



EDUARDO DE PAULA LIMA

**CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSOR DE UMIDADE
TIPO CAPACITIVO**

LAVRAS – MG

2020

EDUARDO DE PAULA LIMA

**CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSOR DE UMIDADE
TIPO CAPACITIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras – MG, como parte das exigências do curso de Engenharia Agrícola, para obtenção de título de bacharel.

**Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto
Orientador**

LAVRAS – MG

2020

EDUARDO DE PAULA LIMA

**CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSOR DE UMIDADE
TIPO CAPACITIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Lavras – MG, como parte das exigências do curso de Engenharia Agrícola, para obtenção de título de bacharel.

**Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto
Orientador**

LAVRAS – MG

2020

Aos meus pais por todo apoio e confiança.
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por torna tudo isso possível.

A minha Mãe Cláudia por todo amor e carinho durante essa trajetória.

Ao meu Pai Jair por todo suporte e confiança.

Aos meus avós, que mesmo não estando presentes sei que olham por mim.

A Enagri Jr. Projetos e Consultoria Agrícola por todas as amizades, experiências de vivência e pelo conhecimento adquirido.

Ao Núcleo de Estudos em Irrigação por toda experiência compartilhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adriano Valentim Diotto por toda atenção e amizade criada durante esse tempo.

Ao Prof. Gilberto Coelho, com quem tive contato assim que ingressei na Universidade e por quem tenho uma grande admiração.

A minha namorada Gabriela por todo suporte e ajuda nos momentos mais difíceis.

A todos meus amigos, com quem compartilhei os melhores momentos durante esse período em Lavras.

Ao Departamentos de Engenharia da Universidade Federal de Lavras por toda a estrutura, oportunidades de estudo, crescimento profissional e pessoal.

“Torna-te aquilo que és.”

RESUMO

Informações sobre a variação da quantidade de água presente no solo são essenciais para o manejo de culturas e manejo da irrigação, pois possibilita a aplicação de água no momento e na quantidade certa. Com o avanço da tecnologia relacionada a irrigação, existem diversos métodos de se estimar o volume de água presente no solo, dentre eles temos os sensores de umidade do tipo capacitivo. Os sensores capacitivos são capazes de estimar o volume de água presente no solo a partir da variação da capacitância do sinal que é enviado e posteriormente retorna as placas do sensor. Isto é possível devido a constante dielétrica do solo, a qual sofre alterações com a variação do teor de água. Este equipamento pode ser facilmente conectado a uma rede de diversos sensores e assim distribuídos na área irrigada. Os sensores captam informações locais sobre a umidade do solo e comunicam-se entre si, enviando informação do ponto mais distante da área até um ponto em comum onde é feita a coleta dos dados, sendo possível também que se tenha uma conexão via wireless, possibilitando assim a coleta de informações em tempo real. No entanto, este tipo de equipamento requer calibração pois podem apresentar variações nos valores de leitura de acordo com o meio em que são submetidos. Sendo assim, para a calibração dos sensores capacitivos foi realizada a correlação dos valores de leitura dos mesmos com os valores de umidade real obtidos a partir do método gravimétrico, realizado em laboratório, e a partir dos resultados obtidos foi gerado um gráfico de correlação dos valores como também a equação para determinação da umidade estimada. O modelo que melhor se ajustou foi o polinomial de segunda ordem. A partir dos resultados obtidos observou-se que os sensores apresentam uma resposta satisfatória a variação da umidade e podem ser facilmente utilizados para o monitoramento da água no solo. No entanto, é necessário que seja feita a devida calibração para o tipo de solo ao qual será instalado.

Palavras-chave: Água no solo, umidade do solo, manejo da irrigação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 – MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DO SOLO.....	10
2.1.1 – SENSOR FDR (FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY).....	10
2.1.2 – SENSOR TDR (FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY)	11
2.1.3 – SENSOR CAPACITIVO.....	12
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5. CONCLUSÃO.....	23

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a capacidade de armazenamento de água no solo é fundamental para o manejo da irrigação e informações sobre a umidade do solo em tempo real auxiliam na tomada de decisão de quando e quanto deve-se irrigar.

