

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos  
para auxílio no manejo da irrigação via IoT

**Angelo Tiago Azevedo**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de  
Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2021

Angelo Tiago Azevedo  
Engenheiro Agrícola e Ambiental

**Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos para auxílio o manejo da  
irrigação via IoT**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de  
Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Azevedo, Angelo Tiago

Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos para auxílio no manejo da irrigação via IoT / Angelo Tiago Azevedo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

153 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Manejo da irrigação 2. FDR 3. Instrumentação 4. Irrigação de precisão  
I. Título

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os professores, pesquisadores, curiosos, entusiastas e amadores, que fazem da ciência e educação pública, gratuita e de qualidade sua forma de vida, a qual é nossa principal ferramenta de busca por igualdade.

Dedico este trabalho a todos o profissionais ligados a produção e distribuição de alimentos no Brasil, pois aplicando ciência e tecnologia aos mesmo, nós brasileiros venceremos a fome.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelo privilégio de ter tido acesso a educação.

Aos meus pais Edimar e Cleonice, os quais são a grande e sólida base de minha vida, por jamais pouparem esforços e investimentos em minha educação, tanto pessoal quanto profissional.

Ao meu irmão Alan, o qual foi um dos principais incentivadores para meu ingresso no curso de engenharia.

A minha namorada Jessica, que dividiu comigo noites em claro de estudos, risadas e muito companheirismo ao longo desses anos desde a graduação, sendo um grande apoio em todos os momentos.

Ao meu avô Sr. Waldemar Azevedo (em memória), o qual me despertou grande amor e respeito a natureza, com todas suas histórias e feitos incríveis.

A minhas tias Eunice e Eracildes, dois anjos que sempre me apoiaram, incentivaram e caminharam juntas comigo.

Ao meu orientador Rubens, pela confiança e conhecimentos passados, que ao longo desses anos se tornou além de mestre um grande amigo.

Aos grandes amigos de pós graduação que colaboraram com este trabalho: Ailson, Beth e Carlos.

Aos grandes amigos que a ESALQ - USP proporcionou que eu encontrasse: Alex, Diego, Rogério, Juliana, Brenda, Jessica, Thais, Hugo, Débora, Danielle, Tibério, Timóteo, Adriano, Juíniór, Wagner, Ícaro e Rubmara.

Aos professores, técnicos e demais funcionários desta instituição de ensino, que direta e indiretamente colaboraram para meu crescimento pessoal, profissional e viabilidade da execução deste trabalho, em especial a Davilmar a qual sempre colaborou ativamente, com louvor e positividade.

A ESALQ – USP pelo apoio técnico e infraestrutura cedidos, a Capes pela bolsa e apoio cedido.

E, que eu possa um dia despertar em outro ser o amor e respeito pela ciência, assim como meus mestres (Conan e Marinaldo) despertaram em mim, colaborando assim para um mundo melhor.

*“Viver é como andar de bicicleta:  
É preciso estar em constante movimento  
para manter o equilíbrio.”*

*Albert Einstein*

## SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS.....	18
INTRODUÇÃO.....	21
REFERÊNCIAS.....	23
1. REVISÃO DE LITERATURA.....	25
1.1. PLANEJAMENTO E MANEJO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA.....	25
1.1.1. MANEJO POR VIA CLIMATOLÓGICA.....	25
1.1.2. MANEJO VIA SOLO.....	27
1.1.3. MANEJO VIA PLANTA.....	27
1.2. UMIDADE DO SOLO.....	28
REFERÊNCIAS.....	31
2. DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA PARA AUXÍLIO DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO.....	33
RESUMO.....	33
ABSTRACT.....	33
2.1. INTRODUÇÃO.....	33
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
2.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO.....	35
2.2.2. AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	36
2.2.3. HARDWARE E SOFTWARE DESENVOLVIDOS.....	37
2.2.4. ESTAÇÃO METEOROLÓGICA PADRÃO.....	40
2.2.5. SENSORES METEOROLÓGICOS UTILIZADOS.....	41
2.2.5.1. TEMPERATURA.....	41
2.2.5.2. UMIDADE RELATIVA DO AR.....	42
2.2.5.3. PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	43
2.2.5.4. RADIAÇÃO SOLAR.....	44
2.2.5.4.1. FOTODIODOS.....	44
2.2.5.4.2. FOTOTRANSISTOR.....	44
2.2.5.4.3. SENSOR DE TEMPERATURA.....	45

2.2.5.4.4. TRANSISTOR NPN.....	45
2.2.5.4.5. ELEMENTO FOTOVOLTAICO.....	46
2.2.5.5. VELOCIDADE DO VENTO.....	47
2.2.5.6. PRECIPITAÇÃO.....	47
2.2.6. LEITURA E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	48
2.2.7. DISPOSITIVO FINAL.....	49
2.2.8. EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	50
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
2.3.1. TEMPERATURA.....	51
2.3.2. UMIDADE RELATIVA.....	53
2.3.3. PRESSÃO ATMOSFÉRICA.....	55
2.3.4. RADIAÇÃO SOLAR.....	56
2.3.5. VELOCIDADE DO VENTO.....	59
2.3.6. PRECIPITAÇÃO.....	60
2.3.7. SENSORES SELECIONADOS.....	60
2.3.7.1. VALIDAÇÃO DOS DADOS.....	61
2.3.8. EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	62
2.3.9. CUSTO FINAL E ALTERNATIVAS DE MERCADO.....	63
2.4. CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS.....	66
3. CALIBRAÇÃO E DESEMPENHO DE SENSORES CAPACITIVOS (FDR) PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE E POTENCIAL MATRICO DA ÁGUA NO SOLO.....	71
RESUMO.....	71
ABSTRACT.....	71
3.1. INTRODUÇÃO.....	71
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	73
3.2.1. SENSORES UTILIZADOS.....	73
3.2.2. SOLOS UTILIZADOS.....	74
3.2.2.1. MÉTODO GRAVIMÉTRICO.....	75
3.2.2.2. REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	76
3.2.2.2.1. EFEITO CAPACITIVO.....	76
3.2.3. AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS.....	78
3.2.4. LISÍMETROS DE PESAGEM.....	79
3.2.5. HARDWARE E SOFTWARE DESENVOLVIDOS.....	81



3.2.6. LEITURA E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	84
3.2.6.1. INFLUÊNCIA DO MEIO POROSO .....	86
3.2.6.2. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA .....	86
3.2.6.3. INFLUÊNCIA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA .....	87
3.2.6.4. ÁREA DE INFLUÊNCIA DO SENSOR.....	87
3.2.6.5. ANÁLISE VISUAL PÓS-TESTE.....	87
3.2.7. DISPOSITIVO FINAL.....	88
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	88
3.3.1. RESPOSTA A VARIAÇÃO DA UMIDADE.....	89
3.3.1.1. CROWTAIL .....	89
3.3.1.2. CS 1.2.....	91
3.3.1.3. GROVE .....	93
3.3.1.4. OCTOPUS.....	95
3.3.1.5. PM WCS 3.....	97
3.3.1.6. SOILWATCH 10 .....	99
3.3.1.7. STEMMA.....	101
3.3.1.8. VH400 .....	103
3.3.1.9. ANÁLISE COMPARATIVA .....	105
3.3.2. RESPOSTA A VARIAÇÃO DA TENSÃO DE RETENÇÃO .....	105
3.3.2.1. CROWTAIL .....	105
3.3.2.2. CS 1.2.....	107
3.3.2.3. GROVE .....	109
3.3.2.4. OCTOPUS.....	111
3.3.2.5. PM WCS 3.....	113
3.3.2.6. SOILWATCH 10 .....	115
3.3.2.7. STEMMA.....	117
3.3.2.8. VH400 .....	119
3.3.3. ANÁLISE DE DISPERSÃO DOS PONTOS COM MAIOR RMSE.....	121
3.3.4. VALIDAÇÃO DOS DADOS POR PONTOS DISCRETOS.....	121
3.3.5. VALIDAÇÃO POR CURVA COMPLETA.....	123
3.3.6. RESPOSTA A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA .....	124
3.3.7. RESPOSTA A VARIAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO. .....	126
3.3.8. RAIOS DE ATUAÇÃO .....	128

3.3.9. FAIXA OPERACIONAL ÚTIL E RESOLUÇÃO DE RESPOSTA .....	129
3.3.10. ANÁLISE VISUAL PÓS-TESTE.....	129
3.3.11. COMPARAÇÃO COM OUTROS AUTORES .....	132
3.3.12. USABILIDADE DOS SENSORES .....	132
3.3.13. DATALOGGER E BANCO DE DADOS.....	133
3.4. CONCLUSÃO.....	134
REFERÊNCIAS.....	135
4 CONCLUSÃO .....	139
APÊNDICES .....	143

## RESUMO

### **Desenvolvimento de dispositivos eletrônicos alternativos para auxílio no manejo da irrigação via IoT**

A atividade agrícola é responsável pelo consumo de grande parte de recurso hídrico disponível no mundo, entretanto, com as alterações climáticas em escalas globais, associadas ao crescimento populacional, requerem da atividade melhor eficiência no uso desse recurso finito. Assim, tecnologias voltadas ao auxílio do manejo da água na agricultura irrigada são demandadas, requisitando dispositivos precisos, eficientes e simples de utilizar, que possibilitem o manejo através de análises baseadas no sistema solo x água x planta x atmosfera, considerando o sistema como um todo, ou somente parte dele. Sendo assim, propôs-se com este trabalho o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos para auxílio no manejo da irrigação, baseados em dispositivos inteligentes via internet das coisas. Os equipamentos desenvolvidos trabalham com metodologias de manejo: via clima, por meio de uma estação meteorológica completa, com mensuração e envio de variáveis a banco de dados online em tempo real; e ainda manejo via solo, com a calibração de sensores baseados em reflectometria no domínio da frequência (FDR), os quais além de estimarem a umidade e tensão de retenção na água do solo, podem medir a condutividade elétrica da solução do solo e temperatura do solo, atendendo a proposta de comunicação em tempo real com o banco de dados *online*, fornecendo ao irrigante um monitoramento em tempo real de clima e solo.

Palavras-chave: Manejo da irrigação, FDR, Instrumentação, Irrigação de precisão

## ABSTRACT

### **Development of alternative electronic devices to aid in irrigation management via IoT**

Agricultural activity is responsible for the consumption of a large part of the water resource available in the world, however, with climate change on global scales, associated with population growth, the activity requires better efficiency in the use of this finite resource. Thus, technologies aimed at aiding water management in irrigated agriculture are demanded, requiring precise, efficient and simple-to-use devices that enable management through analyzes based on the soil x water x plant x atmosphere system, considering the system as a whole, or just part of it. Therefore, this work proposed the development of electronic devices to aid in irrigation management, based on intelligent devices via the Internet of Things. The developed equipment works with management methodologies: via climate, through a complete meteorological station, with measurement and sending of variables to an online database in real time; and also soil management, with the calibration of sensors based on frequency domain reflectometry (FDR), which, in addition to estimating the moisture and retention tension in the soil water, can measure the electrical conductivity of the soil solution and the temperature of the soil, meeting the proposal of real-time communication with an online database, providing the irrigator with real-time monitoring of climate and soil.

Keywords: Irrigation management, FDR, Instrumentation, Precision irrigation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de evapotranspiração, com ênfase para suas variáveis de influência. Fonte: Adaptado de Carleton College (2020). .....	26
Figura 2. Representação da água retida no solo, tanto por capilaridade entre as partículas como por adsorção em forma de filme na superfície dos sólidos. Fonte: Adaptado de LIBARDI, 2018. ....	29
Figura 3. A - Funil de placa porosa; B - Camara de Richards em azul, com manômetros locados a cima e seus acessórios a frente. Fonte: Adaptado de Silva, 2005. ....	30
Figura 4. A - Esquema de funcionamento do funil de placa porosa, com destaque para o mesmo em nível e com tensão de retenção h; B - câmara de Richards, com amostra de solo acomodada sob a placa porosa acima do diafragma, recebendo pressão de uma fonte externa e tendo a água de sua amostra translocada por um tubo de saída. Fonte: Adaptado de Libari, 2018. ....	31
Figura 5. Estufa utilizada e sua localização. A – Prédio principal do departamento de engenharia; B – Estufa. ....	36
Figura 6. Microcontrolador Arduino micro. ....	36
Figura 7. A - Módulo bluetooth Hm-10; B - Display LCD. ....	36
Figura 8. Módulo de leitura de cartão de memória. ....	37
Figura 9. Módulo RTC - DS3231. ....	37
Figura 10. Diagrama esquemático do controlador desenvolvido para a leitura prévia dos sensores. ....	38
Figura 11. Diagrama gráfico da ferramenta PcbNew, com distribuição dos componentes: A – Aleatória; B – Ajustada. ....	38
Figura 12. Passo a passo do roteamento de trilhas, sendo: A - importação do spectraDSN no freerouting; B – Roteamento das trilhas; C – Importação das trilhas roteadas no PcbNew. ....	39
Figura 13. A - Arquivo final gerado para impressão com as trilhas; B - Visualização 3D da placa. ....	39
Figura 14. Passo a passo da transferência e corrosão de um circuito impresso. A - Circuito impresso; B - Placa virgem; C - Placa com circuito transferido; D - Placa após corrosão. ....	40
Figura 15. Sensores presentes na estação. A – Piranômetro LI 200 X; B – Anemômetro 03002 Campbell; C – HMP45C; D – Vaisala CS 106. ....	41
Figura 16. Datalogger Campbell, modelo CR1000. ....	41
Figura 17. Abrigo utilizado para a instalação dos sensores de temperatura. A – Abrigo utilizado; B – Esquema de estrutura do abrigo. Fonte: (YOUNG USA, 2020). ....	42

Figura 18. Sensores de temperatura utilizados. A - BME280; B - BMP280; C - BMP180; D - DHT11; E - DHT22; F - DS18B20.....	42
Figura 19. Sensores de UR utilizados. A – BME280; B – DHT11; C – DHT22; D - HTU21D; E - HR202L encapsulado; F - HR202L sem encapsulamento.....	43
Figura 20. Sensores de pressão atmosférica utilizados. A - BME280; B - BMP280; BMP180. ....	43
Figura 21. Modelos de fotodiodos utilizados como sensores de radiação solar. A – BH1750; B – TSL2561; C – GYML8511; D – CJMCU3116; E – SFH206K; F – OPT101; G – BPW34.....	44
Figura 22. Fototransistor Temt6000. ....	45
Figura 23. Sensores de temperatura utilizados para a estimativa de radiação de corpo cinza. A – Sonda DS18B20; B – Sensor infravermelho de temperatura modelo MLX90614. ....	45
Figura 24. Transistor 2N3055. A – Vista superior e inferior, com os polos coletor e emissor; B – Estrutura interna, com os polos coletor e emissor ligados a pastilha de silício. Adaptado de Sugawara (2003).....	46
Figura 25. Elemento fotovoltaico utilizado. A - Células fotovoltaicas, com vista superior; B – vista inferior; C - Módulo INA219, para mensuração da potência gerada. ....	46
Figura 26. Anemômetro modelo ANM01 utilizado para estimativa da velocidade do vento.....	47
Figura 27. Representação do modelo de funcionamento do anemômetro, com o reed switch em azul e o sinal de saída em vermelho. ....	47
Figura 28. Pluviômetro de balança. A – vista frontal; B – vista superior; C – Vista inferior; D – Detalhe da balança. ....	48
Figura 29. Dispositivo datalogger da estação. A – Vista modelada; B – Controlador instalado....	50
Figura 30. Disposição geográfica das estações, no interior do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth, 2021. ....	51
Figura 31. Resposta dos sensores comparada a temperatura mensurada pela estação. A – BME280; B – BMP280; C – BMP180; D – DHT22; E – DHT11; F - DS18B20 .....	52
Figura 32. Resposta dos sensores comparada a UR medida pela estação. A – BME280; B – DHT22; C – DHT11; D – H202; E – HTU21D.....	54
Figura 33. Resposta dos sensores comparada com a pressão atmosférica medida pela estação. A – BME280; B – BMP280; C – BMP180. ....	55
Figura 34. Resposta dos sensores comparada com a radiação solar medida pela a estação. A – AP3216; B – BH1750; C – BPW43; D – Elemento fotovoltaico; E – OPT101; F – GYML8511; G – TSL2561; H – SFH206K; I – Temt6000; J – 2N3055; K – DS18B20; L – MLX90614.....	58
Figura 35. Resposta do transistor 2N3055, comparada a radiação de onda longa, mensurada pelo saldo radiômetro. ....	59

Figura 36. Resposta do anemômetro ANM01, comparada a velocidade média do vento mensurada pela estação.....	60
Figura 37. Resposta do pluviômetro comparada a lâmina aplicada.....	60
Figura 38. Validação de dados dos sensores escolhidos. A – Temperatura; B – UR; C – Pressão atmosférica; D – Radiação solar; E – Velocidade do vento; F – Precipitação.....	62
Figura 39. Comparação da evapotranspiração calculada com os dados da estação desenvolvida versus estação automática. ....	63
Figura 40. Distribuição temporal da evapotranspiração diária com dados da estação desenvolvida versus estação automática. ....	63
Figura 41. QR code, redirecionador para o banco de dados online, hospedados na Adafruit IO.	65
Figura 42. Sensores capacitivos adquiridos para estimar a umidade do solo. A – CS 1.2; B – Grove; C – Crowtail; D – VH-400; E – SoilWatch; F – PM-WCS 3; G – Octopus; H – Stemma. ....	74
Figura 43. Curva de retenção da água no solo, dos 8 solos utilizados. Com destaque para a diferença de umidade dos solos para a tensão de 3 mca, o qual é frequentemente utilizado como gatilho de irrigação.....	75
Figura 44. Bandeja com os solos acomodados em anéis volumétricos, sendo eles: A – latossolo vermelho; B – areia quartzarênica; C – orgânico; D – latossolo amarelo; E – distrófico férrico; F – siltoso; G – sertãozinho; H – carbonatado.....	75
Figura 45. Estrutura de capacitor de placas paralelas e linhas de interação do fluxo magnético. A - capacitor de placas paralelas; B - capacitor de placas anguladas; C - capacitor de placas coplanares. Fonte: Adaptado de BESSA, 2013. ....	76
Figura 46. Estrutura de um capacitor de placas coplanares, com suas grandezas associadas. $q$ – polaridade das placas; $d$ – distância entre as placas; $w$ – largura das placas; $h$ – altura do substrato que suporta as placas; $\epsilon$ - permissividade elétrica. Fonte: Adaptado de CHANG, 1991. ....	77
Figura 47. Microcontrolador Arduino micro.....	79
Figura 48. A – Módulo bluetooth Hm-10; B - Display LCD.....	79
Figura 49. Módulo de leitura de cartão de memória. ....	79
Figura 50. Mini lisímetros de pesagem desenvolvidos: A – vista frontal; B – Vista frontal superior; C – Vista lateral; D – células de carga de 5kg; E – amplificador operacional HX711. ....	80
Figura 51. Bancada contendo os lisímetros desenvolvidos. ....	81
Figura 52. Diagrama esquemático do controlador desenvolvido para a leitura prévia dos sensores. ....	82
Figura 53. Diagrama gráfico da ferramenta PcbNew, com distribuição dos componentes: A – Aleatória; B – Ajustada.....	82

Figura 54. Passo a passo do roteamento de trilhas, sendo: A - importação do spectraDSN no freerouting; B – Roteamento das trilhas; C – Importação das trilhas roteadas no PcbNew.....	83
Figura 55. A - Arquivo final gerado para impressão com as trilhas; B - Visualização 3D da placa. .....	83
Figura 56. Interface do Arduino IDE Pro - versão 2.0.....	84
Figura 57. Esp32 modelo WROOM – 32. A - Vista superior; B - Vista inferior.....	88
Figura 58. Resposta do sensor crowtail a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	90
Figura 59. Resposta do sensor CS 1.2 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	92
Figura 60. Resposta do sensor Grove a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	94
Figura 61. Resposta do sensor Octopus a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	96
Figura 62. Resposta do sensor PM WCS 3 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	98
Figura 63. Resposta do sensor SoilWatch 10 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	100
Figura 64. Resposta do sensor Stemma a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	102
Figura 65. Resposta do sensor VH400 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	104
Figura 66. Resposta do sensor Crowtail a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.....	106



Figura 67. Resposta do sensor CS 1.2 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	108
Figura 68. Resposta do sensor Grove a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	110
Figura 69. Resposta do sensor Octopus a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	112
Figura 70. Resposta do sensor PM WCS 3 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	114
Figura 71. Resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	116
Figura 72. Resposta do sensor Stemma a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	118
Figura 73. Resposta do sensor VH400 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho. ....	120
Figura 74. Resposta dos sensores FDR a variação de temperatura de meio líquido, sendo: A – Crowtail; B – CS 1.2; C – Stemma; D – Grove; E – Octopus; F – SoilWatch; G – PM WCS 3; H – VH400.....	126
Figura 75. Resposta dos sensores FDR a variação de temperatura de meio líquido, sendo: A – Crowtail; B – CS 1.2; C – Octopus; D – Grove; E – Stemma; F – PM WCS 3; G – SoilWatch; H – VH400.....	128
Figura 76. Sensores classificados como avariados, na análise visual pós teste de calibração, sendo: A – Crowtail em vista superior; B – Crowtail em vista inferior; C – Grove em vista superior; D – Grove em vista inferior; E – CS 1.2 em vista superior; F – CS 1.2 em vista inferior. ....	130
Figura 77. Sensores Octopus e Stemma, na análise visual pós teste de calibração, sendo A - Octopus em vista superior; B - Octopus em vista inferior; C - Stemma em vista superior; D - Stemma em vista inferior.....	130

Figura 78. Sensores SoilWatch 10, PM WCS 3 e VH400, análise visual pós teste de calibração, sendo: A – SoilWatch 10 em vista superior; B – SoilWatch 10 em vista inferior; C – PM WCS 3 em vista superior; D – PM WCS 3 em vista inferior; E – VH400 em vista superior; F – VH400 em vista inferior. ....	131
Figura 79. Comparação dos erros de calibração de cada um dos sensores, para todos os tipos de solo, sendo: A - Umidade volumétrica; B - Tensão de retenção. ....	132
Figura 80. Circuito eletrônico (versão prototipada) do datalogger, responsável pela leitura em campo dos sensores. A – Vista superior; B – Vista lateral. ....	133
Figura 81. Dispositivo final para coleta dos dados em campo, com alimentação via fonte, com entrada para sensores com comunicação I2C e analógica. ....	133
Figura 82. QRCode do banco de dados online, o qual apresenta a distribuição temporal dos dados dos sensores FDR. ....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelo de sensores de temperatura utilizados. ....	42
Tabela 2. Modelo de sensores de UR utilizados.....	43
Tabela 3. Sensores de pressão atmosférica utilizados. ....	43
Tabela 4. Modelos de fotodiodos utilizados como sensores de irradiância. ....	44
Tabela 5. Classificação do coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas (1997).....	49
Tabela 6. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a temperatura. ....	53
Tabela 7. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a UR.....	55
Tabela 8. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a pressão atmosférica. ....	56
Tabela 9. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a radiação solar.....	58
Tabela 10. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade do anemômetro digital para a velocidade média do vento.....	59
Tabela 11. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade do pluviômetro para a precipitação aplicada. ....	60
Tabela 12. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade da evapotranspiração calculada a partir dos dados da estação desenvolvida comparados com a estação automática.....	63
Tabela 13. Descrição de custos dos componentes da estação desenvolvida. ....	64
Tabela 14. Comparação do custo de aquisição dos componentes da estação desenvolvida com outros modelos de mercado.....	65
Tabela 15. Modelos de sensores utilizados, com informações de seus fabricantes, outras variáveis medidas e custo de aquisição. ....	73
Tabela 16. Parâmetros da equação de Van Genuchten, para cada um dos solos utilizados. ....	74
Tabela 17. Classificação do coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas (1997).....	85
Tabela 18. Descrição de índices avaliativos, propostos. ....	87
Tabela 19. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor crowtail a variação da umidade do solo.....	90
Tabela 20. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor CS 1.2 a variação da umidade do solo.....	92

Tabela 21. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Grove a variação da umidade do solo.....	95
Tabela 22. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Octopus a variação da umidade do solo.....	96
Tabela 23. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor PM WCS 3 a variação da umidade do solo.....	99
Tabela 24. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da umidade do solo.....	100
Tabela 25. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Stemma a variação da umidade do solo.....	103
Tabela 26. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor VH400 a variação da umidade do solo.....	104
Tabela 27. Síntese da média dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta dos sensores para a variação da umidade do solo. ....	105
Tabela 28. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Crowtail a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	107
Tabela 29. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor CS 1.2 a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	109
Tabela 30. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Grove a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	110
Tabela 31. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Octopus a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	112
Tabela 32. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor PM WCS 3 a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	115
Tabela 33. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	117
Tabela 34. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Stemma a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	118
Tabela 35. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor VH400 a variação da tensão de retenção da umidade do solo. ....	120
Tabela 36. Erro absoluto médio, dos 10% com maiores valores de RMSE. ....	121
Tabela 37. Síntese dos parâmetros estatísticos, referentes a validação de dados por medidas pontuais. ....	122

Tabela 38. Síntese dos parâmetros estatísticos, referentes a validação de dados por medidas pontuais.....	124
Tabela 39. Apresentação das variáveis relacionadas ao raio e volume de solo influentes nas leituras de cada um dos sensores utilizados. ....	129
Tabela 40. Comparação da faixa útil de resposta dos sensores, associados a unidade de resposta e a resolução de leitura, dentro da faixa de tensão de 0,1 a 4 mca.....	129
Tabela 41. Situação final dos sensores após o período integral de testes.....	131

## INTRODUÇÃO

Desde os primórdios do desenvolvimento humano, em regiões áridas como a Mesopotâmia e o Egito, o homem utilizava técnicas que visam a condução de água de grandes corpos hídricos até suas plantações, instituindo assim o início do que se conhece hoje como irrigação. Entretanto em regiões com clima mais úmido e regime de chuvas mais uniforme a irrigação teve um papel complementar na produção agrícola, emergindo de fato em um período mais recente (ANA, 2017).

