

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JORGE OTTA JÚNIOR

**ESTUDO DA INFILTRAÇÃO E RETENÇÃO HÍDRICA DO SOLO POR
SENSORIAMENTO EM TEMPO REAL**

MEDIANEIRA

2022

JORGE OTTA JÚNIOR

**ESTUDO DA INFILTRAÇÃO E RETENÇÃO HÍDRICA DO SOLO POR
SENSORIAMENTO EM TEMPO REAL**

**STUDY OF SOIL WATER INFILTRATION AND RETENTION BY REAL TIME
SENSING**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio / Área de Concentração: Tecnologias Computacionais Aplicadas à Produção Agrícola e Agroindústria da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Augusto Vaghetti Luchese.

MEDIANEIRA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JORGE OTTA JÚNIOR

**ESTUDO DA INFILTRAÇÃO E RETENÇÃO HÍDRICA DO SOLO POR
SENSORIAMENTO EM TEMPO REAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio, Linha de Pesquisa Tecnologias Computacionais Aplicadas à Produção Agrícola no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio - PPGTCA, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: trinta de agosto de dois mil e dezenove

Prof. Dr. Augusto Vaghetti Luchese (Orientador – PPGTCA)
Doutorado em Agronomia
Universidade Federal do Paraná – Campus Palotina

Prof. Dr. Paulo Lopes de Menezes
Doutorado em Engenharia Agrícola
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira

Prof. Dr. Laércio Augusto Pivetta
Doutorado em Agronomia
Universidade Federal do Paraná – Campus Palotina

MEDIANEIRA

2022

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Solange Yoshiko Sekikawa Otta, pela paciência e tempo extra dedicado à família quando da minha ausência.

A minha família, por sempre mostrar pelo exemplo a importância da busca do conhecimento e aperfeiçoamento pessoal e moral.

As minhas filhas, Nicoli e Mayumi, por serem a razão e alegria do meu existir.

Ao Prof. Dr. Augusto Vaghetti Luchese pelas palavras de apoio e incentivo.

Aos amigos e colegas, de trabalho e sala de aula, pelas conversas construtivas ou somente de descontração e companheirismo.

Aos professores do curso, pelo conhecimento compartilhado.

A todos que de forma direta ou indireta colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

RESUMO

Com o crescente aumento da população mundial vêm também um crescente aumento na pressão causada pelo uso dos recursos hídricos para sua manutenção. Essa pressão demanda melhor utilização desses recursos hídricos de modo que sua utilização seja feita do modo mais racional possível. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo das mecânicas da infiltração e retenção hídrica no solo por meio de sensores para maximizar o uso de água na agricultura e avaliação de outras características hídricas do solo. Foram realizados procedimentos de calibração em ambiente controlado baseado nas leituras do método padrão de estufa. O estudo utilizou equipamentos desenvolvidos de baixo custo que possibilitarão a reprodução dos resultados alcançados pela comunidade de desenvolvedores e pesquisadores interessados na continuidade do trabalho. Os resultados esperados são de que o protótipo utilizado possa auxiliar na tomada de decisão em ambientes irrigados de modo a prover economia na utilização dos recursos hídricos da propriedade rural de modo que não limite a produtividade máximo do solo.

Palavras-chave: umidade solo; monitoramento; arduino.

ABSTRACT

Along with a rising growth of world population comes as well a rising growth in the pressure created by the hydric resources to its maintenance. Such pressure demands better use of this hydric resources in the most rational possible way. This study's objective is to study the soil infiltration and retention mechanics. Calibration's procedures were performed in a controlled environment based in the oven's standard method. Such study used low-cost developed equipments which will allow the community and researches interested to continue the results achieved. It is expected to help the decision to irrigate or not in a way which provides economy but not limiting its maximum productivity.

Keywords: soil moisture; monitoring; arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquemático da montagem do sensor de umidade do solo.....	21
Figura 2 - Esquemático da ligação do sensor de umidade de solo ao arduino. Elaborado utilizando Fritzing	22
Figura 3 - Montagem do sistema de coleta de dados.....	25
Figura 4 - Esquemático da conectorização dos componentes	26
Figura 5 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 0 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	33
Figura 6 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 20 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	33
Figura 7 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 40 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	34
Figura 8 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 60 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	34
Figura 9 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 80 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	35
Figura 10 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 100 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média	35
Figura 11 - Gráfico de dispersão dos sensores para a textura muito argilosa e sua respectiva equação linear obtida em laboratório	40
Figura 12 - Gráfico de dispersão dos sensores de umidade de solo com sua respectiva equação linear, obtida em laboratório, para a textura argilosa	40
Figura 13 - Gráfico de dispersão dos sensores de umidade do solo com suas respectivas equações lineares, obtida em laboratório, para a textura média.....	41
Figura 14 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura muito argilosa	42
Figura 15 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura argilosa	42
Figura 16 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura média	43
Figura 17 - Treze horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura muito argilosa	44
Figura 18 - Oito horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura argilosa	47
Figura 19 - Treze horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura média	49

Figura 20 - Diferença de volume entre a retirada da primeira e segunda amostras quando da coleta de dados no cano para as três texturas pela coleta de dados dos sensores de umidade de solo	51
Figura 21 - Diferença de volume entre a retirada da primeira e segunda amostras quando da coleta de dados no cano para as três texturas – método padrão de estufa.....	52
Figura 22 - Superfície após o despejamento da umidade	54
Figura 23 - Permeabilidades calculadas das 3 texturas estudadas.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos e valores do sistema de coleta de dados	24
Tabela 2 - Desvio geral padrão, variância geral e coeficiente de variação dos níveis de umidade 0 a 100 para os três solos de textura diferenciada estudados. MA – Muito argiloso, Arg – Argiloso e Média.....	31
Tabela 3 - Quantidade de água necessária para atingir os níveis de saturação para as texturas estudadas	36
Tabela 4 - P-valores para os níveis de saturação de zero a cem para as três texturas estudadas	37
Tabela 5 - Tabela ilustrando as médias de umidade dos níveis de saturação obtidas pelo método padrão de estufa para as três texturas estudadas	39
Tabela 6 - Taxas de infiltração na primeira rodada da textura muito argilosa	45
Tabela 7 - Dados necessários para obtenção da densidade aparente dos substratos. Texturas: MA – Muito argilosa, Arg – Argilosa, Méd - Média.....	45
Tabela 8 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura muito argilosa	46
Tabela 9 - Velocidade de infiltração na primeira rodada da textura argilosa	48
Tabela 10 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura argilosa.....	48
Tabela 11 - Taxas de infiltração na primeira rodada da textura média.....	50
Tabela 12 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura média	50
Tabela 13 - Desvios padrões gerais dos sensores para as três texturas quando da coleta de dados no cano	53
Tabela 14 - Taxas de evaporação calculadas para o volume total da coluna de solo para as 3 texturas estudadas	56
Tabela 15 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura muito argilosa calculadas pelas leituras dos sensores de umidade de solo	56
Tabela 16 - Porcentagens de umidade e volume de água para cada subseção do sistema de coleta de dados para a textura muito argilosa segundo método padrão de estufa.....	57
Tabela 17 - Volumes para cada subseção do sistema de coleta para a textura argilosa calculadas pelas leituras dos sensores de umidade de solo.....	57
Tabela 18 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura média segundo as leituras dos sensores de umidade de solo.....	57
Tabela 19 - Taxas de evaporação calculadas para o volume total da coluna de solo para as 3 texturas estudadas com base nas amostras retiradas do sistema de coleta de dados.....	58
Tabela 20 - Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura muito argilosa	64

Tabela 21 - Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura argilosa	64
Tabela 23 - Porcentagens de umidade e volume de água para cada subseção do sistema de coleta de dados para a textura muito argilosa.....	66
Tabela 24 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura média calculadas pelas amostras retiradas da coluna de solo.....	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fórmula para obtenção da porcentagem de umidade gravimétrica	18
Equação 2 - Fórmula para obtenção da densidade aparente.....	27
Equação 3 - Fórmula para obtenção do volume equivalente à área do cano.....	29
Equação 4 - Fórmula para obtenção da área ocupada pela boca do cano	29
Equação 5 - Fórmula para obtenção do volume de um cilindro	45
Equação 6 - Fórmula para obtenção do volume de água através da porcentagem de umidade gravimétrica	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARM	Advanced RISC Machine
AVR	Família de microcontroladores
EPROM	memória programável apagável somente de leitura, do inglês Erasable Programmable Read-Only Memory
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IDE	Integrated Development Environment
I2C	Inter-Integrated Circuit
NBR	Normas Brasileiras
PVC	Policloreto de polivinila, do inglês: Polyvinyl chloride
PWM	"Pulse Width Modulation" ou Modulação de Largura de Pulso
SD	Secure Digital Card
S.O.	Sistema Operacional
TPU	Tubos de poliuretano termoplástico
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter ou Receptor/Transmissor Universal Assíncrono
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Panorama da agricultura mundial	17
2.2	Métodos para determinação da umidade do solo	18
2.3	Tecnologias empregadas.....	19
3	DESENVOLVIMENTO	21
3.1	Sensores	21
3.2	Sistema de coleta de dados.....	24
3.3	Coleta de dados.....	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Calibração de dados	31
4.2	Coleta em Laboratório	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A - Tabelas.....	63
	APÊNDICE B - Códigos utilizados	67

1 INTRODUÇÃO

A umidade do solo é uma variável ambiental, hídrica e climática essencial (MITTELBACH; LEHNER; SENEVIRATNE, 2012), ela afeta fortemente os fluxos de água na superfície do solo com impactos na temperatura e evapotranspiração. Em recentes anos a interação entre a atmosfera e a umidade do solo recebeu atenção crescente na pesquisa do clima (SENEVIRATNE ET AL., 2010).

A mecânica de infiltração de água no solo determina o balanço de água na zona das raízes (REICHARDT; TIMM, 2016) e, portanto, a velocidade e eficiência que as culturas implantadas absorvem nutrientes para seu crescimento. Há então necessidade crescente de otimizar o uso dos recursos hídricos disponíveis de modo a utilizá-los da maneira mais otimizada possível haja vista as crises hídricas mostradas na conjuntura, relatório de responsabilidade da Agência Nacional das Águas – ANA, de acordo com a Resolução nº 58/2006. Entre 2012 e 2016, a bacia do São Francisco enfrentou forte seca sendo que em 2015 esse reservatório, do Tocantins-Araguaia e das demais regiões hidrográficas tiveram os menores índices do período (ANA, 2017).

Essa otimização é ainda mais exigida haja vista o crescente aumento da população requerendo maior quantidade de recursos naturais para sua manutenção. A demanda por uso de água no Brasil é crescente, com aumento estimado de aproximadamente 80% no total retirado de água nas últimas duas décadas e com previsão de aumento em 30% até 2030 (ANA, 2017). Adicionalmente exigindo grande uso de recursos hídricos para produção de alimentos e, especialmente no Brasil, um país com grande parte de sua energia produzida por hidrelétricas, com 64,5% da matriz elétrica (ANA, 2017).

A atividade agropecuária no Brasil tem um importante papel para a economia do país. Particularmente diversas culturas têm projeção de crescimento de 3,3% do algodão em pluma, arroz 1,4%, milho 1,7%, trigo 1,2%, soja 2,3% e café 4,4% ao ano até 2020/2022, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2011). De acordo com o Conjuntura de 2017, 67,2% da vazão média de consumo de 1.081,3 m³ s⁻¹ são consumidos pela irrigação.

Essa pesquisa mostra-se útil no provimento de informações de construção de um sensor de umidade de solo de baixo custo e sua utilização na obtenção de maior entendimento das mecânicas envolvidas na retenção e infiltração de água no

substrato de estudo de modo a prover maior conhecimento para um melhor aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis.

1.1 Objetivos

Este estudo visa utilizar o protótipo de baixo custo construído com um conjunto de sensores de umidade de solo conectados a um sistema de coleta de dados para averiguar se é possível, através da medição de umidade do solo determinar a velocidade de infiltração, retenção e secamento da água no solo em tempo real.

Além do objetivo principal, este estudo tem os seguintes objetivos específicos:

Projetar e construir sensores de umidade de solo de baixo custo e verificar sua eficácia de modo a diminuir os onerosos custos de aquisição de diversos sensores utilizados em pesquisas acadêmicas;

Projetar e construir um armazenador e processador de dados que consiga mostrar em tempo real dados de infiltração, retenção hídrica do solo. Cogita-se que se possa também detectar e calcular uma taxa de movimentação de umidade pelas profundidades analisadas nos perfis de coluna de solo estudados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Agricultura é conhecida como a atividade econômica com o objetivo de produzir e fornecer gêneros alimentícios de origem vegetal ao ser humano englobando tanto em pequena escala, como a familiar, média e grande produtor. Sendo uma das bases econômicas do país, esta é de suma importância que os processos envolvidos sejam feitos da melhor forma possível utilizando a menor quantidade de recursos naturais preferencialmente de modo a torná-la sustentável no longo prazo causando o menor impacto ambiental possível.

Embora originalmente visasse um melhor aproveitamento dos recursos hídricos do país pelo setor energético, o decreto Nº 24.643, de 10 de julho de 1934, deu um importante passo para atualizar a legislação outrora vigente sobre a definição do que é água pública, suas derivações e usos de modo a lançar luz na defasada legislação anterior. Importante marco foi a publicação da lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, dando maior abrangência ao Código das Águas de 1934 e integrando União e estados, possibilitou a criação de comitês de bacias hidrográficas incluindo usuários e sociedade civil na discussão.

Criada pela lei Nº 9.984, de 17 de julho de 2000, a ANA - Agência Nacional de Água, é uma instituição federal que visa a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, entre outras providências. Como citado por Mantovani et al, 2009, em agricultura irrigada: caracterização e Importância, a ANA pode outorgar diretamente, por meio de autorização, o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio da União, bem como a outorga preventiva. Adicionalmente, cita que a concessão de uso da água já é taxada em algumas bacias hidrográficas do País, de modo a fomentar programas de intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos e caracterizar valor à água, reconhecendo-a como um bem econômico e incentivando a racionalização.

De modo a disponibilizar atualizações e informes sobre a implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Resolução nº 58/2006, atribuiu à ANA a responsabilidade pela

elaboração do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, de forma sistemática e periódica. Esse relatório pode ser consultado, quando da publicação deste estudo, ao acessar a página do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Informações adicionais como mapas interativos e metadados podem ser obtidos pelo portal da agência no endereço: <http://www.snirh.gov.br/>.

Diante da postura atual de preocupação com os recursos hídricos e a vaporização da água irá, mais cedo ou mais tarde, promover que a água entre na planilha de custo das propriedades que têm sistema de irrigação sendo então, fundamental o conhecimento das características hídricas e teores no solo das propriedades para melhor armazenamento, reduzindo desta forma a necessidade da captura de água nos corpos hídricos.

Segundo Silveira et al (1993), infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. Segundo Mantovani et al (2009), o processo de infiltração é dividido em várias partes, em que inicialmente, a VI - Velocidade de Infiltração - é em função da umidade e cobertura do solo entre outros fatores e no decorrer do processo, ela passa a ser em função da estrutura e textura do solo. Exemplos disso podem ser observados em eventos chuvosos, quando a precipitação hídrica é desviada primeiro pela cobertura do solo, como árvores, grama e pedras superfciais, para então ser absorvida pelo solo e ter sua velocidade influenciada pela estrutura e textura do solo.

Para a agricultura, a água retida no solo possui limites máximo e mínimo dentro dos quais se torna disponível para as plantas. O limite superior é chamado de capacidade de campo, constituindo no máximo volume hídrico que o solo pode reter sem causar dano ao sistema, como citado por Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009). O limite inferior  o ponto de murcha permanente em que a água não pode mais ser absorvida pela planta já que a retenção exercida pelo solo  maior, como complementa Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009).

Disponibilizando gua entre esses dois limites, a irrigação permite mais de um plantio por ano e otimiza o uso das propriedades gerando empregos permanentes através de menores investimentos comparado a outros setores da economia, como citado por Mantovani, Bernardo e Palaretti, 2009.

2.1 Panorama da agricultura mundial

Agricultura é conhecida como a atividade econômica com o objetivo de produzir e fornecer gêneros alimentícios de origem vegetal ao ser humano englobando tanto em pequena escala, como a familiar, média e grande produtor. Sendo uma das bases econômicas do país, esta é de suma importância que os processos envolvidos sejam feitos da melhor forma possível utilizando a menor quantidade de recursos naturais preferencialmente de modo a torná-la sustentável no longo prazo causando o menor impacto ambiental possível.

Embora originalmente visasse um melhor aproveitamento dos recursos hídricos do país pelo setor energético, o decreto Nº 24.643, de 10 de julho de 1934, deu um importante passo para atualizar a legislação outrora vigente sobre a definição do que é água pública, suas derivações e usos de modo a lançar luz na defasada legislação anterior. Importante marco foi a publicação da lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, dando maior abrangência ao Código das Águas de 1934 e integrando União e estados, possibilitou a criação de comitês de bacias hidrográficas incluindo usuários e sociedade civil na discussão.

De modo a disponibilizar atualizações e informes sobre a implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, por meio da Resolução nº 58/2006, atribuiu à ANA a responsabilidade pela elaboração do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, de forma sistemática e periódica. Esse relatório pode ser consultado, quando da publicação deste estudo, ao acessar a página do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Informações adicionais como mapas interativos e metadados podem ser obtidos pelo portal da agência no endereço: <http://www.snirh.gov.br/>.

Diante da postura atual de preocupação com os recursos hídricos e a vaporização da água irará, mais cedo ou mais tarde, promover que a água entre na planilha de custo das propriedades que têm sistema de irrigação sendo então, fundamental o conhecimento das características hídricas e teores no solo das

propriedades para melhor armazenamento, reduzindo desta forma a necessidade da captura de água nos corpos hídricos.