Para a determinação da umidade do solo temos como um dos principais equipamentos os sensores de umidade do tipo capacitivo. Os quais consistem em um tipo de sensor que têm como princípio de funcionamento a medição da capacidade dielétrica do solo. Tal princípio permite estimar a umidade a partir da constante dielétrica do solo, que sofre variação de acordo com o aumento do teor de água. Este tipo de sensor apresenta vantagens, como a facilidade de manuseio, precisão e capacidade de estimar a umidade em diferentes profundidades. Contudo, para este tipo de equipamento é recomendado que seja feita uma calibração, levando em consideração o tipo de solo ao qual vai ser instalado, bem como suas características físicas.

Um dos problemas encontrados quando tratamos deste tipo de equipamento é a falta de informação sobre sua calibração, isso porque os sensores apresentam variações dos valores de leitura quando submetidos a diferentes tipos de solo. Deste modo, a calibração visa correlacionar os valores de leitura do sensor que são apresentados em Milivolts (mV) com a umidade real do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), verificando assim sua precisão. Como os sensores estimam a umidade a partir de uma propriedade do solo, tal calibração é fundamental para determinar, por exemplo, qual seu valor mínimo de leitura de umidade, visto que, quando o solo apresenta um baixo teor de água a leitura do sensor pode ser afetada devido a variação da constante dielétrica.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi selecionado um sensor de umidade do tipo capacitivo alternativo de baixo custo, o qual pode ser facilmente encontrado no mercado. Este modelo de sensor não apresenta nenhuma informação sobre calibração ou erro de leitura. Sendo assim, o referente trabalho tem como objetivo determinar a curva de calibração deste sensor correlacionando seus valores de leitura com a umidade real do solo obtida através do método gravimétrico, avaliando assim sua resposta à variação da umidade em dois diferentes tipos de solos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 – MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DO SOLO

Existem diversos métodos para se estimar o teor de água presente no solo, podendo ser eles diretos ou indiretos. Dentre os métodos diretos podemos citar como principal o método gravimétrico, que consiste na determinação da umidade do solo a partir da retirada de amostras, fazendo assim a aferição de sua massa antes e depois do processo de secagem e relacionando o volume de água retirado com o volume da amostra (Gardner et al., 1986). Este método, apesar de ser o mais preciso e servir de calibração para os métodos indiretos, requer um maior tempo para obtenção dos resultados (Gilberto Jr. et al., 2003). No entanto, os métodos indiretos apresentam grande facilidade e rapidez na estimativa da umidade do solo. Tais métodos consistem na determinação da umidade do solo a partir de suas propriedades físicas, que por sua vez, sofrem alterações de acordo com a variação do teor de água no solo (Gardner et al., 1986). Como principais métodos indiretos temos os sensores de umidade do solo, que apresentam diferentes princípios de funcionamento. Como exemplo de princípio de funcionamento temos: Sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry), Sensores TDR (Time Domain Reflectometry) e Sensores Capacitivos ou sonda de capacitância.

Outra forma de se estimar a umidade do solo é através do potencial matricial, utilizando tensiômetros. O tensiômetro consiste em um equipamento que estima a umidade a partir da tensão de água no solo. Comumente utilizado, este método apesar de demonstrar resultados satisfatórios apresenta também algumas limitações. Podendo ocorrer problemas como o manômetro enferrujar devido a entrada de água, vazamentos permitindo a entrada a entrada de ar, perda de aferição como também apresenta uma resposta lenta em relação a variação do teor de água (Azevedo et al., 1983).