O Brasil, por sua vez figura no segundo grupo, onde a irrigação teve seu início em meados de 1900 nas produções de arroz no Rio Grande de Sul, com crescimento relevante no restante do país por volta dos anos 70 e 80. Desta forma compreende-se, que no Brasil a atividade teve crescimento visando aumento da produtividade, estabilidade na oferta de alimentos e aumento da segurança alimentar, elevando assim o potencial agrícola nacional e em regiões antes pouco exploradas (ANA, 2017; TESTEZLAF, 2017).

Nos últimos 55 anos, o Brasil expandiu sua área irrigada em 14000%, partindo de aproximadamente 0,5 Mha para 7 Mha em 2015, onde 65% da área irrigada se encontra no eixo sul x sudeste, tendo os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul representando em torno de 53% desta. É esperado, até 2030, que o Brasil atinja a casa dos 10 Mha irrigados, tendo o centro-oeste como um dos principais responsáveis por esse avanço (IBGE, 2009; ANA, 2017, 2019).

A agricultura irrigada é caracterizada como atividade de uso consultivo do recurso hídrico, alterando suas características qualitativas e quantitativas, sendo assim são requeridas estratégias para a otimização da produtividade, o que além de reafirmar a segurança alimentar mundial, visa um uso mais racional do recurso (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Durante o ano de 2018, a irrigação foi responsável pelo consumo de 728 m<sup>3</sup>/s de água, sendo o maior consumidor brasileiro, totalizando 66%, com estimativa de atingir até o ano de 2030 a vazão de 1055 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2017).

Embora a agricultura irrigada seja associada a alto grau de nível técnico, para alguns autores ela ainda é praticada de forma imprecisa e com grande desperdício de recursos finitos, como a água e a energia. Dessa forma busca-se a implementação de técnicas com intuito de auxílio no manejo da irrigação, aspirando uma exploração mais racional e eficiente, proporcionando a manutenção da condição de umidade do solo e a fitossanidade (COELHO, 2007; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

A análise climatológica figura como uma das técnicas mais implementadas no manejo da irrigação, onde variáveis ambientais como temperatura, pressão, umidade, velocidade do vento e radiação são utilizadas para alimentar modelos de estimativa de evapotranspiração, a qual representa a associação dos fenômenos de evaporação da água no solo e a evaporação na superfície foliar (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Outra forma vastamente difundida, é o balanço de umidade no solo, o qual utiliza ferramentas para o monitoramento do teor de água existente na zona radicular das plantas, bem como sobre a energia com que a água está retida no solo. Podendo ser executado de forma direta, pelo método gravimétrico ou de forma indireta por equipamentos como as sondas TDF, FDR ou tensiometria (LIBARDI, 2018).

Com o advento da tecnologia, diversos ramos da sociedade obtiveram avanços, assim como a agricultura irrigada. Desta forma, a instrumentação, automação agrícola e inteligência artificial são ferramentas que visam a coleta de informação e tomada de ação em tempo real, munida de algoritmos capazes de retroalimentarem seus banco de dados e aprimorarem suas escolhas (TALAVIYA et al., 2020; VIJ et al., 2020).

Atualmente, a redução de custos e difusão de tecnologia de internet das coisas e o movimento *maker* popularizou sistemas embarcados como Arduino, Raspberry, Esp e outros, na instrumentação e automação de atividades residenciais, industriais e agrícolas. Os quais fornecem dispositivos baratos, compactos, leves, rápidos e capazes de serem implementados em soluções inteligentes e individuais.

Essas ferramentas permitem que sejam criados dispositivos ímpares, capazes de atuarem em atividades extremamente específicas, ou ainda em consórcio com demais equipamentos, por serem dotados de porta de entrada e saída onde permitem a leitura de sensores e o controle de atuadores, além de permitirem acesso remoto por diferentes sistemas.

Com base no apresentado, o seguinte trabalho tem o intuito de calibrar sensores para auxílio no manejo da água na agricultura irrigada, baseado na metodologia climatológica, com sensores de variáveis ambientais calibrados e ligados a um controlador, fornecendo além dos parâmetros a cálculo de evapotranspiração diária. Por via balanço de umidade do solo, serão utilizados sensores modelos FDR, os quais serão calibrados por meio de lisímetros de pesagens, associados a pontos discretos.

## Referências

- ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 56, p. 300, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>>.
- ANA. **Atlas Irrigação - Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2017.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília - DF: ANA Brasília, 2019.
- BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1453–1460, set. 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2008.0082>>.
- CARLETON COLLEGE. **Evapotranspiration and Crop Water Use**. Disponível em: <[https://serc.carleton.edu/integrate/teaching\\_materials/food\\_supply/student\\_materials/1091](https://serc.carleton.edu/integrate/teaching_materials/food_supply/student_materials/1091)>
- CARVALHO, D. F. (UFRRJ); OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. 1. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2012.
- COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. ESALQ - USP, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-06112007-101254/publico//CoelhoLivreDocencia2007.pdf>>.
- DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. v. 53
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements - FAO 24. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 24, p. 154, 1977.
- FOLEGATTI, M. V.; SILVA, T. J. A.; CASSARINI, E. **A cobrança pelo uso da água na agricultura**. Embu - SP: IQUAL Editora, 2004.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. [s.l: s.n.]
- KOLE, C. **Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 1
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. São Paulo, SP - Brasil: Ed. USP, 2018.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2009.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. p. 203, 2007.
- PORTELA, J. C.; LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. de J. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 49–54, 2001.
- SHMUGGE, T. J.; ANDRÉ, J. C. **Land Surface Evaporation**. New York, NY: Springer New



York, 1991. v. 53

SILVA, A. M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-27012006-043239/>>.

SOUZA, C. F. et al. Monitoramento Do Teor De Água No Solo Em Tempo Real Com As Técnicas De Tdr E Fdr. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 26, 2018.

TALAVIYA, T. et al. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 58–73, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.04.002>>.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual De Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA - Solos, 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. 1. ed. Campinas, SP: Unicamp - FEAGRI, 2017.

VIJ, A. et al. IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 1250–1257, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>>.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1. Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada

Entre os problemas que mais assolam a humanidade, destaca-se a crise hídrica vivida nos últimos anos, ocasionada por mudanças climáticas e eventos de origem antrópica, resultado em elevado impacto na disponibilidade quantitativa e qualitativa do recurso hídrico.

Ressalta-se que a agricultura irrigada é responsável pelo consumo de aproximadamente 745 m<sup>3</sup>/s, o que representa aproximadamente 46,2 % dos recursos retirados do ambiente, se portando desta forma como o maior consumidor da água nacional, requerendo dessa forma, técnicas que otimizem seu uso na irrigação (ANA, 2017, 2019).

Define-se como manejo de irrigação o conjunto de técnicas associadas ao fornecimento de informações, que permitam ao irrigante definir quando e quanto de água fornecer as culturas em exploração, corroborando para o melhor desempenho genético da mesma, associado a otimização do uso do recurso hídrico disponível (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Em projetos de irrigação, muitas são as variáveis que influenciam nas metodologias empregadas para se obter o uso racional do recurso hídrico, entretanto, considerando o sistema solo x água x planta x atmosfera, o manejo da irrigação pode ser realizado de 3 formas, com análises baseadas no solo, na planta ou ainda de climatológica, como se apresenta a seguir (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

#### 1.1.1. Manejo por via climatológica

Os fatores ambientais têm a capacidade de influenciar a transpiração dos vegetais, à medida que alteram o gradiente de vapor de água entre a superfície foliar e a camada atmosférica que a circunda. Desta forma o processo de evapotranspiração (**Error! Reference source not found.**) apresenta como principais variáveis: temperatura, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, pressão e disponibilidade hídrica no solo (SHMUGGE; ANDRÉ, 1991).

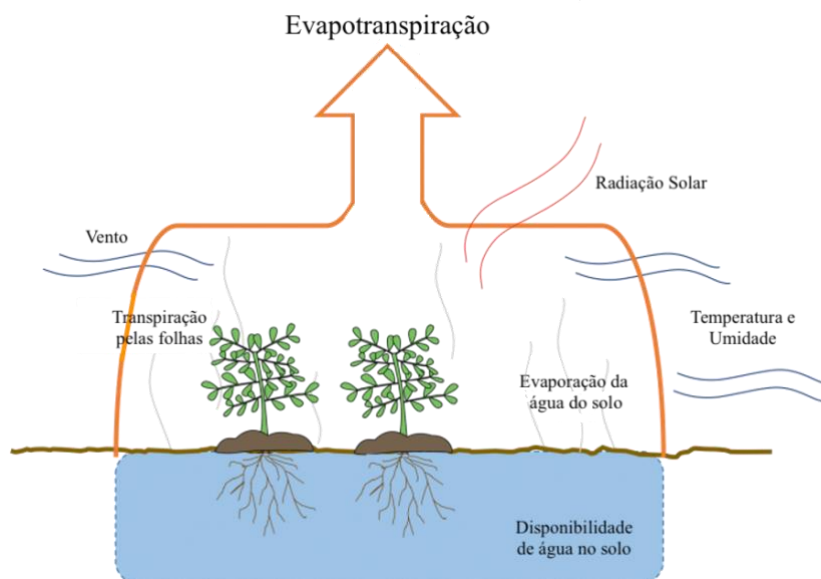


Figura 1. Processo de evapotranspiração, com ênfase para suas variáveis de influência. Fonte: Adaptado de Carleton College (2020).

- Radiação solar – considerada a principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração (ET);
- Temperatura – a variação de temperatura ao longo do dia acarreta uma variação na demanda evaporativa do ar, em condições de aquecimento aumenta o déficit de saturação;
- Umidade relativa do ar (UR) – atua em conjunto com a temperatura, influenciando na demanda evaporativa, em ambientes com elevada UR tende-se a ocorrência de baixos déficits de saturação, acarretando baixa ET; e
- Vento (advecção regional de energia) – a advecção representa o transporte de energia de uma área mais seca para uma mais úmida. O vento pode ainda remover o ambiente de elevada umidade criado entre as folhas e a atmosfera, a remoção repentina deste ambiente pode criar uma elevada demanda evaporativa, elevando assim a ET.
  - Pressão (advecção regional de energia) – apresenta influência sobre o calor latente de vaporização ( $\lambda$ ), o qual representa a quantidade de energia necessária para a transformação de uma unidade de massa de água líquida para o estado de vapor, a uma determinada condição de pressão e temperatura constantes.
- Disponibilidade hídrica no solo – segundo a teoria dos potenciais da água no solo, a medida em que sua presença é reduzida, o potencial de retenção (potencial mátrico) apresentação aumento, reduzindo assim a taxa de extração dela, em condições climatológicas padrão. Adicionalmente, a maior parte dos modelos considera o solo em capacidade de campo, o que requer dos mesmos correções quando utilizados em locais onde esta característica não é verdadeira.

O efeito combinado dos fatores acima listados, definem a demanda atmosférica por vapor de água, a qual rege o processo evapotranspirativo (DOORENBOS; PRUITT, 1977; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

### **1.1.2. Manejo via solo**

O solo é um material natural, sólido e poroso, que adsorve em seus poros a solução do solo (água + íons) e uma solução gasosa, composta principalmente por N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vapor de água e baixas concentrações de outros gases. Os sólidos que compõe este material são de origem mineral e orgânica de diversos tamanhos formando aglomerados de estruturas variáveis e arquitetura complexa (LIBARDI, 2018).

Na metodologia de manejo baseada no solo, medidas pontuais possibilitam a estimativa da lâmina de água a ser aplicada no meio, em função da água disponível e o nível de umidade atual, objetivando com que o meio atinja a capacidade de campo, disponibilizando a maior quantidade de água possível as culturas (FOLEGATTI; SILVA; CASSARINI, 2004; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Destaca-se, que a medida de umidade do solo pode ser expressa de diversas formas, como é o caso da umidade com base mássica, base volumétrica ou ainda através de seu potencial de retenção no solo, através dos equipamentos e metodologias baseados no solo (PORTELA; LIBARDI; VAN LIER, 2001).

As metodologias com esta base podem ser classificadas em obtenção direta da umidade, como é o caso da gravimetria, ou ainda indireta, como é o caso da reflectometria no domínio da frequência ou ainda a tensiometria.

### **1.1.3. Manejo via planta**

Segundo o principal processo fisiológico dos vegetais, a respiração e assimilação de carbono decorrentes da fotossíntese, requerem a presença de água para sua conclusão, a qual libera oxigênio ao ambiente em forma de O<sub>2</sub> agindo como acceptor final de elétrons no processo (KOLE, 2013; SOUZA et al., 2018).

Desta forma o estresse hídrico, segundo baixa disponibilidade hídrica as culturas resultam em diversas alterações fisiológicas, as quais podem ser mesuradas, analisadas e utilizadas como parâmetros para gatinho e manejo da água na agricultura irrigada (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Um dos principais parâmetros a ser observado é a elevação da temperatura foliar, em relação ao ambiente, a qual representa a redução da taxa de transpiração, ocasionando no acúmulo de temperatura na zona foliar (KOLE, 2013).

Não obstante, técnicas como avaliação da pressão hidrostática da seiva xilemática do tecido foliar podem representar o nível de estresse hídrico ao qual as culturas se encontram, onde tensões elevadas podem ser encontradas em vegetais expostos a condições mais áridas, com baixa disponibilidade de recurso hídrico (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Demais alterações como redução de área foliar e zona radicular ativa também podem ser correlacionadas ao estresse hídrico recorrente, entretanto não apresentando elevado potencial para auxílio do manejo da irrigação, por se tratar de respostas permanentes ou que originam perdas irreversíveis, ou ainda de elevado impacto na produtividade (DASBERG; OR, 1999).

Em suma, diversos são os reflexos observados, como alterações morfológicas dos vegetais, quando expostos ao estresse hídrico, cabendo ao irrigante a seleção da melhor técnica associado a sua cultura, baseado na mão de obra e conhecimento técnico.

## 1.2. Umidade do solo

O solo é um material natural, sólido e poroso, que adsorve em seus poros a solução do solo (água + íons) e uma solução gasosa, composta principalmente por N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vapor de água e baixas concentrações de outros gases. Os sólidos que compõe este material são de origem mineral e orgânica de diversos tamanhos formando aglomerados de estruturas variáveis e arquitetura complexa (LIBARDI, 2018).

Para o cálculo da umidade do solo, considera-se uma porção do mesmo com a forma de um paralelepípedo, com altura (y), largura (x), comprimento (z) e sua face superior coincidindo com a superfície, desta forma a obtenção de seu volume (V) pode ser descrita como a equação 1. Sendo o volume do solo composto pela soma do volume dos sólidos (V<sub>s</sub>) e o volume dos poros (V<sub>p</sub>), como é apresentado na equação 2. O espaço poroso, encontra-se ocupado com ar ou solução e desta forma a equação 2 pode ser reescrita como a equação 3 (LIBARDI, 2018).

$$V = x \cdot y \cdot z \quad ( 1 )$$

$$V = V_s + V_p \quad ( 2 )$$

$$V = V_s + V_{ar} + V_{água} \quad ( 3 )$$

Em um solo estruturado, ou seja, onde não ocorre variação significativa de V<sub>p</sub> considera-se que qualquer que seja a variação de seu volume interno de água (V<sub>água</sub>) acarreta uma variação direta em seu V<sub>ar</sub>. No tocante a massa do sistema, considera-se que a massa total (m) é

correspondente a soma da massa dos sólidos ( $m_s$ ) mais a água ( $m_{\text{água}}$ ), desconsiderando assim a massa de ar presente no mesmo (equação 4).

$$m \cong m_s + m_{\text{água}} \quad ( 4 )$$

A umidade do solo é um índice básico, utilizado para representar a água presente em uma amostra de solo, tradicionalmente descrito em duas formas básicas, sendo a primeira com base em massa ( $U$ ) que relaciona a massa de água com a massa dos sólidos presentes e ainda em base volumétrica ( $\theta$ ), relativo a relação entre o volume de água e o volume total da amostra, como mostram as equações 5 e 6, estas duas grandezas podem ser igualadas com a adoção da densidade do solo ( $D_s$ ), apresentado na equação 7.

$$U = m_{\text{água}} / m_s \quad ( 5 )$$

$$\theta = V_{\text{água}} / V_{\text{Total}} \quad ( 6 )$$

$$\theta = U \cdot D_s \quad ( 7 )$$

A retenção de água pelo solo pode ser explicada por 2 processos distintos, sendo por meio das forças de capilaridade, onde o solo forma uma rede complexa de poros que se comportam como tubos capilares, retendo assim a água em seu interior e ainda por forças de adsorção, onde a água adere a superfície dos sólidos presentes no solo, de forma a criar um filme (LIBARDI, 2018). Ambos os processos são representados na Figura 2.

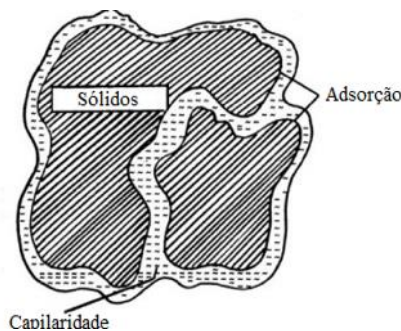


Figura 2. Representação da água retida no solo, tanto por capilaridade entre as partículas como por adsorção em forma de filme na superfície dos sólidos. Fonte: Adaptado de LIBARDI, 2018.

### 1.3. Curva de retenção da água no solo

A curva de retenção da água no solo é um parâmetro físico, com representação gráfica, construída em um laboratório, expressando a relação entre o potencial mátrico e a umidade presente no solo, seja em base mássica ou volumétrica (BITTELLI; FLURY, 2009; LIBARDI, 2018).

Uma amostra de solo saturado com água, disposto somente sob a pressão atmosférica é acomodado em uma placa porosa, a qual exerce na amostra uma função de sucção, drenando desta forma parte da água presente, processo o qual se estabiliza quando a tensão de retenção na água no solo se equilibra com a tensão de sucção (TEIXEIRA et al., 2017).

Esta primeira fase, com tensões a partir da saturação podem ser exercidas a partir de um funil de placa porosa (Figura 3 – A), e posteriormente para pressões mais elevadas com o auxílio de uma câmara de pressão de Richards (Figura 3 – B) (SILVA, 2005a).

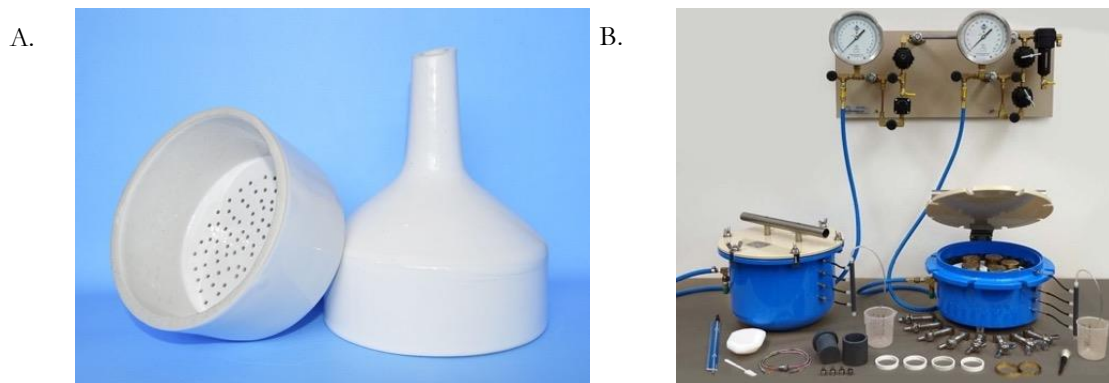


Figura 3. A - Funil de placa porosa; B - Câmara de Richards em azul, com manômetros localizados a cima e seus acessórios a frente. Fonte: Adaptado de Silva, 2005.

