



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

RUAN SANTANA CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE S12 PARA ARDUÍNO NO
MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA UMIDADE DO SOLO**

FORTALEZA

2025

RUAN SANTANA CAVALCANTE

AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE S12 PARA ARDUÍNO NO
MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA UMIDADE DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Ceará.

Área de concentração: Irrigação e drenagem.

Orientador:

Prof. Dr. Benito Moreira de Azevedo

FORTALEZA

2025

RUAN SANTANA CAVALCANTE

AVALIAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE S12 PARA ARDUÍNO NO
MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DA UMIDADE DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola do Centro de Ciências Agrárias da
Universidade Federal do Ceará.
Área de concentração: Irrigação e drenagem.

Aprovada em: 13/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Dr. José Bruno Rego de Mesquita
Centro Universitário da Faculdade do Nordeste Wyden (UNIFANOR WYDEN)

A Deus.

Aos meus pais, Sergio e Adriana.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido e pela manutenção da bolsa de auxílio, fundamental para a realização desta pesquisa.

A Deus, por sempre me dar forças para continuar seguindo em frente apesar das dificuldades, me guiar e permitir acreditar que tudo pode ser superado. Agradeço a Deus por todas as oportunidades que surgiram para mim, e por ter sempre ter me iluminado para encará-las com coragem e determinação. Agradeço ao A minha mãe Adriana Braga de Santana, por todo o amor e carinho, por sempre acreditar no meu potencial apesar de tudo. Ao meu pai Sergio Luiz Dantas Cavalcante por todo amor e carinho que me deu por me ensinar as maiores lições de vida para que pudesse me tornar quem eu sou e ter acreditado em mim e me ajudado na minha jornada com muita ajuda e incentivo. À minha Irmã Sarah Santana Cavalcante, por ter me ajudado nos momentos mais difíceis, com ajuda nos trabalhos, e acreditar que posso sempre ser alguém melhor. Amo muito todos vocês.

À minha Vozinha, Maria Zoraide Dantas Cavalcante, por todo o amor e carinho e ter me apoiado nas decisões que tomei. Ao meu tio Roberto e minha tia Karina por toda ajuda apesar das dificuldades. Aos demais familiares que apesar de distantes, fazem parte da minha vida e sempre acreditaram em mim.

À minha querida Marcia Cruz Paiva, que sempre acreditou em mim e me ajudou na minha jornada. Por todo o carinho, amor e compreensão e por me fazer sempre acreditar que sou capaz de vencer meus medos. Por me fazer sempre querer lutar para ser minha melhor versão.

Ao Prof. Dr. Benito Moreira Azevedo, pela excelente orientação e por ter me acolhido como orientando e abrindo as portas da Estação meteorológica no momento em que mais precisei durante minha pós-graduação. Sou extremamente grato por todo o carinho, apoio e todas as lições profissionais que o senhor pode me ensinar que vão além da sala de aula. Ao Prof. Dr. Thales Vinícius de Araújo Viana por toda a ajuda na minha dissertação e apoio na promoção do projeto. Ao prof. Dr. Luís Gonzaga Medeiros de Figueredo Júnior e o prof. Dr. José Bruno Rego de Mesquita por toda a orientação e ajuda na dissertação. Ao professor Raimundo Nonato de Assis Jr por todas as dicas e apoio na escrita do meu trabalho e por me ajudar a abrir minha mente para o real significado da ciência.

A todos os professores da Universidade Federal do Ceará, que serviram de inspiração de vida e estiveram sempre me ajudando na jornada do mestrado para se tornar o profissional que sou hoje.

Aos meus amigos da Estação Meteorológica, Juvenaldo, Diogo, Gleyciane, James, Lucas, Matheus, Bruno, e Gustavo por toda ajuda e acolhimento na estação.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Agrícola Mayara, Magaly, Libério, Luigi, Sharon, Matheus, Josiely, Felipe, Fábio e Raul pela grande parceria enfrentando as disciplinas da pós-graduação.

Aos meus grandes amigos da Pós-graduação Yago, Sabrina, Paula e Israel por toda o companheirismo mesmo estando na pós-graduação em outros departamentos. Aos meus grandes amigos de vida Alysson, Isael, Pedro, Marcos, Alan e João Vitor, Jamille e Janaina pelos longos anos de amizade e por todas as aventuras vividas.

Aos meus amigos do Universitário, Laio, Bosco, Milton, Jeovani, Ramon, Diego, Thiffany, Elbston, Janis, Beatriz e Gabriel que sempre transformaram as longas horas de viagem no ônibus para o Aquiraz em momentos de muita alegria, em especial para os amigos do Vôlei que contribuíram para a dessedentarização do grupo.

Aos demais amigos e colegas que pude adquirir na minha jornada acadêmica e que fizeram parte da minha história. Todos vocês fazem parte do meu sucesso, porque sozinho nada disso seria possível.

Continuarei sempre lutando enquanto houver presas em meu coração”. (Komamura Sajin, 2023).

RESUMO

A água é um recurso abiótico fundamental para a vida na terra, estando presente em diversas atividades humanas, principalmente na agricultura. O crescimento populacional trouxe um aumento na demanda de água e por esse motivo houve a necessidade de se implementar novas tecnologias agrícolas voltadas para controle o controle do uso água, de forma sustentável e aprimorada, com a utilização do monitoramento da água através de sensores de umidade do solo. Os sistemas Arduino vêm ganhando espaço no mercado e nas pesquisas científicas voltadas a engenharia agrícola, devido a sua simplicidade operacional e baixo custo, proporcionando o desenvolvimento de sistemas de sensores automatizados de monitoramento da umidade do solo. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o potencial desempenho do sensor de umidade do solo resistente a corrosão modelo S12 para Arduino, por meio da análise do tempo de resposta do sensor em comparação com o tempo de resposta de uma sonda de nêutrons devidamente calibrada. A metodologia consistiu na avaliação do tempo de resposta do sensor de umidade S12 utilizando como base de comparação uma sonda de nêutrons, previamente calibrada para medições da umidade do solo. Para isto, observaram-se as variações das medidas de umidade feitas na sonda em relação as medidas feitas no sensor S12 no interior de um sistema de tanque com terra com controle constante da umidade e temperatura do solo. As medidas de umidade foram feitas partindo da umidade de saturação até o limite de menor umidade detectado pelo sensor e a partir desses dados foi construído a curva de calibração e a curva do tempo de resposta do sensor que foi comparada com o tempo de resposta da sonda de nêutrons. A curva de calibração do sensor S12 mostrou coerência com seu comportamento linear e uma correlação positiva entre os valores de umidade do solo medidas e o tempo, com um coeficiente de determinação de 0.98, valor este entre o intervalo de aceitabilidade para a equação. Além disso, os resultados da análise de variância da variação da umidade do solo medida pelo sensor e o tempo não apresentou nenhuma diferença significativa entre as medidas feitas em diferentes amostras de solo, o que revela uma boa precisão do sensor para estimativa da umidade do solo.

Palavras-chave: estimativa da umidade do solo; sonda de nêutrons; curva de calibração

ABSTRACT

Water is a fundamental abiotic resource for life on Earth, present in various human activities, especially in agriculture. Population growth has led to an increase in water demand, which has necessitated the implementation of new agricultural technologies focused on controlling and using water in a sustainable and improved way, with the use of water monitoring through soil moisture sensors. Arduino systems have been gaining popularity in the market and in scientific research related to agricultural engineering due to their operational simplicity and low cost, enabling the development of automated sensor systems for soil moisture monitoring. The objective of this study is to evaluate the potential performance of the corrosion-resistant Arduino soil moisture sensor model S12 by analyzing its response time compared to the response time of a properly calibrated neutron probe. The methodology consists of evaluating the response time of the Arduino S12 moisture sensor using a calibrated neutron probe as a comparison for soil moisture measurements. The variation in moisture readings made with the Arduino S12 sensor will be observed relative to those taken with the neutron probe within a tank system with soil, where the moisture and temperature of the soil are kept under constant control. Moisture measurements will be taken from saturation to the lowest moisture limit detected by the sensor, and from these data, the calibration curve and the response time curve of the sensor will be constructed and compared with the neutron probe's response time. The calibration curve of the Arduino sensor showed consistency with its lineares behavior and a positive correlation between the measured soil moisture values and time, with a coefficient of determination of 0.98, a value within the acceptable range for the equation. Moreover, the results of the analysis of variance for the variation in soil moisture measured by the sensor and time showed no significant difference between measurements taken from different soil samples, which indicates good precision of the sensor for estimating soil moisture.

Keywords: soil moisture estimation; neutron probe; calibration curve.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	Contextualização do problema	13
2.2	Métodos diretos de estimar a umidade do solo	13
2.2.1	<i>Método termogravimétrico ou padrão de estufa</i>	13
2.2.2	<i>Método das pesagens</i>	14
2.3	Métodos indiretos de estimativa da umidade do solo	14
2.3.1	<i>Método dos blocos de resistência elétrica</i>	15
2.3.2	<i>Método da atenuação por raios gamas</i>	15
2.3.3	<i>Método da tensiometria</i>	16
2.3.3.1	<i>Tensiômetro de câmara de ar</i>	18
2.3.3.2	<i>Tensiômetro eletrônico</i>	18
2.3.3.3	<i>Tensiômetro polimérico</i>	20
2.3.3.4	<i>Fatores que afetam a resposta do tensiômetro</i>	21
2.3.3.5	<i>Temperatura</i>	22
2.3.3.6	<i>Tempo de resposta</i>	22
2.3.3.7	<i>Erros causados pelo transdutor</i>	23
2.3.4	<i>Método da reflectometria do domínio do tempo (TDR)</i>	23
2.3.5	<i>Método da moderação de nêutrons</i>	26
2.3.6	<i>Sensores de umidade do solo para Arduino</i>	27
2.4	Sensor de umidade do solo S12 para Arduino	29
3	OBJETIVOS	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
6	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A revolução neolítica ou revolução agrícola foi o marco inicial para o desenvolvimento da sociedade em que vivemos. A sedentarização do ser humano juntamente com o desenvolvimento da agricultura iniciou um processo de milhares de anos, saindo de técnicas rudimentares no cultivo agrícola até as mais modernas formas de automatização dos processos agropecuários. A irrigação é uma das práticas agrícolas fundamentais, na qual graças ao manejo eficiente da água é possível se obter melhor desenvolvimento das plantas e uma maior produtividade dos cultivos. Os métodos de irrigação são aprimorados cada vez mais, onde a incorporação da tecnologia proporciona uma maior eficiência no manejo da água e produtividade agrícola.

Os métodos para estimar o conteúdo de água no solo são diversos, dentre eles podemos citar métodos diretos como o termogravimétrico e o das pesagens, como também métodos indiretos que relacionam a água presente no solo com uma outra variável a ser medida como: corrente elétrica; nêutrons moderados; condutividade elétrica e tensão da água no solo. Os diversos métodos para se estimar o conteúdo de água no solo, apesar de não serem 100% eficientes, apresentam vantagens e desvantagens, dentre elas a necessidade de medições constantes para as estimativas. O avanço da tecnologia permitiu uma união de ferramentas e conhecimentos científicos aliados à área da ciência da computação e engenharia de automação, permitindo a criação de formas de medições automatizadas que permitem que as leituras de umidade do solo possam ser feitas em intervalos de tempo cada vez menores, permitindo um melhor controle da umidade do solo e promovendo diversos benefícios no manejo da água da irrigação.

Dentre os métodos para se estimar o conteúdo de água no solo, se destaca a sonda de nêutrons, que se configura em um dos métodos mais sofisticados e precisos para esse fim, pois permite medidas eficientes e com baixo tempo de resposta. Dentre suas desvantagens, destacam-se o alto custo de aquisição, a necessidade de mão de obra especializada para seu uso e, principalmente, a burocracia dos órgãos governamentais para sua utilização. Tendo em vista essa problematização é necessário o uso de técnicas mais simples e de baixo custo, direcionados para pequenas propriedades e para que atinja o nível do pequeno produtor.

Atualmente, uma das tecnologias que mais vem ganhando espaço na automação aplicada à irrigação é o uso de sistemas computacionais embarcados que permitem pequenos circuitos elétricos automatizarem a irrigação em campo. O uso de sistema Arduino vem permitido a facilidade do uso desses sistemas automatizados nas mais diversas áreas da

irrigação e da agricultura. Os protótipos de circuitos automatizados podem ser mais bem desenvolvidos e implementados em campo. O sistema Arduino permite a implementação de uma ampla infinidade de sensores de umidade que apresentam um bom desempenho e um preço de baixo custo.