2.1.1 – SENSOR FDR (FREQUENCY DOMAIN REFLECTOMETRY)

Os sensores de umidade de solo de reflectometria no domínio da frequência, conhecido como FDR, são um dos diferentes tipos de sensores eletrônicos encontrados hoje no mercado. Estes sensores apresentam alto nível de precisão, permitem a leitura de dados em tempo real e são susceptíveis a automação. No entanto, apresentam elevado custo de comercialização e necessitam de calibração. O sensor consiste em um par de eletrodos posicionados em paralelo e separados por um material isolante que quando em contato com o solo formam o meio

dielétrico. O aumento da quantidade de água no solo provoca um aumento da capacitância do meio e através destes valores o sensor estima a umidade do solo, correlacionando a variação do campo elétrico criado pelo capacitor com o a quantidade de água presente no solo (Paltineanu & Starr et al., 1997). Como exemplo de um sensor do tipo FDR podemos citar o sensor 10Hs (Figura 1).

Figura 1: Exemplo de um sensor FDR – modelo 10HS da Decagon®

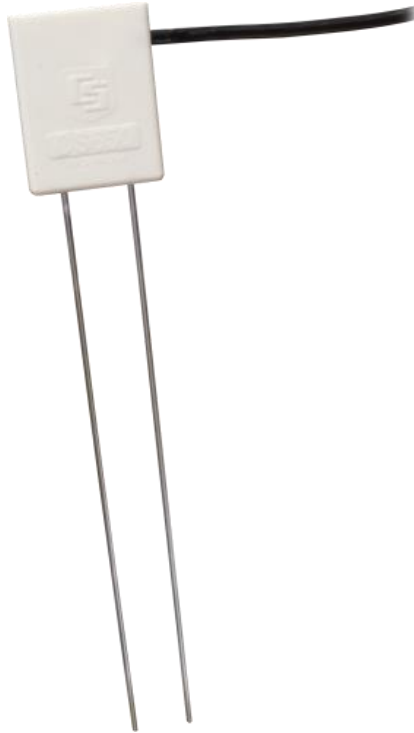


Fonte: (<http://www.ictinternational.com/products/10hs/decagon-10hs-moisture/>)

2.1.2 – SENSOR TDR (TIME DOMAIN REFLECTOMETRY)

Os sensores de reflectometria no domínio do tempo, TDR, são um tipo de sensor eletrônico formado por dois cabos condutores dispostos paralelamente. A estimativa da umidade do solo se dá pela relação do tempo de resposta das ondas eletromagnéticas que passam através dos condutores. A umidade do solo é baseada na velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas das hastes do sensor quando submetidas ao meio dielétrico (Umenyiora et al., 2012). Este tipo de sensor possibilita a leitura de valores de umidade em tempo real como também são passíveis de automação. A precisão dos dados a serem obtidos é totalmente dependente da calibração do equipamento e é específica para cada tipo de solo (Santos et al., 2010). Como exemplo de um sensor TDR podemos citar CampbellCS616 (Figura 2).

Figura 2: Exemplo de um sensor TDR – modelo CS616 Campbell



Fonte: (<https://www.campbellsci.com.au/cs616-reflectometer>)

2.1.3 – SENSOR CAPACITIVO

Os sensores de umidade capacitivos ou sonda de capacitância, são um tipo de sensor eletrônico que estima a umidade a partir da constante dielétrica do meio. É constituído por um par de eletrodos dispostos em uma placa separados por um material dielétrico. O sensor realiza a leitura da constante dielétrica do meio, a qual se relaciona diretamente com a quantidade de água presente no solo. A constante dielétrica do meio sofre alteração de acordo com a variação de seus constituintes. Para o ar a constante dielétrica K é igual a 1, para o solo seco pode variar de 2 a 5 e para a água, aproximadamente 81 (Silva et al., 2008).

Os sensores capacitivos apresentam princípio de funcionamento parecido com os sensores FDR, que também estimam a umidade a partir da variação da constante dielétrica do solo. No entanto, nos sensores capacitivos os eletrodos não estão diretamente expostos ao solo o que promove uma maior vida útil do equipamento (Figura 3).

Figura 3: Sensor de umidade do tipo capacitivo



Fonte: (<http://mundoprojetado.com.br/sensor-de-umidade-capacitivo-para-solo/>)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no laboratório de análise física de solos do setor de Engenharia de Água e Solo do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG.