2.2 Métodos para determinação da umidade do solo

Utilizado como método padrão e de referência para realizar a medição do conteúdo gravimétrica da água no solo, o método da estufa consiste em deixar uma quantidade de solo com peso conhecido secando em estufa por um período entre 24 a 48 horas a uma temperatura entre 105 e 110° C. A diferença entre o peso do substrato úmido e o seco é o peso da umidade contida no substrato analisado (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, p.44, 2009) de acordo com a equação 1:

Equação 1 - Fórmula para obtenção da porcentagem de umidade gravimétrica
$$\% \text{Umidade} = ((\text{Mu} - \text{Ms}) / \text{Ms}) \cdot 100$$

Onde: Mu é o peso da amostra úmida e Ms é o peso da amostra seca (NBR 6457:2016)

Como principais vantagens desse método podem ser citadas a integridade estrutural da amostra analisada e a alta confiabilidade na medição obtida além de sua aplicabilidade para diversos materiais a serem estudados. Apresenta grande demora (24 a 48 horas) para obtenção de qualquer leitura como principal desvantagem além de seu caráter destrutivo, não permitindo sua repetibilidade em uma mesma amostra.

Com o objetivo de agilizar a leitura desse importante parâmetro do solo, diversos sensores foram desenvolvidos de modo a realizar a leitura de outro parâmetro, e relacioná-lo com a umidade do solo utilizando leituras obtidas pelo método padrão da estufa (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Resistência elétrica, capacitância e pressão são alguns exemplos de métodos indiretos. Segundo Silva, Andrade Júnior e Souza (2008) para aumentar o nível de precisão é necessário realizar calibrações para adaptar as leituras do sensor ao ambiente em que será implantado.

Sensores de umidade do solo estimam o conteúdo volumétrico da água enquanto sensores de potencial de água medem o potencial que a água pura tem de mover-se de uma área à outra devido à osmose, gravidade, pressão mecânica ou

ação. Exemplos de tecnologia para medir o conteúdo volumétrico da água incluem Reflectometria em domínio de frequência (FDR) (SILVA; ANDRADE JÚNIOR; SOUZA, 2008), Reflectometria ou Transmissão em domínio de tempo (TDR e TDT) (MUÑOZ-CARPENA; RITTER; BOSCH, 2005), medidores de mistura de nêutrons, resistividade do solo e células galvânicas. Exemplos de métodos que medem a tensão mátrica da água no solo, baseiam-se em um material poroso que fica em contato com o solo e incluem tensiômetros e os métodos de Bouyoucos e de Colman.

Sensores industriais como os citados podem custar 4 mil reais a unidade e unidades armazenadoras para alguns modelos podem custar um adicional de 3 mil reais por unidade na data de realização deste estudo.

2.3 Tecnologias empregadas

Entre os microcontroladores existentes no período de estudo e que poderiam ser utilizados estão o ARDUINO e o Raspberry. Embora ambos possam ser usados para aquisição de dados, eles se diferem nos recursos disponibilizados e seu consequente custo para aquisição.

O ARDUINO é também uma plataforma de desenvolvimento livre. Seu objetivo é o de disseminar conhecimentos de programação e eletrônica para o público com interesse no assunto. O microcontrolador de mesmo nome é composto basicamente de um micro controlador com entradas e saídas digitais e analógicas (WWW.ARDUINO.CC, 2018). A quantidade dessas portas de entrada e saída variará de acordo com o modelo.

A programação no Arduino é feita utilizando uma linguagem baseada em Wiring (wiring.org.co, 2019) e em um ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês, IDE) disponibilizado gratuitamente pelo sítio do desenvolvedor primário no endereço eletrônico <https://www.arduino.cc> e baseado em processing (HTTPS://PROCESSING.ORG, 2018). Sua programação pode ser realizada mesmo sem a aquisição de uma placa física já que a plataforma disponibiliza também como parte do ambiente um sítio para desenvolvimento online no endereço <https://create.arduino.cc/editor>.

Sua principal vantagem para uso neste estudo é possuir um conversor analógico-digital integrado à placa permitindo a leitura de sinais analógicos sem a adição de componentes adicionais (WWW.ARDUINO.CC, 2018). Esse componente mapeia tensões entre 0 e a tensão operacional (5v ou 3.3V, para o caso do ARDUINO) para valores inteiros entre 0 e 1023. No caso de microcontroladores baseados em AVR, cada leitura de um valor analógico leva em torno de 100 microsegundos, sendo sua taxa de leitura máxima de 10,000 leituras por segundo, portanto, adequado para utilização em amplo número de estudos.

Sua principal desvantagem é a obrigatoriedade de aquisição de um módulo adicional de modo a prover armazenamento permanente de informações nos modelos disponíveis na época deste estudo. Embora o código enviado à placa fique armazenado em uma unidade EPROM, os dados resultantes de sua execução, variáveis e dados coletados, ficam armazenados na memória RAM que depende de a placa estar energizada para que continuem na memória.

Para realizar o armazenamento permanente dos dados coletados, optou-se por utilizar um Raspberry PI, criado pela fundação de mesmo nome com o objetivo de "colocar o poder da computação e da produção digital nas mãos de pessoas de todo o mundo para que mais pessoas possam aproveitar o poder da computação e das tecnologias digitais para o trabalho, resolver problemas que são importantes para elas e se expressarem de forma criativa" - em tradução livre. (<https://www.raspberrypi.org/>)

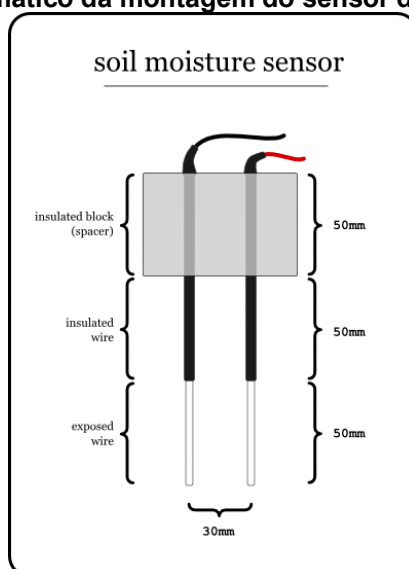
Sua principal vantagem é proporcionar um ambiente de desenvolvimento já que o Sistema Operacional - S.O. recomendado, uma variação customizada do Debian para processadores ARM, chips de baixo consumo de energia, custo e liberação de calor, têm diversas opções pré-instaladas, como por exemplo, scratch e python.

3 DESENVOLVIMENTO

Essa pesquisa pode ser classificada como de natureza aplicada, pois permitirá a construção de novos conhecimentos para uma finalidade específica, o sensoriamento da umidade do solo em tempo real. A abordagem será quantitativa uma vez que os ensaios e a aplicação serão realizados de forma a mensurar uma grandeza física que é a concentração de umidade nos substratos estudados.

3.1 Sensores

Figura 1 - Esquemático da montagem do sensor de umidade do solo

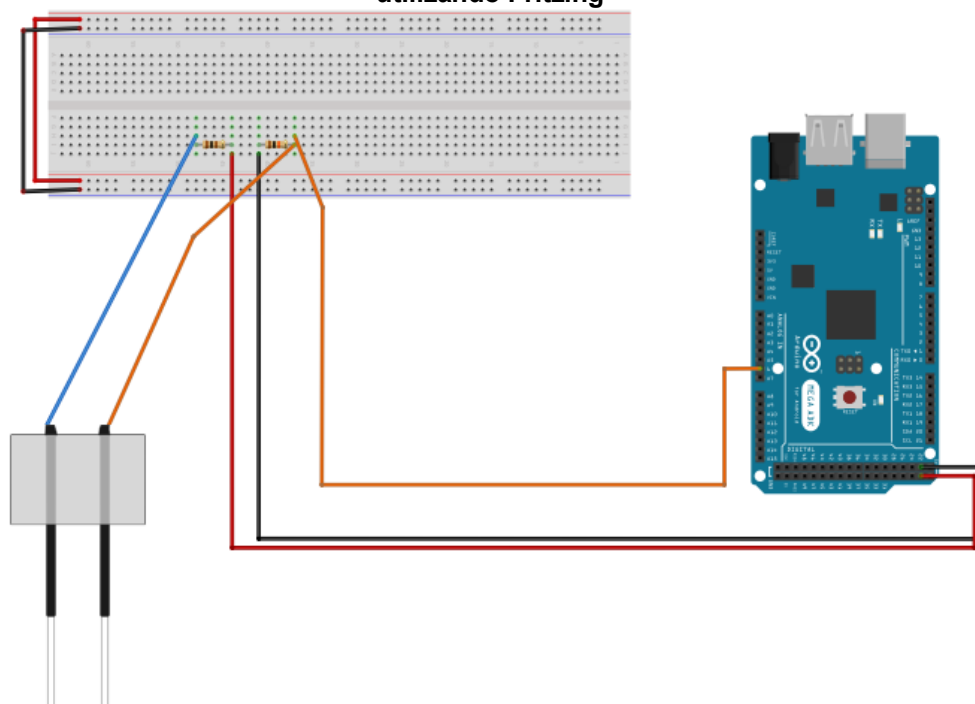


Fonte: FRUEH (2017)

Para realizar a medição dos valores de umidade do substrato utilizado foram fabricados os sensores ilustrados na figura 1, estas constam de dois segmentos lineares de arame galvanizado de 12 gauges com aproximadamente quinze centímetros cada, de modo que 5 centímetros ficariam expostos ao substrato e o resto do segmento estivesse coberto por um segmento de tubo termo retrátil de modo a não ter contato com o substrato. O posicionamento dos segmentos foi fixado na parte superior isolada utilizando isopor medianamente rígido. O fio utilizado foi o contido em cabos de rede categoria 5 e afixado ao segmento por solda estanhada. Devido à diferença entre os raios do fio metálico e do segmento, cola quente foi utilizada para finalizar o isolamento na área da solda.

Uma das pontas de cada sensor de umidade do solo foi conectada a um resistor de 100ohm e depois a uma porta de entrada e saída digital do arduino. A outra ponta foi conectada a um resistor de maior valor e depois a uma entrada analógica e uma saída digital como representado na figura 2.

Figura 2 - Esquemático da ligação do sensor de umidade de solo ao arduino. Elaborado utilizando Fritzing



Fonte: A autoria própria (2018)

A medição quantifica a passagem de tensão elétrica de uma ponta do sensor de umidade para a outra e vice-versa. Como os resistores dos dois segmentos têm valores diferentes, é necessário medir a passagem para os dois lados e o valor médio será utilizado para correlacionar a umidade obtida por procedimento padrão de estufa. A inversão do sentido da passagem de corrente também permitirá uma maior vida útil do sensor visto que se ocorresse somente em um sentido causaria um maior desgaste devido a eletrólise. Para os objetivos deste estudo serão realizadas medições de modo a estudar a velocidade de infiltração e retenção de água nos substratos utilizados.

Quanto maior a porcentagem de água no substrato, maior o valor lido, quanto menor a umidade, menor o valor obtido. De modo a diminuir as incertezas nas medições dos sensores, o processo de calibração foi padronizado e repetido três vezes para cada sensor utilizando as amostras citadas. Os valores amostrais

coletados encontram-se no anexo A separados em seções das 3 amostras texturais estudadas.

O processo de coleta de dados para a calibração seguiu as instruções constantes na NBR 6457:2016, da ABNT, em especial as considerações feitas no anexo A sobre a quantidade de material em massa seca a tomar. Inicialmente as amostras foram peneiradas com peneira metálica 4,75 mm e qualquer material maior que esse foi descartado. Posteriormente as amostras foram quebradas e homogeneizadas com o cuidado de separar materiais diferentes do substrato a ser analisado e peneiradas novamente em peneira de 2 mm. Esses materiais separados foram descartados devido ao fluxo de água, de maneira geral, ser limitado pela camada menos permeável como citado por Reichardt K. e Timm L. C. (2012) baseado em estudos realizados em solos estratificados em equilíbrio dinâmico. As amostras foram homogeneizadas e pesadas separadamente e armazenadas em recipiente plástico limpo e inodoro.

O processo de calibração foi baseado também no utilizado por Pizetta (2015), descrito por Kinzli (2012) e citado por Spelman, Kinzli e Kunberger (2013). Foram utilizadas duas garrafas pet de 2,5 litros cortadas ao meio para acondicionar a amostra para realização das leituras de calibração de modo a padronizar a distribuição da amostra evitando que diferenças na compactação e distribuição da amostra causassem leituras díspares para a mesma amostra. Para cada rodada, foi utilizado um quilo de cada amostra para determinação do nível 100% de saturação. Separou-se um litro de água destilada que foi despejada na amostra lentamente de modo a evitar compactação na superfície da amostra. Quando a amostra ficava visualmente a 100% de saturação, o peso da amostra e da água inserida era aferido. Se durante a meia hora seguinte a amostra não apresentasse visualmente 100% de saturação, mais água era despejada na amostra.

O volume de água utilizado para chegar visualmente aos 100% de saturação da amostra serviu de referência para determinar o nível máximo da calibração. Para definir a curva de correlação entre a umidade volumétrica de água e as leituras obtidas pelos sensores, foi utilizado um intervalo de 20 pontos percentuais, de 0 a 100% do nível de saturação. Durante o processo, verificou-se que o substrato ao ser umedecido com água tinha sua temperatura alterada consideravelmente.

O processo para homogeneizar a amostra para os níveis de 40 a 80% de saturação dependeu da resposta da amostra ao processo de homogeneização

manual. Se a amostra aumentasse de tamanho, o volume era levemente ajustado para o volume do nível anterior. Se a amostra não sofresse colapsamento, com diminuição do seu volume, a homogeneização manual era utilizada. Caso ocorresse diminuição do volume, a amostra era novamente seca e homogeneizada para ser utilizada posteriormente e na próxima rodada e nas subsequentes, para esse nível e amostra, era utilizado o seguinte processo alternativo: A amostra era inserida novamente e seu volume levemente ajustado. Posteriormente despeja-se lentamente a água de modo a não causar compactação superficial na amostra. Aguardou-se 10 minutos antes da realização das leituras para esse nível.

Esse processo alternativo se mostrou necessário, pois as leituras foram severamente afetadas pelo colapsamento da amostra causado pelo processo de homogeneização manual. Para os objetivos deste estudo, esse processo não deve causar resultados anômalos, já que o despejamento de água será sempre feito de modo a evitar a compactação superficial da amostra e não será realizada homogeneização depois da inserção no substrato no cano.

Após a realização das leituras para correlacionamento, para os níveis de 100% a 20% de saturação, amostras de pelo menos 30g de peso foram extraídas para secagem na estufa seguindo procedimento padrão.

3.2 Sistema de coleta de dados

As coletas em laboratório foram realizadas no bloco C, térreo, no laboratório de solos da UTFPR – Campus Toledo do período de 11 de maio de 2019 a 23 de julho de 2019. Os componentes e seus custos do sistema de coleta de dados deste estudo estão elencados na tabela 1.

Tabela 1 - Equipamentos e valores do sistema de coleta de dados

(continua)

Equipamento	Valor unitário (R\$)
Placa de desenvolvimento Raspberry PI 3 model B	210,00
Placa de desenvolvimento Arduino mega 2560	64,90
Arame galvanizado de 2,12 mm (20 barras de 15 cm)	6,00
Termo Retrátil	12,00
Fio de rede categoria 5	40,00
Sensor de umidade e temperatura DHT22	5,00

Tabela 1 - Equipamentos e valores do sistema de coleta de dados

Equipamento	Valor unitário (R\$)
4x Sensores de temperatura DS18B20	100,00
Cano PVC 200 mm diâmetro e 1,50 m de comprimento	100,00
Tampa PVC 200 mm de diâmetro	50,00
Total	614,70

Fonte: Autoria própria (2018)

Um cano PVC de 200 mm de diâmetro com 1,30 metros de comprimento, medida suficiente para acomodar as adaptações necessárias para realização do estudo, foi utilizado para acomodar os solos que foram utilizados no estudo, proporcionando um perfil de solo para a inserção dos sensores e posteriores determinações. O lado inferior que ficaria em contato com o chão foi tampado e a partir daí, perpendicularmente ao comprimento do cano, os furos necessários para inserção dos sensores de umidade foram feitos a cada 10 centímetros de distância um do outro totalizando 10 furos e restando os 20 centímetros superiores do cano sem modificações.

Os furos para inserção dos sensores de temperatura foram feitos respeitando as mesmas regras, porém do lado oposto aos furos dos sensores de umidade. Furos de 2 centímetros de diâmetros para extração das amostras de substrato foram feitos nessa mesma distância, porém a 90° dos furos para inserção dos sensores. A montagem do sistema de coleta está ilustrada na figura 3.