A partir disso objetiva-se que com o desenvolvimento tecnológico seja possível cada vez mais desenvolver e implementar novos métodos de se estimar a água no solo de forma precisa, automática e que possua um baixo custo de implementação e de uso, possível de se utilizar nos mais diversos cultivos agrícolas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Contextualização do problema

A água é um recurso abiótico fundamental para a vida na terra, estando presente em diversas atividades humanas como na indústria, no comércio, no lazer e, principalmente, na agricultura. E, o crescimento populacional trouxe um aumento na demanda de água, principalmente no setor agrícola, sendo este responsável por cerca de 70 % do volume de água extraído da natureza. Isso mostra a necessidade de implementação de sistemas agrícolas sustentáveis, ou seja, capazes de suprir as demandas agrícolas, mas sem comprometer os recursos para gerações futuras, sendo estes com grande foco na gestão e na eficiência do uso da água, um dos recursos mais escassos do planeta (INGRAO et al., 2023).

O rápido desenvolvimento de novas tecnologias proporcionou soluções inovadoras para se resolver os diversos problemas relacionados a produtividade, a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas convencionais e das técnicas de manejo. A integração de inovações tecnológicas como a robótica, internet das coisas (dispositivos IoT), inteligência artificial e a eletrônica embarcada incorporada à automação, trouxeram novas perspectivas para a criação de sistemas agrícolas modernos, eficientes e automatizados. A chamada agricultura inteligente pode promover a criação de sistemas de irrigação automatizados, eficientes e de monitoramento constante, o que pode trazer inúmeros benefícios quanto a eficiência do uso da água, além de aumento dos rendimentos agrícolas e diminuição da mão de obra de trabalho (MORCHID et al., 2024).

A criação de sistemas de irrigação eficientes requer o uso de tecnologias que proporcionem a gestão precisa da água e a rentabilidade do sistema. Entretanto, vários fatores são responsáveis pela variabilidade das necessidades hídricas das culturas, como: condições meteorológicas, estágio fenológico da cultura, características topográficas, compactação e textura do solo, sistema de irrigação, entre outros (MILLÁN et al., 2019). Por esse motivo, a gestão eficiente da água necessita de medições precisas e monitoramento constante da água no solo, em diferentes fases de crescimento. A umidade do solo é um dos fatores fundamentais para o manejo da irrigação eficiente. Entretanto, as tecnologias de detecção da umidade do solo possuem algumas limitações devido à grande variabilidade das propriedades do solo e as limitações econômicas dos agricultores. Além disso, a medição da umidade do solo é sensível a fatores ambientais como temperatura, salinidade, densidade do solo, matéria orgânica e teor

de argila, pois essas variáveis interferem de forma direta ou indireta na leitura feita pelos sensores comprometendo a precisão e a exatidão das medições (ADLA et al., 2024).

Um dos principais modelos para a caracterização e a quantificação do conteúdo de água no solo e do fluxo de água em meios porosos; é a curva de retenção de água no solo, “*soil-water retaining capacity*” (SWRC). Esse modelo expressa a relação entre a tensão da água no solo ou potencial matricial da água no solo e o conteúdo de água do solo expresso em termos de umidade em base volumétrica. A construção da SWRC requer dados experimentais de campo, e sua precisão irá depender da precisão das medidas de tensão obtidas em campo. Entretanto, as técnicas utilizadas para se obter medidas de tensão de da água no solo são bastante limitadas. Além disso a dificuldade de instalação e de operação de alguns aparelhos utilizados para a obtenção de medidas, torna o processo laborioso e demorado (NAJDI et al., 2023).

Existem diversos métodos para a obtenção da quantidade de água no solo, sendo divididos em métodos diretos e métodos indiretos. Nos métodos diretos, o teor de água no solo, como o próprio nome diz, é medido diretamente do solo de forma simples. Já nos métodos indiretos, utilizam-se de propriedades físicas e químicas do solo que estão relacionadas a quantidade de água no solo. Tais métodos são indispensáveis na construção de curvas SWRC assim como para o monitoramento da água no solo (CARVALHO et al., 2023). O aperfeiçoamento dos métodos de obtenção da quantidade de água no solo aliados a tecnologias da computação e da eletrônica poderão permitir a criação de novos sistemas de monitoramento da água no solo de forma constante e com menores graus de interferência no solo.

2.2 Métodos diretos de estimar a umidade do solo

Dentre os métodos diretos para se estimar a umidade do solo, destacam-se o método termogravimétrico e o método das pesagens, sendo o primeiro método utilizado como padrão para se calibrar outros métodos indiretos de estimativa da umidade do solo e o segundo um método complementar para uso prático em campo com pouca necessidade de aparelhagem.

2.2.1 Método termogravimétrico ou padrão de estufa

O principal método para se medir a umidade do solo é o método termogravimétrico, também conhecido como método padrão de estufa. Esse método consiste basicamente na coleta de amostras de solo, que são pesadas para a medição da massa de solo úmida, que, em seguida, são colocadas em estufa a temperatura de 105 °C até atingir massa constante, obtendo-se dessa

forma a amostra de solo seco e a massa de solo seco após sua pesagem. A umidade do solo é obtida pela diferença entre a massa de solo úmida, e a massa de solo seco, dividida pela massa de solo seco, obtendo-se a umidade do solo em base de massa dada em gramas de água por gramas de solo. As vantagens do método termogravimétrico estão relacionadas a sua boa exatidão e relativa facilidade na obtenção de resultados. Entretanto, o método apresenta desvantagens por alterar a estrutura física do solo, ser bastante demorado na obtenção de resultados e a impossibilidade de ser realizado diretamente no campo. Apesar disso, o método termogravimétrico ainda é utilizado como padrão para calibração de outros métodos de medidas de umidade do solo, pois é o único que quantifica exatamente a quantidade de água na amostra de solo (GHELFI FILHO et al., 1988).

2.2.2 Método das pesagens

O método das pesagens tem como princípio a saturação da amostra de solo, diferentemente do método termogravimétrico que se baseia no secamento da amostra de solo. O método das pesagens consiste na obtenção de uma amostra de solo padrão de 100 g de terra seca em estufa a 105 °C, em recipiente com volume conhecido. Tendo em mãos os valores de densidade das partículas do solo, é possível se obter a umidade do solo a partir de qualquer nova amostra no momento da sua coleta, simplesmente saturando a amostra em um recipiente com o mesmo volume da amostra padrão, sendo necessário somente a pesagem da amostra seca e da amostra após a saturação (KLAR et al., 1966). O método das pesagens é uma proposta muito vantajosa, devido a sua grande facilidade de execução, rapidez nos resultados, boa precisão e baixo custo, podendo ser utilizado facilmente em campo. Entretanto, assim como o método termogravimétrico, é um método destrutivo e ainda sem possibilidade de automatização (BUSKE et al., 2013).

2.3 Métodos indiretos de estimativa da umidade do solo

Dentre os métodos indiretos, destacam-se: blocos de resistência elétrica, atenuação de raios gama, tensiometria, reflectometria no domínio do tempo, moderação de nêutrons e higrômetros automáticos. Devido ao foco do trabalho a abordagem dos higrômetros automáticos será aprofundada em um tópico a parte.

2.3.1 Método dos blocos de resistência elétrica

O princípio do método dos blocos de resistência elétrica tem base na estimativa da umidade do solo, de forma indireta, em função da resistência do solo à passagem de corrente elétrica. Sabe-se que quanto maior o teor de água, menor é a resistência à passagem de corrente elétrica. Portanto, solos úmidos possuem menor resistência elétrica do que solos secos. O método consiste na introdução de dois eletrodos no solo encaixados no interior de blocos porosos de gesso ou náilon. A umidade dos blocos porosos se equilibra com a umidade do solo, podendo assim ser medida a condutividade elétrica dele. Entretanto, sabe-se que o método na verdade avalia a variação da condutividade elétrica que antes, interpretada como variação da umidade do solo, dependia também de outros fatores como composição, textura e concentração de sais na solução do solo e densidade dos blocos. Contudo, ainda é possível relacionar a variação da condutividade elétrica com a variação da umidade, tendo em vista que os demais fatores permanecem praticamente constantes. Para se utilizar os blocos de resistência elétrica, é necessário construir uma curva de calibração que relaciona a variação da umidade com a variação da resistência elétrica, tomando por base pontos desde o solo seco até o solo saturado. A grande vantagem é que esse método não é destrutivo, além disso, permite leituras contínuas até mesmo em solo seco. Porém, o método apresenta desvantagens relacionadas às variações nas propriedades hidráulicas e deterioração dos blocos, além de necessidade de bom contato entre o bloco e o solo. E, como requer a construção de curva de calibração tornando necessário o uso do método padrão (AMARO FILHO et al., 2008).

2.3.2 Método da atenuação por raios gamas

O método da atenuação por raios gamas é bastante semelhante ao método da dispersão de nêutrons. O aparelho consiste em uma fonte de césio radioativo (^{137}Ce), que emite radiação gama, e um detector, que consiste em um contador de cintilação (sintético ou de iodato de sódio) ligado a um multiplicador e um pré-amplificador. A radiação monoenergética e radial emitida pela fonte e o detector possui distância constante, o que faz com que a radiação detectada pelo receptor dependa somente da secção angular interceptada. Então, se houver algum material interceptando o caminho, a radiação será absorvida, evidenciando uma diferença na contagem do detector. Tendo a amostra de solo com espessura e densidade conhecida, a intensidade da radiação irá variar somente com o conteúdo de água na amostra (AMARO FILHO et al., 2008).

A aplicação da atenuação por raios gamas pode ir além, para detecção de outros materiais. Ensaios experimentais foram feitos por Taqi et al. (2017), realizados para amostras de óleo-solo com vários componentes químicos para estimar o coeficiente de atenuação de massa. Os autores não encontraram diferenças significativas nos valores dos coeficientes de atenuação de massa para as amostras, superestimando em algumas energias que refletem o efeito da porcentagem de componentes químicos na mistura.

Esse método é mais utilizado em laboratórios onde se conhece a espessura e a densidade da amostra de solo, que pode ser mais facilmente controlada. O método possui como vantagem um alto grau de resolução espacial, permitindo realizar leituras de amostras de até 2 mm de espessura, apresentando rapidez nos resultados. Além disso, apresenta menos problemas que a sonda de nêutrons com relação a exposição dos raios gamas e permite a leitura em solo seco. Porém, o método apresenta como desvantagem a necessidade dos tubos de acesso que precisam ser instalados de forma adequada, além do alto custo da instrumentação e necessidade de calibração do aparelho (AMARO FILHO et al., 2008).

2.3.3 Método da Tensiometria

Um dos métodos indiretos mais utilizado para se estimar a umidade do solo em campo é o da tensiometria. O tensiômetro consiste em um instrumento que realiza a medição do potencial mátrico da água no solo, também referido na literatura como “tensão da água” ou “sucção”. A umidade do solo é estimada por meio da relação que possui com o potencial mátrico da água do solo. O tensiômetro consiste basicamente em uma cápsula porosa, geralmente de material cerâmico, colada a um tubo plástico que geralmente é feito de PVC que se conecta a um medidor de pressão (que pode ser um vacuômetro metálico ou manômetro de mercúrio). Todas as partes são preenchidas com água. A cápsula porosa é permeável a água e a solutos, porém impermeável a gases, até determinado nível de tensão. A estimativa do potencial mátrico da água no solo é feita a partir de sensores de pressão. O mais comum e tomado como padrão é o manômetro de mercúrio, devido a sua maior sensibilidade a variações de potencial mátrico da água do solo. Com o decorrer do tempo, novos sensores de potencial mátrico da água do solo foram sendo desenvolvidos, dando espaço para um leque de opções alternativas ao mercúrio (AMARO FILHO et al., 2008).

O funcionamento do tensiômetro consiste no contato da cápsula porosa com o solo, que deve ser o mais perfeito possível. O contato da água da cápsula com a água do solo gera um equilíbrio formando um sistema contínuo. Sabendo que a água no interior no tensiômetro

encontra-se à pressão atmosférica, ou seja, potencial mátrico zero, ou de referência, à medida que a água no interior do tensiômetro vai se submetendo a diferentes tensões, o movimento da água gera uma sucção sobre o instrumento, retirando dele uma determinada quantidade de água, proporcional a tensão exercida, causando uma diminuição na pressão no interior do tensiômetro. A diferença de pressão a que a água é submetida altera a altura da coluna de mercúrio até atingir o equilíbrio do sistema. A partir disso, é obtido o potencial mátrico da água no solo, sendo este equivalente ao potencial da água dentro do tensiômetro, que equivale a altura da coluna de mercúrio no interior do manômetro de mercúrio.

Na agricultura prática, é bastante comum o uso de tensiômetros mais simples, utilizando sensores de ponteiro, conhecidos como manômetro de punção. Após a instalação do tensiômetro em campo, basta inserir o manômetro de punção na parte superior do tensiômetro, aguardar o equilíbrio e fazer a leitura. Esse método possui a vantagem da simplicidade operacional, contudo, as medidas podem não ser tão precisas em relação ao manômetro de mercúrio, porém possuem uma confiabilidade suficiente para o controle da irrigação na agricultura (REICHARDT, 1990).