Para determinação da curva de calibração dos sensores de umidade foram utilizados dois tipos de solo com características distintas, sendo um argiloso, com comportamento expansivo e o outro um solo arenoso de granulometria fina. Os solos foram depositados em baldes de volume conhecido, (Figura 4), de modo que se pudesse obter o volume de solo utilizado bem como sua densidade.

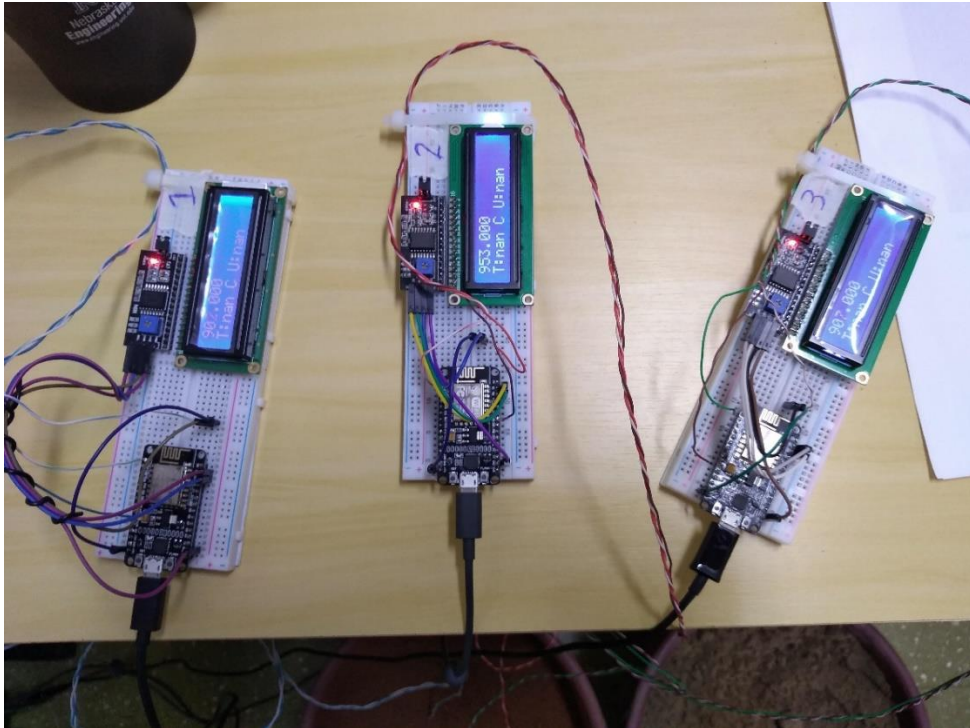
Figura 4: Baldes com os diferentes tipos de solo