Para tensões até aproximadamente 10 kPa pode-se fazer uso do funil de placa porosa, o qual acomoda o solo em uma placa cerâmica, e com o desnível entre essa e sua saída exerce uma tensão de extração da solução presente na amostra, podendo ser regulando somente com a mudança de nível entre os componentes (Figura 4 – A). Entretanto para tensões superiores requerer-se um equipamento mais aprimorado, como é o caso da câmara de Richards, uma panela de pressão, a qual a amostra é acomodada sob uma placa porosa e recebe um incremento de pressão, com a solução da amostra tendo como único caminho o escoamento para a placa porosa, método o qual pode atingir tensões até 2000 kPa (Figura 4 – B) (TEIXEIRA et al., 2017; LIBARDI, 2018).

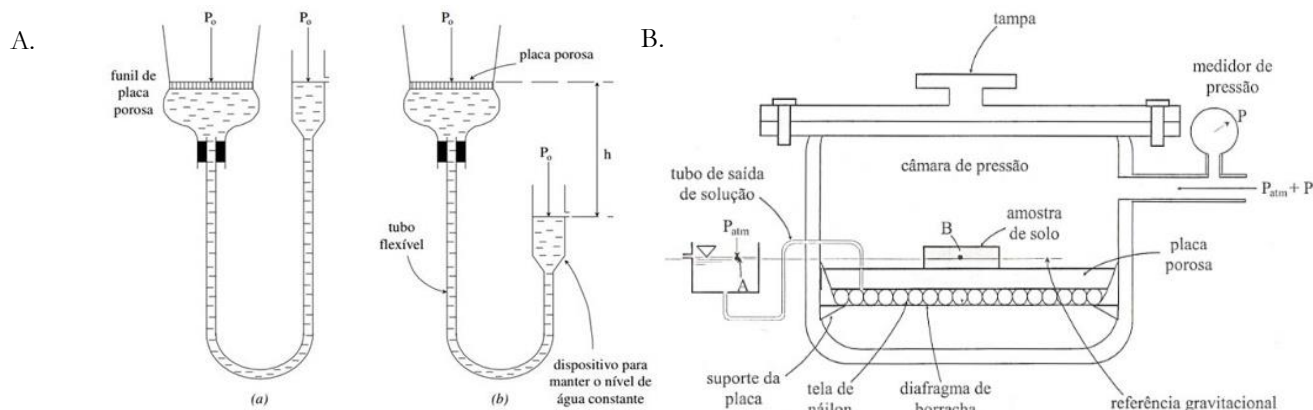


Figura 4. A - Esquema de funcionamento do funil de placa porosa, com destaque para o mesmo em nível e com tensão de retenção  $h$ ; B - câmara de Richards, com amostra de solo acomodada sob a placa porosa acima do diafragma, recebendo pressão de uma fonte externa e tendo a água de sua amostra translocada por um tubo de saída. Fonte: Adaptado de Libari, 2018.

## Referências

ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 56, p. 300, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>>.

ANA. **Atlas Irrigação - Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2017.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília - DF: ANA Brasília, 2019.

BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1453–1460, set. 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2008.0082>>.

CARLETON COLLEGE. **Evapotranspiration and Crop Water Use**. Disponível em: <[https://serc.carleton.edu/integrate/teaching\\_materials/food\\_supply/student\\_materials/1091](https://serc.carleton.edu/integrate/teaching_materials/food_supply/student_materials/1091)>

CARVALHO, D. F. (UFRRJ); OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. 1. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2012.

COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. ESALQ - USP, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-06112007-101254/publico//CoelhoLivreDocencia2007.pdf>>.

DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. v. 53

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements - FAO 24. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 24, p. 154, 1977.

FOLEGATTI, M. V.; SILVA, T. J. A.; CASSARINI, E. **A cobrança pelo uso da água na agricultura**. Embu - SP: IQUAL Editora, 2004.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. [s.l: s.n.]



KOLE, C. **Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 1

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. São Paulo, SP - Brasil: Ed. USP, 2018.

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

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. p. 203, 2007.

PORTELA, J. C.; LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. de J. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 49–54, 2001.

SHMUGGE, T. J.; ANDRÉ, J. C. **Land Surface Evaporation**. New York, NY: Springer New York, 1991. v. 53

SILVA, A. M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-27012006-043239/>>.

SOUZA, C. F. et al. Monitoramento Do Teor De Água No Solo Em Tempo Real Com As Técnicas De Tdr E Fdr. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 26, 2018.

TALAVIYA, T. et al. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 58–73, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.04.002>>.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual De Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA - Solos, 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. 1. ed. Campinas, SP: Unicamp - FEAGRI, 2017.

VIJ, A. et al. IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 1250–1257, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>>.

## 2. DESENVOLVIMENTO DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA PARA AUXÍLIO DO MANEJO DA IRRIGAÇÃO

### Resumo

Consagrada por sua elevada confiabilidade, o manejo da irrigação baseado em dados climatológicos apresenta excelente aplicabilidade para diversas culturas e sistemas de irrigação, possibilitando melhoria da eficiência do uso da água pela agricultura irrigada. Desta forma, propôs-se neste trabalho a calibração de sensores de variáveis ambientais, como: temperatura, umidade relativa, pressão, velocidade do vento, radiação e precipitação, com posterior construção de uma estação meteorológica automática, mensurando as variáveis listadas a cada 10 segundos, com posterior extração dos extremos e médias, dados os quais são enviados a um banco de dados online, com cálculo diário de evapotranspiração às 00:00, pelo método de Penman Monteith. Visando sua avaliação, foram comparados os valores de lâmina evapotranspirada de um período contínuo de 30 dias, com os de uma estação automática, interligada a rede do INMET, resultando em um RMSE de 0,38 mm, sendo classificada como excelente, segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas, para a estimativa de evapotranspiração.

Palavras-chave: Climatologia; Penman Monteith; Evapotranspiração; Instrumentação.

### Abstract

Consecrated for its high reliability, irrigation management based on climatological data has excellent applicability to various crops and irrigation systems, enabling improvement in the efficiency of water use by irrigated agriculture. Thus, this work proposes the calibration of sensors for environmental variables, such as: temperature, relative humidity, pressure, wind speed, radiation and precipitation, with subsequent construction of an automatic meteorological station, measuring the variables listed every 10 seconds, with subsequent extraction of extremes and averages, data which are sent to an online database, with daily calculation of evapotranspiration at 00:00, by the method of Penman Monteith. For its evaluation, evapotranspiration values of a continuous period of 30 days were compared with those of an automatic station, connected to the INMET network, resulting in a RMSE of 0.38 mm, being classified as excellent, according to the coefficient of Camargo and Sentelhas confidence to estimate evapotranspiration.

Keywords: Climatology; Penman Monteith; Evapotranspiration; Instrumentation.

### 2.1. Introdução

Desde os primórdios do desenvolvimento humano, em regiões áridas como a Mesopotâmia e o Egito, o homem utilizava técnicas que visam a condução de água de grandes corpos hídricos até suas plantações, instituindo assim o início do que se conhece hoje como irrigação. Entretanto em regiões com clima mais úmido e regime de chuvas mais uniforme a irrigação teve um papel complementar na produção agrícola, emergindo de fato em um período mais recente (ANA, 2017).

O Brasil integra o campo da irrigação desde o início do século 20, com a cultura do arroz no Rio Grande do Sul, com seu aumento expressivo nas décadas de 70 e 80. Desta forma compreende-se, que a atividade teve crescimento visando aumento da produtividade, estabilidade

na oferta de alimentos e aumento da segurança alimentar, elevando assim o potencial agrícola nacional e em regiões antes pouco exploradas (ANA, 2017; TESTEZLAF, 2017).

Nos últimos 50 anos, o Brasil expandiu sua área irrigada em 14000%, partindo de aproximadamente 0,5 Mha para 7 Mha em 2015, onde 65% da área irrigada se encontra no eixo sul x sudeste, tendo os estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul representando em torno de 53% desta. É esperado, até 2030, que o Brasil atinja a casa dos 10 Mha irrigados, tendo o centro-oeste como um dos principais responsáveis por esse avanço (IBGE, 2009; ANA, 2017, 2019).

Caracterizada como atividade de uso consuntivo, a irrigação altera as características qualitativas e quantitativas, consumindo em 2018 aproximadamente  $728 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  de água sendo o maior consumidor brasileiro, totalizando 66%. Estimasse, que até 2030 este valor atinja a casa dos  $1055 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , o que redobra a necessidade de estratégias que otimizem o uso deste recurso, maximizando a produção a fim de reafirmar a segurança alimentar, disponibilizando água de qualidade aos habitantes (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; ANA, 2017).

Embora a agricultura irrigada seja associada a alto grau de nível técnico, para alguns autores ela ainda é praticada de forma imprecisa e com grande desperdício de recursos finitos, como a água e a energia. Dessa forma busca-se a implementação de técnicas com intuito de auxílio no manejo da irrigação, aspirando uma exploração mais racional e eficiente, proporcionando a manutenção da condição de umidade do solo e a fitossanidade (COELHO, 2007; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

A análise climatológica figura como uma das técnicas mais implementadas no manejo da irrigação, onde variáveis ambientais como temperatura, pressão, umidade, velocidade do vento e radiação são utilizadas para alimentar modelos de estimativa de evapotranspiração, a qual representa a associação dos fenômenos de evaporação da água no solo e a evaporação na superfície foliar (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998; CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Considera-se a metodologia de Penman-Monteith como o padrão para a calibração de outros métodos, pois além de levar em consideração variáveis como temperatura e radiação solar apresenta elevada precisão e exatidão quando comparado a resposta obtida por meio de lisímetros (ALLEN, 1986; CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Conhecida por requerer um elevado número de parâmetros meteorológicos, por vezes o método de Penman-Monteith é substituído, visando a redução da complexidade de sua implementação. Desta forma, a utilização de estações automáticas, contribui para a redução nos erros humanos de transcrição de dados e simplifica a rotina de cálculos, possibilitando sua utilização de forma integral (JHA et al., 2019; XUE et al., 2020).

Com o advento da tecnologia, diversos ramos da sociedade obtiveram avanços, assim como a agricultura irrigada. Desta forma, a instrumentação, automação agrícola e inteligência artificial são ferramentas que visam a coleta de informação e tomada de ação em tempo real, munida de algoritmos capazes de retroalimentarem seus banco de dados e aprimorarem suas escolhas (TALAVIYA et al., 2020; VIJ et al., 2020).

Atualmente, a redução de custos e difusão de tecnologia de internet das coisas e o movimento *maker* popularizou sistemas embarcados como Arduino, Raspberry, Esp e outros, na instrumentação e automação de atividades residenciais, industriais e agrícolas. Os quais fornecem dispositivos baratos, compactos, leves, rápidos e capazes de serem implementados em soluções inteligentes e individuais (BARBON et al., 2016; GKIOLMAS et al., 2020; KONDAVEETI et al., 2021).

Essas ferramentas permitem que sejam criados dispositivos ímpares, capazes de atuarem em atividades extremamente específicas, ou ainda em consórcio com demais equipamentos, por serem dotados de porta de entrada e saída onde permitem a leitura de sensores e o controle de atuadores, além de permitirem acesso remoto por diferentes sistemas (GONZÁLEZ; CALDERÓN, 2019; PAVEETHRA et al., 2020).

Com base no apresentado, o seguinte trabalho tem o intuito de calibrar sensores climatológicos, visando a construção de uma estação meteorológica automática para auxílio no manejo da água na agricultura irrigada, baseado na metodologia climatológica, com cálculo da evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith com dados diários a partir de um controlador central, o qual realiza a leitura dos sensores e deposita os dados em um banco de dados online.

## **2.2. Material e métodos**

### **2.2.1. Caracterização do local do experimento**

O trabalho foi desenvolvido na área de pesquisa experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ – USP) com a primeira fase em ambiente protegido (Figura 5), especialmente construído em projeto de pesquisa anterior para mensuração da eficiência de água das culturas agrícolas (Processo FAPESP 2010/50083-7), situada no município de Piracicaba – SP.

A região apresenta clima Aw, tropical, segundo a escala de Köppen, apresentando chuvas no verão e seca no inverno (DIAS; ALVARES; SENTELHAS, 2017). A estufa é construída com 3 vãos conjugados com área total de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, e pé-direito de 5,2 m de altura, contando com cobertura plástica transparente difusor de radiação e laterais fechadas com sombrite preto, com 50% de interceptação de radiação global.



Figura 5. Estufa utilizada e sua localização. A – Prédio principal do departamento de engenharia; B – Estufa.

### 2.2.2. Aquisição e armazenamento de dados

Para tal atividade foi desenvolvido um circuito digital com base no microcontrolador Arduino Micro (Figura 6), o qual trabalha com tensão nominal de 5 volts, contando com 20 pinos de entrada e saída para a conexão de sensores e atuadores, sendo todos digitais, 7 com função *Pulse Width Modulation* (PWM) e 12 com função analógica. Adicionalmente o processador trabalha com *clockspeed* de 16 MHz e permite a utilização dos protocolos de comunicação: *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter-Integrated Circuit* (I<sup>2</sup>C), *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (UART) e *Wire* (ARDUINO INC., 2020).



Figura 6. Microcontrolador Arduino micro.

Para auxílio de verificação de funcionamento, incluiu-se no dispositivo de leitura um módulo bluetooth HM-10 (Figura 7 - A), pelo qual era enviado em tempo real cada uma das leituras, bem como um display LCD (Figura 7- B), o qual apresentava em tempo real todas as leituras realizadas.

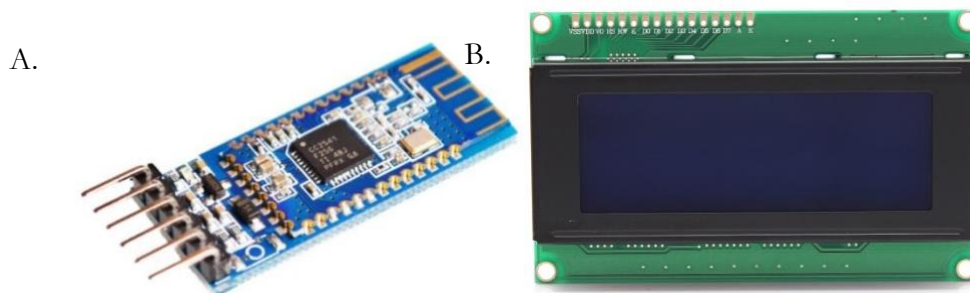


Figura 7. A - Módulo bluetooth Hm-10; B - Display LCD.

A coleta de dados ocorrerá em intervalos de 10 segundos e a cada 10 minutos serão extraídos os valores extremos e uma média dos dados, a fim de evitar problemas de oscilações

de resposta em torno do valor real (CANAFISTULA, 2013). Os dados coletados serão armazenados em um cartão micro SD, por meio de um módulo de comunicação SPI (Figura 8), onde será estruturado de forma a gerar um relatório compatível com os gerenciadores de planilha, salvo em formato separado por vírgula (CSV).



Figura 8. Módulo de leitura de cartão de memória.

A rotina de coleta segue o mesmo padrão de funcionamento de uma estação automática profissional, a qual será utilizada como padrão de dados para a calibração dos sensores utilizados, visto que eles serão instalados lado a lado, no interior da estufa a 2 m do solo. O dispositivo criado contará ainda com um módulo DS3231 (Figura 9) *Real Time Clock* (RTC), a fim de sempre obter os dados de data e hora atualizados e corrigidos (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008).



Figura 9. Módulo RTC - DS3231.

### 2.2.3. Hardware e software desenvolvidos

Visando a redução de interferência por capacitância residual e impedância variável devido a diferentes cabos utilizados, optou-se pela construção de uma placa de circuito impresso, a qual foi modelada no software Kicad, gratuito e de código aberto, rodando em Windows, Linux e MacOS e é licenciado sob GNU GPL v3 (BROOKS, 2003; KICAD, 2021).

A primeira fase da modelagem é composta pela criação de um protótipo esquemático (Figura 10), dentro da ferramenta “Eeschema”, contendo todos os componentes básicos presentes no sistema, bem como a inserção de todas as ligações a serem realizadas entre os componentes presentes, bem como o *footprint* e as especificações de dimensão de largura das ligações diâmetro dos furos (KHANDPUR, 2011).

Posteriormente, realiza-se a exportação dos componentes via *netlist*, onde um arquivo de extensão “net” é criado, com todas as informações do circuito. Tal arquivo é importado na segunda

ferramenta “PcbNew” (Figura 11), onde inicialmente os componentes são incluídos em disposição aleatória e devem ser organizados da forma a serem construídos.

Ressalta-se que não existe um modelo padrão a ser seguido em tal etapa, sendo a disposição dos componentes realizada a fim de resultar em trilhas mais simples e de menor comprimento possível.

A terceira fase do processo de modelagem é a definição dos diâmetros de trilha, com sua respectiva isolamento, assim como para furos. Desta forma, pode-se gerar um arquivo *Spectra DSN*, o qual é utilizado no software *freerouting* (versão editada pelo autor) a fim de se obter uma melhor distribuição de trilhas. Com as trilhas definidas, exporta-se o arquivo *spectrasession* do *freerouting* para o *PcbNew*, obtendo desta vez a placa integralizada (Figura 12).

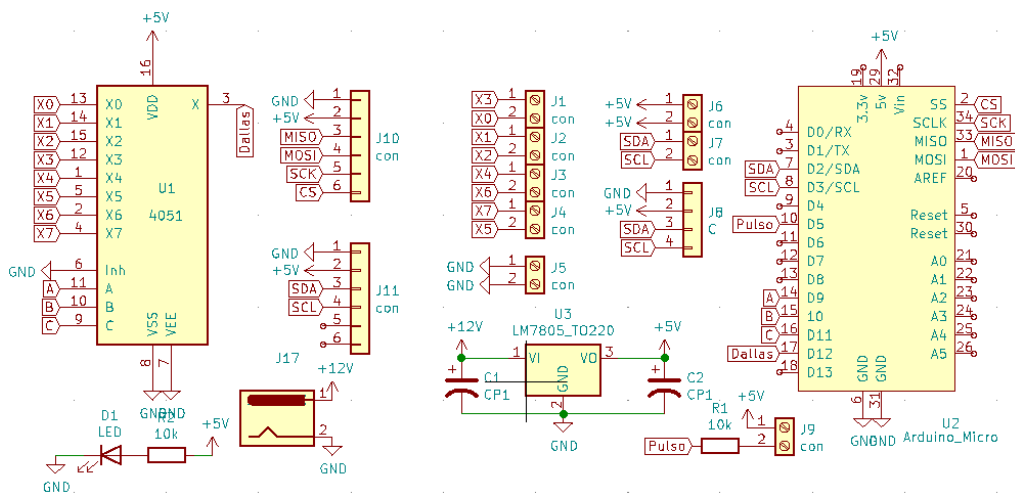


Figura 10. Diagrama esquemático do controlador desenvolvido para a leitura prévia dos sensores.

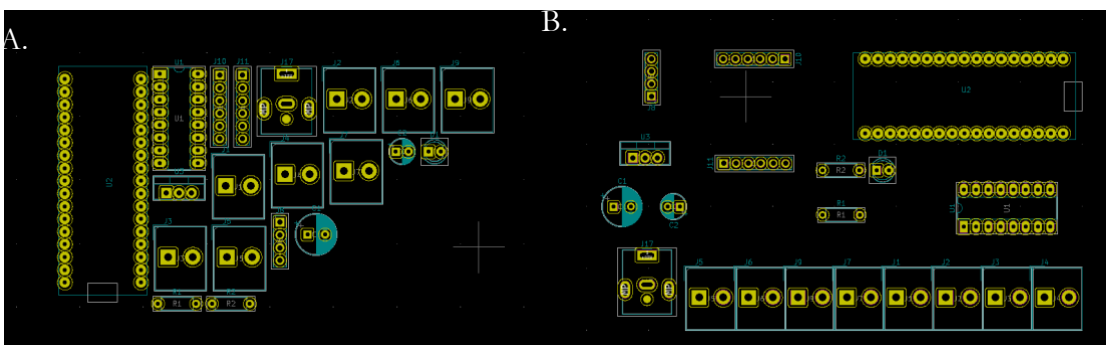


Figura 11. Diagrama gráfico da ferramenta PcbNew, com distribuição dos componentes: A – Aleatória; B – Ajustada.



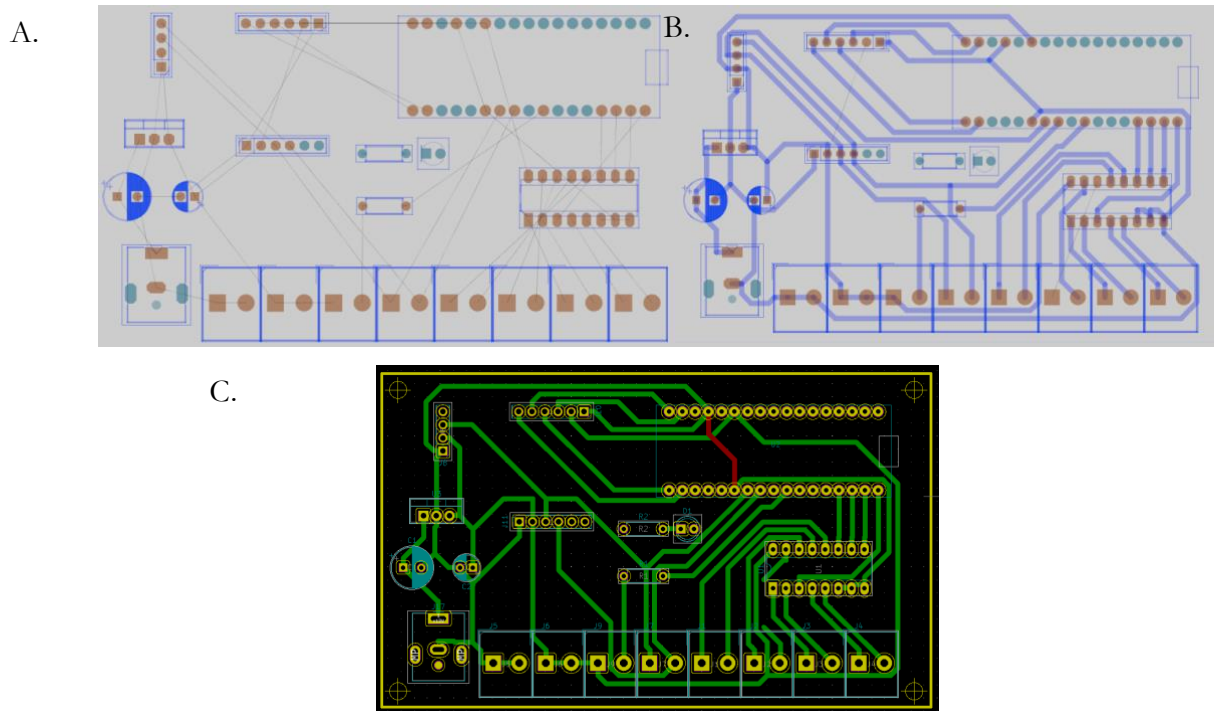


Figura 12. Passo a passo do roteamento de trilhas, sendo: A - importação do spectraDSN no freerouting; B – Roteamento das trilhas; C – Importação das trilhas roteadas no PcbNew.