Figura 3 - Montagem do sistema de coleta de dados



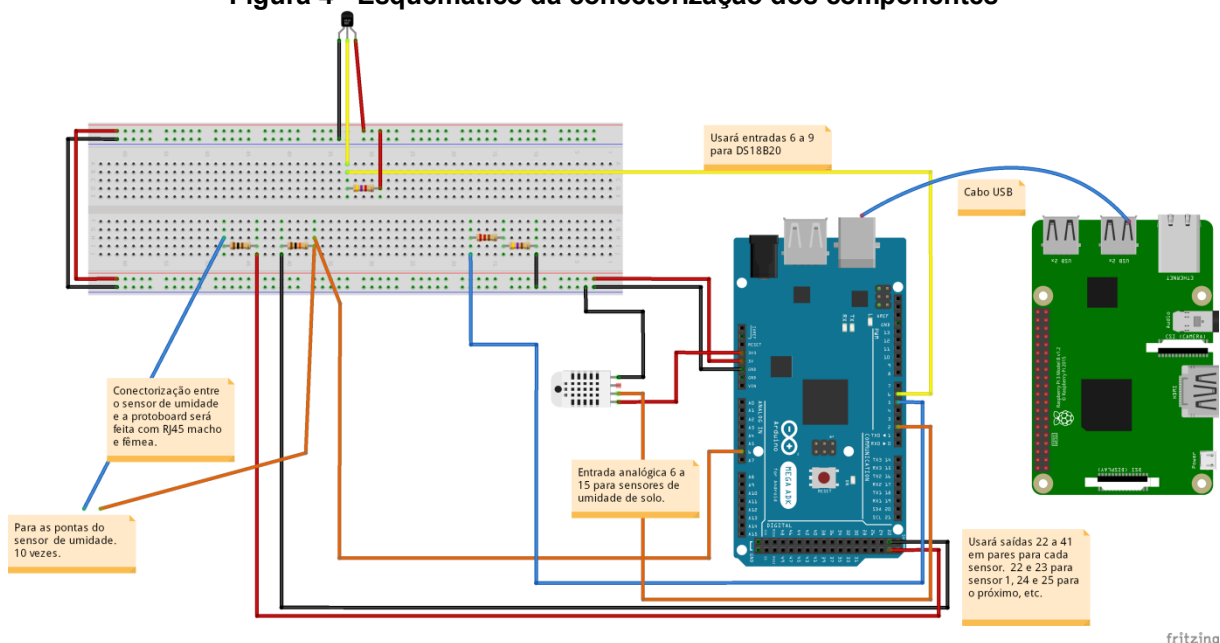
Fonte: Autoria própria (2018)

Tiras de borracha foram afixadas a meia distância dos furos no interior do cano para evitar que a água se infiltrasse pela lateral do cano.

Acima do cano um chuveiro de plástico de 16 centímetros de raio foi conectado a um permeâmetro por uma mangueira plástica de TPU de 8x1,25 suportando uma pressão de água máxima de 10 bar através de uma válvula modelo MGA PN16 de um quarto de polegada em uma ponta e um adaptador plástico de três quartos de polegada para 8 mm. O chuveiro foi apoiado em uma estrutura metálica de modo a prover sustentação.

O esquemático da conectorização dos componentes encontra-se na figura 4.

Figura 4 - Esquemático da conectorização dos componentes



Fonte: Autoria própria (2018)

Os sensores DS18b20, sensores de temperatura com proteção IP68, e, portanto, à prova de água e poeira, foram utilizados para realizar a medição da temperatura do substrato na altura que os sensores de umidade foram inseridos. Embora a calibração e leitura tenham sido feitas em ambiente laboratorial, essa medição foi necessária de modo a comprovar que eventuais variações de temperatura do substrato afetassem de modo significativo a medição dos sensores de umidade causando falsas leituras de substrato seco, sendo importante ainda quando em destino final de utilização à campo as condições do ambiente não serão tão controladas.

A alimentação elétrica e comunicação do arduino foram feitas por intermédio da porta USB tipo B do arduino conectada à porta USB tipo A do Raspberry. Cogitou-se realizar a escrita dos dados diretamente no cartão SD do sistema

operacional de modo a diminuir os componentes do sistema, porém testes iniciais de uso indicaram uma maior propensão à corrupção dos dados quando armazenados utilizando o mesmo cartão do S.O. Com o objetivo de evitar a perda de dados devido a constante escrita de dados o código desenvolvido armazena temporariamente 300 registros na memória para depois realizar a escrita de todos no cartão de memória. Adicionalmente fez-se uso do serviço de nuvem provido pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo para armazenamento dos dados coletados na calibração.

Devido ao ambiente desta pesquisa ser somente laboratorial, a alimentação elétrica do raspberry está sendo feita por uma fonte padrão de 2.0 amperes conectada à rede elétrica do laboratório.

Para o cálculo da umidade das camadas, fez-se necessário o cálculo da densidade aparente dos substratos e da função de correlação da umidade e das leituras registradas pelos sensores de umidade de solo.

Para o cálculo das densidades aparentes foi utilizado um tubo de ensaio para medição de até 500 mL de líquidos de forma a padronizar a medição de volume dos substratos estudados. Utilizou-se somente o volume da área graduada, de 28,9 cm de altura e 2,7 cm de raio, resultando em um volume de 661,87 cm³, para essa medição.

O cálculo da densidade aparente dos substratos foi realizado utilizando a equação 2:

Equação 2 - Fórmula para obtenção da densidade aparente

$D_{aparente} = \frac{Massa_{seca} - Massa_{\text{água}}}{Volume}$, sendo:

$D_{aparente}$ - Densidade aparente do substrato (g cm⁻³)

$Massa_{seca}$ - Peso do substrato seco (g)

$Massa_{\text{água}}$ – Peso da água presente no substrato (g)

$Volume$ – Volume ocupado pela massa da qual se calculará a densidade aparente. (cm³)

3.3 Coleta de dados

Os solos utilizados no estudo foram coletados na região de Toledo - PR e Palotina - PR, sendo de texturas muito argilosa, argilosa e média. Cinquenta quilos de cada amostra foram coletados. A amostra muito argilosa foi coletada na região de Toledo, na posição longitude 24°43'58.9"S e latitude 53°45'53.0"W, entre o Restaurante Universitário e o bloco C do Campus da UTFPR. As amostras de textura argilosa e média foram coletadas na região de Palotina, nas posições - 24,188659, -53,795714 (ponto 1) e -24,192616, -53,808544 (ponto 2).

Primeiramente, a camada vegetal foi removida e uma camada superficial de 5 a 40 centímetros de profundidade foi coletada. Eventuais materiais vegetais foram removidos manualmente. As amostras deformadas de solo foram acondicionadas em recipiente plástico limpo e inodoro. Devido ao projeto do sensor, as amostras foram coletadas deformadas, já que devido à dureza do substrato seco não seria possível inseri-lo sem alterar a estrutura física das amostras. Após a coleta, aguardou-se que as amostras chegassem ao ponto de umidade higroscópica secando ao ar.

Uma consulta ao sítio da IAPAR foi realizada para determinar a máxima precipitação em 24 horas na região de Toledo, Paraná. Os municípios com estações da IAPAR próximos foram Cascavel, Palotina, Pato Branco, Francisco Beltrão, Quedas do Iguaçu, Cianorte, Umuarama, Laranjeiras do Sul e São Miguel do Iguaçu. Os municípios com dados mais atualizados foram de Pato Branco, com dados entre 1979 e 2016, Francisco Beltrão, com dados entre 1974 e 2018 e Umuarama, com dados entre 1972 e 2018. Os dados dos outros municípios não foram considerados por serem muito antigos.

Consulta similar ao sítio do Instituto Nacional de Meteorologia - INMet retornaram dados de precipitação máxima em 24 horas de valores inferiores à consulta feita no sítio da IAPAR. Foram consultados os dados de precipitação dos municípios de Maringá, Campo Mourão e Marechal Cândido Rondon, sendo as máximas de 99,3 mm em agosto de 2018, 86,6 mm em julho de 2012 e 129,2 mm em abril de 2012 respectivamente. Para esse estudo optou-se por estudar um fluxo de água de 5,7 litros de água em período de 24 horas, máxima registrada no município de Umuarama em fevereiro do ano de 1998, correspondendo a 183,8 mm de precipitação para a área do cano, obtido pela equação 3:

Equação 3 - Fórmula para obtenção do volume equivalente à área do cano

$X = \text{Prec.Área}$, onde

X - Volume em litros equivalente a área (L)

Prec - Volume em milímetros da precipitação (mL)

Área - Área em que se deseja o volume de chuva precipitada (cm²)

Equação obtida considerando:

Área - Área em metros quadrados ocupada pelo cano.

Equação 4 - Fórmula para obtenção da área ocupada pela boca do cano

$\text{Área} = \pi r^2$, onde:

$\pi = 3,14$

$r = 0,1$ metro

Resultando em $\text{Área} = 3,14 \cdot 0,1^2 = 0,0314$ metros². E por proporção direta, sabendo-se que em 1 metro quadrado precipitou 183,8 mm, têm-se o volume de precipitação para a área do cano de 0,0314 metros quadrados. Substituindo-se os valores na equação anterior:

$$X = 183,8 \cdot 0,0314 = 5,77 \text{ litros}$$

Depois de feita a calibração, procedeu-se ao estudo da infiltração e retenção de água. Para isso, o cano foi preenchido com a amostra a ser estudada utilizando como limite superior uma distância de 10 centímetros do sensor mais superficial de modo que todos os sensores tivessem 10 centímetros de substrato entre cada um, totalizando uma coluna de solo de 1,2 metros de altura. Tomou-se o cuidado de realizar o preenchimento com o cano na diagonal de modo a evitar a compactação causada pela gravidade.

A leitura dos sensores foi efetuada durante todo o processo, desde o início do despejamento da água até a segunda retirada de amostras. O processo de coleta de dados constituiu-se das seguintes etapas:

Despejamento dos 5,77 litros de água em ritmo que não causou compactação superficial visível;

Após 24 horas do final do despejamento, retirada da primeira amostra para comparação com as leituras dos sensores de umidade do solo;

Após 96 horas da etapa anterior, retirada da segunda amostra e finalização da coleta de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visacro (2010), ensina que os caminhos da corrente elétrica no solo apresentam uma geometria complexa e, portanto, ao analisar o solo como um condutor de corrente, não se tem a mesma simplicidade no tratamento existente no caso de condutores metálicos lineares. Fatores atuantes no aumento dessa complexidade são: estrutura do solo e de seus micro e macro poros, composição, umidade e temperatura. De modo a tornar essa análise menos complexa as leituras foram feitas em ambiente laboratorial, medindo-se a temperatura e umidade ambientes, inserindo a mesma quantidade de água e utilizando amostra homogeneizada com peneira de 2 mm de espessura na medição e calibração.

4.1 Calibração de dados

Após a coleta de dados da calibração dos sensores, procedeu-se um estudo estatístico acerca destes. Calculou-se a estatística descritiva de modo a verificar as características dos dados obtidos para a calibração dos sensores e sua correlação com a umidade obtida pelo método padrão de estufa.

Nota-se pela tabela 2, ilustrando os desvios gerais padrão, variância e coeficientes de variação, que com o aumento do teor de umidade inserido, o coeficiente de variação diminui e os valores de leitura variam menos do valor médio das leituras amostrais. Esperava-se que a variância acompanhasse o coeficiente de variação, porém a maior variância foi verificada para os níveis com maiores teores de umidade. Da mesma forma, os desvios gerais padrão foram menores para os níveis de saturação de 0 a 20, enquanto para os outros níveis de saturação os desvios foram maiores chegando a 98,38 para 40 por cento de saturação para a textura argilosa.

Tabela 2 - Desvio geral padrão, variância geral e coeficiente de variação dos níveis de umidade 0 a 100 para os três solos de textura diferenciada estudados. MA – Muito argiloso, Arg – Argiloso e Média

					(continua)
Nível	Solo	Desvio Geral Padrão	Variância	Coef. De Variação (%)	
0	MA	4,38	19,26	278,70	
	Arg	3,42	11,73	253,37	
	Média	6,19	38,30	271,98	
20	MA	6,65	44,24	85,53	
	Arg	3,42	11,73	50,67	

Tabela 2 - Desvio geral padrão, variância geral e coeficiente de variação dos níveis de umidade 0 a 100 para os três solos de textura diferenciada estudados. MA – Muito argiloso, Arg – Argiloso e Média

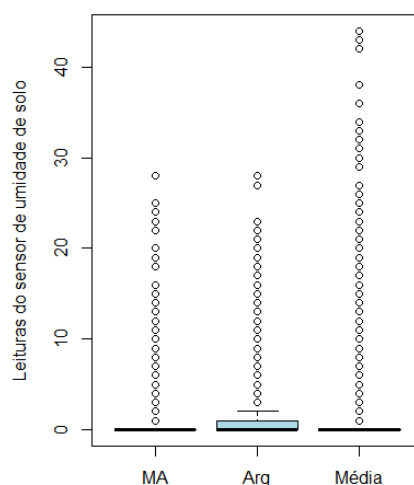
(conclusão)				
Nível	Solo	Desvio Geral Padrão	Variância	Coef. De Variação (%)
20	Média	17,87	319,19	10,77
40	MA	13,60	184,89	29,90
	Arg	98,37	9677,17	19,19
	Média	69,01	4763,05	9,65
60	MA	37,86	1433,60	9,35
	Arg	31,84	1013,70	3,90
	Média	38,37	1472,54	4,60
80	MA	43,53	1894,67	6,98
	Arg	24,32	591,67	3,45
	Média	44,01	1937,06	6,49
100	MA	37,31	1392,36	4,68
	Arg	28,68	822,35	4,77
	Média	27,61	762,47	4,42

Fonte: Autoria própria (2018)

Construiu-se boxplot de todos os níveis de saturação para as 3 texturas de modo a avaliar a existência de pontos discrepantes. Os pontos discrepantes foram mais frequentes nos níveis de umidade de 0 a 40, sendo muito numerosos para os três solos estudados para o nível 0.

Nota-se pela figura 5 ilustrando o boxplot das leituras registradas ao nível de 0 por cento de saturação que para esse nível, o sensor terá dificuldade de registrar os valores reais de umidade para os níveis próximos devido à grande quantidade de outliers encontrados e à alta variância e coeficiente de variação para esse nível de saturação de umidade para as três texturas.

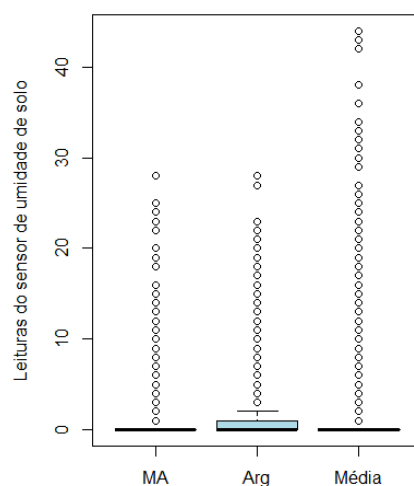
Figura 5 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 0 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se pelos bloxplots, ilustrados na figura 6, que ao nível de vinte por cento de saturação, a variabilidade das leituras é aproximadamente a mesma para as texturas muito argilosa e argilosa, porém é bem alta para a textura média e por isso, espera-se uma maior variabilidade nas leituras para essa textura quando da coleta de dados no cano. Para esse nível de saturação a distribuição das leituras é aparentemente normal.

Figura 6 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 20 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média

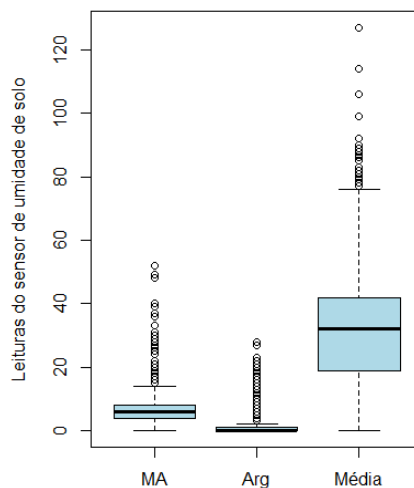


Fonte: Autoria própria (2018)

A figura 7, mostra que ao nível de quarenta por cento de saturação grande variabilidade nas leituras para as texturas argilosa e média sendo que para a argilosa, houve uma maior distribuição para os valores menores que a mediana. A

textura muito argilosa tem uma distribuição com menor variabilidade e aparentemente do tipo normal.

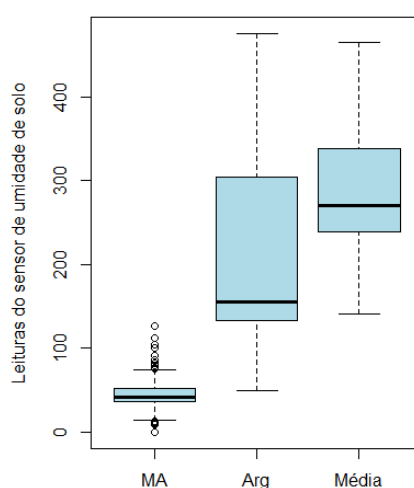
Figura 7 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 40 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média



Fonte: Autoria própria (2018)

Analisando ao nível de sessenta por cento de saturação, ilustrado na figura 8, nota-se grande amplitude nos valores lidos para a textura muito argilosa com uma proporção maior de valores maiores que a mediana. Os valores lidos nas texturas argilosa e média apresentaram menor amplitude na variação dos seus valores.

Figura 8 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 60 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média

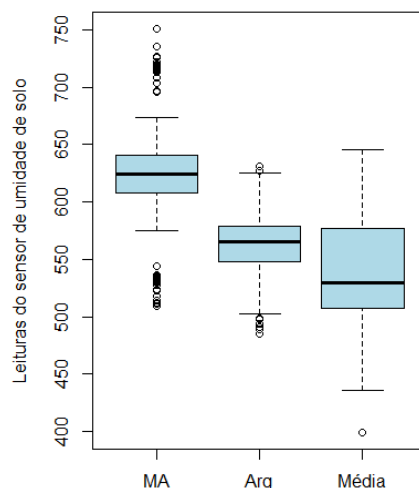


Fonte: Autoria própria (2018)

Ao nível de oitenta por cento de umidade, ilustrado na figura 9, o boxplot da textura argilosa apresentou distribuição normal enquanto a textura muito argilosa e a

média, apresentaram distribuição tendendo a valores maiores e menores que a mediana, respectivamente.

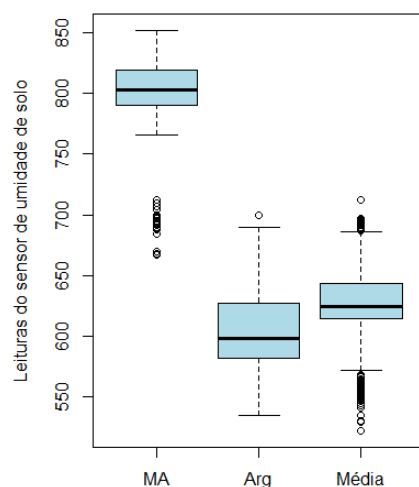
Figura 9 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 80 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média



Fonte: Autoria própria (2018)

A cem por cento de saturação, ilustrada na figura 10, as leituras da textura muito argilosa apresentaram acentuada variabilidade com a maior parte de seus valores tendendo a serem menores que a mediana. As leituras das texturas argilosa e média apresentaram menor variabilidade sendo que a textura média apresentou valores perto do ideal, com pouca variabilidade e com a maior parte de seus valores perto da mediana.