Fonte: Do autor

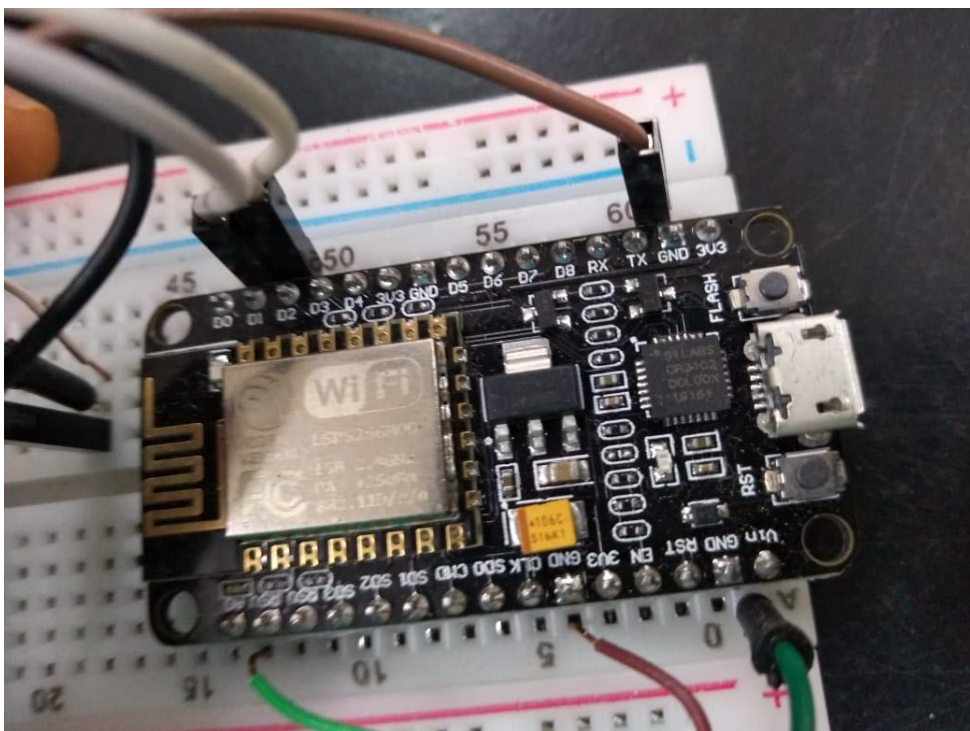
O esquema de montagem dos sensores foi feito pelos professores do Departamento de Ciência da Computação. Com a utilização de uma placa protoboard, foi montado um pequeno circuito eletrônico, (Figura 5), ligando o sensor capacitivo a um visor LCD e a uma placa de aquisição de dados modulo ESP8266 (Figura 6).

Figura 5: Esquema de montagem dos sensores



Fonte: Do autor

Figura 6: Modulo ESP8266 wireless



Fonte: Do autor

O tipo de sensor utilizado foi um sensor capacitivo alternativo de baixo custo, (Figura 7), o qual apresenta um grande potencial de uso caso a demonstre bons resultados durante sua calibração.

Figura 7: Sensor capacitivo alternativo de baixo custo



Fonte: Do autor

Para a determinação da curva de calibração dos sensores foi utilizado como o método gravimétrico como método base de calibração. O método gravimétrico consiste na determinação da umidade a partir da retirada de amostras de solo, aferindo sua massa úmida e depois submetendo a mesma a secagem em estufa com temperatura de 105° C até peso constante. Com a diferença entre a massa úmida e a massa seca é determinada a quantidade de água retirada da amostra, e relacionando este valor com a densidade do solo obtemos o valor da umidade volumétrica real do solo no momento da coleta.

Os dois tipos de solo utilizados foram levados a estufa para secagem à 105° C, obtendo-se assim o ponto inicial para a construção da curva de calibração. Com os solos totalmente secos foi dado início a adição regular de água às amostras. Para cada etapa de adição de água foi feita a leitura do valor apresentado pelo sensor e concomitantemente retirada uma amostra de solo, aferida sua massa úmida e levada à estufa para secagem (Figura 8). Foram utilizados três

sensores para leitura e para cada tipo de solo foi retirada três amostras, a cada etapa de adição de água, para obtenção da umidade real.

Figura 8: Balança para aferição da massa das amostras de solo argiloso (à esquerda) e arenoso (à direita)



Fonte: Do Autor

Para garantir que a umidade de cada solo se apresente homogênea durante a leitura dos sensores, a cada etapa de adição de água os solos foram depositados em bandejas de alumínio e então homogeneizados a porção de água adicionada (Figura 9).

Figura 9: Homogeneização do solo a cada adição de água



Fonte: Do autor

O procedimento foi repetido até que os solos atingissem visualmente um alto teor de água, o que resultou na coleta de dez pontos de leitura.

Os valores de leitura dos sensores são obtidos em milivolt (mV), enquanto os valores de umidade obtidos através do método gravimétrico, em gramas de água por gramas de solo (g g^{-1}) e depois transformados para centímetro cúbico de água por centímetro cúbico de solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), utilizando-se da densidade do solo.