No geral, a dimensão dos poros da cápsula é de tamanho no qual, os poros só podem ser esvaziados quando submetidos a pressões de -1 atm. Em caso de poros muito grandes, pode ocorrer a entrada de ar na cápsula, podendo ocasionar cavitação, alterando o equilíbrio da coluna de água do sistema. Porém, na prática as limitações de medidas do tensiômetro situa-se em torno de 0 à -0,85 atm. A faixa de potencial da água no solo disponível para as plantas está entre 0 atm até próximo do ponto de murcha permanente que é aproximadamente -15 atm, estando bem além da faixa de medidas feitas pelos tensiômetros convencionais. Mesmo com essa limitação, o tensiômetro é um ótimo instrumento para indicar o momento da irrigação de forma simples e prática (REICHARDT 1990). Para contornar os problemas do limite de pressão, novos tipos de tensiômetros foram desenvolvidos, utilizando sensores de pressão mais sensíveis, ampliando a faixa de leitura dos tensiômetros convencionais. Entre eles se destacam o uso do tensiômetro eletrônico digital com transdutor de pressão, do tensiômetro de câmara de ar e do tensiômetro polimérico. Além disso, o mercúrio utilizado, possui natureza prejudicial ao meio ambiente caso seja derramado no solo ou na água, estando ligado a poluição, problemas de saúde do usuário e dificuldades de manutenção (AMARO FILHO et al., 2008).

2.3.3.1 *Tensiômetro de câmara de ar*

Camargo *et al.* (1982) desenvolveram um tensiômetro de leitura simples e direta, baseado na lei de Boyle-Mariotte, que diz que o volume de uma massa de gás a temperatura constante varia de forma inversamente proporcional a pressão do gás. Baseado nesse princípio, o tensiômetro de câmara de ar é uma alternativa prática para a mensuração do potencial mátrico da água no solo, utilizando uma coluna de ar que se descola no interior do tensiômetro de acordo com as variações da tensão da água no solo. Estando o tensiômetro completo com água, ela é atraída pelo solo, gerando uma bolsa de ar que se expande, onde, ao entrar em equilíbrio, a altura da coluna de ar é proporcional a tensão da água dentro do tensiômetro (MORAIS *et al.*, 2004).

Vários estudos demonstram a aplicabilidade e eficiência do tensiômetro de câmara de ar. Vila Nova *et al.*, (1989) propuseram um modelo matemático de calibração do tensiômetro a partir da altura da câmara de ar no momento da leitura. Além disso Vila Nova *et al.* (1992) observaram em estudos comparativos, que as leituras feitas em tensiômetros com câmara de ar se mostraram equivalentes às feitas com o tensiômetros de mercúrio, indicando a aplicação do tensiômetro de câmara de ar para programas de irrigação devido a sua simplicidade.

Assis Jr (1995) observou que a aplicabilidade do tensiômetro de câmara de ar é bastante útil para o manejo da irrigação, visto que a medida do potencial mátrico obtido pelo manômetro de câmara de ar é muito próximo do padrão com manômetro de mercúrio. Contudo, o autor destaca que ainda existem limitações para sua aplicação para medidas mais precisas que exigem maior rigor, devido a necessidade de vedação total da câmara, que pode ser comprometida com o manuseio, levando a erros significativos na leitura.

2.3.3.2 *Tensiômetro eletrônico*

O tensiômetro eletrônico digital é um método simples para medida da tensão da água no solo que usa um transdutor de pressão, em vez do manômetro de mercúrio. Inicialmente descrito por Marthaler *et al.* (1983), o tensiômetro eletrônico tem seu tubo fechado com vedação hermética durante e após a inserção da agulha de seringa, que é introduzida através da rolha. A pressão do ar na extremidade superior do tubo é medida inserindo a agulha na seringa conectada a um sistema transdutor de pressão. A câmara é separada da câmara inferior por um invólucro, estando a pressão atmosférica. Quando a pressão no interior do tubo e a pressão do ar na câmara de ar se equilibram com a pressão atmosférica, ocorre uma pequena deflexão na membrana de

ação presente na câmara no transdutor de pressão, que altera a resistência dos semicondutores incorporados a membrana, que está conectado por um fio blindado que conecta os condutores ao medidor de resistividade. Após a calibração, é possível realizar a leitura direta da tensão da água no solo que é proporcional a deflexão da membrana do sensor. Para uso em campo, os tensiômetros ficam instalados no campo permanentemente, sendo que para realizar as medições, basta inserir o transdutor sobre o tensiômetro. A sonda da agulha penetra na tampa do septo do tensiômetro e a tensão interna pode ser medida, sendo exibida através de um leitor digital na unidade de tensão já calibrada. A grande vantagem do tensiômetro eletrônico é a grande quantidade de leituras que podem ser feitas por septo, antes que seja necessário a substituição, em um determinado intervalo de tempo, além de serem leituras rápidas e fáceis é possível o armazenamento das leituras em meios físicos. Contudo, a necessidade de substituição do septo é apresentada como uma desvantagem do aparelho, pois requer um monitoramento frequente do aparelho (KIRKHAM *et al.* 2005).

Estudos feitos por Darusman *et al.* (1997), utilizando tensiômetros eletrônicos com transdutor de pressão instalados no solo, com um sistema de irrigação por gotejamento subterrâneo, foram muito importantes para observar a velocidade na realização de leituras nos tensiômetros eletrônicos. No estudo, dezenas de tensiômetros foram utilizados para o monitoramento do fluxo de água abaixo da zona radicular do milho (*Zea Mays* L.), com profundidade do solo de 1,5 m, em sistema de irrigação por gotejamento subterrâneo em diferentes espaçamentos entre linhas de gotejamento. Os tensiômetros realizaram as medidas do potencial mátrico do solo, utilizados para estimar a condutividade hidráulica do solo e assim mensurar o fluxo de água subterrânea do sistema de irrigação.

Coelho *et al.* (2004) desenvolveram um tensiômetro de leitura automática utilizando sensores de pressão e sistema de aquisição de dados, e através de ensaios em laboratório foi possível se avaliar o desempenho destes aparelhos. O tensiômetro eletrônico possibilitou a obtenção de valores de potencial matricial da água no solo em alta frequência, permitindo observar a evolução detalhada do processo de secamento do solo, assim como as avaliações de flutuações diurnas de temperatura que influenciavam na leitura do potencial matricial da água no solo. Além disso, foi possível comparar erros de leituras decorrentes das flutuações diurnas de temperatura, evidenciando a importância de sensores de temperatura para evitar erros de leitura em horários de maior temperatura.

2.3.3.3 Tensiômetro polimérico

Para resolver o problema da cavitação frequentemente ocasionada em tensiômetros convencionais, foi desenvolvido o tensiômetro polimérico, comumente chamado de tensiômetro osmótico (OT). Esse método consiste no preenchimento da câmara de água do tensiômetro com polímeros para a absorção da água e assim reduzindo o potencial osmótico da água. Essa redução de potencial causa um aumento de pressão dentro do tensiômetro polimérico, ocasionando a expansão da solução polimérica à medida que a água entra no interior do tensiômetro. Esse aumento de pressão é responsável pela pressão do interior do tensiômetro permanecer sempre positiva, sendo esta a faixa de medição de potencial matricial para leitura no tensiômetro, o que também evita o problema da cavitação (LIU *et al.* 2024).

O princípio do funcionamento do tensiômetro polimérico é baseado nas teorias dos polímeros de Flory-Huggins, que explica a relação entre a pressão da água do hidrogel polimérico e a fração volumétrica do polímero. Diversos estudos observaram a utilizações de diversos polímeros na confecção de tensiômetros poliméricos, na tentativa de encontrar o polímero mais adequado. Liu *et al.* (2024) citaram vários trabalhos com teste de diferentes polímeros utilizados para confecção de tensiômetros poliméricos, apresentando tanto o tipo de polímero, estrutura e grupo iônico. Entre eles, os mais utilizados são polímeros de polietileno glicol, poliacrilamida reticulada e linear, polivinilporrolidona, poliacrilato de sódio e sal de potássio poli (acrilamida-co-acrílico) reticulado.

Bakker *et al.* (2007) desenvolveram seis protótipos de tensiômetros poliméricos, que consistiam de um transdutor de pressão de ampla faixa com um sensor de temperatura, um invólucro de aço inoxidável e uma placa de cerâmica com uma membrana para evitar vazamento de polímero. Os resultados mostram que o tempo de resposta a temperatura foram afetados pela altura da câmara do polímero, sendo que pequenas câmaras de polímeros tendem a funcionar melhor. Além disso, o autor menciona a necessidade de estudos sobre o formato das pontas de cerâmica para garantir um melhor contato entre o aparelho e o solo e integridade a longo prazo dos polímeros dentro da câmara.

Um estudo feito por Liu *et al.* (2023) comparou tensiômetros convencionais com tensiômetros poliméricos preenchidos com o sal de potássio poli reticulado (acrilamida-co-acrílico) (PAM-co-PAAK) e observou que os tensiômetros poliméricos são capazes de uma a faixa de tensão mais alta. Além disso, foi observado o problema da queda de pressão contínua com o tempo, baseando-se nas propriedades do polímero. Os resultados sugeriram a necessidade de uso de membrana semipermeável para evitar vazamento de polímero, pois a

queda de pressão não é ocasionada pelo vazamento do polímero, mas sim devido ao relaxamento da tensão dos hidrogéis poliméricos dentro do tensiômetro e as propriedades viscoelásticas do polímero

Liu *et al.* (2024) estudaram o comportamento de tensiômetros poliméricos preenchidos com poliacrilamida reticulada sintetizada, investigando experimentalmente e explicando de acordo com as teorias poliméricas de Flory-Huggins a relação entre o potencial matricial da água no solo e as pressões medidas no tensiômetro. O autor propôs uma equação de calibração generalizada para reduzir a flutuação de pressão no tensiômetro devido a mudança de temperatura. Os resultados demonstraram que não houve queda de pressão após o teste de secagem parcial.

Liu *et al.* (2023) utilizaram tensiômetros poliméricos combinados com uma placa de pressão e um potenciômetro de ponto de orvalho WP4C para estimar a curva de retenção de água em um solo residual, utilizando três tensiômetros poliméricos com diferentes faixas de medição (900 kPa, 1.200 kPa, 2.300 kPa). O estudo mostrou uma rápida resposta do tensiômetro polimérico a uma rápida sucção do solo e o equilíbrio foi estabelecido em 10 a 15 minutos. Além disso, em comparação com os outros métodos utilizados, o tensiômetro mostrou bom desempenho na estimativa da curva de retenção de água no solo, principalmente para a zona de transição.

O uso de tensiômetros poliméricos promove grandes avanços no monitoramento do potencial matricial da água no solo, assim como estudos relacionados a materiais e sensores para melhoria do manejo da água no solo. Porém, ainda é necessário aprofundamento nos estudos para atenuar os erros residuais ocasionados por variações de temperatura e pelas propriedades dos polímeros utilizados. Além disso, o uso de polímeros de síntese simples em laboratório e de baixo custo de produção será fundamental para a utilização dessa tecnologia em todas as áreas da produção agrícola.

2.3.3.4 Fatores que afetam a resposta do tensiômetro

Diversos fatores estão relacionados a interferência na leitura dos tensiômetros, o que pode ocasionar erros de medição e, conseqüentemente, levar ao comprometimento do manejo da irrigação ou da pesquisa feita. Entre os principais fatores que afetam a resposta do tensiômetro, podemos citar a temperatura, o tempo de resposta e os erros causados pelos transdutores ou por outros sensores de pressão. Minimizar esses erros é fundamental para uma boa eficiência de qualquer tensiômetro, principalmente quando se trabalha com tensiômetros

poliméricos, pois o efeito da temperatura também interfere nas propriedades do polímero (LIU *et al.* 2024).

2.3.3.5 Temperatura

A temperatura, a princípio, tem efeito direto nas propriedades físicas da água, e suas variações afetam tanto a densidade como a tensão superficial da água, o que conseqüentemente provoca alterações no potencial matricial da água no solo. A temperatura afeta principalmente o volume da água, ocasionado pela expansão do fluido a temperaturas elevadas. Como nas camadas mais profundas do solo, o efeito da variação de temperatura não é muito intenso, ocorre que, maiores variações de temperatura ocorrem na superfície do solo, onde ocorre uma maior incidência solar. O efeito da temperatura pode causar alterações no fluxo de água no solo (KIRKHAM *et al.*, 2005).

A temperatura afeta o instrumento diretamente, pois provoca dilatação no material do tensiômetro, e por esse motivo recomenda-se a utilização de materiais plásticos que possuam baixa condutância térmica. Além disso, a temperatura afeta o mercúrio, que é aquecido e se expande, podendo conduzir calor do ar para o solo (KIRKHAM *et al.*, 2005). Os efeitos da temperatura podem ser minimizados utilizando isolamentos com caixas de sombra ou fazendo-se as leituras no início da manhã, quando a temperatura ambiente está mais amena (COELHO *et al.*, 2004).