Figura 10 - Boxplot das três texturas de solo estudadas ao nível de 100 por cento de saturação. Da esquerda para direita: MA - muito argilosa, Arg - argilosa e Média – média



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se pelas figuras 5 a 10 que inicialmente a variabilidade das texturas muito argilosa e argilosa foram parecidas e bem baixas enquanto a variabilidade da textura média foi bastante ampla. Enquanto a textura argilosa apresentou variabilidade menor entre os níveis de umidade, exceto a quarenta por cento de umidade, a textura média apresentou menor variabilidade a níveis mais altos de umidade, a textura muito argilosa apresentou variabilidade menor para as umidades mais baixas.

Acredita-se que esse comportamento tenha relação com a quantidade de água necessária para atingir o nível de cem por cento de saturação. Enquanto que para as texturas muito argilosa e argilosa foram usados 520 mL e 507 mL de água, para a textura média foram usados somente 392 mL de água. A tabela 3 mostra quanta água foi usada para cada nível de saturação.

Tabela 3 - Quantidade de água necessária para atingir os níveis de saturação para as texturas estudadas

Nível	Muito argilosa (mL)	Argilosa (mL)	Média (mL)
20	104	101,4	78,4
40	208	202,8	156,8
60	312	304,2	235,2
80	416	405,6	313,6
100	520	507	392

Fonte: Autoria própria (2018)

Embora a variabilidade nas leituras pareça excessiva, é importante considerar que as amostras utilizadas foram homogeneizadas utilizando uma peneira de 2 mm de malha, como executado por Predevello e Loyola, 2005, e, portanto, com uma tendência a criar macroporos com uma variabilidade e frequência maiores do que uma de abertura menor. Ademais devido à natureza do sensor devemos optar entre duas opções ao realizar sua calibração:

- Homogeneizar a amostra entre as trocas de sensores visando evitar que os sucessivos furos provocados pelo sensor criem alterações na estrutura da amostra, porém com a consequência de alterar sua estrutura e, portanto, os valores de leitura. Essa constante homogeneização provocará ainda a expulsão da umidade causada pela constante manipulação da amostra para níveis mais altos de umidade, para este estudo, igual ou acima de 80 por cento de saturação;

Ou

- Não homogeneizar a amostra visando manter a estrutura original criada para evitar que a constante manipulação da amostra cause os empecilhos mencionados anteriormente. Isso, porém causará dificuldades quando a amostra estiver suficientemente úmida para se sustentar e os constantes furos para inserção dos sensores e leitura acabarão por alterar a estrutura original devido aos sulcos criados.

Neste estudo optou-se pela segunda opção mantendo uma boa variabilidade na amostra, porém sem causar alterações na umidade absorvida pela amostra entre a inserção dos sensores para calibração.

Como usaremos os sensores ao longo do cano na coleta de dados, é necessário nos certificarmos que eles sejam suficientemente parecidos de modo que possamos comparar as leituras feitas ao longo do perfil de solo. Realizar essa verificação na fase de calibração garante que os dados coletados nos diferentes níveis da coluna de solos possam ser comparados entre si já que se saberá de antemão que os sensores funcionam de modo análogo.

Um dos testes possíveis de se realizar é o teste de Tukey que compara todos os possíveis pares de médias e se baseia na diferença mínima significativa. Para ser realizado, as observações devem ser independentes dentro e fora dos grupos, os grupos devem ser normalmente distribuídos e sua variância deve ser constante.

Utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk para verificar se os valores de leitura eram normalmente distribuídos, porém para todos os níveis de saturação e texturas a distribuição foi classificada como não normalmente distribuídas. Sendo assim, utilizou-se um teste não-paramétrico para verificar se as leituras possuíam funções de distribuição iguais. A tabela 4 mostra o p-valor resultante do teste de kruskal para os diversos níveis de saturação e solos. Valores menores que um nível de significância de 5 por cento resulta em rejeição da hipótese zero, de que não há diferença significativa entre os sensores.

Tabela 4 - P-valores para os níveis de saturação de zero a cem para as três texturas estudadas

	0	20	40	60	80	100
MA	0,01561	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16
Argilosa	0,1715	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16
Média	2,01e-06	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16	2,2e-16

Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se que somente a zero por cento de saturação e para a textura argilosa os sensores são semelhantes. Porém deve-se notar que para o nível zero de saturação os pontos considerados discrepantes foram os maiores que 1 para essas texturas e, portanto, essa semelhança era esperada.

Considerando a diferença entre as leituras obtidas pelos sensores na grande maioria dos níveis de saturação e texturas, a coleta de dados no cano utilizará as médias de leituras para os cálculos seguintes. Embora durante o processo de calibração notou-se que os valores de desvio padrão e desvio médio das leituras para cada nível de calibração e sensor e na mesma repetição, mantiveram-se abaixo de 9% e 5% respectivamente, melhorando conforme o nível de umidade medido, chegando a menos de 5% e 3% respectivamente. Considerando o custo para sua construção, para níveis de saturação acima de 25% para as texturas argilosa e média e de 30% para a textura muito argilosa, os sensores apresentaram valores satisfatórios de leitura.

Devido aos valores dos sensores de umidade do solo serem afetados pelos diversos fatores mencionados anteriormente, optou-se por, nesse estudo, utilizar as médias das leituras de modo a prover uma curva de calibração que representasse o nível de umidade do solo lido, mas sem desconsiderar os fatores atuantes dos substratos analisados. Também se optou por realizar a calibração dos sensores de umidade de solo com base em porcentagens do nível máximo de saturação, considerando que durante a coleta de dados no cano a umidade provavelmente se aproximará ao de saturação.

Utilizou-se o método padrão de estufa para validar a correlação entre a umidade obtida pelo método padrão e a leitura feita pelos sensores de umidade de solo. Para cada amostra e nível de saturação do solo foram realizadas três medições para obtenção de uma possível função que representasse essa relação.

A tabela 5 ilustra os dados utilizados para obtenção da umidade da amostra utilizada pelo método padrão de estufa para os níveis de umidade relativos pretendidos de 100 por cento de saturação.

Para se obter os 100 por cento de saturação utilizou-se três recipientes plásticos de mesmo volume e dimensões para acomodar um quilo de solo. Pesou-se o recipiente para obter sua tara e um quilo de solo seco. Adicionou-se lentamente água até que o solo apresentasse aspecto de saturação com uma fina lâmina de

água na superfície e superfície brilhante. Neste momento media-se a quantidade restante de água da inicial, de 1 litro, e pesava-se o recipiente com o solo úmido.

Se no período de meia hora o solo permanecesse com o mesmo aspecto, o volume em mililitros utilizado era anotado para servir como referência para o necessário para atingir o nível de saturação desejado. Caso, nesse período, fosse necessário adicionar água, aguardava-se meia hora novamente. Utilizou-se essa orientação devido à semelhança que a água seria inserida no cano para a coleta de dados.

Tabela 5 - Tabela ilustrando as médias de umidade dos níveis de saturação obtidas pelo método padrão de estufa para as três texturas estudadas

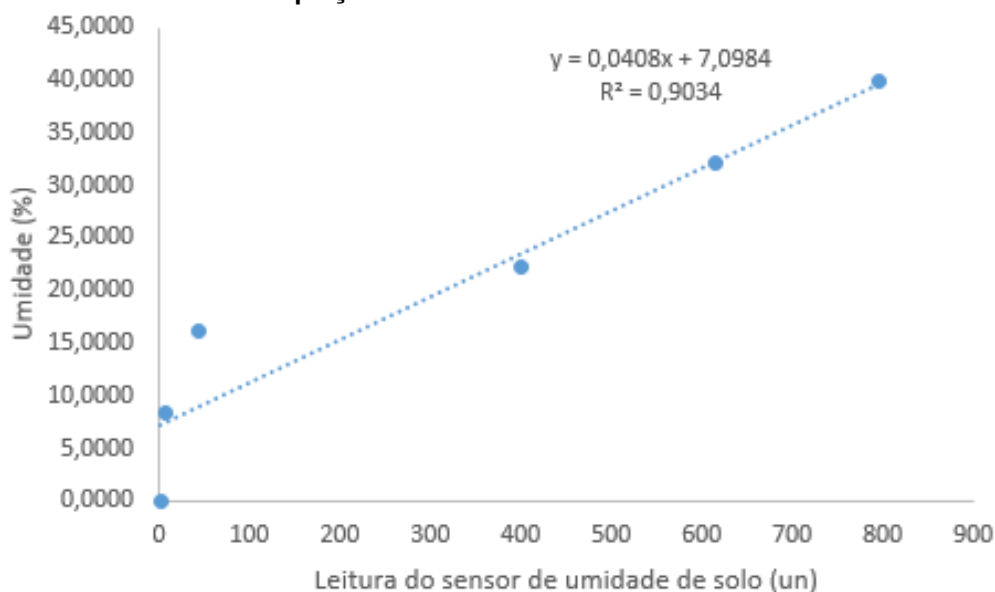
Nível de saturação (%)	Muito argilosa	Argilosa	Média
20	8,41	8,76	5,49
40	16,05	14,17	11,43
60	32,13	22,01	16,27
80	32,13	30,08	24,27
100	39,53	42,1	29,76

Fonte: Autoria própria (2018)

Na tabela 5 encontram-se as médias dos valores lidos para cada nível percentual de umidade e suas respectivas curvas de calibração para as três texturas analisadas: muito argilosa, argilosa e média. Os valores médios de porcentagem de umidade foram obtidos pela média da porcentagem de umidade das amostras extraídas quando da calibração dos sensores e a média das leituras dos sensores pelo valor médio lido pelos sensores em cada faixa de umidade.

A figura 11 mostra a linha de tendência para a textura muito argilosa como sendo linear e tendo R², coeficiente de determinação, bastante alto, 0,9034, e, coeficiente de correlação, 0,9504, indicando uma forte correlação positiva apesar de sua equação ($0,0408 \cdot x + 7,0984$) subestimar valores perto de 15 por cento de umidade e superestimar valores perto de 25 por cento de umidade. As leituras para os outros níveis de umidade fornecem valores perto dos reais obtidos por método padrão de estufa.

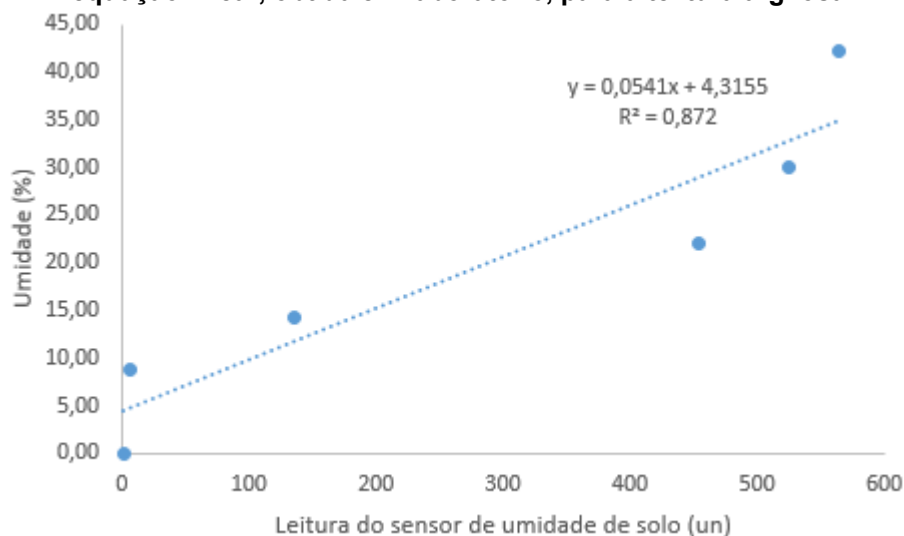
Figura 11 - Gráfico de dispersão dos sensores para a textura muito argilosa e sua respectiva equação linear obtida em laboratório



Fonte: Autoria própria (2018)

Embora a linha de tendência obtida para a textura argilosa, ilustrada na figura 12, tenha tido um R2 alto, 0,8692, e forte coeficiente de correlação positiva, de 0,9338, a equação obtida superestima os valores de umidade para as leituras feitas para os níveis de saturação de umidade de 20, 40 e 100 por cento e subestima para 60 e 80 por cento.

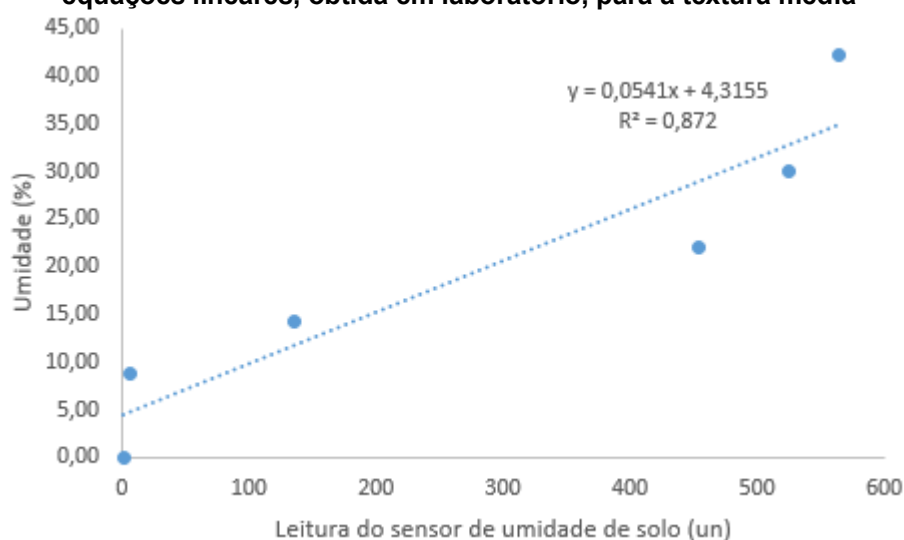
Figura 12 - Gráfico de dispersão dos sensores de umidade de solo com sua respectiva equação linear, obtida em laboratório, para a textura argilosa



Fonte: Autoria própria (2018)

De modo similar a linha de tendência da textura argilosa, a equação obtida pela linha de tendência para a textura média e ilustrada na figura 13 tende a superestimar as porcentagens de umidade para os níveis de saturação de 20, 80 e 100 e subestimar os níveis 40 e 60.

Figura 13 - Gráfico de dispersão dos sensores de umidade do solo com suas respectivas equações lineares, obtida em laboratório, para a textura média



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se que os valores de R2 para as três texturas foram elevados, apresentando valores de 0,9034 para a muito argilosa, 0,8692 para a argilosa, e 0,8809 para a média. Outras linhas de tendência foram testadas e embora também tenham resultado em R2 altos, as linhas mostradas resultaram em coeficientes de determinação (R2) superiores.

4.2 Coleta em Laboratório

Notar que o valor a ser considerado para a correlação com a porcentagem de umidade do substrato deve ser a média das leituras dos dois pinos visto que o caminho que a eletricidade utilizará será em sentidos opostos e poderá variar de acordo com os micro e macro poros existentes entre os dois pinos do sensor de umidade de solo.

Os sensores de umidade de solo serão denominados daqui por diante de acordo com a profundidade que estiverem no cano, de 1, para o sensor mais superficial, a 10, para o sensor mais profundo. Ocorreram alguns períodos com perda de dados de leitura pontuais dos sensores, porém não causaram perda de

informações importantes para a realização deste estudo. As figuras 14 a 16 ilustram o período completo das coletas de dados das três texturas estudadas.