Após a conclusão das trilhas, pode-se gerar o arquivo de impressão (Figura 13 – A), a partir do “PcbNew”, com auxílio do componente de plotagem, onde se seleciona todas as camadas a serem impressas. Adicionalmente, nesta fase, pode-se gerar uma visualização 3D da placa, a fim de se avaliar a distribuição o posicionamento dos componentes (Figura 13 – B), o que auxilia na montagem da placa e soldagem dos componentes.

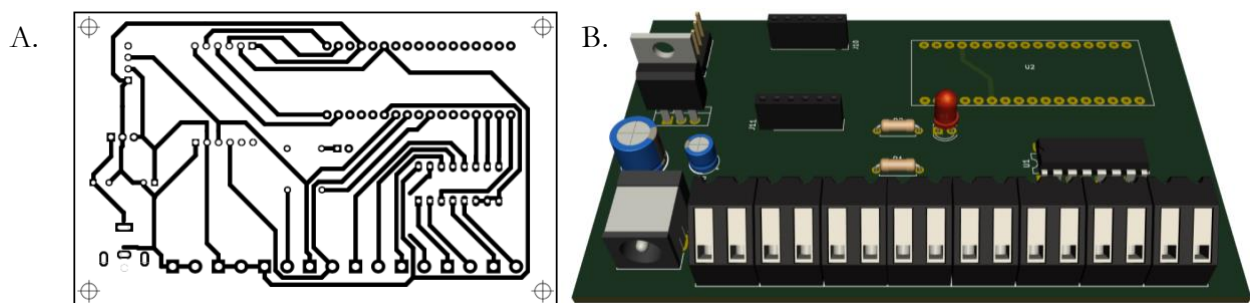


Figura 13. A - Arquivo final gerado para impressão com as trilhas; B - Visualização 3D da placa.

Com o modelo salvo, realiza-se sua impressão em papel couchê brilhoso de  $180 \text{ g m}^{-2}$  ou inferior em impressora a laser. Para a transferência das trilhas, utiliza-se uma placa com face de cobre virgem, a qual deve ser limpa com álcool isopropílico previamente, não contando com nenhuma imperfeição em sua superfície.



Fixa-se a página impressa na placa, com o desenho voltado para a superfície de cobre e realiza o aquecimento do papel, seja por prensa térmica ou ferro de passar, regulado a aproximadamente 150°C, salientando para a necessidade de aquecer a placa por completo até que ela apresente uma alteração de sua colocação para um tom amarelado.

Neste momento, emerge-se a placa em água a temperatura ambiente e com movimentos circulares, realiza a remoção do papel, resultando em uma placa de cobre recoberta de uma fina camada de tonner, na localidade das trilhas. Após conferência das trilhas, a placa deve ser imersa em uma solução de percloroeto de ferro, o qual realiza a corrosão do cobre exposto sucedendo uma placa com as trilhas compostas de cobre, com isolamento nas demais áreas (Figura 14). Após a total corrosão, a placa pode ser lavada com água e esponja de aço, com posterior limpeza por álcool isopropílico. Seguido da furação e soldagem dos componentes.

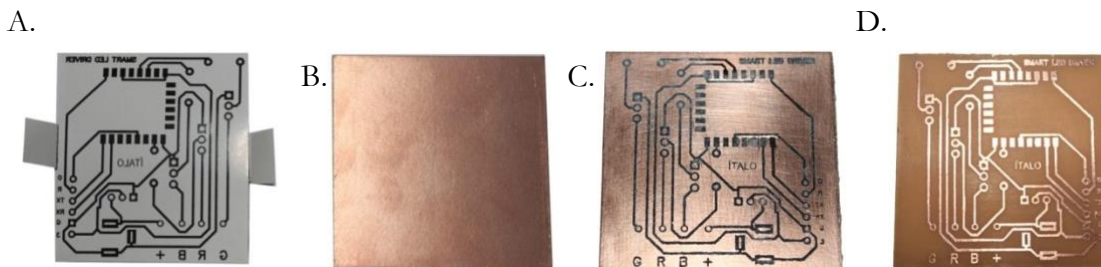


Figura 14. Passo a passo da transferência e corrosão de um circuito impresso. A - Circuito impresso; B - Placa virgem; C - Placa com circuito transferido; D - Placa após corrosão.

#### 2.2.4. Estação meteorológica padrão

Para a calibração dos sensores, utilizou-se uma estação meteorológica com sensores profissionais, instalada a 2 m metros do solo, contendo todos os sensores necessários, sendo eles:

- LI 200 X (Figura 15 – A) – fotodiodo de silício (piranômetro), monitora densidade de fluxo da radiação global ( $W m^{-2}$ ), capaz de reconhecer faixa de onda no espectro eletromagnético de 400 a 1100 nm, com acurácia de  $\pm 3\%$ (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021a);
- Anemômetro 03002 (Figura 15 – B) – mede a velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ) e direção, com faixa útil de utilização de 0 a 50  $m s^{-1}$ , com acurácia de aproximadamente 0,5  $m s^{-1}$ (SALCAS - YOUNG, 2021).
- HMP45 (Figura 15 – C) – mede a temperatura ( $^{\circ}C$ ) e a umidade relativa do ar (%), com acurácia de 0,4° C e 1%, com faixa útil de funcionamento de -39,20° a 60° C e 0,8 a 100%, para temperatura e umidade relativa respectivamente (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021b).
- Vaisala CS 106 (Figura 15 – D) – barômetro, mensura (Sugestão: mede ) a pressão atmosférica (hPa), com acurácia de 0,6 hPa e faixa útil de utilização de 500 a 1100 hPa(CAMPBELL SCIENTIFIC, 2021c).



Figura 15. Sensores presentes na estação. A – Piranômetro LI 200 X; B – Anemômetro 03002 Campbell; C – HMP45C; D – Vaisala CS 106.

Ressalta-se que a estação contava com um datalogger Campbell modelo CR1000 (Figura 16), operando com leituras a cada 10 segundos, com processamento e armazenamento de dados extremos e médios a cada 10 segundos.



Figura 16. Datalogger Campbell, modelo CR1000.

### 2.2.5. Sensores meteorológicos utilizados

Para cada uma das variáveis meteorológicas, serão testadas ao menos 3 alternativas de baixo custo, coletando dados por um período mínimo de 20 dias (com a rotina descrita no item 1.2.6), a fim de expor o mesmo a diversas condições que podem ser encontradas no dia a dia de funcionamento.

#### 2.2.5.1. Temperatura

Para estimativa desta variável os sensores em teste foram alocados dentro de um abrigo profissional modelo 41003 da empresa Young Usa (Figura 17) adequado a tal atividade. Foram utilizados 6 diferentes modelos de sensores, apresentados na Tabela 1 e Figura 18, testados de forma individual, a fim de se evitar influências por presença de outro corpo além do sensor em uso, dentro do abrigo.

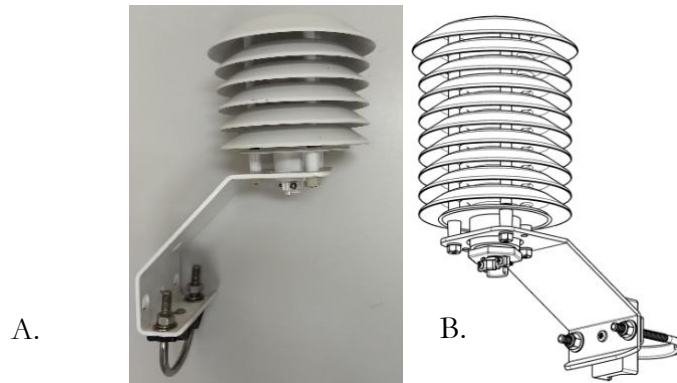


Figura 17. Abrigo utilizado para a instalação dos sensores de temperatura. A – Abrigo utilizado; B – Esquema de estrutura do abrigo. Fonte: (YOUNG USA, 2020).

Tabela 1. Modelo de sensores de temperatura utilizados.

Modelo	Marca	Faixa operacional (°C)		Comunicação	Preço (R\$)
BME280	Bosch / Adafruit	-40	85	I <sup>2</sup> C / SPI	24,00
BMP280	Bosch	-40	85	I <sup>2</sup> C / SPI	14,90
BMP180	Bosch	-40	85	I <sup>2</sup> C	18,90
DHT11	D-Robotics	0	50	1-Wire	12,90
DHT22	D-Robotics	-40	80	1-Wire	34,90
DS18B20	Dallas S.	-55	125	1-Wire	14,90

Fonte: (AOSONG ELECTRONICS, 2010a, 2010b; BOSCH SENSORTEC, 2015, 2018a, 2018b; DALLAS SEMICONDUCTOR, 2015).

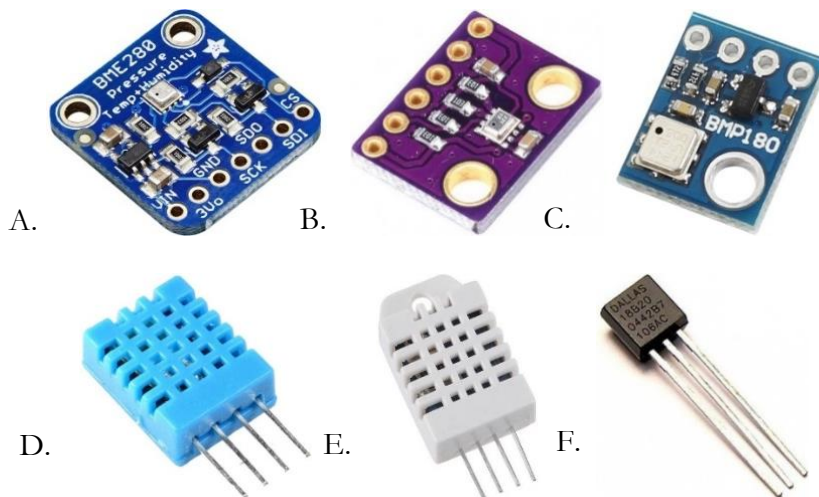


Figura 18. Sensores de temperatura utilizados. A - BME280; B - BMP280; C - BMP180; D - DHT11; E - DHT22; F - DS18B20

### 2.2.5.2. Umidade relativa do ar

Para esta variável fez-se uso de 5 sensores (Tabela 2 e Figura 19), onde 3 deles são sensores combinados que também estimam a temperatura e um deles a pressão atmosférica. O processo de coleta também foi realizado com sensor alocado no mesmo abrigo dos sensores de temperatura (Figura 17), posicionados a 2 m do solo.

Tabela 2. Modelo de sensores de UR utilizados.

Modelo	Marca	Faixa operacional (%)		Comunicação	Preço (R\$)
BME280	Bosch / Adafruit	0	100	I <sup>2</sup> C	24,00
DHT11	D-Robotics	10	90	1-Wire	12,90
DHT22	D-Robotics	0	100	1-Wire	34,90
HR202L	Ryndac	5	95	Analógico	9,90
HTU21D	Measurement	0	100	I <sup>2</sup> C	17,65

Fonte: (AOSONG ELECTRONICS, 2010a, 2010b, 2016; MEASUREMENT SPECIALITIES, 2013; BOSCH SENSORTEC, 2018a)

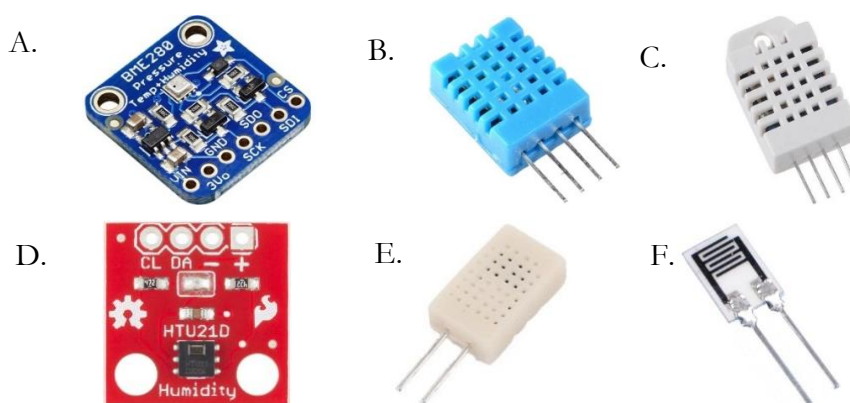


Figura 19. Sensores de UR utilizados. A – BME280; B – DHT11; C – DHT22; D - HTU21D; E - HR202L encapsulado; F - HR202L sem encapsulamento.

### 2.2.5.3. Pressão atmosférica

Para esta variável, fez-se uso de 3 modelos de sensor (Tabela 3 e Figura 20), onde ambos são sensores combinados para temperatura e um deles também para UR. Desta forma também foram condicionados no abrigo apresentado na Figura 17.

Tabela 3. Sensores de pressão atmosférica utilizados.

Modelo	Marca	Faixa operacional (hPa)		Comunicação	Preço (R\$)
BME280	Bosch / Adafruit	300	1100	I <sup>2</sup> C	24,00
BMP280	Bosch	300	1100	I <sup>2</sup> C	14,90
BMP180	Bosch	300	1100	I <sup>2</sup> C	18,90

Fonte: (BOSCH SENSORTEC, 2015, 2018a, 2018b).

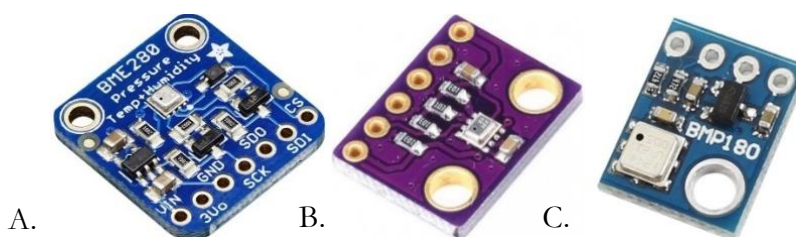


Figura 20. Sensores de pressão atmosférica utilizados. A - BME280; B - BMP280; C - BMP180.

#### 2.2.5.4. Radiação solar

Para esta variável, utilizou-se 12 modelos de sensores com modos de funcionamentos distintos, sendo 7 fotodiodos, um fototransistor, dois sensores de temperatura, um transistor NPN e um elemento fotovoltaico.

##### 2.2.5.4.1. Fotodiodos

Componente condutor, composto de silício semiconductor, capaz de permitir a condução de corrente elétrica com a absorção de fótons, utilizados para converter irradiação em resposta elétrica. Presente neste trabalho com 7 modelos diferentes, são apresentados na Tabela 4 e Figura 21.

Tabela 4. Modelos de fotodiodos utilizados como sensores de irradiância.

Modelo	Marca	Comunicação	Espectro (nm)		Preço (R\$)
BH1750	ROHM	I <sup>2</sup> C	400	700	16,90
TSL2561	TAOS	I <sup>2</sup> C	200	1100	15,90
CJMCU-3216	LSC	I <sup>2</sup> C	450	900	49,90
GYML8511	Sparkfun	Analógica	280	450	25,90
SFH206K	Siemens	Analógica	400	1100	22,40
OPT101	Texas Inst.	Analógica	300	1100	16,50
BPW34	Vishay	Analógica	430	1100	12,50

Fonte: (SIEMENS, 1998; KINGBRIGHT, 2001; TAOS, 2009; SEMICONDUCTOR, 2010; VISHAY SEMICONDUCTORS, 2011; LAPIS SEMICONDUCTOR, 2013; SENSORS et al., 2015).

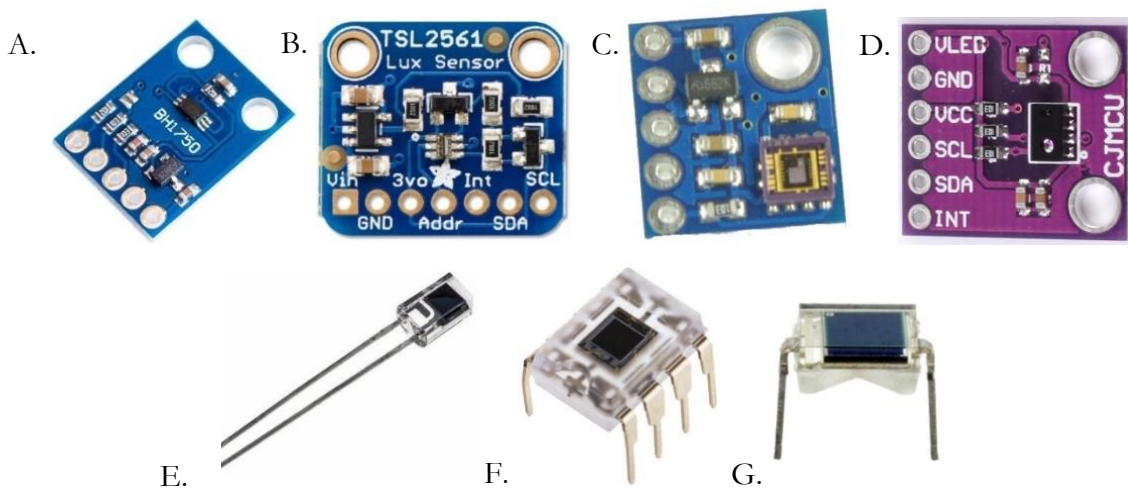


Figura 21. Modelos de fotodiodos utilizados como sensores de radiação solar. A – BH1750; B – TSL2561; C – GYML8511; D – CJMCU3116; E – SFH206K; F – OPT101; G – BPW34.

##### 2.2.5.4.2. Fototransistor

Assim como os fotodiodos, são componentes feitos a partir silício semiconductor, os quais atuam como uma chave de acionamento, quando tem sua base saturada por fótons permitem a passagem entre corrente entre seu polo coletor e emissor, apresentam como vantagem a possibilidade de suportarem cargas maiores que os diodos.



Neste trabalho, encontram-se representados por meio do sensor Temt6000 (Figura 22), fabricado pela empresa Vishay, e comercializado por um preço médio de R\$ 46,90, com resposta analógica e atuando dentro do espectro de 400 a 900 nm (VISHAY SEMICONDUCTORS, 2004).



Figura 22. Fototransistor Temt6000.

#### 2.2.5.4.3. Sensor de temperatura

Proposta baseada na lei de Plank, segundo o qual, corpos negros tem a capacidade de absorver toda a radiação incidente sobre ele, resultando assim em uma variação de sua temperatura. Sendo este tipo de corpo ideal, passou-se para duas propostas distintas: variação de temperatura dentro de um recipiente de vidro de cor âmbar e a variação de temperatura de corpo metálico (alumínio térmico) expostos a radiação incidente, tendo como elemento sensor o uma sonda de temperatura modelo DS18B20 (Figura 23 – A e B) e um sensor de temperatura infravermelho modelo MLX90614 (Figura 23 – C e D) com custo de aquisição de R\$ 21,50 e R\$ 65,00, respectivamente (MELEXIS, 2006; DALLAS SEMICONDUCTOR, 2015).

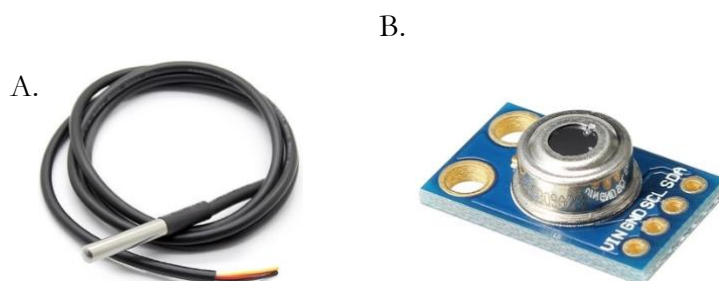


Figura 23. Sensores de temperatura utilizados para a estimativa de radiação de corpo cinza. A – Sonda DS18B20; B – Sensor infravermelho de temperatura modelo MLX90614.

#### 2.2.5.4.4. Transistor NPN

O 2N3055 (Figura 24 – A), considerado um transistor de alta potência, é composto por uma pastilha de silício, atuando como base, recoberta por um invólucro metálico (Figura 24 – B). Com a remoção de sua proteção, expõe-se a junção NP a radiação solar, a qual tem a capacidade de polarizar a mesma, permitindo a condução de energia entre o coletor e o emissor (SUGAWARA, 2003).

Para análise de funcionamento, fez-se uso de um divisor de tensão com diferença de potencial de 5 volts feito a partir de resistores de 10 k Ohms, com custo total de aquisição de aproximadamente R\$ 7,90.

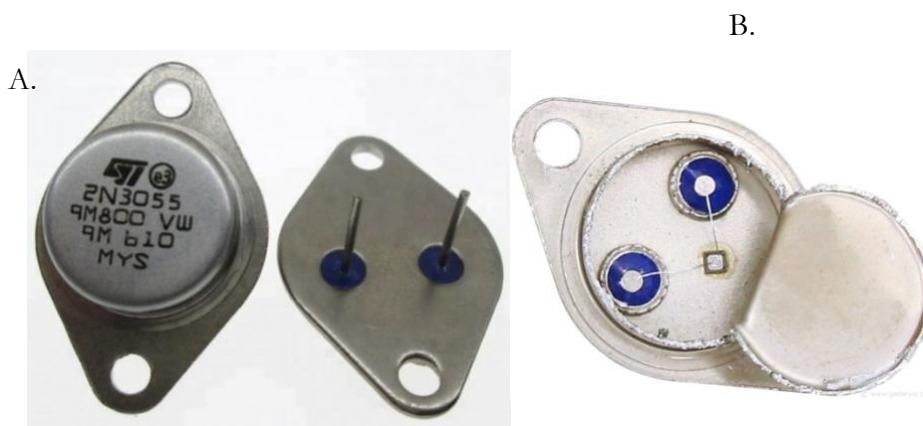


Figura 24. Transistor 2N3055. A – Vista superior e inferior, com os polos coletor e emissor; B – Estrutura interna, com os polos coletor e emissor ligados a pastilha de silício. Adaptado de Sugawara (2003).

#### 2.2.5.4.5. Elemento fotovoltaico

Conhecidas por converter radiação solar em diferença de potencial elétrico, as células fotovoltaicas são amplamente utilizadas na geração de energia. Utilizou-se dois painéis fotovoltaicos, de silício monocristalino de dimensões 54 x 54 mm (Figura 25 – A). Com saída nominal de 2 volts e 130 mA, totalizam aproximadamente 0,26 W, arranjados em série integralizam a potência máxima de 0,52 W.

Visando o consumo de carga gerado painel fotovoltaico, fez-se uso de um barramento de LED, o qual varia sua intensidade luminosa de forma linear com a variação de potência fornecida, evitando assim o superaquecimento do painel e tendo consumo mensurado pelo controlador utilizado.

Segundo as especificações técnicas do microcontrolador utilizado, o limite de corrente em suas portas analógicas é de 50 mA, o que inviabiliza a sua leitura de forma direta, sendo assim, fez-se uso de um sensor de potência DC, modelo INA219 (Figura 25 – B), capaz mensurar tensões de 0 a 26 volts e corrente de 0 a 3,2 A, com acurácia de 0,5%. O sistema como um todo apresentou custo total de aquisição de aproximadamente R\$ 46,50 (TEXAS INSTRUMENTS, 2011).