2.3.3.6 Tempo de resposta

Em teoria, o tensiômetro fornece leituras instantâneas do potencial mátrico da água no solo. Contudo, ainda há a necessidade de que seja estabelecido um equilíbrio entre a água no interior do tensiômetro e a água no solo. Esse equilíbrio ocorre por meio da transferência de um determinado volume de água entre a capsula porosa e o solo. O tempo necessário para um determinado volume de água seja transferido entre o sistema tensiômetro-solo é chamado de tempo de resposta, e tal grandeza está relacionada a sensibilidade do medidor de pressão, a condutância hidráulica da capsula e á condutividade hidráulica do solo no qual o instrumento está instalado. Em solos com baixa condutividade hidráulica, o tempo de resposta poderá ser limitado, comprometendo a precisão do tensiômetro, pois o tempo de resposta é inversamente proporcional a condutividade hidráulica solo, assim como a condutância da cápsula de cerâmica (SOCCOL *et al.*, 2005).

A condutância hidráulica torna-se de extrema importância para a análise do tempo de resposta e da eficiência do tensiômetro, sendo está definida como o volume de água que passa através da cápsula porosa, por unidade de tempo e por unidade de diferença de pressão. Altos valores de condutância hidráulica juntamente com a sensibilidade do medidor, diminuem o tempo de resposta do tensiômetro. De acordo com Cassel *et al.* (2018), condutâncias, da ordem de grandeza de $0,001 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ tempos de resposta da ordem de 1 minuto são adequados para se ter bons resultados na maioria das aplicações do tensiômetro em campo. Em caso da necessidade de tempo de resposta mais rápido, o tensiômetro pode ser construído com cápsulas especiais que possuam uma alta condutância.

2.3.3.7 Erros causados pelo transdutor

Transdutores de pressão são dispositivos constituídos em sua maioria, por reguladores de voltagem, compensador de temperatura e um amplificador condicionador de sinal, que são utilizados para se medir a pressão por meio da deflexão de uma membrana metálica. Os transdutores de pressão convertem a pressão aplicada em um sinal elétrico em um sinal analógico, que pode ser lido por um conversor digital analógico (BRITO *et al.*, 2009). Apesar da grande capacidade do transdutor de pressão realizar uma grande quantidade de leituras sucessivas em um determinado tempo, a saída do transdutor pode apresentar variações no tempo e no espaço. Coelho *et al.* (2004) citam fontes de erro que dependem da pressão aplicada, denominado erro de envergadura, que seria a sensibilidade da membrana a envergadura quando submetida a pressão, a temperatura, a histerese, a linearidade e a estabilidade em longos períodos; e os erros que não dependem da pressão, denominados erros de calibração, relacionados a longos períodos submetidos a extensa voltagem. Coelho *et al.* (2004) propuseram e obtiveram equações de calibração para o ajuste do erro de envergadura e de calibração.

2.3.4 Método da reflectometria do domínio do tempo (TDR)

A estimativa da umidade do solo através da reflectometria de domínio do tempo (TDR) foi proposta primeiramente por Davis e Chudobiak (1975), no qual é mostrado estudos sobre a relação entre a permissividade elétrica do material do solo e o conteúdo de água do solo. O método da TDR é baseado na emissão e reflexão de pulsos eletromagnéticos de alta velocidade guiados no solo através de linhas de transmissão. De acordo com os princípios

físicos, o tempo e a velocidade de deslocamento desses pulsos dependem da permissividade dielétrica do solo. Por sua vez, a permissividade varia com o conteúdo de água no solo devido ao fato de a permissividade (constante dielétrica da água ($\epsilon_r \approx 81$) ser muito maior do que de outros constituintes do solo como o r $\epsilon_r = 1,0006$ (KRAUS & CARVER, 1973). Como o solo é um meio trifásico composto de água, minerais e ar, a permissividade aparente relativa as três fases conjuntas é controlada pela quantidade de água presente no solo.

O TDR mede a propagação de pulso de baixa voltagem com frequência entre 20 kHz a 1,5 GHz. A velocidade do sinal é função da permissividade do meio e depende das propriedades eletromagnéticas do meio pelo qual se propaga, no qual pode ser expressa através da equação de propagação do pulso (Equação 1) (ROBINSON *et al.*, 2003):

$$vp = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \times \mu_r \times \epsilon_0 \times \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \times \epsilon_r}} \quad (1)$$

Em que c é a velocidade da luz no vácuo ($3,0 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$);

ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)

ϵ_r é a permissividade relativa ($\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$),

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($1,257 \times 10^{-6} \text{ H.m}^{-1}$),

e μ_r é a permeabilidade magnética relativa ($\mu_r = \mu/\mu_0$).

As grandezas μ e ϵ são a permeabilidade magnética e a permissividade dielétrica do meio (F.m^{-1} e H.m^{-1} , respectivamente).

A permeabilidade magnética indica a quantidade de indução magnética que é gerada por um material quando submetido a um campo eletromagnético, sendo definida como a razão entre a indução magnética e o campo magnético aplicado. De acordo com Robison *et al.*, (2003), em geral pode-se assumir que a permeabilidade magnética é exatamente igual a 1,000 em materiais que não contém óxidos de ferro, de modo que a velocidade de propagação do sinal é calculada a partir das equações 2 e 3.

$$v = \frac{2l}{t} \quad (2)$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

Sendo (l) o comprimento da haste guia (m);

t é o tempo para a propagação (ida e volta) da onda eletromagnética (s).

A permissividade dielétrica relativa de um meio poroso só está definida no conjunto dos números complexos, sendo dividida em um componente real (ϵ_r') e um imaginário (ϵ_r''). Dessa forma, a representação adequada para representar a permissividade dielétrica relativa na forma de número complexo é dada de acordo com a equação 4.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + i\epsilon_r'' \quad (4)$$

Como a permissividade real é controlada principalmente pelo conteúdo de água no solo, foram desenvolvidos vários modelos empíricos ou semi-empíricos para estimar a umidade volumétrica do solo (θ) conhecendo-se sua permissividade dielétrica. O modelo mais conhecido e utilizado foi desenvolvido por Topp *et al.* (1980), que admite que a permissividade dielétrica do solo é função do conteúdo de água no solo, desconsiderando as outras variáveis do solo, mas apresentando melhores coeficientes de ajuste em solos mais homogêneos, de acordo com a equação 5, que apresenta o modelo de Topp *et al.* (1980):

$$\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (5)$$

Atualmente, existem vários modelos de equações posteriores ao de Topp *et al.* (1980), que levam em conta outros atributos do solo para relacionar a umidade do solo, como a densidade do solo juntamente com a permissividade dielétrica. Na maioria dos trabalhos experimentais, o sensor do TDR utilizado para fornecer estimativas de conteúdo de água no solo possui uma acurácia média de $0,020 \pm 0,005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ de água. Dessa forma, o sensor de TDR é considerado um método preciso para estimativa da umidade do solo, apresentando como vantagens o fato de ser um método pouco destrutível, rápido por obter em tempo real a umidade do solo e a possibilidade de automação do processo (ROBINSON *et al.*, 2003). Entretanto, a maior limitação do uso do TDR ainda é a dificuldade de desenvolver equações de calibração para os diferentes tipos de solos e materiais.

Pesquisas desenvolvidas por Topp *et al.* (1980), observaram que solos orgânicos e vermiculita apresentam uma relação diferente entre ϵ_r e θ o que não permitiu a aplicação da sua equação para estimar umidade do solo. Van Dam *et al.* (2002) e Robinson *et al.* (1994) relataram a necessidade de calibração do TDR para solos contendo minerais magnéticos e óxidos de ferro e alumínio. Segundo Souza Junior *et al.* (2010), como os solos tropicais, em geral, por seu alto grau de intemperismo, possuem a tendência de apresentar teores significativos de óxidos de ferro em sua composição, o que pode influenciar nas medidas da constante dielétrica. Segundo Robinson *et al.* (1994), a presença desses óxidos, principalmente

a magnetita, podem influenciar na estimativa da constante dielétrica, por meio do TDR, e na subsequente estimativa do conteúdo de água. A permeabilidade magnética relativa, que eventualmente é assumida como 1,000 no cálculo de propagação de sinal do TDR, pode assumir um valor expressivo em função da presença dos óxidos de ferro (VAN DAM *et al.*, 2002).

A importância do método da reflectometria no domínio do tempo neste trabalho se dá pela própria natureza do sensor Arduino S12 resistente a corrosão que foi utilizado, pois ambos partem do mesmo princípio físico de funcionamento. Por esse motivo, o entendimento do método se faz fundamental para compreender com clareza os mecanismos de funcionamento do sensor para melhor avaliação do seu desempenho de tempo de resposta.

2.3.5 Método da moderação de nêutrons

O método da moderação de nêutrons surgiu em meados de 1950, a partir das primeiras pesquisas feitas sobre utilização da dispersão de nêutrons para estimativa da umidade do solo. Os nêutrons são partículas subatômicas provindas de reações nucleares após a colisão entre átomos. Por serem partículas desprovidas de carga elétrica, os nêutrons não sofrem desvio devido a presença de campo magnético, além disso são partículas instáveis que se desintegram rapidamente quando livres ou no vácuo. Contudo, na presença de matéria eles são facilmente capturados antes de desaparecer. De acordo com a energia cinética que possuem, podem ser classificados como: rápidos (energia cinética superior a 100 keV), intermediários (energia entre 100 keV e 100 eV), lentos (com energia entre 100 e 0,025 eV) ou térmicos ou moderados (com energia menor que 0,025 eV). A interação dos nêutrons com os átomos do meio pode ocorrer por vários processos, principalmente por dispersão, que é quando ocorre colisões com núcleos, onde ocorre transferência de energia cinética dos nêutrons para os núcleos. Durante as colisões ocorre um “freamento” ou moderação dos nêutrons causando redução da sua energia cinética a níveis muito baixos, da ordem de 0,025 eV, levando assim a dispersão dos nêutrons no meio segundo a lei da difusão de gases. Essa energia é da mesma ordem de grandeza da energia de agitação térmica dos átomos do meio com os quais os nêutrons entram em equilíbrio térmico, daí o nome termalização de nêutrons (CRUCIANI, 1971).

Quando uma fonte de nêutrons rápidos é colocada em um meio qualquer, os nêutrons emitidos interagem com os átomos do meio. Quanto maior a abundância de elementos leve no solo, mais eficiente será a moderação dos nêutrons, ou seja, a trajetória percorrida através da matéria será mais curta e o número de colisões menor para que atinjam o nível de energia da ordem de 0,025 eV. Entre tais elementos leves, o hidrogênio é o moderador mais

eficiente, pois seu núcleo consiste em apenas um próton, no qual a massa é muito próxima da massa do nêutron, bastando poucas colisões com ^1H para que ocorra a moderação. Como no solo a presença de hidrogênio se dá em maior quantidade devido as moléculas de água contidas no solo, a detecção e contagem dos nêutrons moderados pode ser correlacionada linearmente com o teor de umidade do solo (GARDNER & KIRKHAN, 1952).

A sonda de nêutrons consiste em um detector de nêutrons moderados após colisões com átomos de hidrogênio presentes nas moléculas de água presente no solo. Vários tipos de emissores e detectores podem ser utilizados na aparelhagem constituinte da sonda. Alguns radioisótopos naturais ou artificiais em estado de excitação produzem a liberação espontânea de nêutrons, que quando misturado com elementos leves como o berílio, o bombeamento desses átomos resultara na emissão de um fluxo de nêutrons, sendo este o elemento mais utilizado como fonte padrão. Outros elementos como o polônio e o rádio associados ao berílio também podem ser considerado fontes de raios gama de vasto espectro eletromagnético com radiação gama de baixa energia, o que torna o uso muito bom para determinação da umidade do solo, pois radiação gama é indesejável em nesses equipamentos. A detecção dos nêutrons moderados depende de efeitos secundários resultante das interações com os núcleos, sendo que para isso, o mais adequado é o uso de contadores que dependem da ionização de um gás, como contadores Geiger, câmara de nuvens e detectores de cintilação.

As vantagens da sonda de nêutrons são sua operação relativamente simples, curto tempo necessário para se fazer as leituras, precisão nos resultados, não necessita de equipamentos adicionais ou levar amostras para o laboratório, grande volume de solo explorado em cada leitura. Entre as desvantagens, cita-se temos o alto preço de aquisição do equipamento, peso elevado devido a blindagem de proteção contra a radiação gama, o que dificulta o manuseio e transporte do equipamento, necessidade de outro instrumento especial para efetuar leituras na camada superficial do solo e, principalmente, a burocracia na legislação para se manusear uma fonte de radiação.