Figura 14 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura muito argilosa

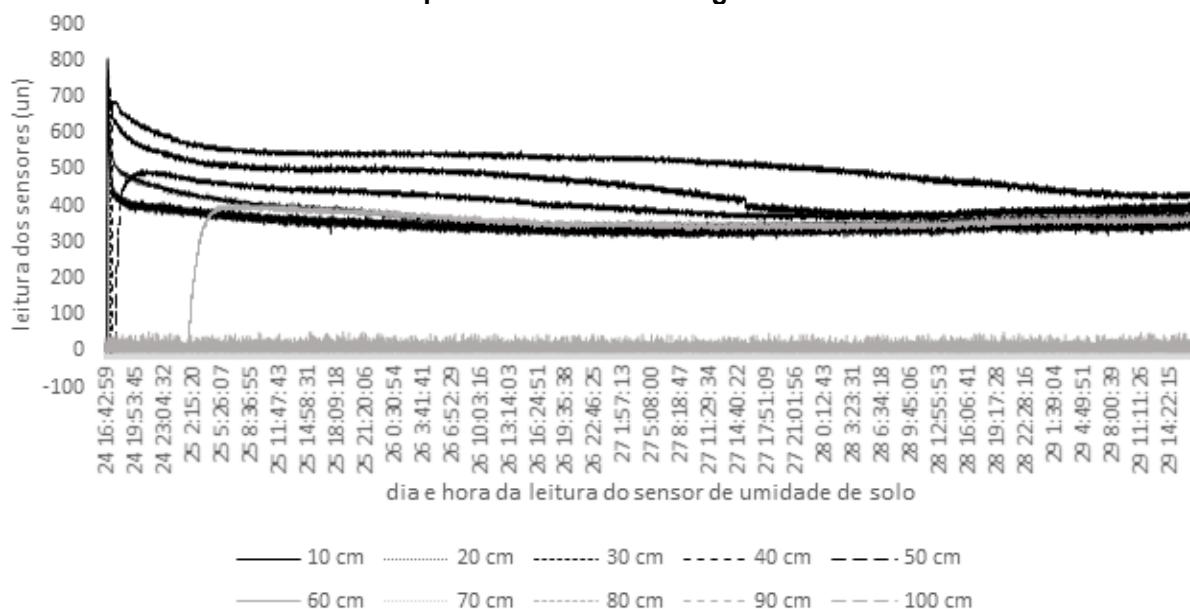


Figura 15 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura argilosa

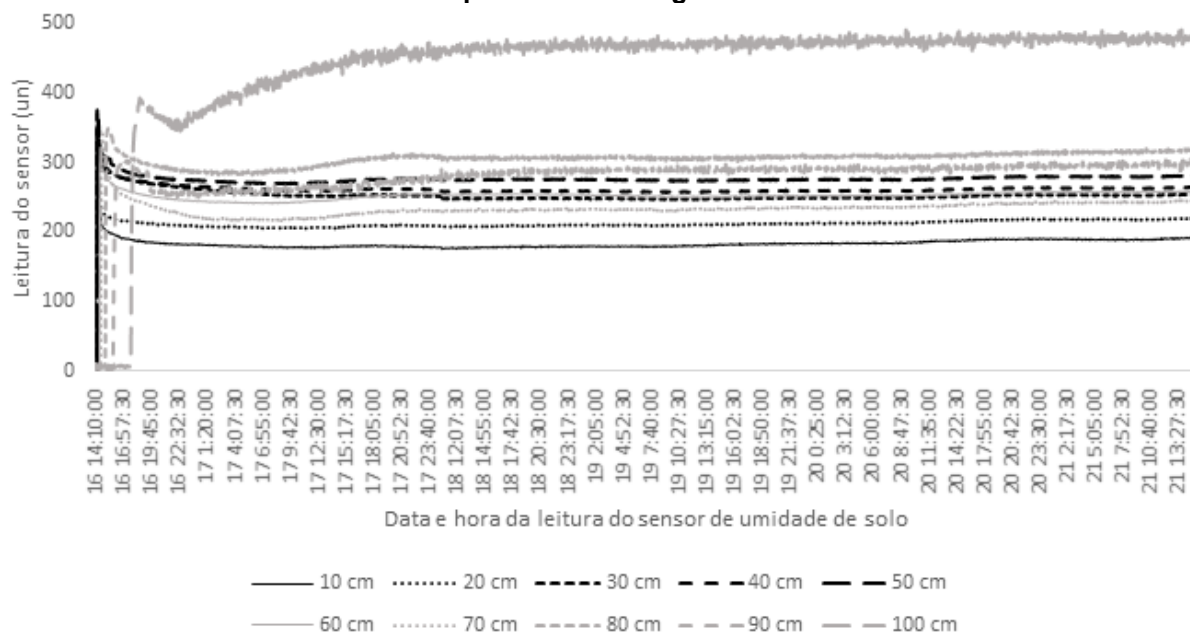
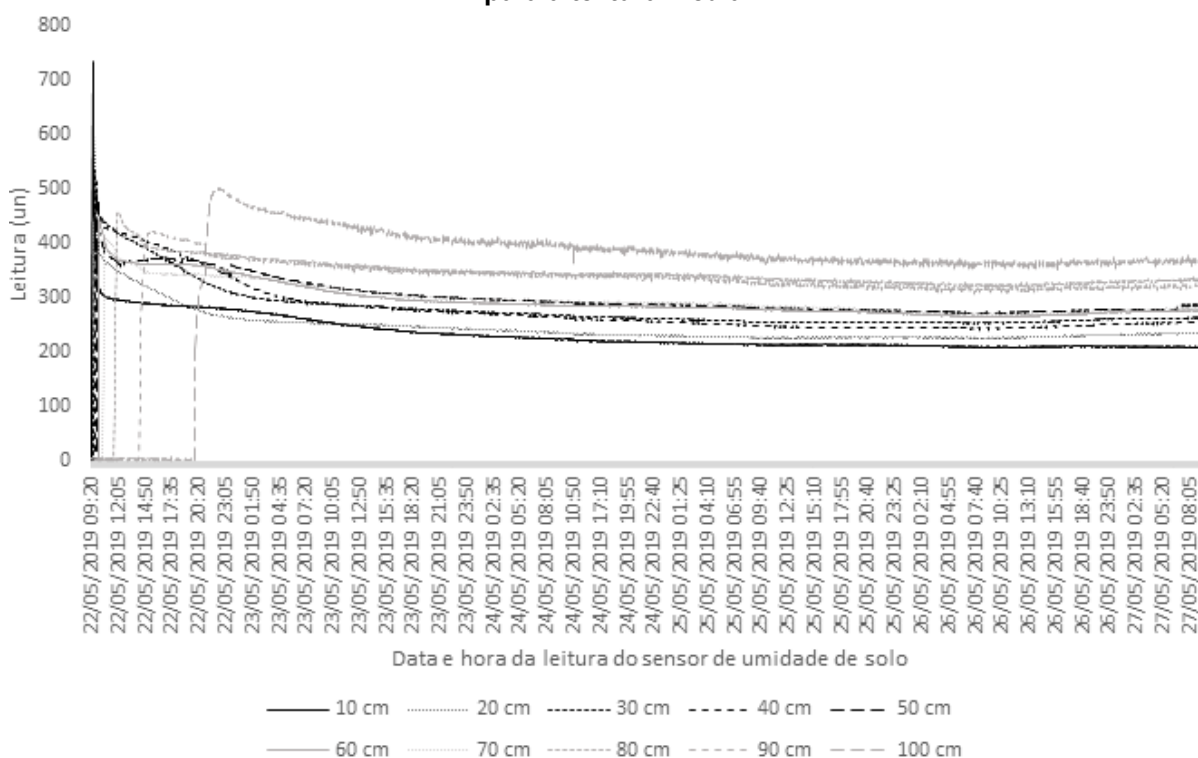


Figura 16 - Valores de leitura dos sensores de umidade durante o período de coleta de dados para a textura média



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se que a frente de molhamento é detectada nas três texturas, ocorrendo um grande aumento nas leituras dos sensores quando a umidade chega nesses níveis e depois baixa enquanto a frente de molhamento segue para os níveis inferiores. Mesmo por essa imagem geral, é possível notar que a velocidade de infiltração diminui conforme aumenta a profundidade da coluna de solo. É notável também a variabilidade de umidade nas diversas camadas assim como a distinção dos picos de umidade para as três texturas.

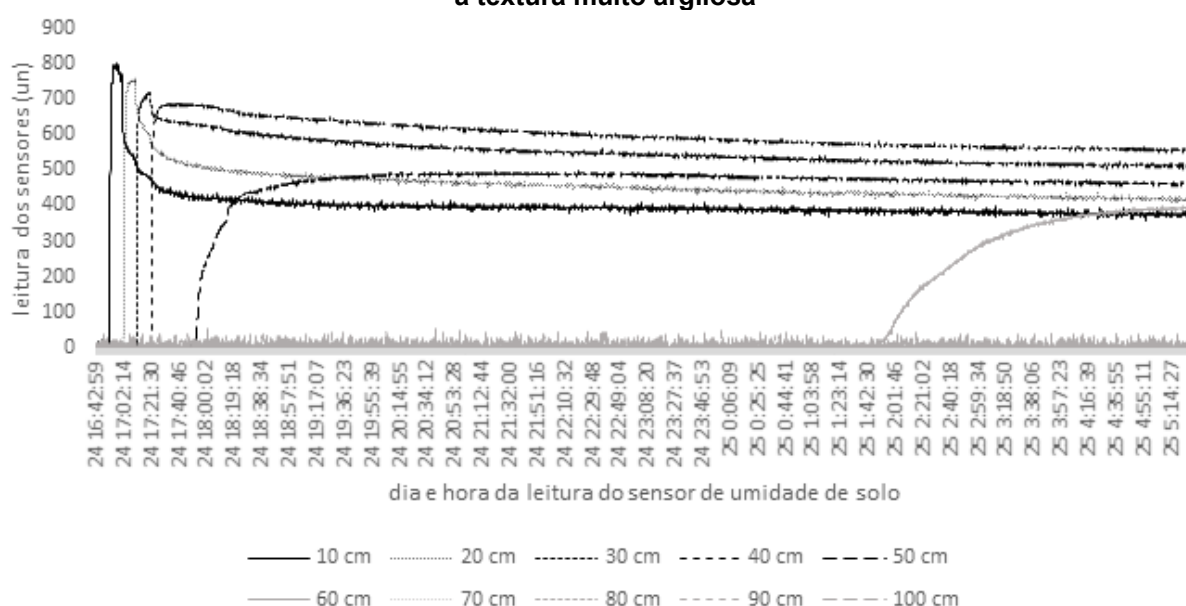
O comportamento depois do término de inserção da água é similar nas texturas muito argilosa e média, porém diferenciada para a textura argilosa. Nas duas texturas mencionadas anteriormente, a umidade tende a se equilibrar para o mesmo nível nas diversas camadas que a umidade chegou. No caso da textura argilosa, a umidade se concentrou ao nível do sensor de maior profundidade, tendendo a altas acumulações perto do fim do segundo dia de coleta de dados. Isso provavelmente indica uma taxa de infiltração maior para essa textura e que a água se infiltraria para níveis mais profundos se o perfil de solo se estendesse para maiores profundidades. Não houve indícios de vazamento de água na parte inferior do sistema de coleta, entretanto.

Considerando o substrato dentro do cano e a umidade entre os sensores como homogêneos, pode-se estimar a taxa de infiltração média entre os sensores baseando-se nas leituras dos sensores. Considerou-se no cálculo da taxa de infiltração:

- Distância percorrida como a distância entre os sensores ou entre a superfície da coluna de solo. Para esse estudo, dez centímetros;
- Horário inicial como o início da coleta de dados, que é também o início da inserção de água, ou o horário que o sensor anterior registrou a umidade;
- Horário final como o horário que o próximo sensor detectou umidade. O horário que a umidade chega no sensor 10 será usado como horário final da taxa de infiltração do trecho entre o sensor 9 e 10. E casos como o da textura muito argilosa que a umidade chega somente até o sensor 6, somente será possível estimar a taxa de infiltração do trecho entre a superfície e o sensor um até o trecho entre os sensores 5 e 6.

A figura 17 ilustra os momentos iniciais da coleta de dados para a textura muito argilosa. Pode-se visualizar os horários que a frente de molhamento chegou ao nível das profundidades de 10 a 60 cm, possibilitando o cálculo da taxa de infiltração para as camadas 0-10, da superfície até a profundidade 10 cm, e até a profundidade 50-60 cm, do sensor 5 ao 6.

Figura 17 - Treze horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura muito argilosa



Fonte: Autoria própria (2018)

Com início da coleta de dados no dia 11 de maio de 2019 às 09:55, as taxas de infiltração estimadas estão mostradas na tabela 6:

Tabela 6 - Taxas de infiltração na primeira rodada da textura muito argilosa

Trecho	Hora início	Hora final	Intervalo (hh:mm:ss)	Velocidade infiltração (cm min-1)
0-10	09:55:09	10:05:23	00:10:14	1
10-20	10:05:23	10:16:50	00:11:27	0,91
20-30	10:16:50	10:30:51	00:14:01	0,71
30-40	10:30:51	10:46:14	00:15:23	0,67
40-50	10:46:14	11:31:00	00:44:46	0,23
50-60	11:31:00	20:00:21	08:29:21	0,02

Fonte: Autoria própria (2018)

Como esperado, nota-se uma gradual diminuição na taxa de infiltração de água conforme aumenta a profundidade da coluna de solo. Por meio da leitura dos sensores também é possível calcular volume de água médio contido no trecho ao nível dos sensores para as diferentes etapas da coleta de dados. Neste estudo optou-se pelo momento das duas coletas amostrais, uma, 24 horas após o término de inserção da água, e a segunda, depois de 96 horas da primeira coleta.

Tabela 7 - Dados necessários para obtenção da densidade aparente dos substratos. Texturas: MA – Muito argilosa, Arg – Argilosa, Méd - Média

	Peso seco (g)	Peso água (g)	Peso úmido (g)	D _{aparente} (g cm-3)
MA	460,43	6,16	466,59	0,70
Arg	548,27	3,3	551,57	0,83
Méd	523,9	5,58	529,48	0,79

Fonte: Autoria própria (2018)

Considerou-se para esse estudo que o volume calculado para cada nível dos sensores como sendo o correspondente ao volume do cilindro de raio 10 centímetros e altura 10 centímetros, utilizando a equação 5:

Equação 5 - Fórmula para obtenção do volume de um cilindro

$V = \text{Pi} \cdot r^2 \cdot h$, sendo:

V – Volume da subseção do cilindro (cm³)

r – Raio (cm)

h – Altura (cm)

$$V = \text{Pi} \cdot 102 \cdot 10 = 3141 \text{ cm}^3$$

Considerando a densidade aparente dos substratos estudados, e o volume calculado anteriormente, cada camada de substrato no cano, ou a massa substrato, ocuparia 3.141 centímetros³ e para as densidades aparentes calculadas, pesaria $3141 \cdot 0,70 = 2185,04\text{g}$ para o substrato de textura muito argiloso, $3141 \cdot 0,83 = 2601,89\text{g}$ para a textura argilosa e $3141 \cdot 0,79 = 2486,24$ gramas para a textura média. Esses valores serão usados mais adiante para estimar o volume de água detectada pelos sensores de umidade para o volume ocupado pela seção do cilindro indicada anteriormente.

Pode-se calcular a lâmina de água contida nas subseções de cada sensor utilizando a equação 6:

Equação 6 - Fórmula para obtenção do volume de água através da porcentagem de umidade gravimétrica

Massa água = $\text{Massa substrato} / 100 \cdot \% \text{umidade}$, sendo:

Massa água – Peso da lâmina de água em gramas (g)

Massa substrato – Peso do substrato calculado anteriormente em gramas (g)

%umidade – Porcentagem de umidade gravimétrica (%)

Para a textura muito argilosa, temos os volumes de água detectados pelos sensores na tabela 8, com temperatura e umidade ambiente iniciais 24°C e 48,4%, respectivamente:

Tabela 8 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura muito argilosa

(continua)

Profundidade (cm)	24 horas			96 horas		
	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)
5-15	357	21,66	473	354	21,54	471
15-25	394	23,17	506	373	22,32	488
25-35	501	27,54	602	389	22,97	502
35-45	540	29,13	637	431	24,68	539
45-55	442	25,13	549	403	23,54	514
55-65	386	22,85	499	366	22,03	481

Tabela 8 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura muito argilosa

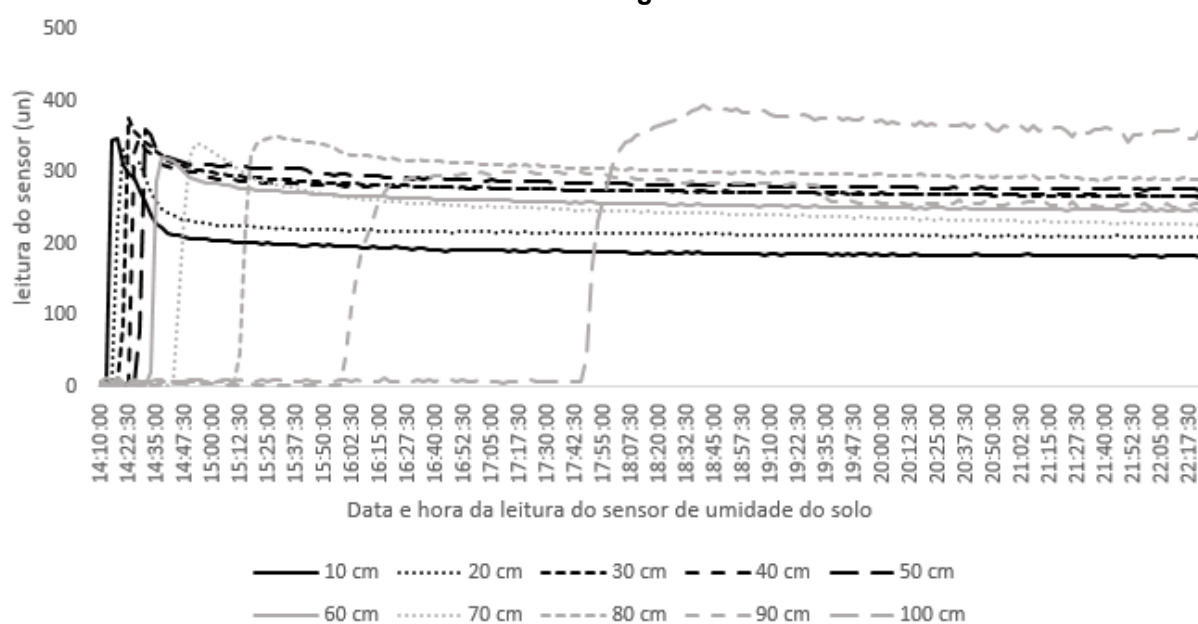
(conclusão)						
Profundidade (cm)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)
65-75	0	7,1	155	0	7,10	155
75-85	0	7,1	155	0	7,10	155
85-95	0	7,1	155	0	7,10	155
95-105	0	7,1	155	0	7,1	155
Total			3887			3616

Fonte: Autoria própria (2018)

Com base nas leituras dos sensores, nota-se uma diferença entre a primeira e segunda amostras de aproximadamente 271 mL no caso da calculada segundo a leitura dos sensores. Um volume bem menor - 1883mL - que o evaporado do início da coleta de dados até a retirada da primeira amostra

A figura 18 ilustra as primeiras oito horas da coleta de dados para a textura argilosa, com temperatura e umidade ambiente iniciais 21,6°C e 68,8%, respectivamente. Umidade inicial do solo de 8,4%. Acredita-se que a queda brusca na leitura do sensor 9 perto das 19 horas e 35 minutos possa ter sido causada pelo colapsamento de parte da coluna de solo neste nível já que a leitura dos outros sensores continuou como esperado.