Com o procedimento finalizado, foi correlacionado os valores de leitura dos sensores aos valores de umidade real encontrados e então elaborada a curva de correlação entre os parâmetros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos valores da massa de solo e do volume de solo utilizado foi determinada a densidade de cada um, chegando assim ao valor aproximado de $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo argiloso e $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo arenoso. Tais valores se apresentaram condizentes quando comparados aos valores médios de densidade para esses tipos de solo. Sendo que para solos argilosos a densidade pode variar entre $0,90$ a $1,25 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto para os solos arenosos varia entre $1,25$ a $1,60 \text{ g cm}^{-3}$.

Para a correlação dos valores de umidade real com os valores de leitura dos sensores, primeiramente foi feita a transformação do valor de umidade gravimétrica para o valor de umidade volumétrica de acordo com a densidade de cada solo e então feita a média entres os três valores obtidos.

Este procedimento foi realizado a cada repetição, ou seja, a cada adição de água às amostras de solo.

O mesmo foi feito para os valores de leitura dos sensores. A partir dos três valores de leitura foi obtida a média para cada repetição, como demonstrado nas tabelas 1 e 2 a seguir.

Tabela 1: Valores médios de leitura solo argiloso

Leituras Solo Argiloso (mV)			
Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Média
893	894	928	905,00
852	893	860	868,33
855	880	865	866,67
816	855	850	840,33
760	783	793	778,67
691	698	679	689,33
642	637	640	639,67
549	578	548	558,33
536	543	545	541,33

Tabela 2: Valores médios de leitura solo arenoso

Leituras Solo Arenoso (mV)			
Sensor 1	Sensor 2	Sensor3	Média
939	937	965	947,00
864	880	880	874,67
849	854	860	854,33
802	775	796	791,00
733	778	728	746,33
654	696	644	664,67
621	624	618	621,00
598	588	597	594,33
554	561	560	558,33
534	553	542	543,00

Deste modo, com os valores de umidade volumétrica e os de leitura do sensor foi elaborado o gráfico da curva de calibração para cada tipo de solo. De acordo com as observações feitas durante o tratamento dos dados foi verificado que o modelo polinomial de segunda ordem foi o que mais se adequou, apresentando um valor de R-quadrado igual a $R^2 = 0,988945$ para o solo argiloso e $R^2 = 0,989090$ para o solo arenoso.

A seguir nas figuras 10 e 11 encontram-se as curvas de correlação para cada tipo de solo.

