Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment (HAICTA 2013). *Procedia Technology*, v.8, p. 61-69, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>.

PRIYANKA, R. et al. Smart Grid System for Water Pumping and Domestic Application Using Arduino Controller. **International Journal for Modern Trends in Science and Technology**, v. 3, n. 5, p. 385-390, 2017.

RIBEIRO, M.R.; JACOMINE, P.K.T.; LIMA, J. Caracterização de solos de referência do Estado de Pernambuco, 1999. 104 p. (Relatório Científico) Universidade Federal, de Pernambuco.

ROBOCK, A. et al. The global soil moisture data bank. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 81, n. 6, p. 1281-1300, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<1281:TGSMDB>2.3.CO;2).

ROCHA, F. B. et al. Plataforma de comunicação sem fio aplicada a sistemas de irrigação. **Holos**, v. 5, p. 269-282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2014.1945>.

RODRIGUEZ, D.; RECA, J.; URRESTARAZU, M. Automatic Irrigation Control System for Soilless Culture Based on Feedback from Drainage Hydrograph. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 4, n. 33, p. 531-542, 2017. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.11172>.

ROMANO, N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 6-20, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.026>

ROMERO, R. et al. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v. 114, p. 59-66, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.06.026>.

ROQUE, W. **Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo**. 2008. 45 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ROSENBAUM, U. et al. Sensor-to-sensor Variability of the ECH₂O EC-5, TE and 5TE Sensors in Dielectric Liquids. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 1, p. 181-186, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0036>.

SAITO, T. et al. Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 6, p. 1931–1937, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0128>.

SAKAKI, T.; LIMSUWAT, A.; ILLANGASEKARE, T. H. A Simple Method for Calibrating Dielectric Soil Moisture Sensors: Laboratory Validation in Sands. **Vadose Zone Journal**, v. 10, n. 2, p. 526-531, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0036>.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 5 ed., Campinas-SP 2005, p 91.

SANTOS, H. G. et al. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 353 p, 2013.

SILVA, S. M. S. et al. Características físicas e químicas de um Neossolo, Regolítico, Eutrófico do Agreste Pernambucano. In: Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Florianópolis. **Anais...**Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 4, 2013.

SILVA JUNIOR, J. J. et al. Calibração de sondas de capacitância para determinação de umidade em Latossolo vermelho Distroférrico. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 743-755, 2013. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p743>.

SILVA, D. M. O. **Calibração de sensores dielétricos ECH₂O para solos de referência na Zona da Mata de Pernambuco**. 2016. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SINGH, J. et al. Performance assessment of factory and field calibrations for electromagnetic sensors in a loam soil. **Agricultural Water Management**, v. 196, p. 87-98, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.020>.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J, P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v. 35, n. 64, p. 689–698, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p689-698/2015>.

SOUZA, A. R. et al. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 01-05, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100026>.

SOUZA, C. F. et al. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 26-42, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>.

SOUZA, C. F. et al. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>.

SUDHA, L. K.; SINHA, A. Effect of Moisture Content in the Sandy, Clay and Loamy Soil using Humidity Sensor YL69. **International Journal of Science and Research**, v. 6, n. 5. p. 107-110, 2017.

SHUKLA, A. et al. Soil Moisture Estimation using Gravimetric Technique and FDR Probe Technique: A Comparative Analysis. **American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences**, v. 1, n. 8, p. 89-92, 2011.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. rev. e ampl.-Brasília, DF: Embrapa, 2017, 574 p. ISBN 978-85-7035-771-7.

URBANO-MOLANO, F. A. Redes de Sensores Inalámbricos Aplicadas a Optimización en Agricultura de Precisión para Cultivos de Café en Colombia. **Jornal de Ciencia e Ingenieria**, v. 5, n. 1, p. 46-52, 2013.

VARBLE, J. L.; CHAVEZ, J. L. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. **Agricultural Water Management**, v. 101, n. 1, p. 93-106, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.09.007>.

VAZ, C. M. P. et al. Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 2, p. 1-16, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0160>.

VICENTE, M. A. et al. Comparison of soil water-contents as measured with a neutron probe and time domain reflectometry in a Mediterranean forest (“Sierra de Gata”, Central Western Spain). **Annals of Forest Science**, v. 60, n. 3, p. 185-193, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:2003011>.

VIELMO, A. L. **Limite superior da retenção da água no solo: método de campo e método de estimativa**. 2008. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**, v. 293, n 1-4, p. 85-99, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.008>.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry-Recent development and future perspective. **Computers and electronics in Agriculture**, v. 50, n. 1, p. 1-14, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p. 184-194, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.

WU, B. et al. Field-Specific Calibration and Evaluation of ECH2O EC5 Sensor for Sandy Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 1, p. 70-78, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.05.0209>.