Figura 18 - Oito horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura argilosa



Fonte: Autoria própria (2018)

Para a primeira rodada da textura argilosa, com início da coleta de dados no dia 16 de maio de 2019 às 14:11, as velocidades de infiltração estimadas foram mostradas na tabela 9:

Tabela 9 - Velocidade de infiltração na primeira rodada da textura argilosa

Trecho	Hora início	Hora final	Intervalo (mm:ss)	Velocidade infiltração (cm min ⁻¹)
0-1	14:11:56	14:15:03	03:07	3,33
1-2	14:15:03	14:18:14	03:11	3,33
2-3	14:18:14	14:21:50	03:36	3,33
3-4	14:21:50	14:25:05	03:15	3,33
4-5	14:25:05	14:29:18	04:13	2,5
5-6	14:29:18	14:34:43	05:25	2
6-7	14:34:43	14:45:21	10:38	1
7-8	14:45:21	15:14:09	28:48	0,36
8-9	15:14:09	16:01:37	47:28	0,21
9-10	16:03:37	17:49:07	01:47:30	0,09

Fonte: Autoria própria (2018)

Cogita-se que a velocidade de infiltração calculada para as 3 texturas, principalmente para as camadas mais superficiais, tenha como um dos fatores, a distribuição dos macroporos da estrutura da coluna de solo. Como citado por Edvane et al (1999, p. 2083), “os macroporos são funcionais quando o solo está muito próximo da saturação, sendo capazes de transportes preferenciais de água e substâncias químicas de forma rápida durante o processo de infiltração”.

Para a textura argilosa, temos os seguintes volumes de água detectados pelos sensores na tabela 10.

Tabela 10 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura argilosa

(continua)

Sensor	24 horas			96 horas		
	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)
1	184	13,23	344	190	13,52	352
2	207	14,33	373	218	14,86	387
3	252	16,49	429	255	16,64	433
4	259	16,83	436	264	17,26	449
5	272	17,45	454	281	17,69	460
6	248	16,3	424	258	16,92	440
7	220	14,96	389	247	16,16	420

Tabela 10 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura argilosa

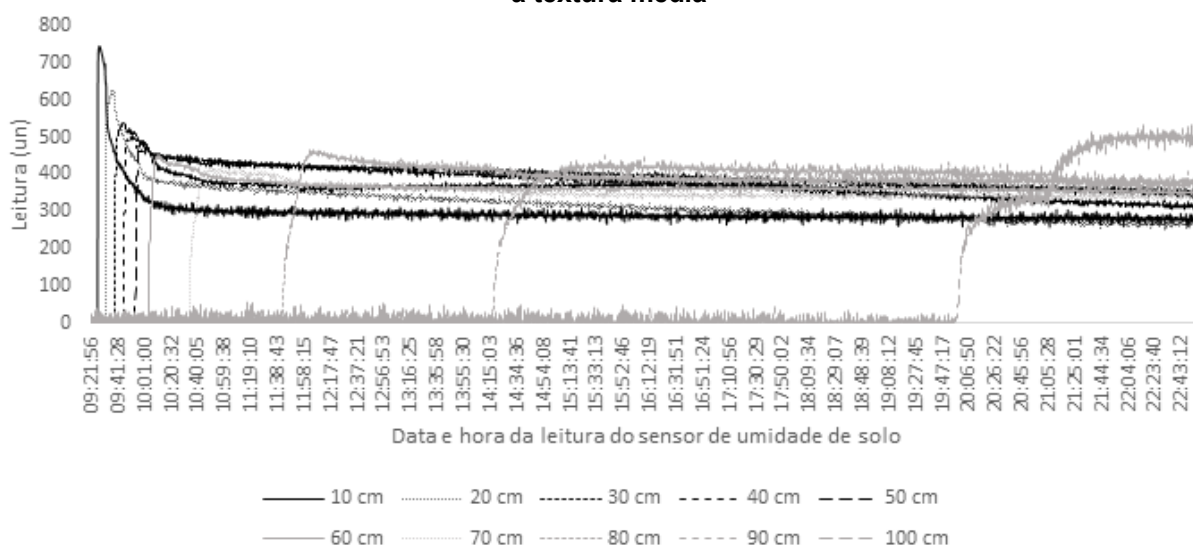
(conclusão)						
24 horas				90 horas		
Sensor	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)
8	301	18,84	490	317	19,61	510
9	277	17,69	460	303	18,75	488
10	399	23,55	613	475	27,29	710
Total			4415			4649

Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se uma diferença do volume de água inserido no sistema de coleta de 1355 mL para o volume registrado no horário da retirada da primeira coleta. Considerando as 24 horas de intervalo entre o término da inserção de água no sistema de coleta de dados, resulta em uma taxa de evaporação, neste período, para a coluna inteira de solo de 56,45 mL hora-1. Com base nas leituras dos sensores, nota-se um aumento de umidade entre a primeira e segunda amostras de aproximadamente 234 mL no caso da calculada segundo a leitura dos sensores.

A figura 19 ilustra as primeiras treze horas da coleta de dados para a textura média.

Figura 19 - Treze horas iniciais da coleta de dados para as profundidades de 10 a 100 cm para a textura média



Fonte: Autoria própria (2018)

Para a primeira rodada da textura média, com início da coleta de dados no dia 22 de maio de 2019 às 09:21, as permeabilidades estimadas foram as mostradas na tabela 11:

Tabela 11 - Taxas de infiltração na primeira rodada da textura média

Trecho	Hora início	Hora final	Intervalo (mm:ss)	Velocidade infiltração (cm min-1)
0-1	09:21:05	09:26:35	04:40	2,5
1-2	09:26:35	09:32:07	05:31	2
2-3	09:32:07	09:38:50	06:43	1,67
3-4	09:38:50	09:45:53	07:03	1,43
4-5	09:45:53	09:54:18	08:25	1,25
5-6	09:54:18	10:04:25	10:07	1
6-7	10:04:25	10:34:14	29:49	0,34
7-8	10:34:14	11:43:14	1:09:49	0,14
8-9	11:43:14	14:17:45	02:34:31	0,06
9-10	14:27:45	19:59:34	05:41:49	0,03

Fonte: Autoria própria (2018)

Temos na tabela 12 a diferença registrada pelos sensores entre os dois períodos de coleta das amostras para a textura média. Com base nas leituras dos sensores, nota-se uma diferença total entre a primeira e segunda amostras de aproximadamente 249 mL segundo a leitura dos sensores. Para o período de término da inserção de água até o horário de retirada da primeira amostra houve uma diminuição do volume hídrico de 2579 mL, sendo o maior volume registrado entre as três texturas.

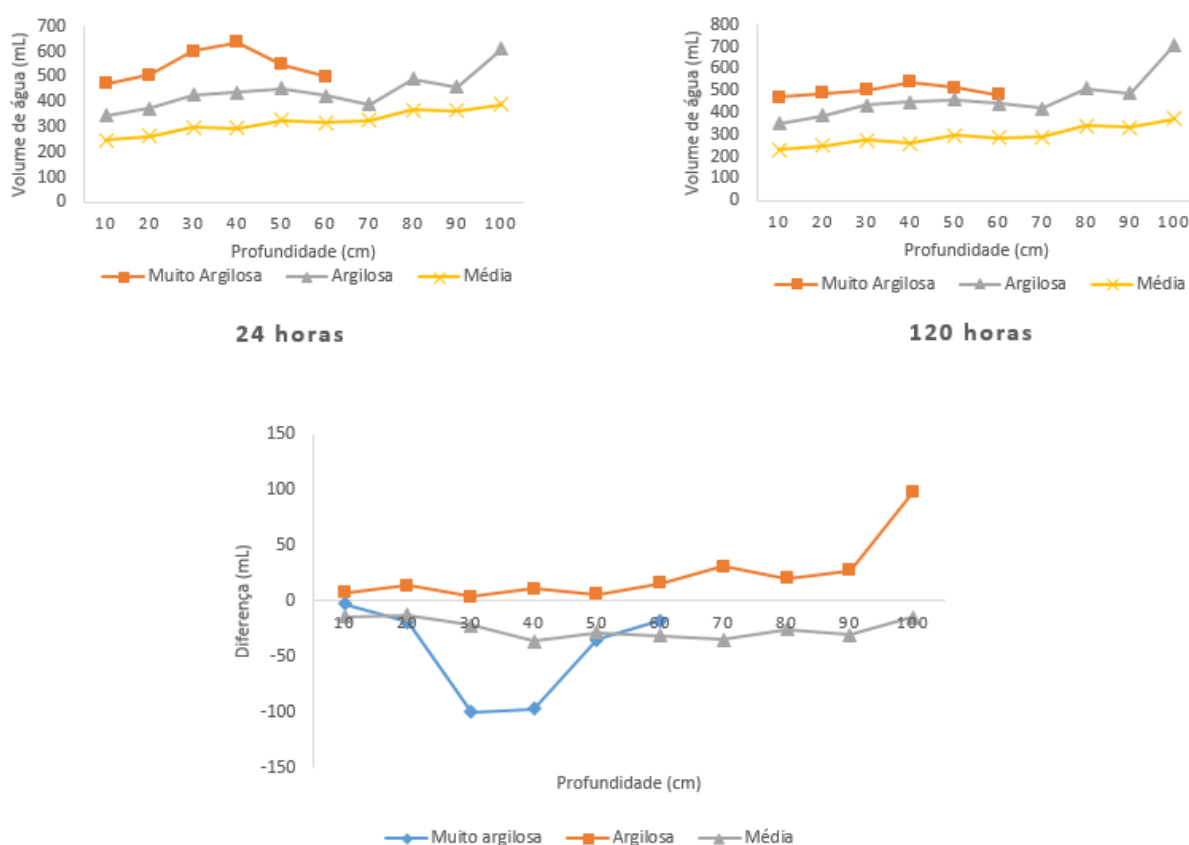
Tabela 12 - Volumes de água obtidos pelas leituras dos sensores no horário de retirada da primeira e segunda amostras da textura média

Sensor	24 horas			96 horas		
	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)	Leitura (un)	%umidade	Volume (mL)
1	234	9,88	246	219	9,31	232
2	253	10,61	264	240	10,11	251
3	288	11,94	297	265	11,06	275
4	287	11,90	296	249	10,45	260
5	319	13,11	326	289	11,97	298
6	310	12,77	318	277	11,52	286
7	319	13,11	326	282	11,71	291
8	362	14,75	367	335	13,72	341
8	362	14,75	367	335	13,72	341
9	358	14,60	363	326	13,38	333
10	386	15,66	389	370	15,05	374
Total			3191			2941

Fonte: Autoria própria (2018)

Utilizou-se os dados constantes nas tabelas 8, 10 e 12 para se obter as diferenças entre o volume de água registrado em cada subseção do sistema de coleta para verificar possíveis alterações na umidade. Na figura 18 estão ilustrados, para melhor visualização, os volumes registrados em cada subseção do sistema de coleta, tanto quando da retirada da primeira amostra quanto da segunda, e a diferença encontrada entre o volume registrado para cada subseção do sistema de coleta. Verifica-se que embora o volume total entre a retirada da primeira e segunda amostras quando da coleta de dados no cano para as três amostras tenha sido muito próxima, a distribuição dessa diferença foi diferenciada como ilustrado pela figura 20.

Figura 20 - Diferença de volume entre a retirada da primeira e segunda amostras quando da coleta de dados no cano para as três texturas pela coleta de dados dos sensores de umidade de solo



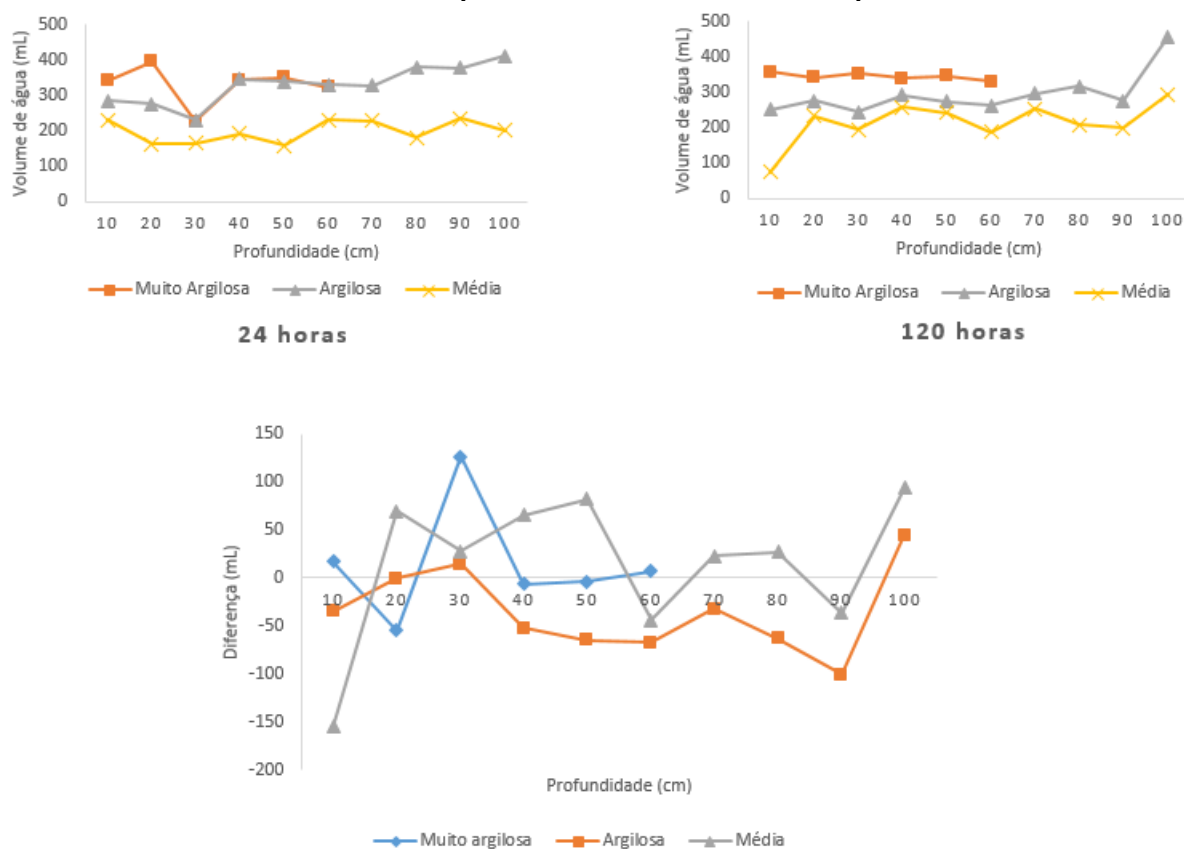
Fonte: Autoria própria (2018)

Acredita-se que o comportamento demonstrado para a diferença de volume de umidade entre o horário de retirada da primeira e segunda amostras tenha como uma das causas o processo de equilíbrio de forças no sistema. Para a textura muito argilosa, a umidade se concentrou nas camadas de profundidade 30 e

40 cm para o horário de retirada da primeira amostra e, foram nessas camadas que houve a maior diminuição no volume de umidade. Para a textura argilosa, a camada com maior acréscimo de umidade foi a de 100 cm, a mais profunda, também a camada com maior acúmulo de umidade. A textura média foi a que teve a distribuição mais uniforme e, portanto, a diferença foi também a menor entre as três texturas estudadas.

A diferença entre a umidade calculada das subseções da primeira e segunda amostras pelo método padrão de estufa apresentou-se de modo diferente das calculadas com base nas leituras registradas pelos sensores e estão ilustradas na figura 21.

Figura 21 - Diferença de volume entre a retirada da primeira e segunda amostras quando da coleta de dados no cano para as três texturas – método padrão de estufa



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se diferenças na umidade de 126 mL para mais, a 30 cm para a textura muito argilosa, até 155 mL para menos, para a camada 10 cm da textura média. Nota-se o mesmo comportamento buscando o equilíbrio de força no sistema, com a umidade se distribuindo mais uniformemente, entretanto, partindo de valores iniciais diferentes.

O comportamento nas camadas mais superficiais foi diferente entre as leituras feitas pelos sensores de umidade de solo e a umidade aferida pelo método padrão. Cogitou-se que isso possa ter ocorrido por causa do crescente desvio padrão encontrado nas leituras registradas durante a medição dentro do cano. Os desvios padrões calculados com base nas leituras dos sensores durante a coleta de dados vão desde 9,98, para as camadas mais superficiais, a 118, para as camadas mais profundas.

Tabela 13 - Desvios padrões gerais dos sensores para as três texturas quando da coleta de dados no cano

Sensor	Muito argilosa	Argilosa	Média
1	28,63	9,98	33,74
2	41,80	9,41	34,15
3	67,66	13,41	43,49
4	62,36	13,17	50,17
5	52,91	15,19	37,80
6		16,06	38,97
7		19,86	40,41
8		31,37	54
9		47,79	73,42
10		90,05	118,39

Fonte: Autoria própria (2018)

Porém, a diferença percentual entre a umidade encontrada pelo método padrão e a calculada pela leitura dos sensores de umidade de solo explica somente parte dessa diferença nos dados. Também foi registrado um comportamento oposto para os teores de umidade calculados entre o método padrão e o calculado para as leituras dos sensores de umidade de solo. Para a textura muito argilosa, foi registrado um pequeno aumento (32 mL) na umidade entre o horário da primeira e segunda amostras pelos teores calculados pelo método padrão enquanto o calculado pelas leituras dos sensores de umidade foi registrado um decréscimo de 271 mL. Para a textura argilosa, pelo método padrão foi calculada uma diminuição de 89 mL e pelo calculado das leituras dos sensores, um aumento de 235 mL. Para a textura média, pelo método padrão, um aumento de 155 mL, e pelas leituras, uma diminuição de 249 mL. Por causa desse comportamento díspare, não foi possível comparar a taxa de evaporação entre os dois métodos. Cogita-se que esse comportamento tenha relação com os tipos de solo analisados. Para as 3 texturas,

foi observada uma diminuição de 1 mm na superfície da coluna de solo em todo o seu raio e uma inclinação de aproximadamente 5 graus dos 5 sensores de umidade de solo mais superficiais. Isso poderia explicar a diferença encontrada nos teores de umidade calculados.