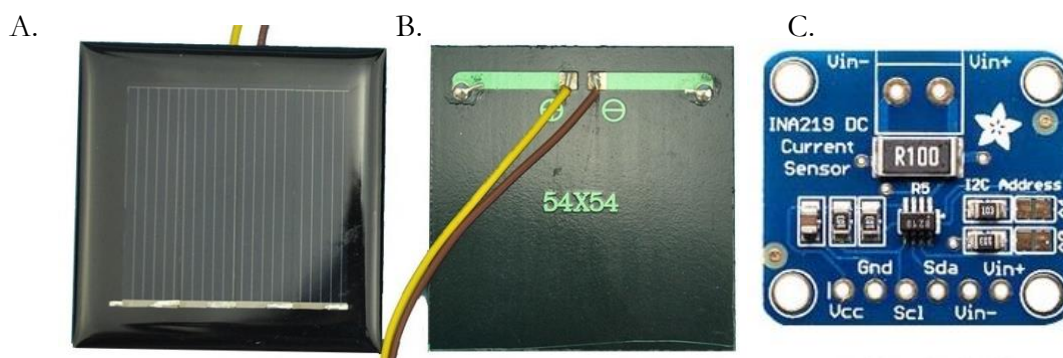


Figura 25. Elemento fotovoltaico utilizado. A - Células fotovoltaicas, com vista superior; B – vista inferior; C - Módulo INA219, para mensuração da potência gerada.

### 2.2.5.5. Velocidade do vento

Para a mensuração da velocidade do vento foram encontrados dispositivos de baixo custo com modo de funcionamento muito semelhante, desta forma optou-se pela compra de um único exemplar (Figura 26). O qual foi instalado na barra de sensores juntamente com o anemômetro profissional. Ressalta-se que o equipamento comprado conta com sensibilidade para ventos acima de  $0,25 \text{ m s}^{-1}$  e comporta rajadas de até  $36 \text{ m s}^{-1}$ , segundo seu fabricante. O equipamento foi adquirido da empresa WRF Comercial, pelo valor de R\$ 159,90 (WRF COMERCIAL, 2020a).

O princípio de funcionamento do sensor utilizado é baseado em um rolamento com imã ligado a um sensor reed switch, o qual emite um pulso a cada revolução do rolamento, quando o imã passa pelo sensor (Figura 27).



Figura 26. Anemômetro modelo ANM01 utilizado para estimativa da velocidade do vento.

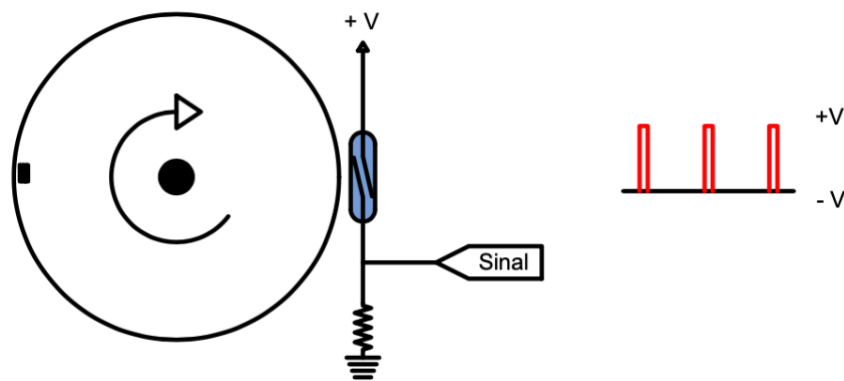


Figura 27. Representação do modelo de funcionamento do anemômetro, com o reed switch em azul e o sinal de saída em vermelho.

### 2.2.5.6. Precipitação

Para a estimativa de precipitação, utilizou-se um pluviômetro (Figura 28), o qual apresenta 160 mm de diâmetro, com uma balsa de aproximadamente 5 ml, construído em alumínio, revestido de tinta epóxi branca, com auto esvaziamento. Adquirido da empresa WRF Comercial pelo valor de R\$ 169,90 (WRF COMERCIAL, 2020b).



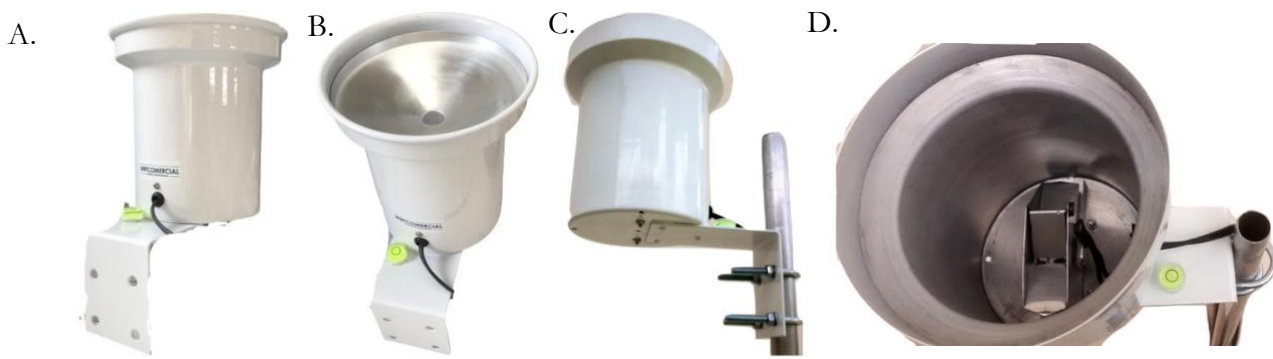


Figura 28. Pluviômetro de bscula. A – vista frontal; B – vista superior; C – Vista inferior; D – Detalhe da bscula.

O princpio de funcionamento deste equipamento tambm  baseado em um reed switch, entretanto o mesmo s fica próximo ao im quando a posi das bsculas se inverte. Onde cada pulso emitido representa aproximadamente 0,25 mm de precipitao.

#### 2.2.6. Leitura e calibrao dos sensores

A leitura dos sensores supracitados para calibrao foi realizada a partir do controlador e rotina de funcionamento apresentados no tópico **Error! Reference source not found.**, onde os sensores estaro instalados na haste de sensores da estao profissional, a 2 metros do solo por um perodo de aproximadamente 20 dias.

Posteriormente, realizou-se a regresso dos dados, comparado os estimados pelos sensores de baixo custo com os sensores profissionais da estao, gerando assim uma equao de calibrao, a qual foi validada a partir de um segundo conjunto de dados, coletado durante o ensaio.

Adicionalmente, realizou-se o clculo de alguns parmetros para auxlio da validao de dados, sendo eles: erro absoluto mdio (MAE – equao 8), raiz quadrada do erro mdio (RMSE – Equao 9), ndice de Willmott (d – equao 10), erro percentual absoluto mdio (MAPE – equao 11), coeficiente de determinao ( $R^2$  – equao 12), R-quadrado ajustado ( $R^2_A$  – equao 13) e coeficiente C (equao 14 e Tabela 5)(WILLMOTT et al., 1985; CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad ( 8 )$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad ( 9 )$$

$$d = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)^2]} \right) \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \right| \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$R^2_{Ajustado} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - 1 - K} \quad (13)$$

$$c = R^2 \cdot d \quad (14)$$

Tabela 5. Classificação do coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas (1997).

Valor de c	Classificação
> 0,85	Excelente
0,76 – 0,85	Muito bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Regular
0,51 – 0,60	Insatisfatório
0,41 – 0,50	Ruim
≤ 0,41	Péssimo

Onde:

E – valor estimado;

O – valor observado;

i – índice;

n – número de dados;

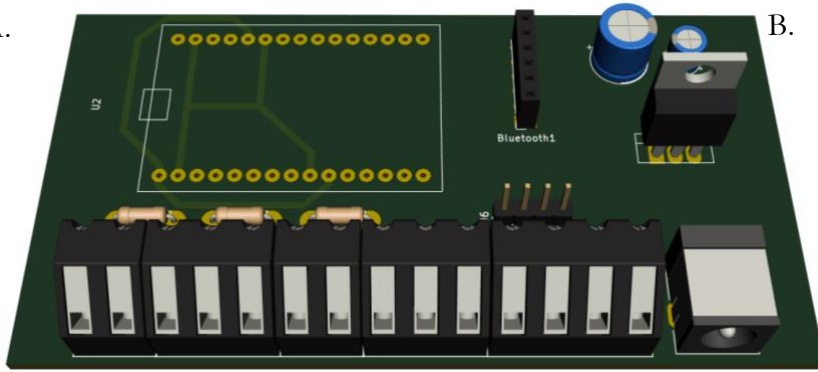
$\bar{O}$  – média de valores observados; e

K – número de variáveis.

### 2.2.7. Dispositivo final

O dispositivo final (Figura 29) contara com os sensores mais bem avaliados pelos parâmetros descritos no tópico 2.6, bem como compreendera um controlador diferenciado, contando com um microcontrolador Nodemcu, munido de um processador Esp8266, operando a 160 MHz, com *wireless fidelity* nativo e compatível com Arduino IDE (ESPRESSIF SYSTEMS, 2020).

A.



B.



Figura 29. Dispositivo datalogger da estação. A – Vista modelada; B – Controlador instalado.

O controlador realizará as leituras em intervalos fixos de 10 segundos, com a extração de extremos e valores médios a cada 10 minutos, os quais serão enviados ao Google Sheet e ao portal Adafruit IO via protocolo MQTT (ambos utilizados como banco de dados), realizando ainda o envio das variáveis lidas em tempo real por um módulo *bluetooth*, o qual pode ser acessado via smartphone por aplicativos de comunicação *bluetooth* serial.

O datalogger conta ainda com uma porta de expansão I2C, a qual pode ser utilizada para inclusão de um display LCD ou ainda para o acoplamento de uma ou mais placas. Observa-se que o controlador não conta com um módulo RTC, para atualização de data e hora, o que por vez ocorre através do protocolo *Network Time Protocol* (NTP), via web.

Visando a redução de perda de dados, por eventuais problemas de falta de energia ou internet, o controlador tem ainda a capacidade de armazenar dados diários em sua memória flash, com auxílio da biblioteca SPIFFS.

Ressalta-se, que para a alteração do software em execução no datalogger, existe a necessidade da remoção de seu microcontrolador para upload do novo programa, o que devido a características de funcionamento, não se torna possível, sendo assim, implementou-se a gravação Over-The-Air (OTA), possibilitando sua programação por meio de um computador ligado a mesma rede wireless.

### 2.2.8. Evapotranspiração

Como produto do dispositivo, objetiva-se realizar a estimativa da evapotranspiração, utilizando o modelo de Penman-Monteith (equação 15), a partir dos sensores selecionados. Adicionalmente, comparar-se-á sua resposta com o de uma estação automática, presente no município, a uma distância de aproximadamente 13 km (Figura 30), a fim de se evidenciar se o dispositivo tem capacidade de fornecer um parâmetro confiável, para o manejo da irrigação.

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad ( 15 )$$

Onde:

ET<sub>o</sub>– Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>);

Δ - Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C<sup>-1</sup>);

R<sub>n</sub> - Saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

G - Densidade de fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

γ - Coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>);

T - Temperatura do ar a 2 metros de altura (°C);

u<sub>2</sub> - Velocidade do vento a 2 metros de altura (m s<sup>-1</sup>);

e<sub>s</sub> - Pressão de vapor de saturação (kPa); e

e<sub>a</sub> - Pressão parcial de vapor (kPa).



Figura 30. Disposição geográfica das estações, no interior do estado do Rio de Janeiro. Fonte: Google Earth, 2021.

## 2.3. Resultados e discussão

Apresenta-se neste tópico, os resultados obtidos na calibração de cada um dos sensores, bem como o dispositivo final com todas as funcionalidades ativas, realizando as mensurações diárias e a estimativa de evapotranspiração comparada com uma estação profissional instalada na mesma localidade.

### 2.3.1. Temperatura

Todos os sensores utilizados apresentaram resposta satisfatória, representando de forma considerável a variável medida, com uma síntese dos dados na Figura 31 e

Tabela 6.

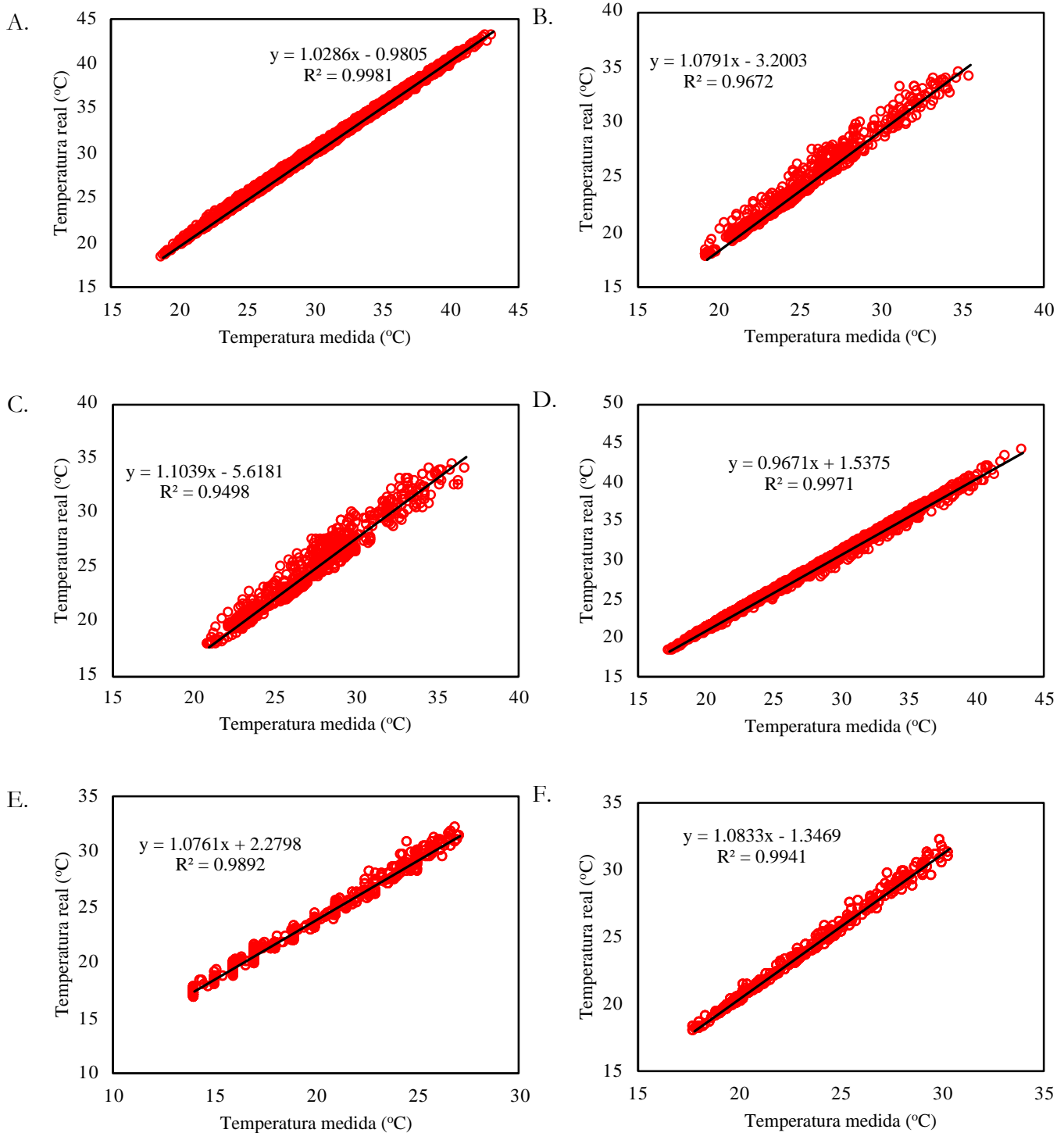


Figura 31. Resposta dos sensores comparada a temperatura mensurada pela estação. A – BME280; B – BMP280; C – BMP180; D – DHT22; E – DHT11; F - DS18B20

Tabela 6. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a temperatura.

<b>Modelo</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>d</b>	<b>MAPE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>Ajustado</sub></b>	<b>C</b>	<b>Desempenho</b>
BME280	0,1702	0,2250	0,9995	0,1058	0,9981	0,9980	0,9976	Excelente
BMP280	0,5004	0,6596	0,9916	1,9445	0,9676	0,9671	0,9591	Excelente
BMP180	0,6353	0,8151	0,9870	2,0440	0,9498	0,9497	0,9374	Excelente
DHT11	0,3355	0,4195	0,9973	1,1824	0,9892	0,9892	0,9865	Excelente
DHT22	0,1580	0,2424	0,9993	0,1767	0,9971	0,9971	0,9964	Excelente
DS18B20	0,4362	0,5927	0,9861	0,4406	0,9465	0,9465	0,9333	Excelente

Destaca-se neste ponto, a resposta dos sensores BME280 e DHT22, os quais foram superiores em todos os parâmetros avaliados, com um RMSE inferior a 0,25° C e um MAPE inferior a 0,20%, ambos fornecendo uma confiabilidade ótima, segundo o coeficiente c de Camargo e Sentelhas (1997).

### 2.3.2. Umidade relativa

Dentre os cinco modelos utilizados, apenas um não apresentou resposta aceitável, com uma síntese dos dados na Figura 32 e Tabela 7.

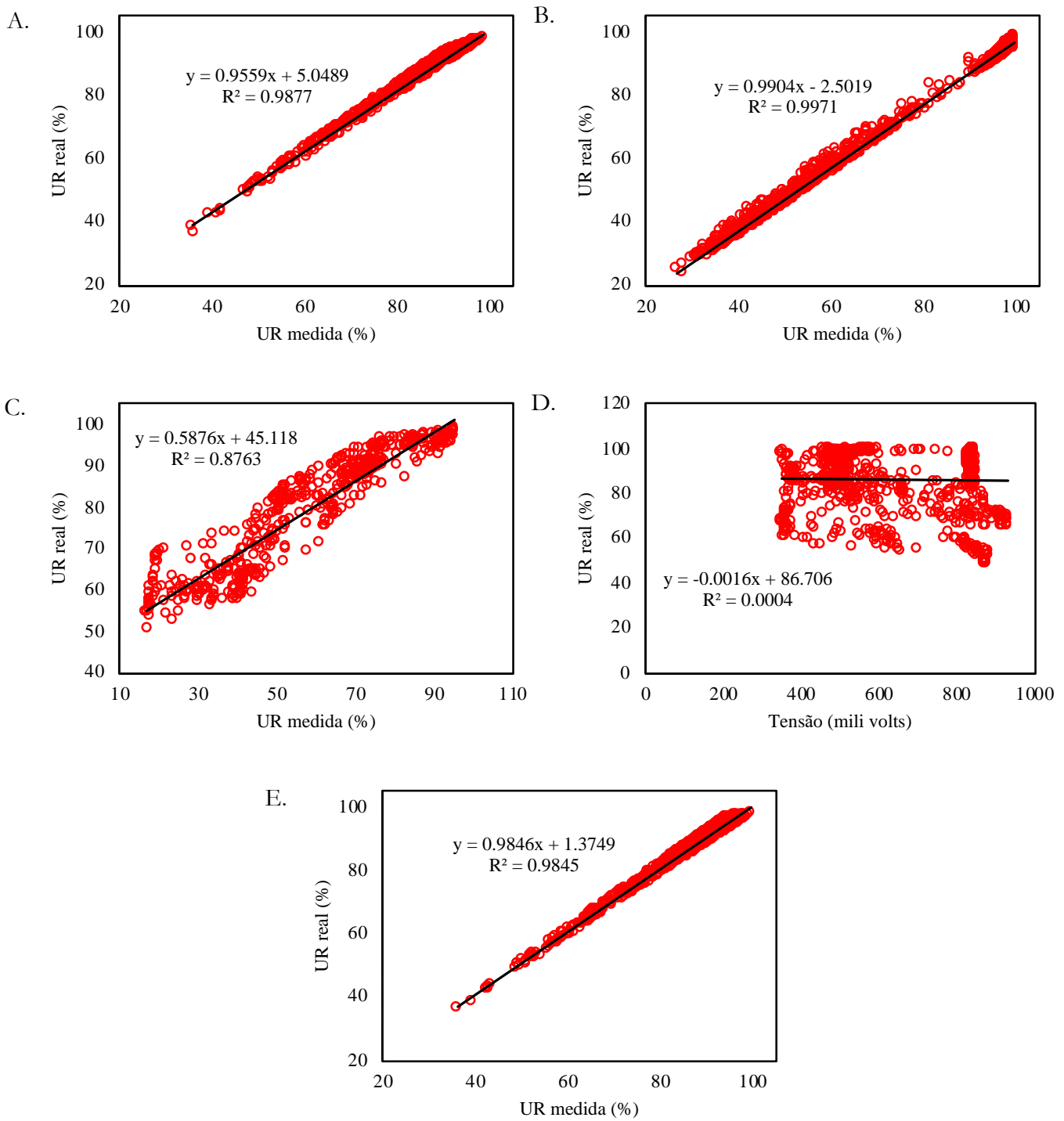


Figura 32. Resposta dos sensores comparada a UR medida pela estação. A – BME280; B – DHT22; C – DHT11; D – H202; E – HTU21D.

Tabela 7. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a UR.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
BME280	0,9317	1,0865	0,9969	0,5780	0,9877	0,9877	0,9846	Excelente
DHT22	0,8437	1,0862	0,9993	0,4857	0,9971	0,9971	0,9964	Excelente
DHT11	3,8045	4,7378	0,9661	8,3616	0,8763	0,8761	0,8466	Muito bom
H202	11,1605	13,4367	0,0335	1,5709	0,0004	0,0002	0,0000	Péssimo
HTU21D	0,8637	1,0017	0,9986	1,0832	0,9944	0,9944	0,9930	Excelente

Destaca-se nesse ponto a resposta dos sensores BME280, DHT22 e HTU21D, os quais apresentaram resultado ótimo segundo o coeficiente c de Camargo e Sentelhas (1997). Dentre eles o sensor DHT22 obteve destaque, perdendo para os demais somente no RMSE, com uma diferença mínima de milésimos de umidade, destaque positivo também para o sensor BME280, o qual já apresentou desempenho elevado para a estimativa de temperatura no teste anterior.

### 2.3.3. Pressão atmosférica

Utilizou-se para esta variável, 3 modelos de sensores produzidos pela empresa Bosh, com um deles desenvolvido em parceria com a Adafruit. Uma síntese dos dados é apresentada na Figura 33 e Tabela 8.