Figura 10 – Curva de Calibração Solo Argiloso

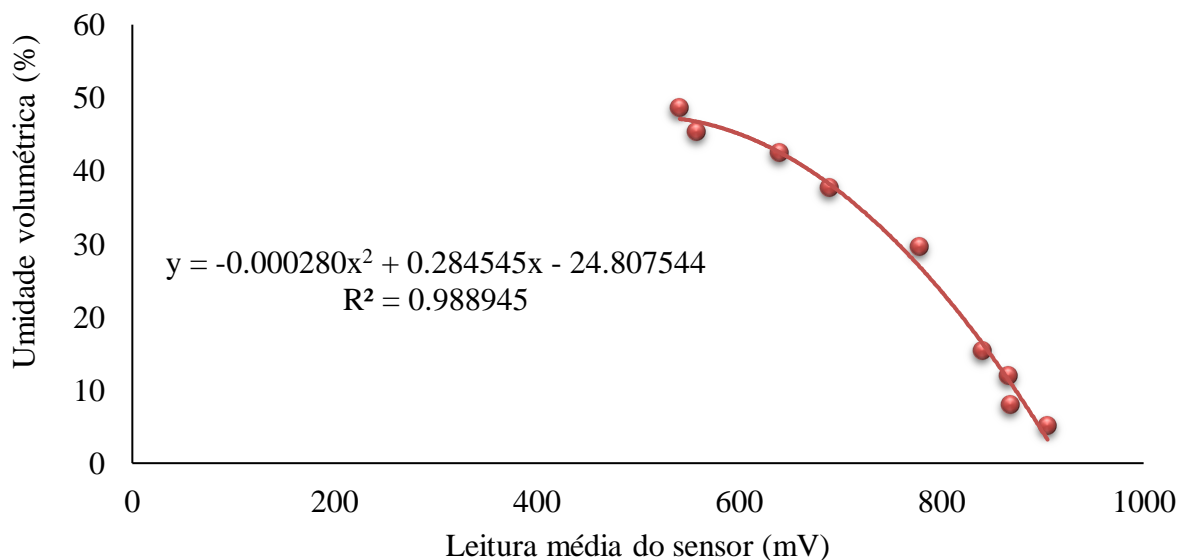
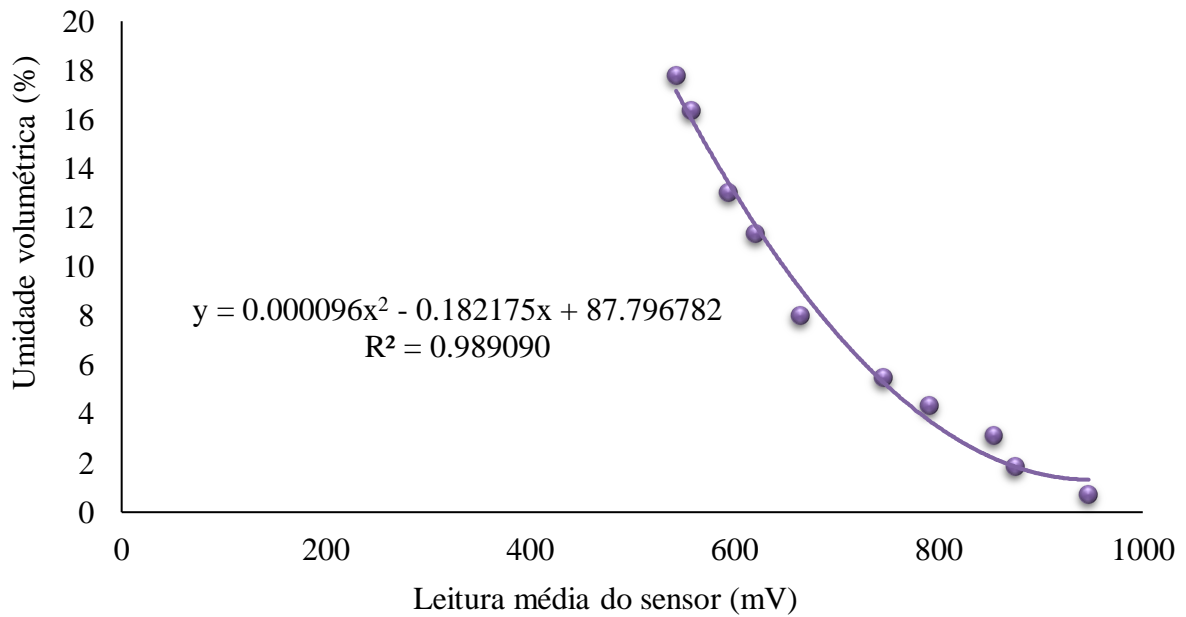


Figura 11 – Curva de Calibração Solo Arenoso



A partir das equações geradas através das planilhas de Excel, foram calculados os valores de umidade estimada e então comparados aos valores de umidade real obtidos.

Foi observado uma diferença nos valores de umidade estimados através da equação em relação aos medidos. Deste modo, foi calculado o erro relativo em relação aos resultados reais (Tabelas 3 e 4).