2.3.6 Sensores de umidade do solo Arduíno

O advento das tecnologias da informação propiciou um avanço significativo na agricultura irrigada, no qual a coleta de dados e informações a respeito dos diversos atributos do solo necessários para o manejo da irrigação tornou o processo cada vez mais automatizado e eficiente. Atualmente, o mercado de sensores de umidade do solo vem se expandindo cada vez mais, trazendo instrumentos de baixo custo, fácil manipulação, fácil instalação e com uma

boa eficiência nas medidas de umidade do solo, em comparação com os demais métodos já citados. A coleta de dados por computador ou de forma automatizada traz possibilidade de se obter dados e de se aplicar análises estatísticas mais precisas e completas (SILVA *et al.*, 2021).

O tempo de coleta de dados pode ser mais eficiente com o uso de equipamentos automatizados, permitindo uma conversão rápida para apresentação gráfica e computacional, permitindo uma boa observação de fenômenos, trazendo uma grande quantidade de resultados que pode ajudar na formulação e teste das hipóteses (CAVALCANTE *et al.*, 2011). É importante a atualização da metodologia da coleta de dados, com a escolha de equipamentos que possibilitem a ampliação das quantidades de dados, de modo a favorecer a análise dos valores, das médias e das representatividades em larga escala e melhor precisão. A plataforma Arduino ganha destaque nessa empreitada, sendo esta detentora de uma vasta instrumentação para medidas de umidade do solo automatizadas, desde a sensores resistivos, capacitivos, resistente a corrosão, entre outros. O sistema também permite a prototipagem de circuitos elétricos e a programação de sistemas eletrônicos de irrigação que podem ser utilizados desde as grandes áreas de cultivo até mesmo nos pequenos jardins e hortas (SILVA *et al.*, 2021).

O Arduino consiste em um sistema de software e hardwares livres e é caracterizado por uma placa de circuito eletrônico contendo um microcomputador que permite a interação direta da eletrônica com o ambiente. Essa interação é feita a partir de simples portas ou entradas, aliadas a uma programação facilmente editável. Porém, a grande versatilidade da aplicação de equipamentos com placas de Arduino está no baixo custo, que vem colocando esse tipo de equipamento mais próximo da realidade funcional (SILVA *et al.*, 2021). A quantidade de portas de cada placa de Arduino varia com o modelo, sendo que as portas podem ser utilizadas de diversas formas, aliadas a outros dispositivos como motores para movimentação, válvulas solenoides, alarmes e sensores, além das portas analógicas que podem ler ou reproduzir valores de variáveis desejadas para os diversos tipos de dispositivos instalados.

Os sensores resistivos Arduino possuem uma forma de funcionamento semelhante ao método dos blocos de resistência elétrica, no qual a água disponível no solo é medida através da resistência elétrica. Esse método utiliza a diferença de leitura causada pela alteração da resistência elétrica do solo entre dois eletrodos inseridos em qualquer matéria capaz de absorver água. As leituras de resistividade variam conforme o conteúdo de água no solo, permitindo a modelagem de equações que correlacionam a umidade do solo com a resistência elétrica medida. A resistência elétrica do solo sofre alterações consideráveis a partir de aspectos como textura e concentração de sais solúveis. O solo, como material não inerte, absorve em sua matriz parte de sais que também são absorvidos pelas plantas. Mas, em alguns tipos de solos essas

diferenças são pequenas de modo a possibilitar o uso de equações semelhantes para se estimar o teor de umidade quando se tratar de solos franco arenosos e areia. O sensor capacitivo funciona a partir das medidas de capacitância de um circuito fechado, no qual o sistema solo-água-sensor faz com que o solo funcione como um dielétrico poroso em um capacitor não fechado, cuja capacitância varia dependendo somente do tipo e da quantidade de material presente nas placas, que no caso a capacitância medida se dará de acordo com a quantidade de água no solo, obtendo uma correlação entre as duas grandezas (RÊGO SEGUNDO, 2010).

2.4 Sensor de umidade do solo S12 para Arduíno

De modo geral, um sensor é um instrumento que responde a um impulso físico ou químico de maneira específica, produzindo um sinal que pode ser transformado em outra grandeza física para fins de medição e/ou monitoramento. Dessa forma, um sensor associado a um módulo de transformação do impulso em uma grandeza, pode ser definido como transdutor ou medidor, que converte um tipo de energia em outro, para fins de medição. Os sensores são amplamente usados na medicina, indústria, agricultura e robótica como meio de fornecer informações de processos físicos/químicos/biológicos em substituição à capacidade humana (sentidos humanos) e em apoio ao monitoramento e ao controle desses processos (SILVA *et al.*, 2021).

É importante diferenciar um sensor de um transdutor, apesar de parecer a mesma coisa. Sensor é o dispositivo que vai receber o estímulo geralmente físico, químico ou biológico, e transdutor vai transformar este estímulo, relacionado a uma energia, em outro tipo de energia para fins de observação. Por exemplo, um termômetro tem como sensor o mercúrio, que se expande com o aumento da temperatura, sendo o tubo capilar que contém o mercúrio com uma escala ao lado do transdutor. Assim, um sensor pode ter intrínseco a ele um transdutor, ou seja, ele se sensibiliza com uma grandeza física/química/biológica e reage com uma saída que pode ser em outra grandeza. Assim, o termômetro pode ser um sensor de temperatura, entre muitos outros. Mas um transdutor não necessariamente é um sensor, pois ele apenas converte um sinal em outro, uma energia em outra. A literatura está repleta de tentativas de definir os termos "sensor" e "transdutor", sendo alvo de trabalhos em várias instituições internacionais relacionadas a desenvolvimento de padrões (SILVA *et al.*, 2021).

O sensor de umidade trata-se de um higrômetro, feito para detectar as variações de umidade no solo. Ele funciona da seguinte forma: quando o solo está seco, a saída do sensor fica em estado alto e quando úmido, a saída do sensor fica em estado baixo. O limite entre seco

e úmido pode ser ajustado através do potenciômetro presente no sensor que regulará a saída digital D0. Contudo, para ter uma resolução melhor, é possível se utilizar a saída analógica A0 e conectar a um conversor AD, como a presente no Arduino, por exemplo.

O sensor de umidade do solo S12 tem a capacidade de detectar as variações de umidade no solo, podendo assim possibilitar o controle de irrigação do solo de uma plantação, por exemplo. O sensor de umidade do solo é de uso prático e simplificado, mostrando nível alto na saída quando o solo estiver seco e nível baixo quando estiver úmido. Outro diferencial atrativo nesse sensor é o fato de ter sido produzido com materiais que apresentam maior resistência a corrosão, garantindo assim maior durabilidade se comparado a outros modelos. A sonda do sensor conta com pontas de prova metálicas que são cobertas com uma pintura especial, sendo isoladas em sua maior parte, além de contar com cabo de um metro de comprimento. Para facilitar a conexão com o Arduino ou Raspberry, o sensor é acompanhado de um módulo que faz a leitura dos dados gerados pela sonda e encaminha por meio de interface digital ou analógica as informações ao microcontrolador (SILVA *et al.*, 2021).

As especificações gerais do sensor foram obtidas através de consulta geral no site do fabricante que fornece o Datasheet do sensor para controle e programação. As especificações estão apresentadas a seguir. A figura 1 mostra um dos sensores Arduino modelo S12 utilizados no experimento.

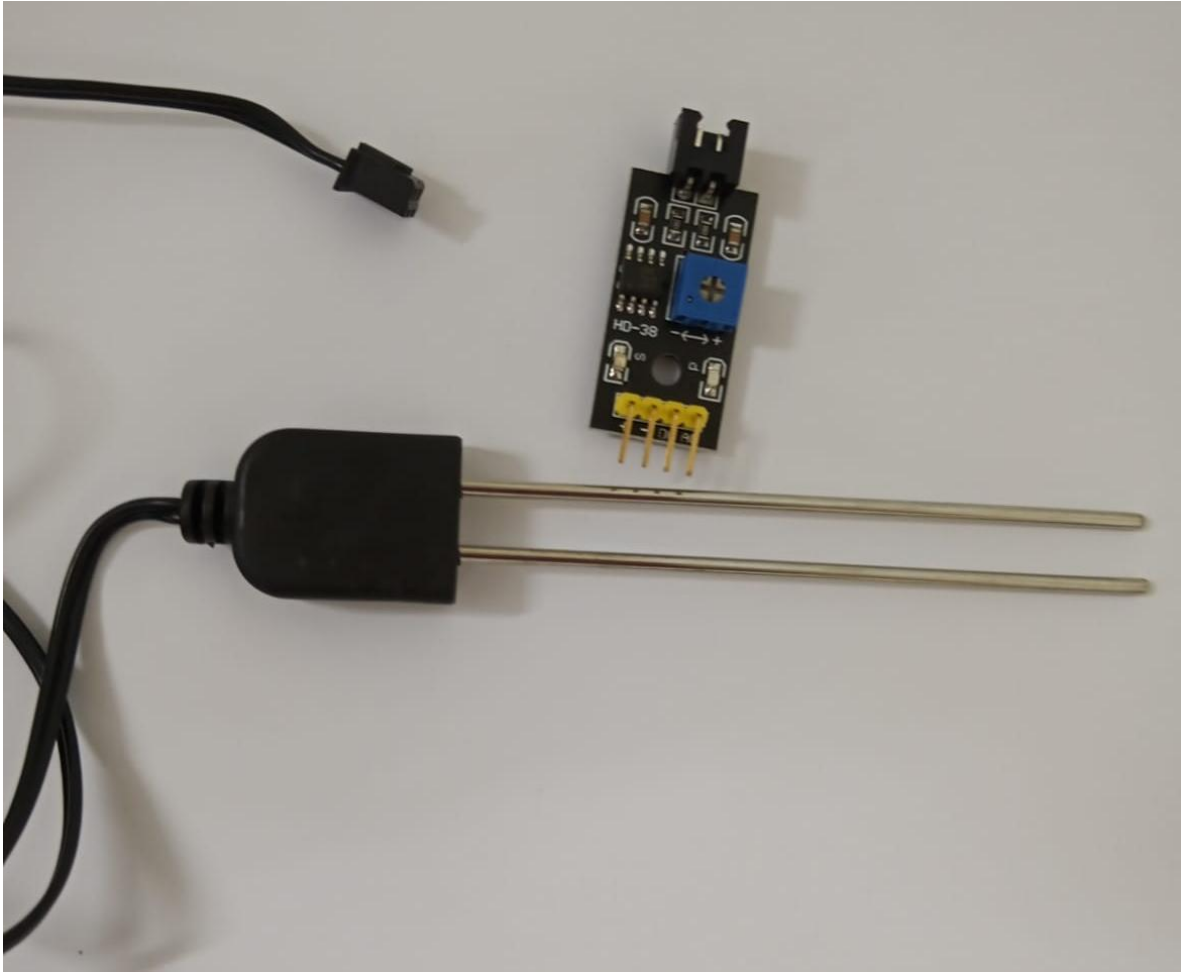
- Modelo: S12;
- Tensão de operação: 3,3 a 12 VDC;
- Corrente: inferior a 20mA; inferior a 30mA (saída);
- Saída: digital e analógica;
- Dimensões sonda: 60 x 19 x 9 mm (C x L x A);
- Dimensões módulo: 36 x 15 x 7 mm (C x L x A);
- Comprimento do cabo de sonda: 1m;
- Peso: 25g;
- Datasheet: Sensor de Umidade do Solo - Resistente à Corrosão

Fonte: <https://curtocircuito.com.br/sensor-de-umidade-do-soloresistente-a-corrosao.html>

A partir do que foi apresentado é possível perceber uma oportunidade de implementação de sensores Arduino de forma mais abrangente na agricultura irrigada, e para

isso é necessária a realização de testes controlados para se avaliar o desempenho do sensor para posterior utilização na agricultura irrigada, tanto em pequena escala como em larga escala. A hipótese em questão pressupõe que o tempo de resposta do sensor Arduino resistente a corrosão S12 é suficiente para o monitoramento da quantidade de água no solo de forma automática.

Figura 1: Sensor de umidade do solo Arduino modelo S12 resistente a corrosão.



Fonte: Autor, 2024.

3 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi de avaliar o desempenho do sensor de umidade Arduino resistente a corrosão modelo S12 no monitoramento da água no solo, por meio da avaliação do tempo de resposta do sensor na obtenção dos valores de umidade do solo no decorrer do tempo em comparação com os valores de tempo de resposta de uma sonda de nêutrons e seus respectivos valores de umidade e mostrar que o sensor de umidade Arduino S12 é apto a ser utilizado na estimativa e monitoramento da umidade do solo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação do desempenho do sensor capacitivo de umidade do solo Arduino S12 foi realizada em duas etapas, sendo consistido a primeira na avaliação das medidas de umidade do solo no decorrer do tempo do sensor, para, posteriormente, realizar a calibração do sensor através de testes de umidade do solo com o sensor e construção da curva de calibração para posterior análise estatística das variáveis.