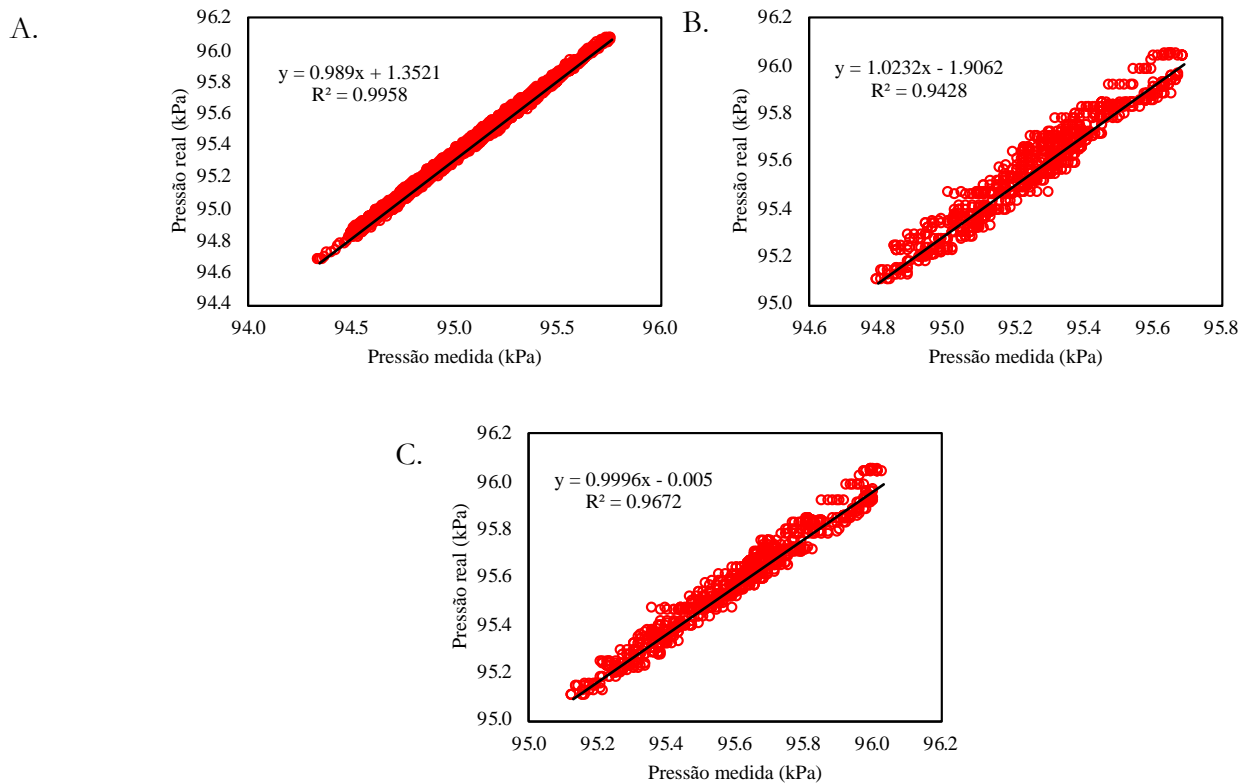


Figura 33. Resposta dos sensores comparada com a pressão atmosférica medida pela estação. A – BME280; B – BMP280; C – BMP180.



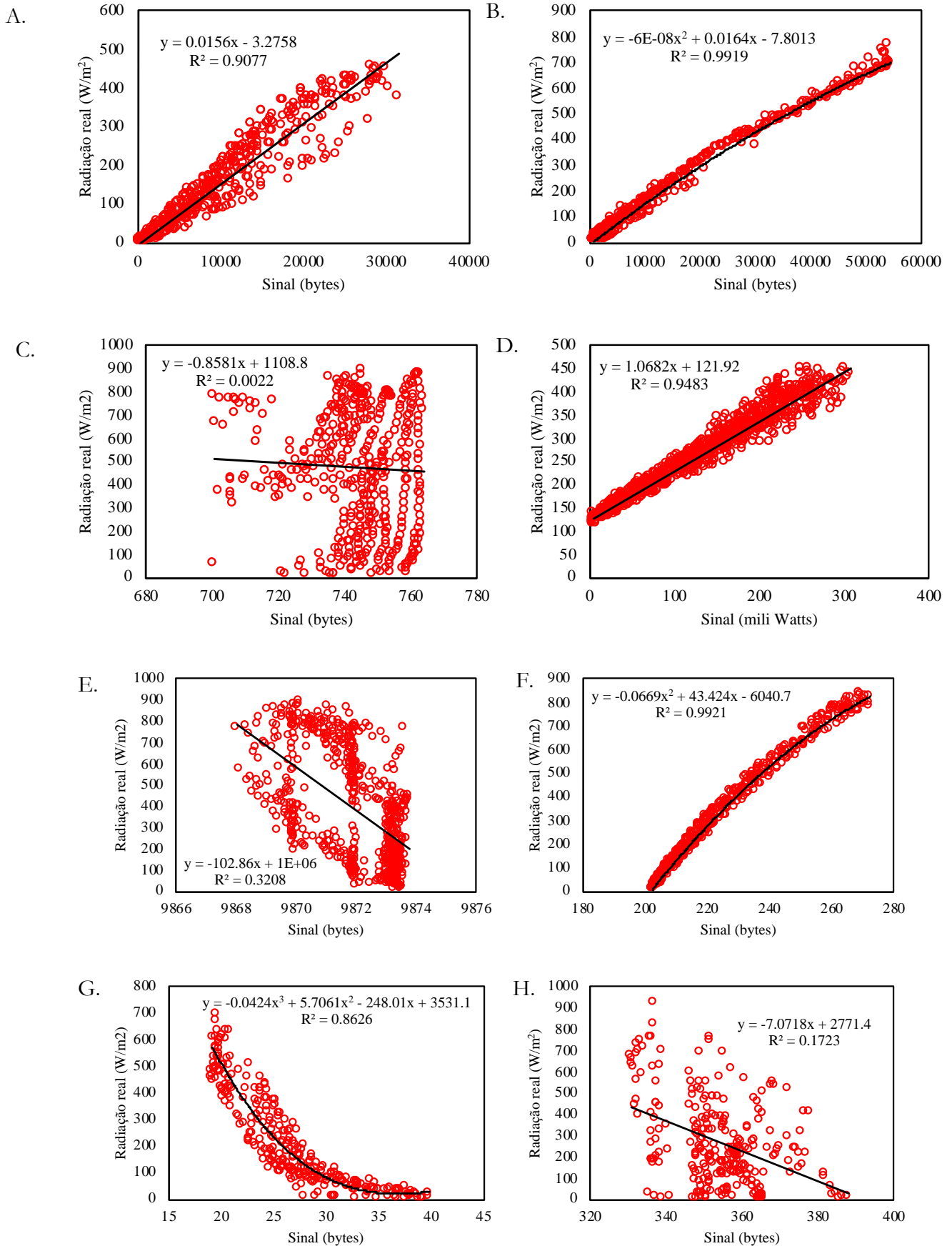
Tabela 8. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a pressão atmosférica.

<b>Modelo</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>d</b>	<b>MAPE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>Ajustado</sub></b>	<b>C</b>	<b>Desempenho</b>
BME280	0,0076	0,0159	0,9989	0,0042	0,9958	0,9958	0,9947	Excelente
BMP280	0,0456	0,0535	0,9851	0,0399	0,9428	0,9427	0,9287	Excelente
BMP180	0,0346	0,0406	0,9916	0,0313	0,9672	0,9672	0,9591	Excelente

Destaca-se aqui, o desempenho do sensor BME280, o qual apresentou desempenho superior para duas outras variáveis e agora para a pressão, classificado como ótimo, segundo o coeficiente c de Camargo e Sentelhas (1997) em todos os testes.

#### **2.3.4. Radiação solar**

Apresenta-se, na Figura 34 e Tabela 9, uma síntese dos dados de resposta dos 12 modelos distintos de sensores utilizados para a estimativa de densidade de fluxo de radiação solar incidente.



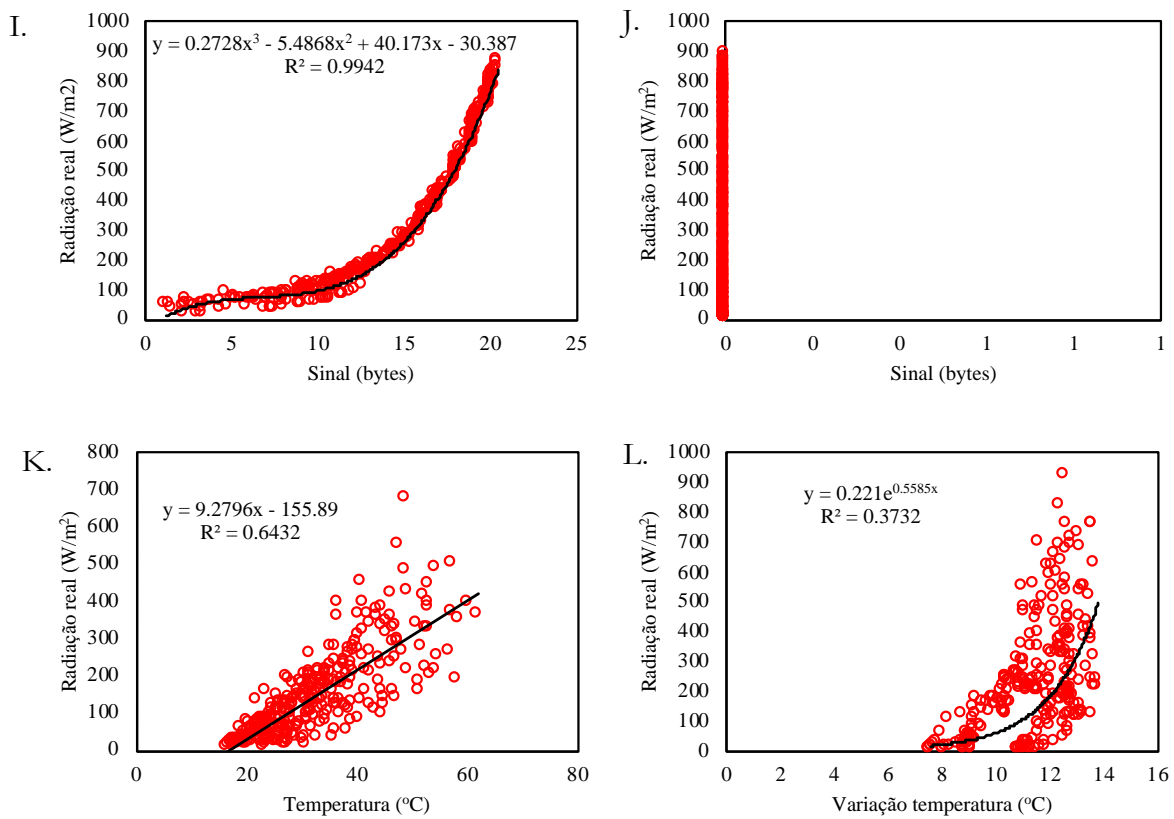


Figura 34. Resposta dos sensores comparada com a radiação solar medida pela a estação. A –AP3216; B – BH1750; C – BPW43; D – Elemento fotovoltaico; E – OPT101; F – GYML8511; G – TSL2561; H – SFH206K; I – Temt6000; J – 2N3055; K – DS18B20; L – MLX90614.

Tabela 9. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade de cada um dos sensores para a radiação solar.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
AP3216	28,6689	39,8764	0,9753	28,4078	0,9077	0,9075	0,8853	Excelente
BH1750	16,0222	20,1774	0,9979	15,6656	0,9919	0,9919	0,9899	Excelente
BPW34	220,7190	256,2557	0,0581	47,1090	0,0022	-0,0001	0,0001	Péssimo
E. Fotov.	14,9476	19,8229	0,9866	5,3723	0,9483	0,9482	0,9356	Excelente
GYML8511	18,1318	21,9505	0,9980	10,4638	0,9921	0,9921	0,9901	Excelente
OPT101	146,5101	181,9234	0,5623	58,9677	0,1723	0,1691	0,0918	Péssimo
TSL2561	267,9291	349,6764	0,4655	180,5763	0,3208	0,3197	0,1493	Péssimo
Temt6000	16,7229	20,3062	0,9985	10,5795	0,9924	0,9942	0,9927	Excelente
SFH206K	51,6327	66,5057	0,9620	33,8032	0,8626	0,8621	0,8298	Muito Bom
2N3055	--	--	--	--	--	--	--	--
DS18B20	49,1346	69,5118	0,8809	39,7742	0,6432	0,6421	0,5666	Insatisfatório
MLX90614	137,0792	182,4567	0,6325	95,0196	0,3732	0,3707	0,2361	Péssimo

Destaca-se neste tópico os sensores BH1750, GYML8511 e Temt6000, os quais apresentaram um melhor desempenho durante os testes, sendo avaliados como ótimos, segundo o coeficiente  $c$  de Camargo e Sentelhas (1997).

Adicionalmente, o sensor 2N3055, embora não tenha apresentado resposta para a radiação, o mesmo apresentou resposta durante período noturno, o que pode ser configurando como sensibilidade a radiação de onda longa, assim sua resposta foi comparada com a leitura de um saldo radiômetro, presente na estação, como apresentado na Figura 35.

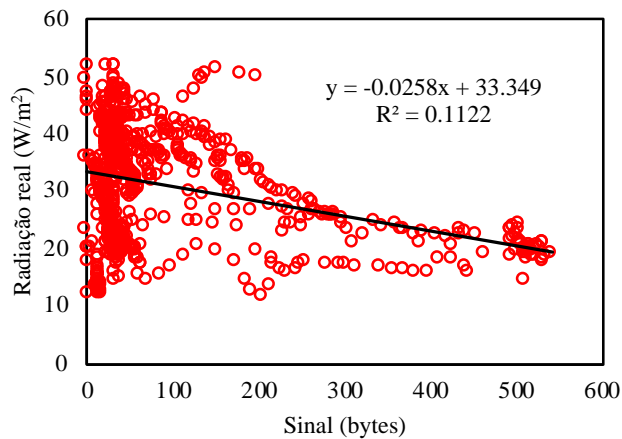


Figura 35. Resposta do transistor 2N3055, comparada a radiação de onda longa, mensurada pelo saldo radiômetro.

### 2.3.5. Velocidade do vento

O anemômetro digital, modelo ANM01, utilizado durante os testes apresentou uma classificação ótima, segundo o coeficiente  $c$  de Camargo e Sentelhas (1997), com um RMSE de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$ , com uma síntese de seus dados apresentado na Tabela 10 e Figura 36.

Tabela 10. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade do anemômetro digital para a velocidade média do vento.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	$R^2$	$R^2_{\text{Ajustado}}$	C	Desempenho
ANM01	0,0449	0,1047	0,9997	0,0297	0,9988	0,9988	0,9985	Excelente

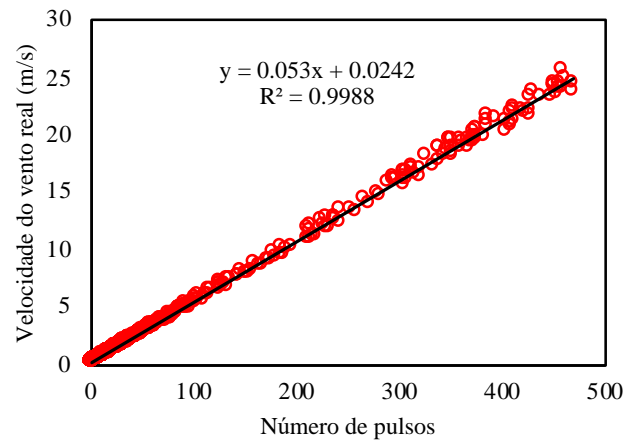


Figura 36. Resposta do anemômetro ANM01, comparada a velocidade média do vento mensurada pela estação.

### 2.3.6. Precipitação

O pluviômetro utilizado durante os testes apresentou uma classificação ótima, segundo o coeficiente  $c$  de Camargo e Sentelhas (1997), com um RMSE de 0,67, com uma síntese de seus dados apresentado na Figura 37 e Tabela 11.

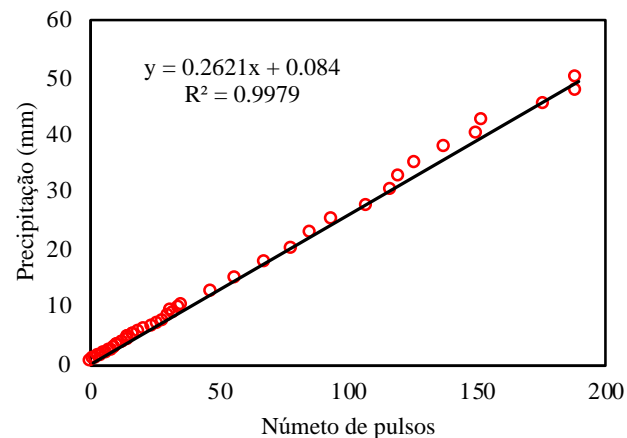


Figura 37. Resposta do pluviômetro comparada a lâmina aplicada.

Tabela 11. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade do pluviômetro para a precipitação aplicada.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	$R^2$	$R^2_{\text{Ajustado}}$	C	Desempenho
PLV01	0,4129	0,6724	0,9995	5,0501	0,9979	0,9979	0,9974	Excelente

### 2.3.7. Sensores selecionados

Baseado no desempenho geral dos sensores, selecionou-se o modelo BME280 (Figura 18 – A), para a estimativa de temperatura, UR e pressão atmosférica, visto seu destaque para as três variáveis, bem como por se tratar de um sensor combinado, fornecendo 3 respostas com um único elemento sensor.

Para a radiação solar, selecionou-se o fotodiodo modelo GYML8511 (Figura 21 – C), por se tratar de um sensor com ótima avaliação em todos os parâmetros e ter sua resposta analógica, o que possibilita a inserção de um filtro de ruído ou uso de um amplificador operacional, a fim de se otimizar o sinal de resposta.

Para a precipitação e velocidade do vento, foram aceitos os respectivos sensores selecionados, visto sua confiabilidade representada nos testes de calibração, previamente realizados e apresentados.

#### **2.3.7.1. Validação dos dados**

Observa-se na validação dos dados (Figura 38) que o coeficiente angular de todos os testes apresenta valor próximo a 1, o que configura uma linearidade de relação entre as respostas dos sensores e o valor real, mensurado pela estação.

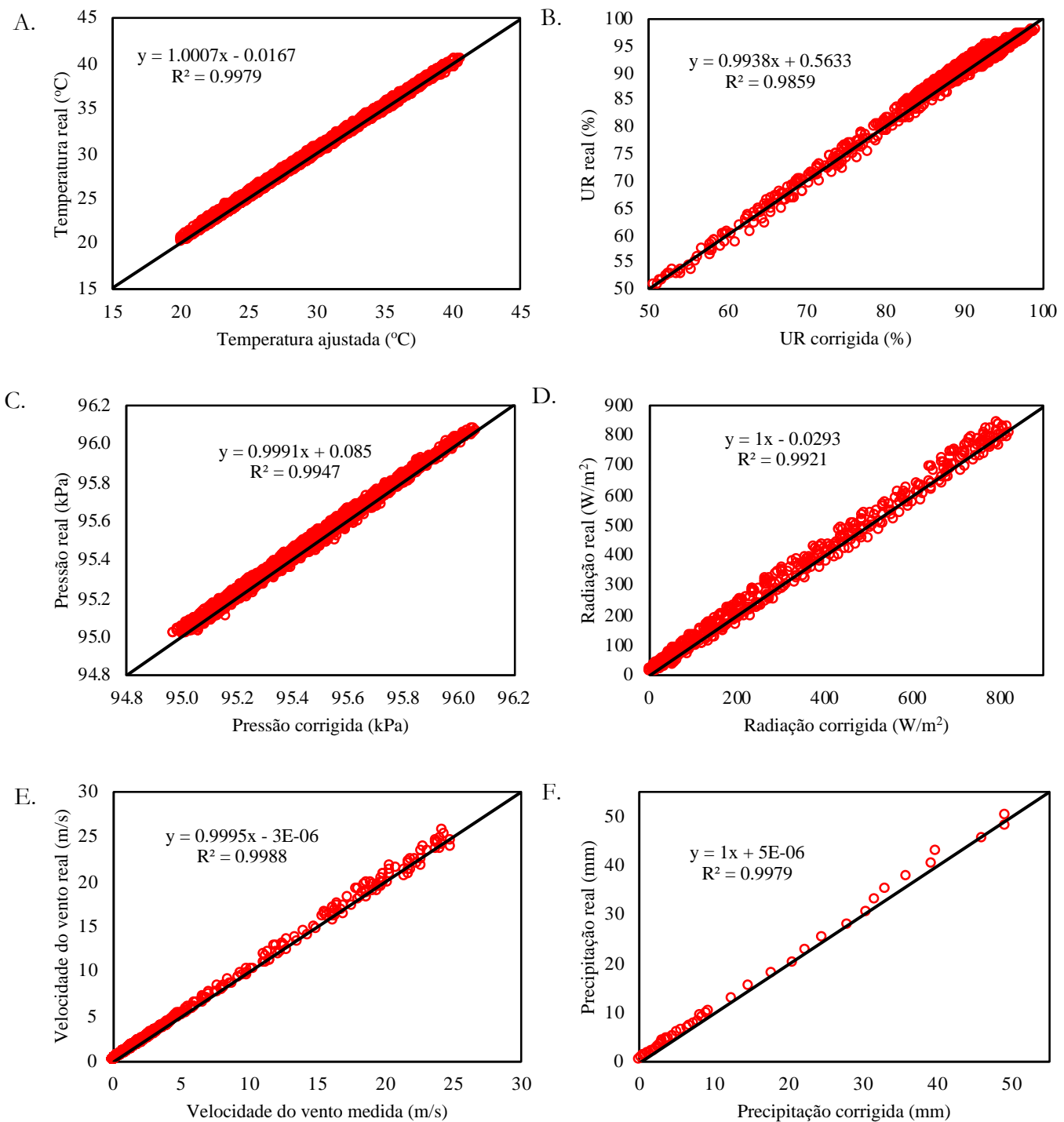


Figura 38. Validação de dados dos sensores escolhidos. A – Temperatura; B – UR; C – Pressão atmosférica; D – Radiação solar; E – Velocidade do vento; F – Precipitação.

### 2.3.8. Evapotranspiração

Visando a análise do produto gerado pela estação, comparou-se os valores de evapotranspiração diários da estação desenvolvida com uma estação automática, presente no mesmo município, ambos calculados pelo método de Penman-Monteith (equação 15), com uma síntese destes dados apresentados na Figura 39 com sua distribuição temporal na Figura 40, com uma síntese dos parâmetros estatísticos apresentado na Tabela 12.

Ressalta-se que algumas disparidades podem ser observadas entre os dados de evapotranspiração das duas estações, o que pode ser explicado por variações decorrentes do microclima de cada estação, visto sua distância de instalação.

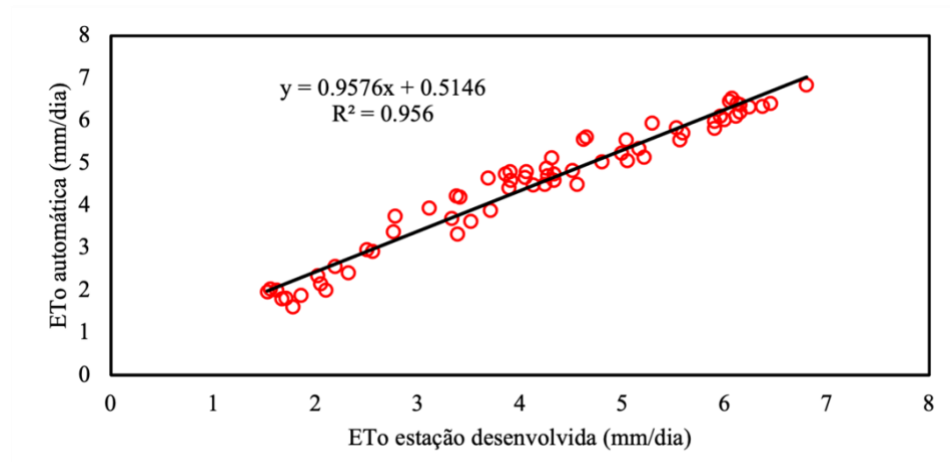


Figura 39. Comparação da evapotranspiração calculada com os dados da estação desenvolvida versus estação automática.