Figura 22 - Superfície após o despejamento da umidade

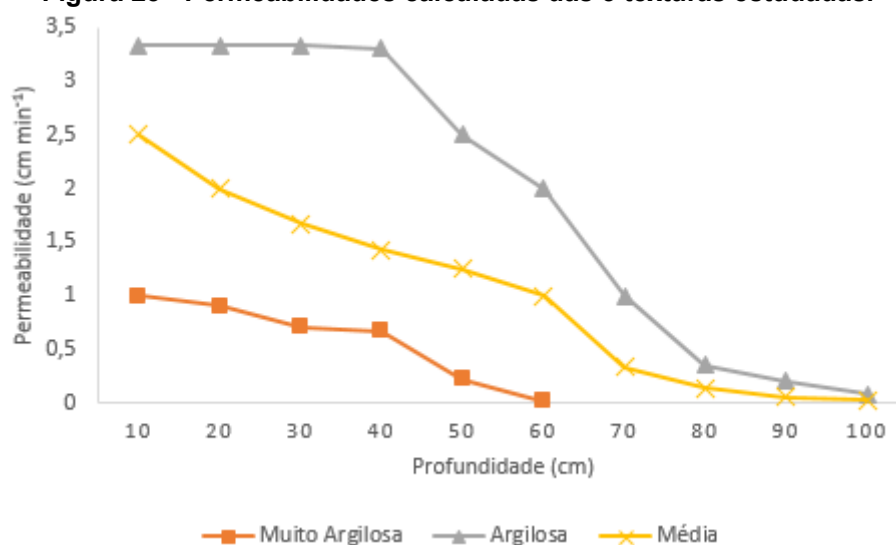


Fonte: Autoria própria (2018)

Outra possibilidade para essa diferença no comportamento e nos teores de umidade encontrados pode ser o encontrado por Prevedello e Loyola, 2005, para as camadas estratificadas, em que a umidade baixou rápido e formou uma crosta superficial que iniciou uma forte resistência ao fluxo de água dessas colunas. Isso poderia explicar o aumento nos teores de umidade registrados entre o horário de retirada da primeira e da segunda amostras e as diferenças encontradas entre os teores de umidade calculados pelas leituras dos sensores e de umidade e pelo método padrão.

Embora, conforme mostra a figura 23, a permeabilidade decresça conforme a profundidade aumenta, isso não significa necessariamente que a capacidade de infiltração das camadas mais profundas seja diferente das mais superficiais. Esse decréscimo da permeabilidade tem esse comportamento para os tipos de solo estudados inserindo a quantidade de água utilizada. À medida que a água se distribui na coluna sem a entrada constante de um volume de água para manter a coluna saturada não se consegue obter a permeabilidade do solo em condição de saturação. Assim com uma menor pressão de coluna de água constante no sistema determina-se a velocidade de movimentação da água naquela condição de lâmina de água aplicada. Contudo demonstra-se que é possível calcular distintas velocidades de infiltração de água em solos com texturas distintas e com condições de variação de água disponível distintas.

Figura 23 - Permeabilidades calculadas das 3 texturas estudadas.



Fonte: Autoria própria (2018)

Nota-se que as três texturas tiveram velocidades de infiltração diferenciadas sob o mesmo processo de coleta de dados. A textura argilosa foi a que apresentou o pico de velocidade de infiltração mais alta sendo registrado 3,3 cm min⁻¹ para as quatro primeiras camadas da coluna de solo, decrescendo abruptamente para as demais. O pico de menor velocidade de infiltração foi registrado para a textura muito argilosa, com velocidades máximas de 1 cm min⁻¹. Os valores calculados de velocidade de infiltração para a textura média ficaram entre as duas.

Como esperado, a capacidade de retenção também foi diferenciada para as três texturas. Como verificado por Kiehl, 1979, Silva, 1986, Carvalho, Figueiredo e Costa, 1999, solos de textura mais fina, para todas as tensões, possuem maior retenção de água. A textura que apresentou a maior capacidade foi a muito argilosa, com valores entre 622 e 842 mL armazenados por subseção. A menor capacidade de retenção foi registrada para a textura média, com valores entre 304 e 477 mL por subseção. A capacidade registrada para a textura argilosa está no intervalo entre as duas mencionadas, com valores entre 453 e 645 mL por subseção. É importante notar que os volumes registrados nas subseções mais profundas, de 511 mL para a textura média, e de 806 mL e 934 mL, para a textura argilosa, devem ser considerados com cautela, já que o sistema de coleta é fechado em sua parte inferior, e, portanto, não deixa que a umidade se infiltre para níveis mais profundos, alterando a capacidade de retenção de água para cima.

A taxa de evaporação foi calculada considerando a umidade e o substrato constante em cada subseção do sistema de coleta de dados. A taxa de evaporação total foi calculada com base na leitura dos sensores para o período de coleta de dados das 3 texturas está ilustrada na tabela 14. Valores negativos resultam de volumes iniciais maiores que os finais e devem, portanto, ser desconsiderados.

Cogita-se que os desvios padrões calculados constantes na tabela 13 possam ter influenciado na taxa de evaporação negativa calculada para a textura argilosa.

Tabela 14 - Taxas de evaporação calculadas para o volume total da coluna de solo para as 3 texturas estudadas

Textura	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª (mL)	Taxa evaporação (mL dia-1)
Muito argilosa	3887	3616	67,75
Argilosa	4415	4649	-58,70 ^(*)
Média	3191	2941	62,35

Fonte: Autoria própria (2018)

As taxas de evaporação por subseção para a textura muito argilosa estão ilustradas na tabela 15. Elas foram calculadas subtraindo o volume calculado para o horário de coleta da segunda amostra do volume calculado par o horário de coleta da primeira amostra. O resultado dessa subtração foi dividido por 4, tempo em dias decorridos entre a retirada da primeira e segunda amostras.

Tabela 15 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura muito argilosa calculadas pelas leituras dos sensores de umidade de solo

Profundidade (cm)	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª amostra (mL)	Taxa evaporação (mL dia-1)
10	473	471	0,67
20	506	488	4,68
30	602	502	24,96
40	637	539	24,29
50	549	514	8,69
60	499	481	4,46

Fonte: Autoria própria (2018)

Na tabela 16 encontram-se o volume de água calculado para as subseções da coluna de solo no período de retirada da segunda amostra utilizando o método padrão de estufa.

Tabela 16 - Porcentagens de umidade e volume de água para cada subseção do sistema de coleta de dados para a textura muito argilosa segundo método padrão de estufa

Profundidade (cm)	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	% umidade	Volume (mL)
10	62,8	53,97	16,36	357
20	58,3	50,42	15,63	341
30	60,8	52,36	16,12	352
40	60,91	52,74	15,49	338
50	56,15	48,45	15,89	347
60	63,4	55,09	15,08	330

Fonte: Autoria própria (2018)

Volumes de água calculados para a textura argilosa com base nas leituras dos sensores de umidade de solo constam na tabela 17.

Tabela 17 - Volumes para cada subseção do sistema de coleta para a textura argilosa calculadas pelas leituras dos sensores de umidade de solo

Profundidade (cm)	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª amostra (mL)
10	344	352
20	373	387
30	429	433
30	429	433
40	438	449
50	454	460
60	424	440
70	389	420
80	490	510
90	460	488
100	613	710

Fonte: Autoria própria (2018)

A taxa de evaporação total média calculada para a coluna de solo para a textura média foi de 62,35 mL dia-1. As taxas de evaporação calculadas para cada subseção da coluna de solo para a textura média estão ilustradas na tabela 18.

Tabela 18 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura média segundo as leituras dos sensores de umidade de solo

(continua)

Profundidade (cm)	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª amostra (mL)	Taxa evaporação (mL dia-1)
10	246	232	3,54
20	264	251	3,07
30	297	275	5,43

Tabela 18 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura média segundo as leituras dos sensores de umidade de solo

(conclusão)			
Profundidade (cm)	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª amostra (mL)	Taxa evaporação (mL dia-1)
40	296	260	8,98
50	326	298	7,09
60	318	286	7,79
70	326	291	8,74
80	367	341	6,38
90	363	333	7,56
100	389	374	3,78

Fonte: Autoria própria (2018)

As taxas de evaporação para as três texturas calculadas com base nas amostras retiradas do sistema de coleta de dados constam na tabela 19. Números negativos resultam de volumes de água iniciais maiores que os finais e, portanto, devem ser desconsiderados.

Tabela 19 - Taxas de evaporação calculadas para o volume total da coluna de solo para as 3 texturas estudadas com base nas amostras retiradas do sistema de coleta de dados

Textura	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª (mL)	Taxa evaporação (mL dia-1)
Muito argilosa	2050	2181	-32,71
Argilosa	3305	2948	89,14
Média	1991	2146	-38,70

Fonte: Autoria própria (2018)

Conclui-se pelos dados obtidos que foi possível realizar o cálculo das velocidades de infiltração, dos volumes hídricos retidos para as subseções do perfil da coluna de solo e uma taxa de deslocamento de umidade para as três texturas estudadas.

As leituras obtidas com os sensores de umidade de solo foram aceitáveis especialmente considerando o custo de sua fabricação, por volta de 5 reais a unidade.

Nota-se que a maior diminuição de umidade calculada ocorreu nas seções de profundidade medianas dos perfis de coluna de solo das texturas estudadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos possíveis trabalhos futuros baseado nos recursos utilizados nesse estudo é a medição dos dados estudados a campo, de modo a prover informações em tempo real das diversas regiões da propriedade rural interessada, permitindo a construção de dados históricos mostrando a variabilidade dessas propriedades do solo analisado. O histórico obtido pode permitir um uso otimizado dos recursos necessários às culturas irrigadas.

Também a campo pode-se realizar estudo relacionando a quantidade de chuva registrada por um pluviômetro com a registrada pelos sensores de umidade de solo. Isso permitiria estudar as propriedades analisadas neste estudo para diversos solos e para inúmeros volumes de chuva.

Estudos futuros no campo sobre a infiltração e retenção e cálculo sobre a irrigação ideal. Estudos de permeabilização em cidades. Estudos relacionando a quantidade de umidade captada pelos sensores com a quantidade de chuva registrada por pluviômetro.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457:** Informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- AMABIS, J. M; MARTHO, G. R. **Fundamentos da Biologia Moderna**. 4. ed. São Paulo: Ed. Moderna, 1995.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Relatório da ANA apresenta situação das águas do Brasil no contexto de crise hídrica**. [Brasília]:[ANA],2019. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias/relatorio-da-ana-apresenta-situacao-das-aguas-do-brasil-no-contexto-de-crise-hidrica>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. [Brasília]:[ANA], 2019. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/gestao-da-agua/sistema-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos Recursos Hídricos**. [Brasília]:[ANA], 2019. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Informações sobre Recursos hídricos**. [Brasília]:[ANA], 2019. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/aceso-a-sistemas/sistema-nacional-de-informacoes-sobre-recursos-hidricos-snirh>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio brasil 2011-2012 a 2021-2022 síntese**. [Brasília]: [MAPA], 2011. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-brasil-2011-2012-a-2021-2022-sintese.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2018.
- CARVALHO, E.J.M; FIGUEIREDO, M.S.; COSTA, L.M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p.257-265, fev. 1999.
- EDVANE, B.; ANTONINO, A.C.D.; DALL'OLIO, A.; AUDRY, P.; CARNEIRO, C.J.G. Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo não-saturado utilizando-se permeâmetro a disco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.11, p.2083-2089, nov. 1999.
- FRUEH, A. **GardenBot**. Disponível em: <http://gardenbot.org/howTo/soilMoisture/>. 2017. Acesso em: 06 mar. 2017.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Estação Cascavel**. Paraná, 2018. Disponível em: http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Cascavel.htm. Acesso em: 20 ago. 2018.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Estação Palotina**. Paraná, 2018.

Disponível em:

http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Palotina.htm.

Acesso em: 20 ago. 2018.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Estação São Miguel**. Paraná, 2018.

Disponível em:

http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Sao_Miguel.htm.

m. Acesso em: 20 ago. 2018.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KINZLI, K.; MANANA, N.; OAD, R. A comparison of laboratory and field calibration of a soil moisture capacitance probe for various soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Estados Unidos, v. 138, n. 4, p. 310-321, abril 2012.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3.ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009.

MITTELBACH, H.; LEHNER, I.; SENEVIRATNE, S.I. Comparison of four moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology* p. 430-431, 39-49. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow. **Nature Geoscience**, Switzerland, v. 3, n. 9, p. 613–616, 2012.

MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D. Field methods for monitoring soil water status. In: MUÑOZ-CARPENA, R., BENEDÍ, J.A. (Ed). **Soil-water-solute process characterization: an integrated approach**. CRC Press, p. 167-193, 2005.

PAYNE, J. How to Get a Sub-string From a String in Python – Slicing Strings. **J. Python Central**. Disponível em: <https://www.pythoncentral.io/how-to-get-a-substring-from-a-string-in-python-slicing-strings/>. Acesso em: 10 jun. 2018.

PIZETTA, S. C. **Calibração de sensores de capacitância (FDR) para estimativa da umidade em diferentes solos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, São Paulo, 2015.

PREVEDELLO, C.L.; LOYOLA, J.M.T. Modelagem numérica para o processo da evaporação da água do solo, **Revista Brasileira de Ciência de solo**, Minas Gerais, v. 29. p. 669-675, out. 2005.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Sending data from Arduino to Raspberry**. 2018. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=111882>. Acesso em: 08 jun. 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações** 2. ed. São Paulo: Manole, 2012.

SENEVIRATNE, S.I.; CORTI, T.; DAVIN, E.; HIRSCHI, M.; JAEGER, E.B.; LEHNER, I.; ORLOWSKY, B.; TEULING, A.J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate. **Journal of Earth-Sci.**, Switzerland, v. 99, n. 3–4, p. 125–161, fev. 2010.

SILVA, A. P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão** (*Gossypium hirsutum*, L.). 1984. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, C. F. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. *In*: WORKSHOP DE APLICAÇÕES DE TÉCNICAS ELETROMAGNÉTICAS PARA O MONITORAMENTO AMBIENTAL. 2., 2008, Curitiba. **Anais[...]**. Curitiba: UNITAU, 2008. p. 25-45.

SILVEIRA, ANDRÉ L. DA., LOUZADA, JOSÉ A., BELTRAME, LAWSON F. Infiltração e armazenamento no solo. *In*: TUCCI, Carlos E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS; ABRH, 1993.

SPELMAN, D., KINZIL, K-D., KUNBERGER, T. Calibration of the 10HS Soil Moisture Sensor for Southwest Florida Agricultural Soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Flórida, v. 139, n. 12, p. 965-971, dez. 2013.

THE PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **strftime() and strptime() Behavior**. 2018. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/datetime.html#strftime-strptime-behavior>. Acesso em: 10 jun. 2018.

VISACRO, S. **Aterramentos elétricos**: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2010.