A primeira etapa do experimento foi realizada na Fazenda Alto Alegre, Campos Belos, localizada no município de Caridade, Ceará, coordenadas geográficas (4,094522269924827° S, 39,04625103069079° W) durante o segundo semestre de 2022. A avaliação do tempo de resposta do sensor Arduino S12 foi realizada utilizando como base de comparação uma sonda de nêutrons previamente calibrada para medições da umidade do solo, observando-se a variação das medidas de umidade feitas em relação as medidas feitas no sensor Arduino S12.

Para isso, primeiramente, um tanque para armazenagem de água de material de fibra de vidro, com capacidade volumétrica de 350 L, foi preenchido completamente com solo, que correspondeu a um conjunto de coleta de solo, no qual passou-se pelo procedimento de preparo de terra fina seca ao ar. O solo utilizado foi coletado na Fazenda Alto Alegre, Caridade, Ceará, onde foi secado a sombra até atingir massa constante. O material foi destorroado e posteriormente passou por tamisação em peneira de malha com abertura de 2 mm de diâmetro. O tanque de armazenagem de água foi preenchido até a borda com todo o material de solo preparado, no qual esse sistema solo tanque consistiu no sistema de controle de solo para a realização das medidas de umidade. Uma lona de plástico foi utilizada para cobrir o tanque para impedir variações de umidade e temperatura no interior do sistema.

Para a utilização da sonda de nêutrons, foi instalado um tubo de acesso no centro do sistema de solo. A sonda foi introduzida através do tubo de acesso à uma profundidade de 50 cm da superfície do sistema, sempre que se realizava as leituras. Os sensores de umidade de solo Arduino S12 foram distribuídos no interior da caixa de solo de forma a contornarem a sonda de forma circular, estando cada um deles a uma distância de 10 e 20 cm da sonda, sendo 4 sensores a cada distância. Após a instalação dos sensores, a lona de plástico foi utilizada para cobrir o sistema solo-sonda-sensores, de modo a estabilizá-lo antes de começar as leituras de umidade.

As leituras da sonda de nêutrons e do sensor de umidade Arduino S12 em solo seco foram feitas após três dias de estabilização no sistema solo, contados a partir da colocação da

lona de plástico no sistema. Após três dias, a lona foi retirada e uma leitura diária foi realizada usando-se a sonda de nêutrons e leituras no sensor Arduino S12, a cada hora durante esse dia.

Após as leituras em solo seco, o sistema foi umedecido com água até atingir a saturação. A lona de plástico foi recolocada para que fosse novamente atingida a estabilização do sistema solo-sonda-sensores. Após três dias da estabilização, foi realizada a leitura diária com a sonda de nêutrons e a leitura com os sensores Arduino S12. As medidas realizadas com a sonda de nêutrons foram feitas obtendo-se valores de umidade do solo indiretamente através do número de nêutrons moderados detectados pela sonda, sendo estes valores obtidos a partir da equação de calibração da sonda.

As medidas feitas nos sensores Arduino S12 em cada ponto foram realizadas obtendo-se valores de variações de capacitância no sensor que oscilava conforme a variação na corrente elétrica circulante no circuito devido a mudança na umidade do solo. O período de leitura a partir do encharcamento durou até sete dias, sendo realizadas leituras no solo com diferentes umidades à medida que a evaporação da água do sistema foi ocorrendo.

As medidas obtidas pela variação da umidade de água do solo foram tabeladas para a construção da curva e calibração do sensor de umidade Arduino S12. A curva de calibração foi feita por meio do método da regressão linear em uma planilha eletrônica do Microsoft Excel para gerar uma equação de regressão linear para o sensor, na qual a medida da umidade do solo, variável dependente (Y) estava relacionada com as medidas de capacitância obtidas no sensor variável independente (X).

A partir dos dados de umidade obtidos com a sonda de nêutrons e a com o sensor capacitivo foi construída a curva de retenção de água do solo em questão para os valores de umidade de ambos os equipamentos. As diferenças de variação nas curvas a partir dos valores de umidade obtidos foram avaliadas através da análise de variância para se detectar as diferenças significativas entre os valores de umidade obtidos em diferentes amostras de solo coletadas. O tempo de resposta da sonda e do sensor Arduino também foi comparado por meio de análise de variância.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados para a calibração da sonda de nêutrons são mostrados na (Tabela 1), onde é possível observar os valores referente a umidade do solo em base de massa (g.g^{-1}) e em base de volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) obtidas a partir do método termogravimétrico, sendo este padrão para a calibração da sonda de nêutrons. Além disso a (Tabela 1) apresenta os valores referentes a razão contagens de nêutrons feita pela sonda e o respectivo valores de umidade do solo calculado pela sonda de nêutrons em base volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

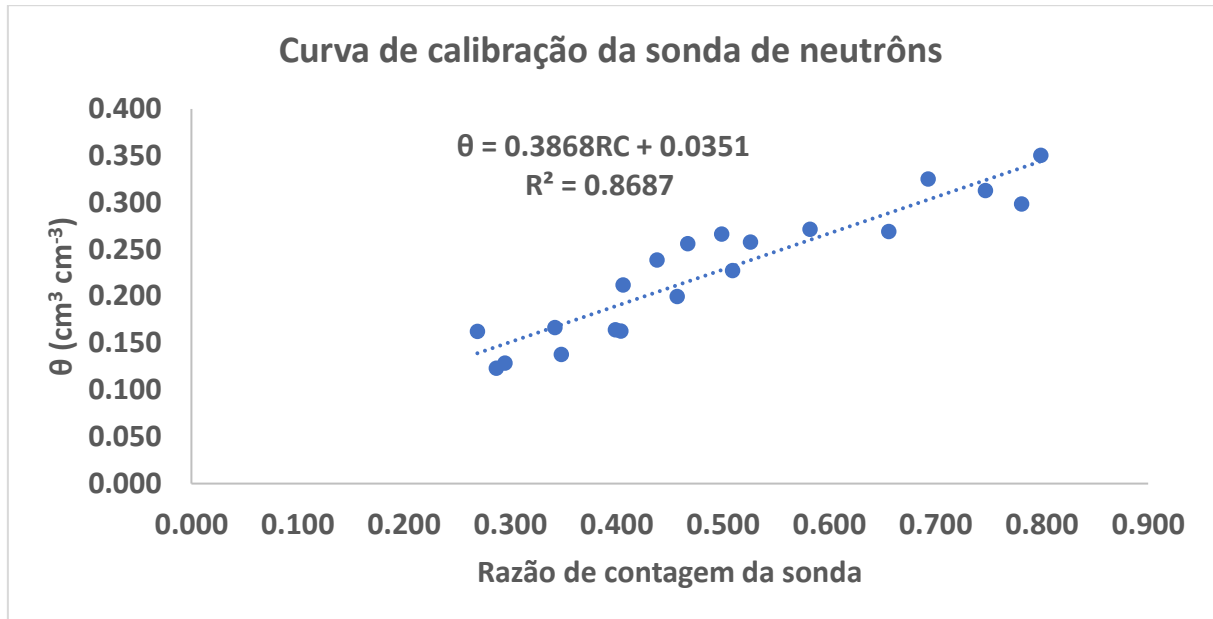
Os resultados referentes a calibração da sonda de nêutrons estão mostrados na (Figura 2), que mostra a curva de calibração da sonda de nêutrons assim como a equação de calibração da sonda de nêutrons que relaciona a umidade do solo em base úmida θ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) com a razão de contagem de nêutrons moderados pela sonda (TC). A partir do gráfico é possível perceber a relação linear entra as variáveis assim como o valor do coeficiente de correlação R^2 da equação de regressão.

Tabela 1: Dados de umidade do solo coletados utilizados para calibração da sonda de nêutrons utilizada no experimento.

Dia de coleta	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Massa água (g)	U (g.g^{-1})	θ atual ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	Razão de contagem	θ atual ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)
1	181.2	143.6	37.6	0.262	0.351	0.799	0.351
2	176.6	144.4	32.2	0.223	0.299	0.781	0.299
3	178.9	145.0	33.9	0.234	0.313	0.747	0.313
4	179.1	144.1	35.0	0.243	0.325	0.693	0.325
5	176.3	146.8	29.5	0.201	0.269	0.656	0.269
6	179.2	149.0	30.2	0.203	0.271	0.582	0.271
7	177.8	148.3	29.5	0.199	0.266	0.499	0.266
8	176.5	148.0	28.5	0.193	0.258	0.526	0.258
9	178.4	152.5	25.9	0.170	0.227	0.509	0.227
10	179.3	150.5	28.8	0.191	0.256	0.467	0.256
11	179.2	154.7	24.5	0.158	0.212	0.406	0.212
12	179.8	152.6	27.2	0.178	0.239	0.438	0.239
13	171.7	149.4	22.3	0.149	0.200	0.457	0.200
14	172.4	153.7	18.7	0.122	0.163	0.404	0.163
15	178.4	158.9	19.5	0.123	0.164	0.399	0.164
16	179.9	160.0	19.9	0.124	0.167	0.342	0.167
17	177.8	161.2	16.6	0.103	0.138	0.348	0.138
18	174.4	159.1	15.3	0.096	0.129	0.295	0.129
19	175.6	156.6	19.0	0.121	0.162	0.269	0.162
20	179.2	164.1	15.1	0.092	0.123	0.287	0.123

Fonte: Viana, (2022)

Figura 2: Curva de calibração da sonda de nêutrons e a respectiva equação de calibração com seu coeficiente de determinação da reta.



Fonte: Viana, (2022)

De acordo com a (figura 2) o valor do coeficiente de determinação da reta para a equação de calibração da sonda de nêutrons (R^2) foi de 0,8687 o que mostra que há uma boa correlação entre a umidade do solo e a contagem relativa de nêutrons obtidas pela sonda. Trabalhos feitos por Teixeira, Moraes e Simonete, (2003) encontraram valores de (R^2) que variaram entre 0,67 a 0,99 para o método direto e 0,82 a 0,99 para o método indireto, sendo estes valores de (R^2) aceitáveis para calibração da sonda de nêutrons pelo método direto e indireto em diferentes profundidades de solo. O coeficiente de determinação expressa numericamente a intensidade e sentido da correlação entre duas variáveis e não a exatidão delas. Por esse motivo pode-se confirmar que houve uma correlação positiva entre a umidade do solo e a contagem relativa de nêutrons moderados no solo, o que faz todo sentido devido ao fato de que à medida que a umidade do solo vai diminuindo, a contagem relativa de nêutrons moderados vai diminuindo, o que torna o método coerente para monitoramento da umidade do solo e realizar a devida comparação no experimento.

Os resultados das coletas feitas na avaliação do sensor de umidade do solo Arduino modelo S12 resistente a corrosão é mostrada na (Tabela 2). Os valores de sinal analógico detectados pelo sensor Arduino foram convertidos em umidade do solo em $H_2O.g^{-1}$. A figura 4 mostra os valores de umidade obtido para cada uma das amostras de solo nas sete diferentes

avaliações que foram da faixa de solo úmido até o solo seco em quatro amostras de solo que correspondem as repetições.

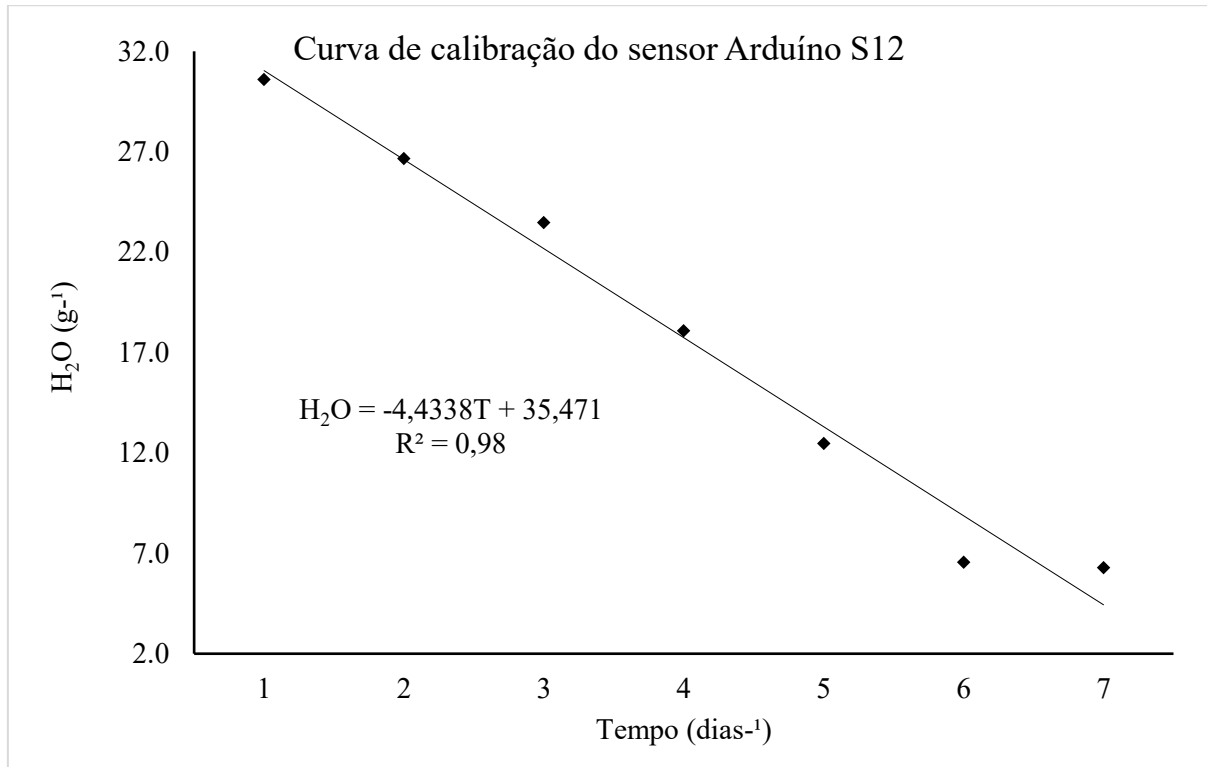
Tabela 2: Medidas de umidade do solo obtidos pelo sensor de umidade do solo Arduino S12 em diferentes amostras de solo.