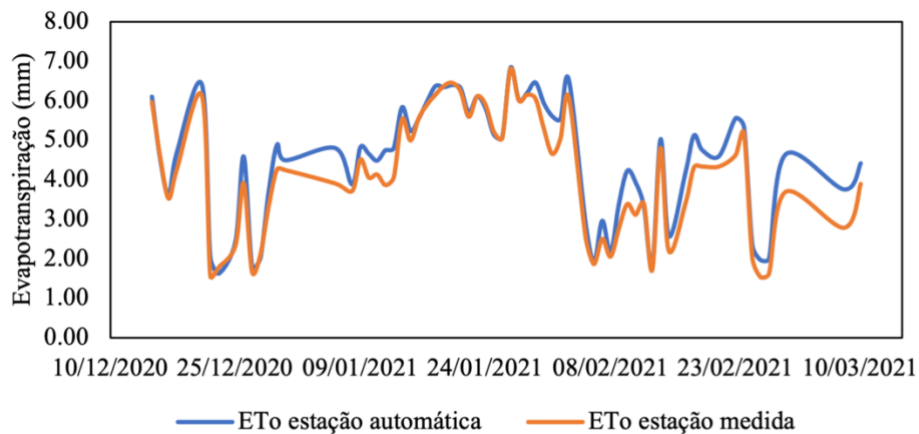


Figura 40. Distribuição temporal da evapotranspiração diária com dados da estação desenvolvida versus estação automática.

Tabela 12. Apresentação dos parâmetros estatísticos para avaliação da representatividade da evapotranspiração calculada a partir dos dados da estação desenvolvida comparados com a estação automática.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Estação d.	0,3040	0,3775	0,9832	7,8212	0,9359	0,9350	0,9202	Excelente

### 2.3.9. Custo final e alternativas de mercado

Com a definição dos sensores selecionados e conclusão da validação dos dados, a estimativa final de preço da estação desenvolvida pôde ser concluída, a qual é apresentada na Tabela 13.



Tabela 13. Descrição de custos dos componentes da estação desenvolvida.

Descrição	Quantidade	Preço (R\$)	Total (R\$)
Esp8266	1	59,90	59,90
Módulo bluetooth HM-10	1	29,90	29,90
Sensor BME280	1	24,00	24,00
Sensor GYML8511	1	25,90	25,90
Anemômetro	1	159,90	159,90
Pluviômetro	1	169,90	169,90
Placa de fibra de vidro (10x10)	1	4,00	4,00
Resistor 10k ohms	3	0,15	0,45
Fonte 12 volts	1	23,50	23,50
Capacitor 10 uF	1	0,50	0,50
Capacitor 100 uF	1	0,50	0,50
Regulador de tensão LM7805	1	1,90	1,90
Conector Jack DC	1	1,90	1,90
Barramento fêmea	2	1,90	3,80
Barramento macho	1	1,90	1,90
Terminal 2P	7	1,50	10,50
Cabo manga 3 vias	5	12,00	60,00
Caixa de montagem hermética	1	29,90	29,90
Abrigo para sensor	1	135,00	135,00
Total			743,35

\* Os valores se referem aos obtidos em julho de 2021, não englobando fretes ou demais taxas.

O sistema conta ainda com a possibilidade de inserção de um sensor para a mensuração da temperatura no interior da caixa hermética de montagem e permite a troca da fonte simples de 12 volts por um sistema nobreak (com custo médio de R\$ 200,00), ou sistema de alimentação solar (com custo médio de R\$ 300,00), recomendado para locais com instabilidade da rede elétrica. Adicionalmente, a estação conta com uma porta de expansão I<sup>2</sup>C, a qual pode ser utilizada para ligação de um módulo de cartão SD, display LCD ou um controlador adicional, possibilitado um aumento no número de suas funções.

Visando sua comparação com outros modelos de estação de baixo custo presentes no mercado, apresenta-se na

Tabela 14, uma síntese de modelos encontrados, com os sensores presentes e custo médio de aquisição.

Ressalta-se, entretanto, que os valores relacionados a estação desenvolvida apresentam somente o custo de aquisição dos componentes utilizados, não considerando demais custos como: frete, impostos, custo de mão de obra, assim como o custo do pacote tecnológico carregado pela

estação, retornando assim em um custo teórico de componentes físicos presentes do dispositivo desenvolvido.

Tabela 14. Comparação do custo de aquisição dos componentes da estação desenvolvida com outros modelos de mercado.

Modelo	Temp.	UR	Pressão	Radiação	Vel. vento	Chuva	Preço
Desenvolvida	X	X	X	X	X	X	743,35
Solar W.	X	X	X	X	X	X	4.950,00
Acurite	X	X	X		X	X	3.870,00
Davis VV	X	X	X		X	X	6.250,00
Davis VV2	X	X	X	X	X	X	18.970,00
AgroMet	X	X	X		X	X	18.200,00
iMetos	X	X		X	X	X	22.630,00
Estação padrão*	X	X	X	X	X	X	25.000,00

Fonte:(MUNDO CLIMA, 2021).

\*Se refere a estação padrão utilizada para a calibração dos sensores, apresentada no tópico: 2.2.4.

\*\* Os valores se referem aos obtidos em julho de 2021, não englobando fretes ou demais taxas.

### 2.3.10. Banco de dados

Como disposto no tópico x, para facilitar a visualização de dados em tempo real fez se uso da plataforma online Adafruit IO, a qual exibe os dados médios, atualizados a cada 10 minutos, os valores de evapotranspiração diários e um gráfico com as últimas 24 horas de dados recebidos, bando de dados o qual pode ser acessado por meio do Qr code, apresentado abaixo (Figura 41).



Figura 41. QR code, redirecionador para o banco de dados online, hospedados na Adafruit IO.

### 2.4. Conclusão

O software desenvolvido para a leitura e processamento de dados, operou as atividades previstas com eficiência, não gerando a perda de dados em nenhum dos 6 meses de operação ininterrupta.

Os resultados dos sensores testados indicaram confiabilidade na mensuração das variáveis testadas, bem como estabilidade de resposta ao longo do tempo, visto sua instalação final com operação contínua a aproximadamente 6 meses, sem manutenção.

A estimativa de evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, calculada pela estação desenvolvida foi qualificada como ótima, segundo o coeficiente  $c$  de Camargo e Sentelhas (1997), quando comparada a mesma variável calculada a partir dos dados de uma estação automática, instalada a 13 km.

Considerando a importância e a necessidade da disponibilidade de informações meteorológicas para o manejo de atividades agrícolas, bem como para a irrigação o dispositivo desenvolvido apresentou-se como alternativa viável, tanto de forma técnica quanto econômica a fim de fornecer tais parâmetros.

O custo final do dispositivo desenvolvido é inferior a 15% de alternativas de mercado, as quais não contam com o mesmo número de sensores disponíveis.

A estação desenvolvida conta ainda com uma porta de expansão I<sup>2</sup>C, o que pode permitir sua utilização em atividades não previstas previamente, sendo, uma contribuição para desenvolvedores futuros otimizarem e ampliarem seu universo de atuação.

### Referências

- ALLEN, R. G. A Penman for All Seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 112, n. 4, p. 348–368, 1986.
- ALLEN, R. G. et al. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 56, p. 300, 1998. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>>.
- ANA. **Atlas Irrigação - Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2017.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília - DF: ANA Brasília, 2019.
- AOSONG ELECTRONICS. **DHT11 - Datasheet**, 2010a. Disponível em: <[https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT11.pdf)>.
- AOSONG ELECTRONICS. **DHT22 - Datasheet**, 2010b. Disponível em: <[https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_DHT22\\_AM2302.pdf](https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT22_AM2302.pdf)>.
- AOSONG ELECTRONICS. **HR202 - Datasheet**, 2016. Disponível em: <<https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/HR202L.pdf>>.
- ARDUINO INC. **Arduino Reference**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/en/>>. Acesso em: 7 mar. 2020.

BARBON, G. et al. Taking Arduino to the Internet of Things: The ASIP programming model. **Computer Communications**, v. 89–90, p. 128–140, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.016>>.

BOSCH SENSORTEC. **BMP180 - Datasheet**, 2015. . Disponível em: <[https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/development\\_desktop\\_software/usermanuals/dd2-0\\_bmpxxx.pdf](https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/development_desktop_software/usermanuals/dd2-0_bmpxxx.pdf)>.

BOSCH SENSORTEC. **BME280 - Datasheet**, 2018a. . Disponível em: <<https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>>.

BOSCH SENSORTEC. **BMP280 - Datasheet**, 2018b. . Disponível em: <[https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product\\_flyer/bst-bmp280-fl000.pdf](https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bmp280-fl000.pdf)>.

BROOKS, D. **Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design**. 1. ed. [s.l.] Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, p. 89–97, 1997.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **LI200X-L**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/li200x-l>>. Acesso em: 26 fev. 2021a.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **HMP45C-L**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/hmp45c-l>>. Acesso em: 26 fev. 2021b.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CS106**. Disponível em: <<https://www.campbellsci.com.br/cs106>>. Acesso em: 26 fev. 2021c.

CANAFISTULA, F. J. F. **Desenvolvimento, implementação e avaliação de uma estação agrometeorológica automática e sensores ambientais**. 2013. Universidade Federal do Ceará, 2013.

CARVALHO, D. F. (UFRRJ); OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. 1. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2012.

COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. ESALQ - USP, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-06112007-101254/publico//CoelhoLivredocencia2007.pdf>>.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS18B20 - Datasheet**, 2015. . Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>>.

DIAS, H. B.; ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba, SP: Mudanças do clima pela classificação de Köppen. In: A Agrometeorologia na Solução de Problemas Multiescala, Juazeiro-BA / Petrolina-PE,. **Anais...** Juazeiro-BA / Petrolina-PE: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia; V Simpósio de Mudanças Climáticas e Desertificação do Semiárido Brasileiro, 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/322211096\\_Um\\_sculo\\_de\\_dados\\_meteorologicos\\_em\\_Piracicaba\\_SP\\_Mudancas\\_do\\_clima\\_pela\\_classificacao\\_de\\_Koppen](https://www.researchgate.net/publication/322211096_Um_sculo_de_dados_meteorologicos_em_Piracicaba_SP_Mudancas_do_clima_pela_classificacao_de_Koppen)>.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements - FAO 24. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 24, p. 154, 1977.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP8266EX - Datasheet**: 6.6. [s.l: s.n.].

GKIOLMAS, A. et al. An environmental education project that measures particulate matter via an Arduino interface. **Sustainable Futures**, v. 2, n. February, p. 100027, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100027>>.

GONZÁLEZ, I.; CALDERÓN, A. J. Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 36, n. October, p. 100557, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100557>>.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. [s.l: s.n.]

JHA, K. et al. A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 2, p. 1–12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004>>.

KHANDPUR, R. S. **Printed Circuit Boards - design, fabrication and assembly**. [s.l.] McGraw-Hill Companies, 2011.

KICAD. **Kicad**. Disponível em: <<https://kicad.org>>. Acesso em: 25 fev. 2021.

KINGBRIGHT. **CJMCU3216 - Datasheet**, 2001. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/168142/KINGBRIGHT/AP3216EC.html>>.

KONDAVEETI, H. K. et al. A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, v. 40, p. 100364, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>>.

LAPIS SEMICONDUCTOR. **GYML8511 - Datasheet**, 2013. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/537994/ETC2/ML8511-00FC.html>>.

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

MEASUREMENT SPECIALITIES. **HTU21D - Datasheet**, 2013. Disponível em: <<https://storage.googleapis.com/baudaeletronicadatasheet/HTU21D.pdf>>.

MELEXIS. **MLX90614** - **Datasheet**, 2006. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/218977/ETC2/MLX90614.html>>.

MUNDO CLIMA. **Mundo clima**. Disponível em: <<http://www.mundoclima.com.br/estacoes-meteorologicas/fixas/>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

PAVEETHRA, S. R. et al. Theoretical modelling and implementation of home energy management system using IoT based automation system. **Materials Today: Proceedings**, n. xxx, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.644>>.

SALCAS - YOUNG. **ANEMÔMETRO YOUNG - 03002**. Disponível em: <<https://www.salcas.com.br/anemometro-young-03002-e-03102>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

SEMICONDUCTOR, R. **BH1750** - **Datasheet**, 2010. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/350139/ROHM/BH1750FVI.html>>.

SENSORS, P. et al. **OPT101** - **Data**, 2015. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/545673/TI/OPT101.html>>.

SIEMENS. **SFH206K** - **Datasheet**, 1998. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/45619/SIEMENS/SFH206K.html>>.

SUGAWARA, M. T. **Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática**. 2003. UFV, 2003.

TALAVIYA, T. et al. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 58–73, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aaaa.2020.04.002>>.

TAOS. **TSL2561** - **Datasheet**, 2009. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TSL2561.pdf>>.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. 1. ed. Campinas, SP: Unicamp - FEAGRI, 2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **Datasheet - INA219**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.usinainfo.com.br/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=458](https://www.usinainfo.com.br/index.php?controller=attachment&id_attachment=458)>.

VIJ, A. et al. IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 1250–1257, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>>.

VISHAY SEMICONDUCTORS. **TEMT6000** - **Datasheet**, 2004. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/117488/VISHAY/TEMT6000.html>>.

VISHAY SEMICONDUCTORS. **BPW34** - **Datasheet**, 2011. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/350139/ROHM/BH1750FVI.html>>.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 8. ed. Geneva - Switzerland: WMO - No 8, 2008.

WRF COMERCIAL. **Anemômetro ANM01**. Disponível em: <<https://www.wrfcomercial.com.br/anemometrosebirutas>>. Acesso em: 13 mar. 2021a.

WRF COMERCIAL. **Pluviometro - PLV01**. Disponível em: <<https://www.wrfcomercial.com.br/pluviometrosautomaticos>>. Acesso em: 13 mar. 2021b.

XUE, J. et al. Evaluation of remote sensing-based evapotranspiration models against surface renewal in almonds, tomatoes and maize. **Agricultural Water Management**, v. 238, n. May, p. 106228, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106228>>.

YOUNG USA. **Multi-plate Radiation Shield Model 41003 user manual**. C012114. ed. Traverse City: Manual do usuário, 2020.

### 3. CALIBRAÇÃO E DESEMPENHO DE SENSORES CAPACITIVOS (FDR) PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE E POTENCIAL MATRICO DA ÁGUA NO SOLO

#### Resumo

Em constante crescimento, o manejo da irrigação baseado em sensores de reflectometria no domínio da frequência (FDR) é uma alternativa cada vez mais presente no ambiente agrícola, visto sua popularização e o crescimento da eletrônica embarcada, como dispositivos de coleta e transmissão de dados em tempo real. Desta forma, propôs-se com este trabalho analisar a utilização de calibração de 8 modelos de sensores FDR, para 8 tipos de solos, avaliando suas respostas para a estimativa de umidade e tensão de retenção da água no solo, pelo método de pontos discretos e pela metodologia de curva de retenção completa, obtida por meio de mini lisímetros de pesagem, desenvolvidos para tal atividade. Ressalta-se ainda, que foram testados a influência da condutividade elétrica da solução do solo de 0 a 5 dS/m e a variação da temperatura do meio de 10 a 40 °C. Os testes conduzidos propiciaram a identificação de 3 sensores classificados com o melhor desempenho, obtendo valores de RMSE inferiores a 0,18 mca para a estimativa do potencial mátrico da água no solo e 0,65% para a estimativa de umidade volumétrica, com baixa influência da temperatura e condutividade elétrica.

Palavras-chave: Instrumentação; manejo da irrigação; permissividade dielétrica.

#### Abstract

In constant growth, irrigation management based on frequency domain reflectometry (FDR) sensors is an increasingly present alternative in the agricultural environment, given its popularization and the growth of on-board electronics, such as data collection and transmission devices in real time. Thus, this work proposed the calibration of 8 models of FDR sensors, for 8 different types of soils, evaluating their response to the estimation of moisture and soil water retention tension, by the discrete point method and by the methodology of complete curve, obtained by means of weighing mini lysimeters, developed for such activity. It is noteworthy that the influence of the electrical conductivity of the soil solution from 0 to 5 dS/m and the variation of the temperature of the medium from 10 to 40 °C were tested. After the tests, 3 sensors were classified with the best performance, obtaining RMSE values less than 0.18 mca for the retention tension estimate and 0.65% for the volumetric humidity estimate, with low influence of temperature and electrical conductivity.

Keywords; Instrumentation; irrigation management; dielectric permittivity.

#### 3.1. Introdução

O teor de umidade no solo é um parâmetro de elevada variabilidade, tanto temporal como espacial, sendo influenciado por características intrínsecas do solo e pelo balanço hídrico na zona radicular das plantas, com as entradas representadas pela chuva e irrigações e saídas por meio de drenagem e evapotranspiração das plantas (SOUZA et al., 2018).

A umidade do solo pode ser medida de três modos diferentes: com base em peso seco de solo, com base em peso úmido de solo ou com base em volume de solo. Complementar ao nível de umidade, a tensão de retenção da água no solo expressa a energia com a qual a solução do solo se encontra adsorvida ao meio poroso, através das forças gravitacionais, capilares e propriedades



coloidais das superfícies de partículas orgânicas e minerais presentes no solo (PORTELA; LIBARDI; VAN LIER, 2001; TEIXEIRA et al., 2017).

Para o manejo da água na agricultura, a tensão de retenção da água no apresenta maior potencial de usabilidade, visto que ela representa a energia a qual deve ser exercida pela planta para a extração de água do solo, sendo possível estabelecer limites técnicos mínimos e máximos para diversas culturas, os quais independem do tipo de solo (curva de retenção) (SILVA; FOLEGATTI; VILLA NOVA, 2005).

Desta forma, ao se atingir o ponto limite máximo de tensão para a planta, inicia-se o processo de irrigação, até que a tensão da água no solo se encontre dentro do limite mínimo ideal, de tal modo que a força de gravidade não induza perdas significativas de água por drenagem profundo no perfil de solo e que a planta mantenha a condutância estomática mais elevada para a captura do CO<sub>2</sub> do ar, de modo à otimizar a produção de biomassa por unidade de área e unidade de água evapotranspirada (COELHO, 2007).

A umidade e a tensão de retenção são fatores essenciais, nos processos que englobam o sistema solo-planta-atmosfera, sendo sua determinação uma importante ferramenta nos estudos da dinâmica da água no solo e manejo da irrigação, resultando na hora mais adequada para a atividade e o volume recomendado a ser aplicado (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012; LIBARDI, 2018).

Diversas são as formas para a obtenção destas variáveis, entretanto, destaca-se a gravimetria como método padrão para a calibração dos demais, o qual requer um longo período de secagem do solo em estufa (aproximadamente 24 horas) e equipamentos especiais para a execução da análise (TEIXEIRA et al., 2017).

O processo de calibração destes sensores FDR resulta na coleta de um elevado número de dados para sua estimativa, deste modo, técnicas baseadas em princípios e sensores eletrônicos passaram a serem implementados, reduzindo o tempo de ensaio e facilitando o uso do procedimento em larga escala (PINTO et al., 2011).

As sondas capacitivas no domínio da frequência (FDR), baseiam-se na técnica de duas placas polarizadas, isoladas por um material dielétrico são inseridas no solo, criando um campo elétrico com o mesmo e resultando em um efeito capacitivo, o qual tem sua intensidade variada de acordo com a composição do meio, que neste caso tem como principal variável a umidade (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Com o advento da tecnologia, diversos ramos da sociedade obtiveram avanços, assim como a agricultura irrigada. Desta forma, a instrumentação, automação agrícola e inteligência artificial são ferramentas que visam a coleta de informação e tomada de ação em tempo real, munida

de algoritmos capazes de retroalimentarem seus banco de dados e aprimorarem suas escolhas (TALAVIYA et al., 2020; VIJ et al., 2020).

Atualmente, a redução de custos e difusão de tecnologia de internet das coisas e o movimento “*maker*” popularizou sistemas embarcados como *Arduino*, *Raspberry*, *Esp* e outros, na instrumentação e automação de atividades residenciais, industriais e agrícolas. Os quais fornecem dispositivos baratos, compactos, leves, rápidos e capazes de serem implementados em soluções inteligentes e individuais (BARBON et al., 2016; GKIOLMAS et al., 2020; KONDAVEETI et al., 2021).

Essas ferramentas permitem que sejam criados dispositivos ímpares, capazes de atuarem em atividades extremamente específicas, ou ainda em consórcio com demais equipamentos, por serem dotados de porta de entrada e saída onde permitem a leitura de sensores e o controle de atuadores, além de permitirem acesso remoto por diferentes sistemas (GONZÁLEZ; CALDERÓN, 2019; PAVEETHRA et al., 2020).

Com base no apresentado, o seguinte trabalho tem o intuito desenvolver um aparato de calibração de sensores baseados no princípio FDR para a estimativa de umidade volumétrica e tensão de retenção para diferentes tipos de solo, baseado no método gravimétrico, para atuarem com auxílio do manejo da água na agricultura irrigada, com metodologia baseada no solo, realizando a leitura dos dados e depositando os mesmos em um banco de dados online.

## 3.2. Material e métodos

### 3.2.1. Sensores utilizados

Foram utilizados neste trabalho 8 modelos de sondas capacitivas (Figura 42 e Tabela 15), dentre as quais alguns modelos também tinham a capacidade de mensurar condutividade elétrica (CE) e temperatura do solo, com as mesmas respondendo em formato analógico e via protocolo I<sup>2</sup>C.

Tabela 15. Modelos de sensores utilizados, com informações de seus fabricantes, outras variáveis medidas e custo de aquisição.

Modelo	Marca	CE	Temp.	Comunicação	Custo (dólar)
Crowtail	Elecrow			Analógica	3,50
CS 1.2	N/A			Analógica	2,45
Grove	Seeed			Analógica	6,50
Octopus	Elecfreaks			Analógica	3,90
PM WCS 3	Tinovi	X	X	I <sup>2</sup> C	32,90
SoilWatch 10	PinoTech			Analógica	23,50
Stemma	Adafruit		X	I <sup>2</sup> C	9,00
VH400	Vegetronix			Analógica	39,95

\* Os valores se referem aos obtidos em julho de 2021, não englobando fretes ou demais taxas.