Tabela 3: Comparação dos valores de umidade volumétrica e umidade estimada para o solo argiloso

Umidade Solo Argiloso				
Leitura Média dos Sensores	Umidade Vol. Média (cm ³ cm ⁻³)	%	Umidade estimada	Erro relativo %
905,00	0,05006	5,01	3,38	32,50
868,33	0,07922	7,92	11,15	40,77
866,67	0,11878	11,88	11,49	3,29
840,33	0,15284	15,28	16,58	8,48
778,67	0,29616	29,62	26,99	8,87
689,33	0,37675	37,67	38,29	1,63
639,67	0,42401	42,40	42,64	0,56
558,33	0,45241	45,24	46,78	3,40
541,33	0,48459	48,46	47,17	2,65

Tabela 4: Comparação dos valores de umidade volumétrica e umidade estimada par ao solo arenoso

Umidade Solo Arenoso				
Leitura Média dos Sensores	Umidade Vol. Média (cm³ cm⁻³)	%	Umidade estimada	Erro relativo %
947,00	0,00688	0,69	1,37	99,31
874,67	0,01802	1,80	1,90	5,38
854,33	0,03099	3,10	2,23	28,13
791,00	0,04304	4,30	3,76	12,59
746,33	0,05439	5,44	5,31	2,42
664,67	0,07974	7,97	9,12	14,39
621,00	0,11294	11,29	11,69	3,49
594,33	0,12995	13,00	13,43	3,38
558,33	0,16348	16,35	16,01	2,07
543,00	0,17779	17,78	17,18	3,36

De acordo com essa diferença apresentada entre os valores de umidade real e umidade estimada, pode-se observar que para os dois tipos de solo, quando a umidade se encontra extremamente baixa, os sensores apresentaram um maior erro, que para o solo arenoso chegou a ser de aproximadamente 100%.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos pode-se observar que os sensores apresentaram comportamento diferenciado em cada tipo de solo, porém com boa correlação para ambos os tipos de solo avaliado.

Para o solo arenoso, o máximo de umidade encontrada ficou abaixo da esperada, porém não houve possibilidade de se continuar o experimento para se checar o comportamento com umidades maiores.

Para o solo mais seco, os sensores tiveram um erro relativo muito maior que para um teor de umidade mais alto. O erro relativo apresentou maior valor para o solo arenoso, à uma umidade média de menos de 1% chegou a apresentar aproximadamente 100% de erro.

Considerando principalmente os resultados do solo argiloso, onde foi capaz de se obter uma correlação até próximo a saturação, pode-se dizer que para este solo este sensor apresenta potencial de uso para monitoramento da umidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, J. A. de.; SILVA, E. M. da.; RESENDE, M.; GUERRA, A. F. Aspectos sobre o manejo da irrigação por aspersão para o Cerrado. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1983^a. 53p. (EMBRAPA-CPAC. Circular Técnica, 16).

CARMO, L. C.; BIAGE, M. Calibração de sensores capacitivos para monitoramento de irrigação. Revista Eletrônica Horizonte Científico, Uberlândia, v.1, n.1, p.1-23, 2002.

GARDNER, C. M. K.; DEAN, T. J.; COOPER, J. D. Soil water content measurement with a high frequency capacitance sensor. Journal of Agricultural Engineering Research, Silsoe, v.71, n.4, p.395-403, 1998.

GARDNER, W. H. water contente, In KLUETE, A. (Ed.). Methods of soil analisys I, physical and mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America, cap. 21, p.493-594, 1986.

GILBERTO Jr., G. O. J. Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, p.94, 2003.

OLIVEIRA, C. A. S. Determinação da tensão de água no solo agrícola usando um sensor de dissipação de calor. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.8, p.1417-1425, 1999.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.61, n.6, p.1576-1585, 1997.

SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influencia do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas TDR. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, n.2, p.299-308, 2010.

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, S. de A.; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental, 2008.

STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUMANN, R. New dielectric sensors and sensing techniques for soil and snow moisture measurements. *Sensors*, v.9, p.2951-2967, 2009.

UMENYIORA, C. A.; DRUCE, R. L.; CURRY, R. D.; NORGDARD, P.; MCKEE, T.; BOWDERS, J. J.; BRYAN, D. A. Dielectric constant of sand using TDR and FDR measurements na predicion models (Time-domain reflectometry) (Frenquency-domain reflectometry (Technical report). *IEEE Transactions on Plasma Science*, v.40, n.10, p.2408-2416, 2012.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. Soil moisture sensors. University of Florida, p.12, 1994.