Tratamento	Repetição	Umidade H ₂ O.g ⁻¹
1 ^a Av	R1	30.97
	R2	30.46
	R3	30.99
	R4	29.99
2 ^a Av	R1	26.78
	R2	26.78
	R3	26.58
	R4	26.51
3 ^a Av	R1	23.21
	R2	23.54
	R3	23.52
	R4	23.65
4 ^a Av	R1	18.34
	R2	18.08
	R3	17.26
	R4	18.65
5 ^a Av	R1	12.53
	R2	12.93
	R3	12.24
	R4	12.19
6 ^a Av	R1	9.23
	R2	8.93
	R3	7.54
	R4	6.55
7 ^a Av	R1	5.16
	R2	5.00
	R3	5.00
	R4	4.00

Fonte: Viana, 2022

A média de cada repetição das amostras de solo foi feita e a partir delas foi construído a curva de calibração do sensor de umidade do solo Arduino S12 resistente a corrosão, que pode ser vista na (figura 3). A curva de calibração do sensor permite obter a equação de calibração do sensor Arduino que relaciona a umidade do solo em H₂O.g⁻¹ com o tempo decorrido em dias, assim como o coeficiente de determinação da reta da equação de calibração.

Figura 3: Curva de calibração do sensor de umidade do solo Arduino S12 e coeficiente de correlação da reta.



Fonte: Viana, (2022).

A partir da avaliação da curva de calibração do sensor Arduino é possível ver a relação de dependência linear entre a umidade do solo obtida pelo sensor e o tempo. O coeficiente de determinação da reta, referente a curva de calibração do sensor foi de 0,98 considerado um bom valor de R^2 para a correlação positiva entre as variáveis. Estudos feitos por Silva, (2020) utilizou dados de umidade do solo por sensores Arduino capacitivo e resistivo, onde à análise de regressão para o sensor capacitivo, gerou uma equação polinomial linear de coeficiente angular de valor -0,0005 e coeficiente linear de 0,534, ambos os coeficientes com significância $p < 0,0001$, dados normais de acordo com teste de Shapiro-Wilk, e R^2 de valor 0,9743. Assim como no sensor capacitivo, os dados também foram submetidos à análise de regressão, a qual gerou uma equação polinomial linear de coeficiente angular de valor -0,0021 e coeficiente linear de 1,3477, ambos os coeficientes têm significância $p < 0,0001$, dados normais de acordo com teste de Shapiro-Wilk, e R^2 valor 0,9903. De acordo com essa análise, considerou-se então a equação de calibração válida para esses sensores. A partir disso é possível observar a coerência da validação da curva de calibração do sensor Arduino S12 para um modelo linear, pois o valor de R^2 está dentro do intervalo de aceitação, mostrando que existe

uma correlação positiva entre a variação da umidade do solo e o tempo. Isso mostra coerência, uma vez que quanto mais seco o solo, menos medidas de pulsos serão detectadas pelo sensor.

As medidas de umidade do solo coletadas pelo sensor Arduino S12 que foram tabeladas e que foram mostradas na (Tabela 2), obtendo-se posteriormente as medidas de variação da umidade do solo no decorrer do tempo para as diferentes amostras de solo. A comparação entre a sonda de nêutrons e o sensor S12 são mostrados na (Tabela 3) que mostra os valores registrados por cada equipamento durante os dois períodos experimentais, antes e após a retirada da lona de plástico. Os valores obtidos podem ser convertidos em valores de umidade do solo utilizando as respectivas curvas de calibração de cada aparelho.

Tabela 3: Valores médios registrados pelas sondas, antes e após a retirada da lona protetora no solo.

Mês	Sonda de nêutrons	SensorS12 inicial	Mês	Sonda de nêutrons	Sensor S12 final
01-set-22	158	251	1-out-22	300	401
02-set-22	158	250	2-out-22	325	475
03-set-22	158	248	3-out-22	356	520
04-set-22	158	264	4-out-22	364	580
05-set-22	158	260	5-out-22	372	600
06-set-22	157	276	6-out-22	420	640
07-set-22	158	275	7-out-22	430	750
08-set-22	158	288	8-out-22	450	765
09-set-22	157	283	9-out-22	470	790
10-set-22	157	285	10-out-22	302	810
11-set-22	157	284	11-out-22	302	810
12-set-22	157	289	12-out-22	302	810
13-set-22	157	287	13-out-22	303	830
14-set-22	157	292	14-out-22	303	845
15-set-22	157	286	15-out-22	303	859
16-set-22	157	297	16-out-22	304	865
17-set-22	157	294	17-out-22	304	870
18-set-22	158	288	18-out-22	304	882
19-set-22	158	300	19-out-22	304	899
20-set-22	158	296	20-out-22	304	910
21-set-22	157	285	21-out-22	315	920
22-set-22	158	307	22-out-22	320	935
23-set-22	157	296	23-out-22	325	950
24-set-22	158	290	24-out-22	329	923
25-set-22	157	304	25-out-22	344	1006
26-set-22	158	288	26-out-22	350	1013
27-set-22	158	304	27-out-22	355	1016
28-set-22	158	294	28-out-22	360	1019
29-set-22	158	291	29-out-22	361	1020
30-set-22	158	293	30-out-22	362	1020

Fonte: Viana, 2022.

O resultado da análise da variância para as medidas de variação de umidade do solo está presente na (Tabela 3 e 4). Os blocos referentes as diferentes amostras de solo e os tratamentos referentes as medidas de umidade em diferentes intervalos de tempo revelam a precisão do sensor na obtenção das medidas de umidade do solo.

De acordo com a (Tabela 3 e 4) é possível observar o valor de F sendo 0.7536 para os blocos e 290.5210 para os tratamentos. Isso revela o que era esperado, sendo para variações entre blocos não houve diferença significativa entre as medidas de umidade das diferentes amostras de solo em nenhum nível de significância. Já para os blocos houve diferença significativa nas medidas de umidade do solo para diferentes intervalos de tempo.

Tabela 3: Análise de variância entre as medidas de variação de umidade medidas pelo sensor Arduino S12 entre diferentes amostras de solo e diferentes intervalos de tempo.

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0.1$). *significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0.1 < p < 0.5$). ns: não significativo ($p \leq 0.5$)

FV	GL	SQ	QM	F
Blocos	3	0.29147	0.09716	0.7536ns
Tratamentos	6	2247.62109	374.60352	290.5210**
Resíduos	18	2.32071	0.12893	
Total	27	2250.23327		

Fonte: Viana, (2022).

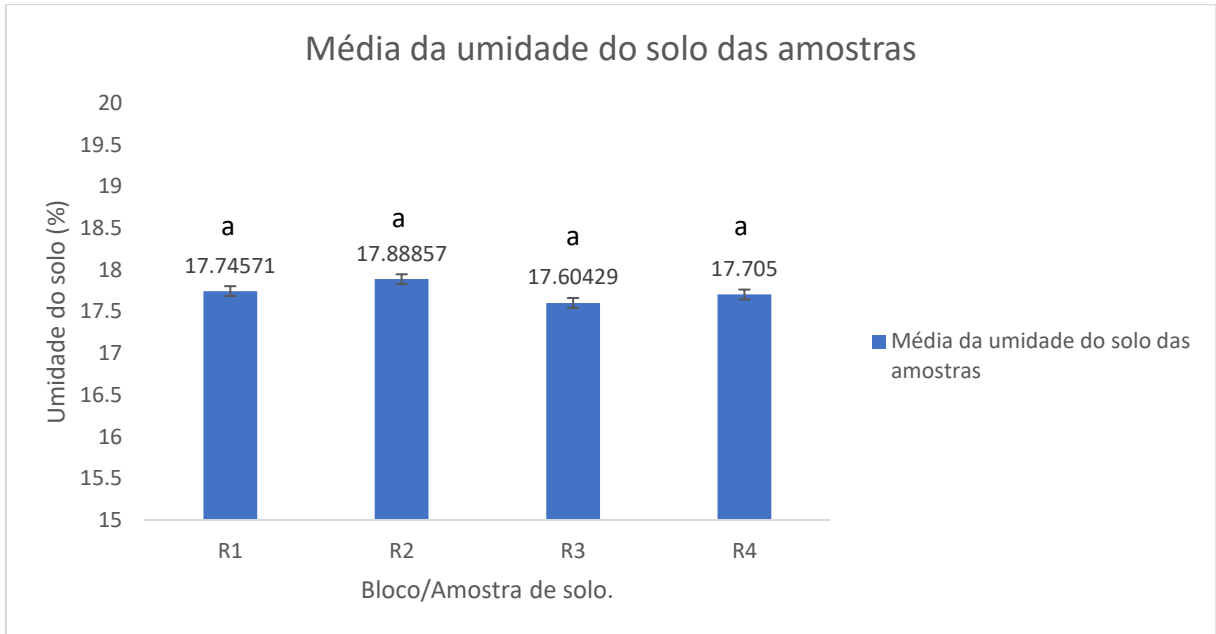
Tabela 4: Resultados do valor de F crítico, F calculado e p calculado para a análise de variância das medidas de variação de umidade Arduino S12 entre diferentes amostras de solo e diferentes intervalos de tempo.

GL	GLR	F-crit	F	p
3	18	0.0707	0.7536	0.5345
6	18	40146	2905.521	<0.0001

Fonte: Viana, (2022).

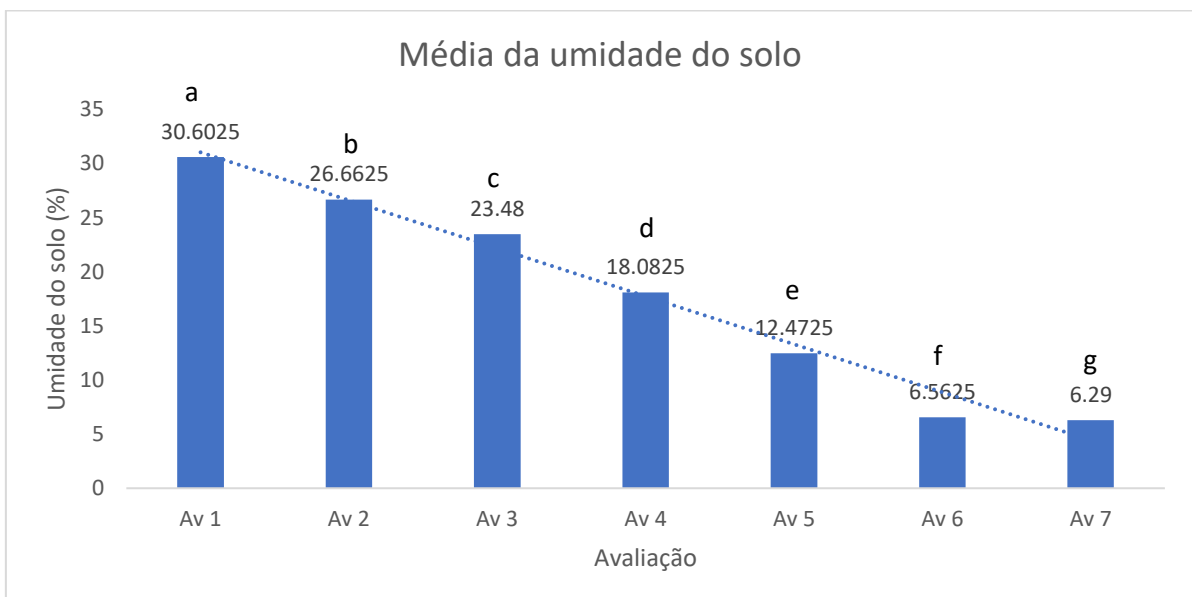
A partir dos valores obtidos na análise de variância foi possível prosseguir com o teste de significância de Tukey para confirmar a diferença significativa entre as medidas de umidade em cada bloco referente a medida de umidade em cada amostra de solo. A (figura 5 e 6) mostra o resultado do teste de Tukey para as medidas entre as médias da umidade do solo em cada amostra de solo avaliada em cada intervalo de tempo, assim como a variação da umidade em cada tratamento.