APÊNDICE A - Tabelas

Tabela 20 - Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura muito argilosa

Rodada	Nível de saturação (%)	Tara (g)	Massa _{úmida} (g)	Massa _{seca} (g)	%umidade
1	20	17,7	91,83	84,77	8,33
2	20	18,53	93,19	85,97	8,40
3	20	15,91	86,75	79,96	8,49
Média - 20					8,41
1	40	17,4	86,07	74,33	15,79
2	40	16,86	98,21	84,3	16,5
3	40	16,9	84,96	73,33	15,86
Média - 40					16,05
1	60	24,58	92,11	76,18	20,91
2	60	17,13	77,56	63,28	22,57
3	60	16,32	77,07	62,7	22,92
Média - 60					22,13
1	80	23,63	114,5	87,94	30,20
2	80	17,08	103,8	77,79	33,44
3	80	17,17	98,06	73,86	32,76
Média - 80					32,13
1	100	25,86	115,04	82,22	39,92
2	100	16,89	121,06	86,32	40,25
3	100	17,24	110,07	79,52	38,42
Média - 100					39,53

Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 21 - Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura argilosa

(continua)

Rodada	Nível de saturação (%)	Tara (g)	Massa _{úmida} (g)	Massa _{seca} (g)	%umidade
1	20	26,26	107,45	100,35	7,08
2	20	25,85	109,09	101,8	7,16
3	20	26,17	107,48	95,92	12,05
Média - 20					8,76
1	40	25,75	100,08	87,77	14,03
2	40	24,82	107,39	93,66	14,66
3	40	25,62	95,67	84,04	13,84
Média - 40					14,17
1	60	17,59	100,69	88,49	23,96
2	60	25,12	100,14	83,12	20,48
3	60	23,14	107,63	88,52	21,59

(conclusão)

Tabela 21 - Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura argilosa

Rodada	Nível de saturação (%)	Tara (g)	Massa _{úmida} (g)	Massa _{seca} (g)	%umidade
Média - 60					22,01
1	80	24,61	114,38	88,25	29,61
2	80	22,1	124,87	95,76	30,4
3	80	25,16	132,91	102,06	30,23
Média - 80					30,08
1	100	16,88	104,38	73,2	42,6
2	100	23,63	105,84	74,86	41,38
3	100	17,08	117,26	82,4	42,31
Média - 100					42,1

Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 22 – Tabela ilustrando os valores necessários para obtenção da umidade das amostras pelo método padrão de estufa da textura media

Rodada	Nível de saturação (%)	Tara (g)	Massa _{úmida} (g)	Massa _{seca} (g)	%umidade
1	20	18,31	98,27	93,23	5,41
2	20	16,79	99,36	94,14	5,54
3	20	16,18	98,54	93,38	5,53
Média - 20					5,49
1	40	16,89	67,98	61,1	11,26
2	40	17,24	74,41	66,71	11,54
3	40	16,93	73,65	66,06	11,49
Média - 40					11,43
1	60	25,72	96,3	83,23	15,70
2	60	16,34	80,11	68,29	17,31
3	60	25,14	94,81	81,87	15,81
Média - 60					16,27
1	80	15,99	94,81	76,47	23,98
2	80	16,28	101,94	81,97	24,36
3	80	16,06	103,1	82,76	24,47
Média - 80					24,27
1	100	25,2	123,78	95,82	29,18
2	100	17,4	121,59	93,86	29,54
3	100	16,86	117,52	90,01	30,56
Média - 100					29,76

Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 23 - Porcentagens de umidade e volume de água para cada subseção do sistema de coleta de dados para a textura muito argilosa

Profundidade (cm)	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	% umidade	Volume (mL)
10	62,8	53,97	16,36	357
20	58,3	50,42	15,63	341
30	60,8	52,36	16,12	352
40	60,91	52,74	15,49	338
50	56,15	48,45	15,89	347
60	63,4	55,09	15,08	330
70	41,91	39,82	5,25	115
80	68,02	66,43	2,39	52
90	79,53	77,72	2,33	51
100	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2018)

Tabela 24 - Taxas de evaporação calculadas para cada subseção do sistema de coleta para a textura média calculadas pelas amostras retiradas da coluna de solo

Profundidade (cm)	Volume 1ª amostra (mL)	Volume 2ª amostra (mL)	Taxa evaporação (mL dia ⁻¹)
10	231	76	38,80
20	164	234	-17,46
30	166	194	-6,99
40	193	259	-16,38
50	159	241	-20,63
60	231	187	10,96
70	229	252	-5,81
80	181	208	-6,78
90	235	199	9
100	201	295	-23,42

Fonte: Autoria própria (2018)

APÊNDICE B - Códigos utilizados

Código utilizado na unidade de armazenamento de dados – Raspberry:

```
#!/usr/bin/python

import serial, os, signal, sys, time, glob, logging, traceback
import time

import Adafruit_GPIO.SPI as SPI
import Adafruit_SSD1306
import subprocess

from PIL import Image
from PIL import ImageDraw
from PIL import ImageFont
from datetime import datetime

armazenar = 1
amostra = "MA"
resistor = "4k7"
flipTimer = "100ms"
serie = "4-3" #rodadaN-primeiroNivel-segundoNivel
pasta = "/home/pi/mestrado/dados/teste/"+amostra+"-"+resistor+"-"+flipTimer+"-
"+serie+"/"

RST = None
DC = 23
SPI_PORT = 0
SPI_DEVICE = 0
disp = Adafruit_SSD1306.SSD1306_128_64(rst=RST)
disp.begin()

# Clear display.
disp.clear()
disp.display()

# Create blank image for drawing.
# Make sure to create image with mode '1' for 1-bit color.
width = disp.width
height = disp.height
image = Image.new('1', (width, height))

# Get drawing object to draw on image.
draw = ImageDraw.Draw(image)

# Draw a black filled box to clear the image.
draw.rectangle((0,0,width,height), outline=0, fill=0)

# Draw some shapes.
# First define some constants to allow easy resizing of shapes.
```



```

leituras[1] = 0
leituras[2] = 0
leituras[3] = 0
leituras[4] = 0
leituras[5] = 0
leituras[6] = 0
leituras[7] = 0
leituras[8] = 0
leituras[9] = 0

temperatura = 0
umidade = 0
pinos = "";
numeroSensor = "";

if not os.path.exists(pasta):
    os.makedirs(pasta)

logging.basicConfig(filename=pasta+'log.log',level=logging.INFO)
logging.basicConfig(format='%(asctime)s %(message)s', datefmt='%d/%m/%Y
%l:%M:%S ')

if ser.in_waiting > 0:
    #logging.info("Entrei no ser.in_waiting")
    while True:
        t = datetime.today()
        if ser.in_waiting > 0:
            #logging.info("Dentro do while após o ser.in_waiting")
            valor = ser.readline().rstrip().decode("utf-8")
            #logging.info("Depois do readlin e decode")
            #print("aqui "+str(len(valor.split(";")))+ " "+valor)
            logging.info("valor "+valor)
            entrada = valor.lower()
            valor = entrada
            if entrada.find("foram encontrados")>-1:
                entradavalida = 1
            if entradavalida:
                entradal = entrada.split(";")
                if len(entradal)== 5:
                    if entradal[0] == "ambiente temperatura":
                        if entradal[1].isdigit():
                            temperatura = entradal[1]
                    if entradal[2] == "ambiente umidade":
                        if entradal[3].isdigit():
                            umidade = entradal[3]
                elif len(entradal) == 4:
                    pinos = ""
                    if entradal[1].find("pino 1"):
                        pinos += entradal[1]
                    if entradal[2].find("pino 2"):

```



```

        pinos += entradal[2]
elif len(entradal) == 6:
    if entradal[0].find("sensor")>-1:
        #logging.info("valor "+valor)
        sensor = entradal[0]

        nome = pasta+sensor
        nome += ".csv"
        numeroSensor = sensor[6:]
        valorDoSensor = entradal[3]
        #print(sensor+" valor "+valor+" media "+valorDoSensor)
        if not armazenar:
            print("Nao armazenando!")
            existe = sensores.count(sensor)
            #logging.debug("numeroSensor "+numeroSensor+" valordosensor
"+valorDoSensor)
            if numeroSensor.isdigit()==0 or valorDoSensor.isdigit()==0:
                print("valor "+valor)
                logging.error("verificar "+valor)
            else:
                leituras[int(numeroSensor)-1] = valorDoSensor
                if existe==0:
                    sensores.append(sensor)
                    inicio = t.strftime("%Y/%m/%d %H:%M:%S -")
                    if armazenar:
                        cabecalho = "dia hora;sensor;"
                        cabecalho += pinos
                        cabecalho
                        +=
";media;temperatura;amb.temp.;amb.umidade;"
                        valores[int(numeroSensor)-1].append(cabecalho)
                        valor
                        =
                        t.strftime("%Y/%m/%d
%H:%M:%S;")+valor+str(temperatura)+";"+str(umidade)
                        valores[int(numeroSensor)-1].append(valor)
                    if armazenar:
                        if len(valores[int(numeroSensor)-1]) == 30:
                            with open(nome, 'a') as filehandle:
                                filehandle.writelines("%s\n" % place for place in
valores[int(numeroSensor)-1])
                                logging.info('gravei 30 valores')
                                logging.info('registros
                                gravados:
                                %s',
valores[int(numeroSensor)-1])
                                valores[int(numeroSensor)-1].clear()
                                logging.info('limpei numeroSensor %s', numeroSensor)
                                #print("gravei 30 valores")
                                filehandle.close()
                                #print("Inicio: "+inicio+" "+valor)

```

```
draw.rectangle((0,0,width,height), outline=0, fill=0)
```

```
# Shell scripts for system monitoring from here :
```

<https://unix.stackexchange.com/questions/119126/command-to-display-memory-usage-disk-usage-and-cpu-load>

```

#cmd = "hostname -l | cut -d\ ' -f1"
cmd = "/sbin/ip -o -4 addr list wlan0 | awk '{print $4}' | cut -d/ -f1"
IP = subprocess.check_output(cmd, shell = True )
#cmd = "top -bn1 | grep load | awk '{printf \"CPU Load: %.2f\", $(NF-2)}'"
#CPU = subprocess.check_output(cmd, shell = True )
cmd = "free -m | awk 'NR==2{printf \"Mem: %s/%sMB %.2f%%\",
$3,$2,$3*100/$2 }'"
MemUsage = subprocess.check_output(cmd, shell = True )
cmd = "df -h | awk '$NF==\"^\">{printf \"Disk: %d/%dGB %s\", $3,$2,$5}'"
Disk = subprocess.check_output(cmd, shell = True )

# Write two lines of text.
hora = t.strftime("%d/%m/%Y %H:%M:%S")
draw.text((x, top), str(hora), font=font, fill=255)
draw.text((x, top+8), "IP: " + IP.decode(), font=font, fill=255)
#draw.text((x, top+8), str(CPU), font=font, fill=255)
draw.text((x, top+16), MemUsage.decode(), font=font, fill=255)
draw.text((x, top+25), Disk.decode(), font=font, fill=255)
draw.text((x, top+34), str(temperatura)+"/ "+str(umidade), font=font, fill=255)

#logging.info(str(leituras[0])+" "+str(leituras[1])+" "+str(leituras[2])+"
"+str(leituras[3])+" "+str(leituras[4]))
draw.text((x, top+42), str(leituras[0])+" "+str(leituras[1])+" "+str(leituras[2])+"
"+str(leituras[3])+" "+str(leituras[4]), font=font, fill=255)
draw.text((x, top+50), str(leituras[5])+" "+str(leituras[6])+" "+str(leituras[7])+"
"+str(leituras[8])+" "+str(leituras[9]), font=font, fill=255)
#for indice in range(0,10,1):
# draw.line((x, top+42+indice*2, x+int(leituras[indice])/8, top+42+indice*2),
fill = 255)
#logging.info("tamanho do 1: "+str(int(leituras[0])/8))

# Display image.
disp.image(image)
disp.display()
#time.sleep(.1)
else :
print("Porta serial nao aberta.")
except serial.SerialException:
print("Arduino nao conectado.")
pass
except IndexError as error:
logging.error(message)
logging.error("numeroSensor: %s", numeroSensor)
logging.error("valor: %s", valor)
except Exception as ex:
template = "Uma excecao do tipo {0} ocorreu. Argumentos: \n{1!r}"
message = template.format(type(ex).__name__, ex.args)
logging.error(message)

```

```
print (message)
message = traceback.format_exc()
logging.error(message)
print(message)
```

Código utilizado na captura de dados – Arduino:

```
/*
  Definições de pinos
*/

/*
  Módulos
*/

#include <SPI.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

/*
  Variáveis
*/
int sensoresALer[] = {1,2,3,4,5,6,7,8,9,10};
#define umidade1 22
#define umidade2 23
#define umidade3 24
#define umidade4 25
#define umidade5 26
#define umidade6 27
#define umidade7 28
#define umidade8 29
#define umidade9 30
#define umidade10 31
#define umidade11 32
#define umidade12 33
#define umidade13 34
#define umidade14 35
#define umidade15 36
#define umidade16 37
#define umidade17 38
```

```
#define umidade18 39
#define umidade19 40
#define umidade20 41

#define leitura1 A6
#define leitura2 A7
#define leitura3 A8
#define leitura4 A9
#define leitura5 A10
#define leitura6 A11
#define leitura7 A12
#define leitura8 A13
#define leitura9 A14
#define leitura10 A15

int flipTimer = 100; //reduzido de 1000. 21/11/2018
int DHTTimer = 300000; // 5 minuto
int DHTTemp = 0;

#define DHTPIN      2
#define DHTTYPE     DHT22

DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);
float t;
float h;

OneWire oneWire(6);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

DeviceAddress sensor1, sensor2, sensor3, sensor4;
int qtd_sensor = 0;
float tempC1 = 0;
float tempC2 = 0;
float tempC3 = 0;
float tempC4 = 0;

void setup() {
  t=0;
  h=0;
  DHTTemp = DHTTimer-flipTimer*4*10;
  Serial.begin(57600);
```

```
pinMode (umidade1, OUTPUT);
pinMode (umidade2, OUTPUT);
pinMode (umidade3, OUTPUT);
pinMode (umidade4, OUTPUT);
pinMode (umidade5, OUTPUT);
pinMode (umidade6, OUTPUT);
pinMode (umidade7, OUTPUT);
pinMode (umidade8, OUTPUT);
pinMode (umidade9, OUTPUT);
pinMode (umidade10, OUTPUT);
pinMode (umidade11, OUTPUT);
pinMode (umidade12, OUTPUT);
pinMode (umidade13, OUTPUT);
pinMode (umidade14, OUTPUT);
pinMode (umidade15, OUTPUT);
pinMode (umidade16, OUTPUT);
pinMode (umidade17, OUTPUT);
pinMode (umidade18, OUTPUT);
pinMode (umidade19, OUTPUT);
pinMode (umidade20, OUTPUT);

dht.begin();
sensor_t sensor;
dht.humidity().getSensor(&sensor);

sensors.begin();
Serial.println("Localizando sensores DS18B20...");
Serial.print("Foram encontrados ");
qtd_sensor = sensors.getDeviceCount();
Serial.print(qtd_sensor, DEC);
Serial.println(" sensores.");

if (qtd_sensor == 0) {
  Serial.println("Sensores nao encontrados !");
} else {
  oneWire.reset_search();
  boolean encontrei = oneWire.search(sensor1);
  if (!encontrei) {
    Serial.println("Nao consegui encontrar o endereço para sensor1.");
  } else {
```

```

encontrei = oneWire.search(sensor2);
if (!encontrei) {
  Serial.println("Nao consegui encontrar o endereço para sensor2.");
} else {
  encontrei = oneWire.search(sensor3);
  if (!encontrei) {
    Serial.println("Nao consegui encontrar o endereço para sensor3.");
  } else {
    encontrei = oneWire.search(sensor4);
    if (!encontrei) {
      Serial.println("Nao consegui encontrar o endereço para sensor4.");
    }
  }
}
}
}
}
}
Serial.print("Endereco sensor: ");
mostra_endereco_sensor(sensor1);
mostra_endereco_sensor(sensor2);
mostra_endereco_sensor(sensor3);
mostra_endereco_sensor(sensor4);
}

void loop() {
  DHTTemp = DHTTemp + flipTimer*4*10;
  if (DHTTemp % DHTTimer == 0) {
    DHTTemp = 0;
    sensors_event_t event;
    dht.temperature().getEvent(&event);
    if (isnan(event.temperature)) {
      Serial.println("Error reading temperature!");
    }
    else {
      t = event.temperature;
    }
    dht.humidity().getEvent(&event);
    if (isnan(event.relative_humidity)) {
      Serial.println("Error reading humidity!");
    }
    else {
      h = event.relative_humidity;

```

```

}

if (qtd_sensor > 0) {
    sensors.requestTemperatures();
    tempC1 = sensors.getTempC(sensor1);
    tempC2 = sensors.getTempC(sensor2);
    tempC3 = sensors.getTempC(sensor3);
    tempC4 = sensors.getTempC(sensor4);
}
}

Serial.print("Ambiente temperatura;");
Serial.print(t);
Serial.print(";");
Serial.print("Ambiente umidade;");
Serial.print(h);
Serial.println(";");

for (int i = 0; i <= (sizeof(sensoresALer)/ sizeof(sensoresALer[0]))-1; i++) {
    if (sensoresALer[i] == 1) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR1",  umidade1,  umidade2,  leitura1,
tempC1));
    }
    if (sensoresALer[i] == 2) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR2", umidade3, umidade4, leitura2, -130));
    }
    if (sensoresALer[i] == 3) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR3",  umidade5,  umidade6,  leitura3,
tempC2));
    }
    if (sensoresALer[i] == 4) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR4", umidade7, umidade8, leitura4, -130));
    }
    if (sensoresALer[i] == 5) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR5",  umidade9,  umidade10,  leitura5,
tempC3));
    }
    if (sensoresALer[i] == 6) {
        Serial.println(realizaLeitura("SENSOR6", umidade11, umidade12, leitura6, -130));
    }
    if (sensoresALer[i] == 7) {

```



```

    Serial.println(realizaLeitura("SENSOR7",  umidade13,  umidade14,  leitura7,
tempC4));
}
if (sensoresALer[i] == 8) {
    Serial.println(realizaLeitura("SENSOR8", umidade15, umidade16, leitura8, -130));
}
if (sensoresALer[i] == 9) {
    Serial.println(realizaLeitura("SENSOR9", umidade17, umidade18, leitura9, -130));
}
if (sensoresALer[i] == 10) {
    Serial.println(realizaLeitura("SENSOR10", umidade19, umidade20, leitura10, -
130));
}
}
}
}

```

```

String realizaLeitura (String sensor, int pino1, int pino2, int pSensor, float
temperatura) {
    Serial.print(sensor+";pino1 ");
    Serial.print(pino1);
    Serial.print(";pino2 ");
    Serial.print(pino2);
    Serial.println(";");
    setSensorPolarity(pino1, pino2, true);
    delay(flipTimer);
    int leituraPino1 = analogRead(pSensor);
    delay(flipTimer);
    setSensorPolarity(pino1, pino2, false);
    delay(flipTimer);
    int leituraPino2 = 1023 - analogRead(pSensor);
    delay(flipTimer);
    int media= (leituraPino1 + leituraPino2) / 2;

    digitalWrite(pino1, LOW);
    digitalWrite(pino2, LOW);

    String retorno = sensor;
    retorno += ";";
    retorno += leituraPino1;
    retorno += ";";
    retorno += leituraPino2;
    retorno += ";";
}

```

```

    retorno += media;
    retorno += ".";
    retorno += temperatura; //temperatura
    retorno += ".";
    //retorno += temperatura;
    //retorno += ".";

    return retorno;
}

void setSensorPolarity(int pino1, int pino2, boolean flip){
    if(flip){
        digitalWrite(pino1, HIGH);
        digitalWrite(pino2, LOW);
    }else{
        digitalWrite(pino1, LOW);
        digitalWrite(pino2, HIGH);
    }
}

String printI00(int val)
{
    String valor;
    if (val < 10) valor = '0';
    valor += (val);

    return valor;
}

void mostra_endereco_sensor(DeviceAddress deviceAddress)
{
    for (uint8_t i = 0; i < 8; i++) {
        // Adiciona zeros se necessario
        if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
        Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
        Serial.print(":");
    }
    Serial.println("");
}

```