Figura 5: Resultado do teste de tukey para as médias da umidade do solo em diferentes amostras de solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si estatisticamente pelo teste de tukey a nível de 5% de probabilidade.



Fonte: Autor, (2024).

Figura 5: Resultado do teste de tukey para as médias variação da umidade do solo em diferentes amostras de solo no decorrer do tempo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si estatisticamente pelo teste de tukey a nível de 5% de probabilidade.



Fonte: Autor, (2024).

A partir dos dados obtidos para as médias da umidade do solo entre amostras foi constatado valores de desvio padrão médio foi de 0.544286 % para as médias de umidade do solo entre as amostras de solo. Além disso, como esperado, não houve diferença significativa entre as amostras, o que sugere que a precisão do sensor em diferentes amostras de solo mante-se bem próximas. A média geral entre tratamentos foi de 17.73607 % com um desvio padrão médio para as medidas de umidade entre tratamentos de 0.83842% e um coeficiente de variação de 2.02 %. OS resultados obtidos sugerem que existem poucas variações entre medidas de umidade entre amostras de solo obtidas pelo sensor Arduino, assim como um amplo intervalo de medidas de umidade.

A escolha do modelo linear para a calibração da curva corrobora os trabalhos feitos com outros sensores Arduino, sendo a escolha do modelo de equação linear baseada na teoria direta das grandezas estudadas, no qual a estimativa do teor de umidade do solo a partir da constante dielétrica e resistência elétrica do solo a partir de sensores de materiais distintos, nesses estudos, Silva, (2020) diz que valores de capacitância e resistência do sensores variam linearmente com a permissibilidade elétrica do meio, mantendo-se a distância fixa entre as placas de eletrodos e a área de contato do eletrodo com o solo seja constante.

6 CONCLUSÃO

O sensor de umidade do solo Arduino S12 resistente a corrosão não mostrou diferenças significativas entre as medidas de umidade do solo feitas em diferentes amostras de solo, o que revela que ele possui uma precisão mínima adequada para realização de estimativas da umidade do solo. Além disso, o sensor apresentou uma ampla faixa de variação para medidas de umidade do solo, o que permite sua utilização em diversos intervalos de umidade. Isso mostra a capacidade do sensor de estimar e quantificar o teor de água no solo.

O sensor de umidade do solo Arduino S12 resistente a corrosão mostrou-se uma alternativa simples, prática e precisa para utilização no monitoramento da água no solo de forma prática e automatizada. Contudo é necessário novos estudos que permitam mostrar sua eficiência em outras aplicações, tanto em larga escala como também na pesquisa científica.

REFERÊNCIAS

- ADLA, Soham *et al.* Impact of calibrating a low-cost capacitance-based soil moisture sensor on Aqua Crop model performance. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 353, p. 120248, fev. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120248>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120248>. Acesso em: 15 fev. 2024
- AMARO FILHO, Joaquim *et al.* **Física do Solo: conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008. 290 p.
- ASSIS JUNIOR, Raimundo Nonato de. **Análise do desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água**. 1995. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 1995. doi:10.11606/T.11.1995.tde-20210104-190835. Acesso em: 2024-03-04.
- BAKKER, Gerben *et al.* New Polymer Tensiometers: measuring matric pressures down to the wilting point. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 196-202, fev. 2007. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2006.0110>. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2006.0110>. Acesso em: 06 fev. 2024.
- BRITO, Alexsandro dos Santos *et al.* Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 33, n. 1, p. 17-24, fev. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832009000100002>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100002>. Acesso em: 08 mar. 2024.
- BUSKE, Taise Cristine *et al.* Avaliação do desempenho do método das pesagens para a determinação da umidade do solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 7, n. 6, p. 340-348, 30 dez. 2013. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n600186>. Disponível em: <https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/18610.7127/RBAI.V7N600186>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- CAMARGO, Ângelo Paes *et al.* Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 12, p. 1763-1772, 1982. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/16420>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- CARVALHO, Alex Jhonne Barbosa *et al.* Estimativa de umidade do solo utilizando diferentes metodologias. **Estudos em Ciências Ambientais e Agrárias**, [s.l.], p. 48-59, 7 ago. 2023. Editora Licuri. <http://dx.doi.org/10.58203/licuri.20965>. Disponível em: <https://doi.org/10.58203/Licuri.20965>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- CASSEL, D. K. *et al.* Water Potential: tensiometry. **Sssa Book Series**, [s.l.], p. 563-596, 11 set. 2018. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c23>. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c23>. Acesso em: 08 mar. 2024.
- CAVALCANTE, Marisa Almeida *et al.* Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 4503-4503, dez. 2011. FapUNIFESP

(SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-11172011000400018>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>. Acesso em: 30 out. 2024.

COELHO, Silvana L. *et al.* Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 536-545, dez. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162004000300006>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300006>. Acesso em: 04 fev. 2024.

CRUCIANI, Décio Eugênio. **Aplicação do método da moderação de neutrons no estudo do balanço hídrico em solo cultivado com cana-de-açúcar**. 1971. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1971. doi:10.11606/T.11.1900.tde-20231122-093110. Acesso em: 2024-08-21.

DARUSMAN *et al.* Water Flux below the Root Zone vs. Drip-Line Spacing in Drip-Irrigated Corn. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 61, n. 6, p. 1755-1760, nov. 1997. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060029x>. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100060029x>. Acesso em: 01 mar. 2024.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In-situ meter for measuring relative permittivity of soils. In *Geological Survey of Canada*, 75-1, Part A, 1975. 75-79 p.

GHELFI FILHO, H. *et al.* Estudo comparativo do método das pesagens e o método gravimétrico padrão para a determinação do teor de umidade do solo. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, [s.l.], v. 45, p. 99-108, 1988. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0071-12761988000100007>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761988000100007>. Acesso em: 16 fev. 2024.

GONDIM, R. S.; AGUIAR, J. V.; COSTA, RNT. **Avaliação de cápsulas porosas para tensiômetros através de testes de condutância hidráulica e pressão de borbulhamento**. 1998. 52 f. 1998. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

INGRAO, Carlo *et al.* Water scarcity in agriculture: an overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, [s.l.], v. 9, n. 8, p. 18507, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>. Acesso em: 13 fev. 2024.

KIRKHAM, M.B. *et al.* Tensiometers. **Principles Of Soil And Plant Water Relations**, [S.L.], p. 41-54, 2005. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-012409751-3/50004-9>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50004-9>. Acesso em: 01 mar. 2024.

KLAR, A.E. *et al.* Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, [s.l.], v. 23, p. 15-30, 1966. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0071-12761966000100003>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0071-12761966000100003>. Acesso em: 18 fev. 2024.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetics**. 2. ed. International Student Edition: McGraw-Hill, 1973. 850 p

LIMA, Severo Cortez. **Monitoramento da irrigação com uso do tensiometro**. 1999. 56 f. Tese (Doutorado em irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.

LIU, Hengshuo *et al.* Laboratory investigation of osmotic tensiometers filled with cross-linked polyacrylamide. **Transportation Geotechnics**, [s.l.], v. 44, p. 101173, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101173>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101173>. Acesso em: 02 mar. 2024.

LIU, Hengshuo *et al.* Long-term decay of the water pressure in the osmotic tensiometer. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 738-746, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.05.005>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.05.005>. Acesso em: 02 mar. 2024.

LIU, Hengshuo *et al.* Use of osmotic tensiometers in the determination of soil-water characteristic curves. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 312, p. 106938, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106938>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106938>. Acesso em: 02 mar. 2024.

MARTHALER, H. P. *et al.* A Pressure Transducer for Field Tensiometers. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 47, n. 4, p. 624-627, jul. 1983. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040002x>. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700040002x>. Acesso em: 29 fev. 2024.

MILLÁN *et al.* Using Soil Moisture Sensors for Automated Irrigation Scheduling in a Plum Crop. **Water**, [s.l.], v. 11, n. 10, p. 2061, 2 out. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11102061>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11102061>. Acesso em: 15 fev. 2024.

MORAIS, Neuzo. Batista *et al.* Avaliação de tensiômetro com câmara de ar usando leitura direta e tensímetro. **Caatinga**, Mossoró-RN, v.17, n.2, p.64-69, jan./jun. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Levien/publication/320309783_AVALIACAO_DE_TENSIOMETRO_COM_CAMARA_DE_AR_USANDO_LEITURA_DIRETA_E_TENSIMETRO/links/59dcfef3458515149f882414/AVALIACAO-DE-TENSIOMETRO-COM-CAMARA-DE-AR-USANDO-LEITURA-DIRETA-E-TENSIMETRO.pdf. Acesso em 31 fev. 2024.

MORCHID, Abdennabi *et al.* Applications of internet of things (IoT) and sensors technology to increase food security and agricultural Sustainability: benefits and challenges. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 102509, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102509>. Acesso em: 13 fev. 2024.

NAJDI, Abdallah *et al.* Evaluating innovative direct and indirect soil suction and volumetric measurement techniques for the determination of soil water retention curves following drying and wetting paths. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 322, p. 107179, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107179>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107179>. Acesso em: 16 fev. 2024.

RÊGO SEGUNDO, Alan Kardek. Development of sensor of soil water content and a closed loop control and automation system for use in irrigation. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Construções rurais e ambiência; Energia na agricultura; Mecanização agrícola; Processamento de produtos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

REICHARDT, KLAUS. **Água em sistemas agrícolas.**, São Paulo: Manole.,1990. 188 p.

ROBINSON, D. A. *et al.* Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 161, n. 1-4, p. 169-180, set. 1994. Elsevier BV. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90127-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90127-9). Acesso em: 28 out. 2024.

ROBINSON, D. A. *et al.* A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 2, n. 4, p. 444-475, nov. 2003. Wiley. <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2003.4440>. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2003.4440>. Acesso em: 28 out. 2024.

SILVA, Murilo de Moura. **Análise da hidrodinâmica com sensores capacitivo e resistivo de Arduino em solo do cerrado.** 2021. 47 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação no Cerrado) - Curso de Pós-graduação em Irrigação no Cerrado, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Ceres, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/2362/3/12%20-%20Disserta%3%a7%3%a3o.pdf>. Acesso em: 30 out. 2024.

SOCCOL, Olívio José *et al.* Condutância hidráulica e tempo de resposta de tensiômetros utilizados em cultivos fertirrigados. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n. 1, p. 3-10, 2005. Disponível em: <https://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5401>. Acesso em: 8 mar. 2024.

SOUZA JUNIOR, Ivan Granemann de *et al.* Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 40, n. 3, p. 513-519, mar. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782010000300003>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000300003>. Acesso em: 28 out. 2024.

TAQI, Ali H. *et al.* An investigation on gamma attenuation of soil and oil-soil samples. **Journal Of Radiation Research And Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, n. 3, p. 252-261, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2017.05.008>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.05.008>. Acesso em: 03 mar. 2024.

TEIXEIRA, C. F. A. e MORAES, S.O e SIMONETE, M. A. **Calibração de sonda de nêutrons: amostragem de solo versus tensiometria.** Revista de Ciências Agroveterinárias, v. 1, n. 1, p. 58-67, 2003Tradução. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/00143399>. Acesso em: 01 dez. 2024.

TOPP, G. C. *et al.* Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 16, n. 3, p. 574-582, jun. 1980. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/wr016i003p00574>. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>. Acesso em: 28 out. 2024.

VAN DAM, Remke L. *et al.* Iron oxides as a cause of GPR reflections. **Geophysics**, [s.l.], v. 67, n. 2, p. 536-545, mar. 2002. Society of Exploration Geophysicists. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1468614>. Disponível em: <https://doi.org/10.1190/1.1468614>. Acesso em: 28 out. 2024.

VILLA NOVA, N. A. *et al.* Direct reading “air-pocket” tensiometer. **Soil Technology**, [s.l.], v. 2, n. 4, p. 403-407, dez. 1989. Elsevier BV. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(89\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(89)90006-8). Acesso em: 28 fev. 2024.

VILLA NOVA, M. S. *et al.* Performance and test of a direct reading “air-pocket” tensiometer. **Soil Technology**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 283-287, out. 1992. Elsevier BV. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(92\)90029-Z](https://doi.org/10.1016/0933-3630(92)90029-Z). Acesso em: 28 fev. 2024.