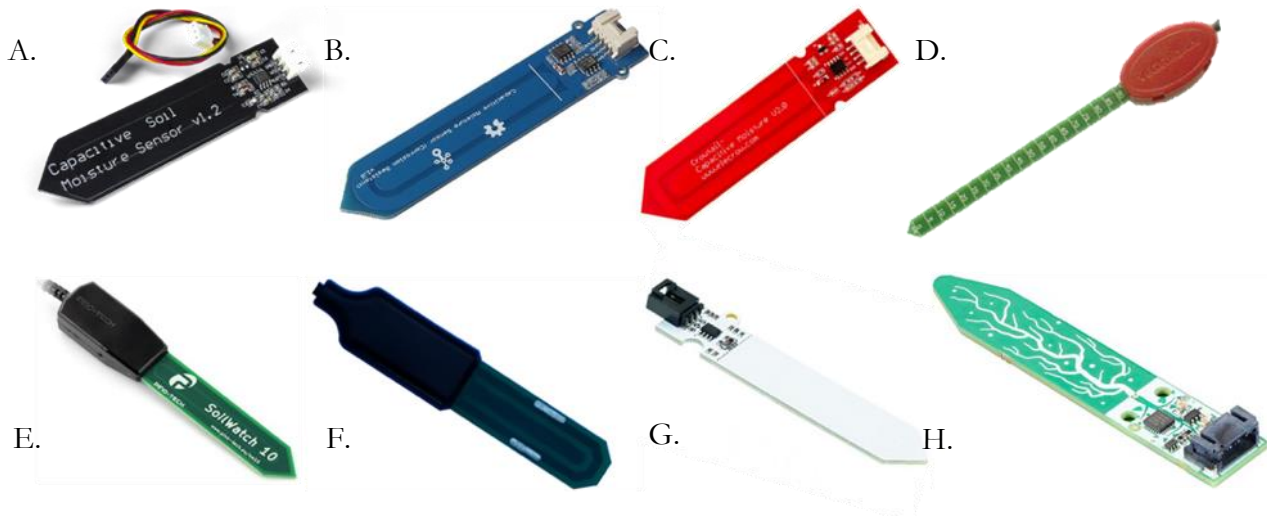


Figura 42. Sensores capacitivos adquiridos para estimar a umidade do solo. A – CS 1.2; B – Grove; C – Crowtail; D – VH-400; E – SoilWatch; F – PM-WCS 3; G – Octopus; H – Stemma.

### 3.2.2. Solos utilizados

Foram utilizados 8 solos distintos (Tabela 16, Figura 43 e Figura 44), sendo eles: areia quartzarênica, carbonatado, distrófico férrico, latossolo amarelo, latossolo vermelho, orgânico, sertãozinho e siltoso, para os quais todos os sensores foram utilizados, visando assim uma melhor análise do dispositivo visto a elevada variabilidade de composição dos meios testados.

Tabela 16. Parâmetros da equação de Van Genuchten, para cada um dos solos utilizados.

Solo	$\alpha$	m	n	$\theta_r$	$\theta_s$	$R^2$
Areia Q.	0,1212	0,2688	1,3677	0,1900	0,5560	0,937
Carbonatado	0,1252	0,3460	1,5290	0,2590	0,6890	0,996
Distrófico F.	0,0638	0,3919	1,6444	0,2830	0,7550	0,995
L. Amarelo	0,0625	0,4324	1,7617	0,2320	0,7040	0,994
L. Vermelho	0,0334	0,6014	2,5088	0,0230	0,4610	0,997
Orgânico	0,0404	0,4210	1,7272	0,2430	0,6870	0,987
Sertãozinho	0,0566	0,3564	1,5538	0,1070	0,5420	0,971
Siltoso	0,1612	0,4102	1,6956	0,3100	0,8020	0,987

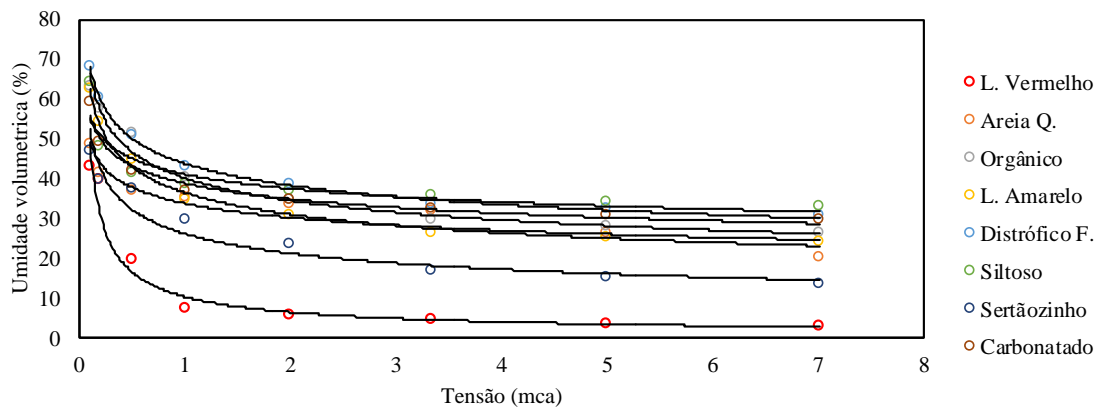


Figura 43. Curva de retenção da água no solo, dos 8 solos utilizados. Com destaque para a diferença de umidade dos solos para a tensão de 3 mca, o qual é frequentemente utilizado como gatilho de irrigação.



Figura 44. Bandeja com os solos acomodados em anéis volumétricos, sendo eles: A – latossolo vermelho; B – areia quartzarênica; C – orgânico; D – latossolo amarelo; E – distrófico férrico; F – siltoso; G – sertãozinho; H – carbonatado.

### 3.2.2.1. Método gravimétrico

Considerado como método padrão para a estimativa de umidade e calibração dos demais, a gravimetria consiste na extração de uma amostra de solo com dimensões conhecidas, a qual passa por uma pesagem inicial e é acomodada em estufa, a aproximadamente 105° C por um período de 24 horas ou até que sua massa não tenha mais variações. Após este prazo realiza-se uma nova pesagem, onde se obtém a massa somente de seus sólidos, visto que a água da amostra foi perdida na estufa. Realizando a subtração entre os valores, pode-se obter a massa de água presente na primeira medida (TEIXEIRA et al., 2017).

### 3.2.2.2. Reflectometria no domínio da frequência

FDR ou sonda capacitiva, como também são conhecida, podem ser inseridas no solo em diferentes profundidades ou angulações e por meio de um princípio eletromagnético interagem com o material que o circunda, criando uma variação de resposta em função da constituição do ambiente, permitindo assim análises de forma não destrutivas e instantâneas (ROQUE, 2008; ARAÚJO PRIMO et al., 2015).

A medida da umidade, realizada por estas sondas baseia-se em um par de placas metálicas condutoras, dispostas uma arquitetura padrão e separadas por um material dielétrico. Considerando o solo como meio dielétrico, a capacitância tende a crescer conforme o número de moléculas livres de água interfere no campo elétrico criado pelo sensor, visto a constante dielétrica dos materiais sólidos constituintes do solo serem desprezíveis, quando comparados ao da água (BOUYOUCOS, 1940; PALTINEANU; STARR, 1997).

Adicionalmente, a composição sólida do meio poroso em questão apresenta pequena variabilidade ao longo do tempo, o que auxilia ainda sua redução na resposta final, levando em conta, entretanto, sua variabilidade espacial, a qual pode influenciar na resposta final do sensor em campo (KELLEY et al., 1946; UHLAND, 1951).

#### 3.2.2.2.1. Efeito capacitivo

Entende-se como capacitor, um elemento reativo que apresenta duas placas carregadas de forma positiva e negativa, respectivamente separadas por um material dielétrico (ou uma combinação destes). Nesta conformação criar-se-á um campo eletromagnético entre os polos que podem ter sua intensidade variada, retardada, ou ainda impulsionada em função da permissividade elétrica do material isolante (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Diversas são as possíveis conformações dos capacitores, variando de arquitetura cilíndrica, placas paralelas, coplanares, esféricos ou combinações destas, variando assim as linhas e a área de interferência do campo eletromagnético, como apresentado na Figura 45.

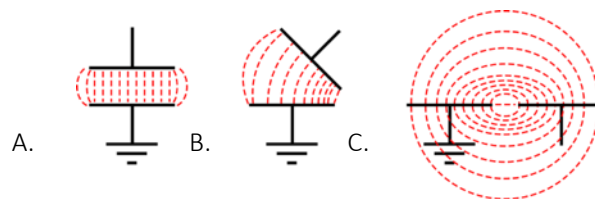


Figura 45. Estrutura de capacitor de placas paralelas e linhas de interação do fluxo magnético. A - capacitor de placas paralelas; B - capacitor de placas anguladas; C - capacitor de placas coplanares. Fonte: Adaptado de BESSA, 2013.

No caso específico dos capacitores coplanares, sua constituição se baseia em duas placas posicionadas em um mesmo plano e separadas por uma pequena distância, desta forma as linhas de interação do campo eletromagnético se curvam e passam a ter uma área de interação acima das placas, onde o material presente interfere na capacitância resultante do conjunto de placas, de acordo com sua permissividade elétrica (Figura 46) (BESSA, 2013).

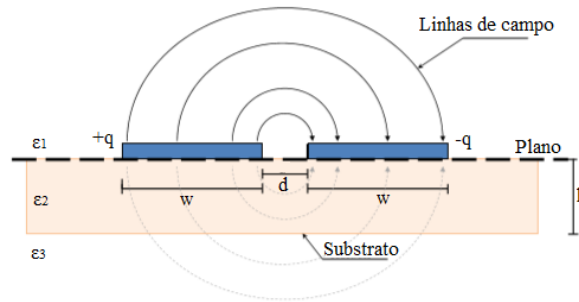


Figura 46. Estrutura de um capacitor de placas coplanares, com suas grandezas associadas.  $q$  – polaridade das placas;  $d$  – distância entre as placas;  $w$  – largura das placas;  $h$  – altura do substrato que suporta as placas;  $\epsilon$  – permissividade elétrica. Fonte: Adaptado de CHANG, 1991.

Uma técnica para a estimativa da capacitância para esta conformação de placas é o cálculo de sua impedância característica ( $Z_0$ ), por meio da técnica de mapeamento como segue a dedução (CHANG, 1991; BESSA, 2013).

$$Z_0 = \frac{120 \pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \frac{K(k)}{K(k')} \quad (16)$$

Em que  $K$  representa a função elíptica completa de primeira espécie e a permissividade elétrica efetiva ( $\epsilon_{ef}$ ), dada por:

$$\epsilon_{ef} = 1 + \frac{\epsilon_{r1} - 1}{2} \frac{K(k')}{K(k)} \frac{K(k1)}{K(k'1)} \quad (17)$$

$$\frac{K(k)}{K(k')} = \begin{cases} \left[ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) \right]^{-1} & \forall 0 \leq k \leq 0,7 \\ \left[ \frac{1}{\pi} \ln \left( 2 \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}} \right) \right]^{-1} & \forall 0,7 \leq k \leq 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$k = \frac{a}{b} = \frac{\frac{d}{2}}{\frac{d}{2} + w} \quad (19) \quad k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (20)$$

$$k1 = \sinh \left( \frac{\pi a}{a h} \right) \quad (21) \quad k1' = \sqrt{1 - k1^2} \quad (22)$$

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (23) \quad LC = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{ef} \quad (24)$$

$$C = \frac{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_{ef}}}{Z_0} \quad ( 25 )$$

Em que:

c – capacitância;

d – espaço entre as placas;

w – largura das placas;

h – altura do substrato;

$\epsilon_0$  – permissividade elétrica no vácuo;

$\epsilon_r$  – permissividade elétrica no substrato;

$\mu_0$  – permeabilidade elétrica no vácuo;

$Z_0$  – impedância característica.

A mensuração da constante dielétrica do solo, com frequência inferior a 1GHz, pode ser uma alternativa a medição de umidade, visto que técnicas eletrônicas permitem tal mensuração e sua correlação com a dinâmica de variação da umidade volumétrica do solo (ATKINS et al., 1998; BAUMHARDT; LASCANO; EVETT, 2000).

Sensores capacitivos apresentam diversas vantagens, quando comparados a outros métodos tradicionais de aferição de umidade, tais como: equipamentos mais leves, instalação permanente, rápida resposta, ausência de efeitos radioativos e ainda baixo erro associado, visto a possibilidade de inserir calibrações com elevada facilidade (SILVA, 2005b; RÊGO SEGUNDO, 2010).

### 3.2.3. Aquisição e armazenamento de dados

Para tal atividade foi desenvolvido um circuito digital com base no microcontrolador Arduino Micro (Figura 47), o qual trabalha com tensão nominal de 5 volts, contando com 20 pinos de entrada e saída para a conexão de sensores e atuadores, sendo todos digitais, 7 com função *Pulse Width Modulation* (PWM) e 12 com função analógica. Adicionalmente o processador trabalha com *clock speed* de 16 MHz e permite a utilização dos protocolos de comunicação: *Serial Peripheral Interface* (SPI), *Inter-Integrated Circuit* (I<sup>2</sup>C), *Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter* (UART) e *Wire* (ARDUINO INC., 2020).

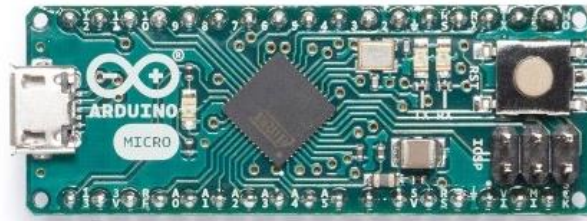


Figura 47. Microcontrolador Arduino micro.

Para auxílio de verificação de funcionamento, incluiu-se no dispositivo de leitura um módulo bluetooth HM-10 (Figura 48 - A), pelo qual era enviado em tempo real cada uma das leituras, bem como um display LCD (Figura 48 - B), o qual apresentava em tempo real todas as leituras realizadas.

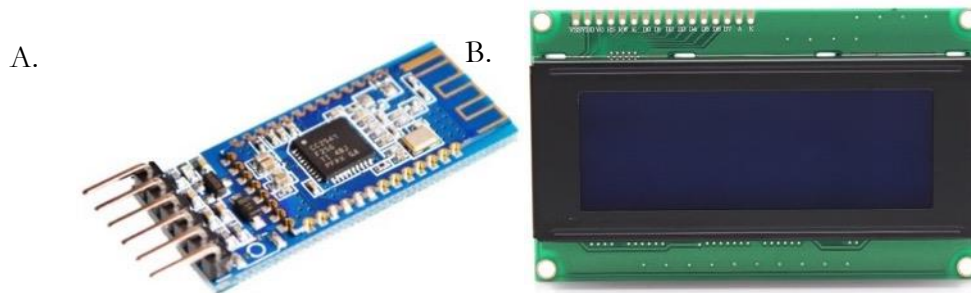


Figura 48. A – Módulo bluetooth Hm-10; B - Display LCD.

A coleta de dados ocorrerá em intervalos de 60 segundos, com os mesmos sendo armazenados em um cartão micro SD, por meio de um módulo de comunicação SPI (Figura 49), onde será estruturado de forma a gerar um relatório compatível com os gerenciadores de planilha, salvo em formato separado por vírgula (CSV).



Figura 49. Módulo de leitura de cartão de memória.

### 3.2.4. Lisímetros de pesagem

Visando a otimização na atividade de leitura dos sensores, bem como a possibilidade da aquisição de maior número de dados, optou-se pela construção de mini lisímetros de pesagem,



equipamentos utilizados a mais de 6 décadas para estudo da relação solo x água x planta x atmosfera (SILVA; FOLEGATTI; MAGGIOTTO, 1999; CARVALHO et al., 2007).

Desta forma, optou-se pela construção de 4 mini lisímetros de pesagem (Figura 50 – A a C), construídos a partir de células de carga de 5 kg (Figura 50 - D), ligadas de forma independente a amplificadores operacionais HX711 (Figura 50 - E) com resolução de 24 bits, se comunicando ao controlador central, desenvolvido com Arduino micro (T. A. HOWELL et al., 1995; MERINO, 2016).

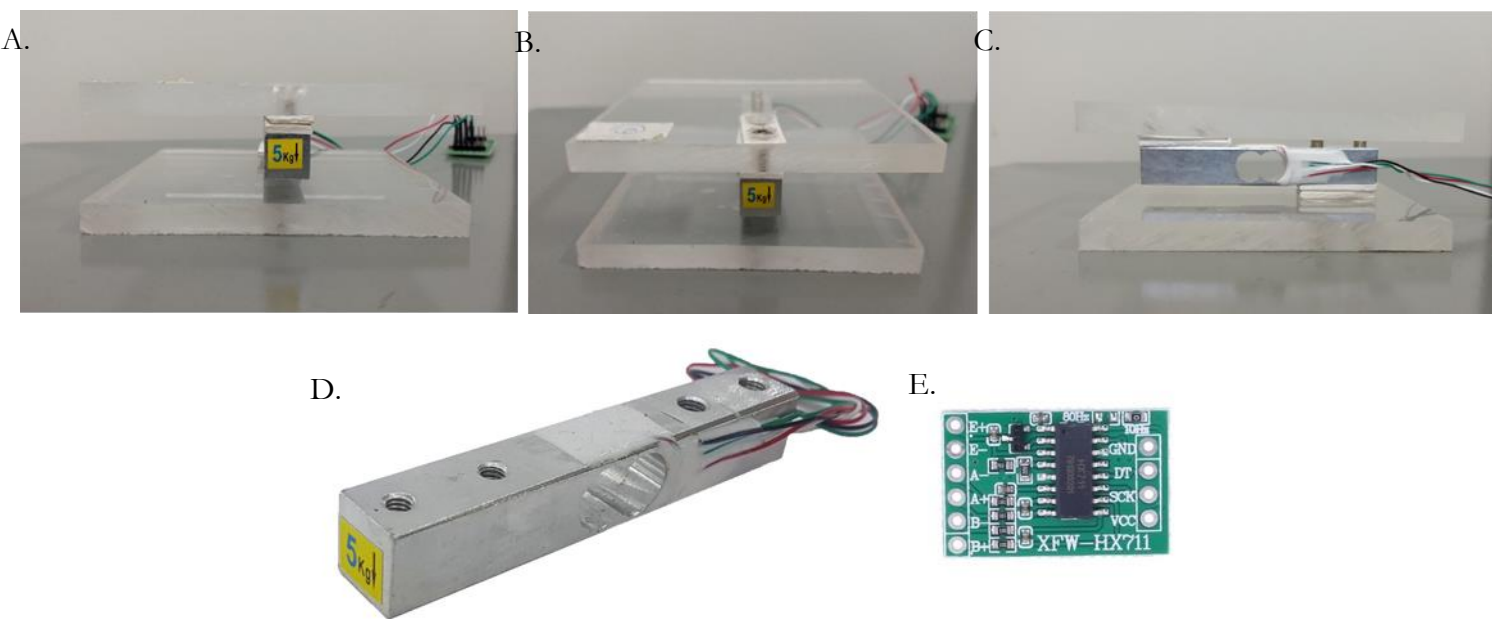


Figura 50. Mini lisímetros de pesagem desenvolvidos: A – vista frontal; B – Vista frontal superior; C – Vista lateral; D – células de carga de 5kg; E – amplificador operacional HX711.

A primeira fase de testes visa a estimativa de resposta do conjunto célula de carga x amplificador operacional, buscando sua resposta para os extremos e assim se obtendo sua sensibilidade efetiva, em volts / grama. Para tal teste, realizou-se a aferição de resposta para os extremos de funcionamento da célula de carga dividindo o mesmo pela carga máxima suportada, com apresentado na equação 26 (RUIZ-PENÁLVOR et al., 2015; MERINO, 2016).

$$\text{Sensibilidade} = \frac{V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}}{\text{massa}} \quad ( 26 )$$

Onde:

$V_{\text{máx}}$  – tensão máxima (volts);

$V_{\text{mín}}$  – tensão mínima (volts);

massa – massa máxima medida (g).

Posteriormente, para a calibração do lisímetro de pesagem foram realizadas pesagens de objetos conhecidos em uma balança de precisão e no equipamento desenvolvido, realizando assim uma curva de calibração entre a medida real e sua resposta, o que permite assim sua calibração final (HOWELL et al., 1995; FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Visando melhorias de mobilidade e transporte do equipamento desenvolvido, optou-se pela conversão do mesmo em uma bancada única, contendo 4 minilísímetros cada, operados de forma independente, como apresentado na Figura 51.

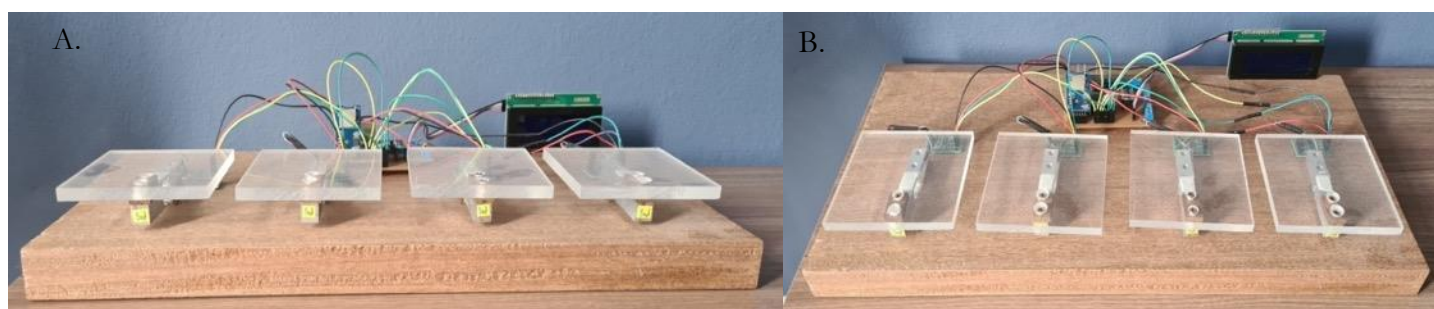


Figura 51. Bancada contendo os lisímetros desenvolvidos.

### 3.2.5. Hardware e software desenvolvidos

Visando a redução de interferência por capacitância residual e impedância variável devido a diferentes cabos utilizados, optou-se pela construção de uma placa de circuito impresso unificando todo o circuito desenvolvido, a qual foi modelada no software Kicad, gratuito e de código aberto, rodando em Windows, Linux e MacOS e licenciado sob GNU GPL v3 (BROOKS, 2003; KICAD, 2021).

A primeira fase da modelagem é composta pela criação de um protótipo esquemático (Figura 52), dentro da ferramenta “Eeschema”, contendo todos os componentes básicos presentes no sistema, bem como a inserção de todas as ligações a serem realizadas entre os componentes presentes, bem como o footprint e as especificações de dimensão de largura das ligações diâmetro dos furos (KHANDPUR, 2011).

Posteriormente, realiza-se a exportação dos componentes via netlist, onde um arquivo de extensão “net” é criado, com todas as informações do circuito. Tal arquivo é importado na segunda ferramenta “PcbNew” (Figura 53), onde inicialmente os componentes são inclusos em disposição aleatória e devem ser organizados da forma a serem construídos.

Ressalta-se que não existe um modelo padrão a ser seguido em tal etapa, sendo a disposição dos componentes realizada a fim de resultar em trilhas mais simples e de menor comprimento possível.

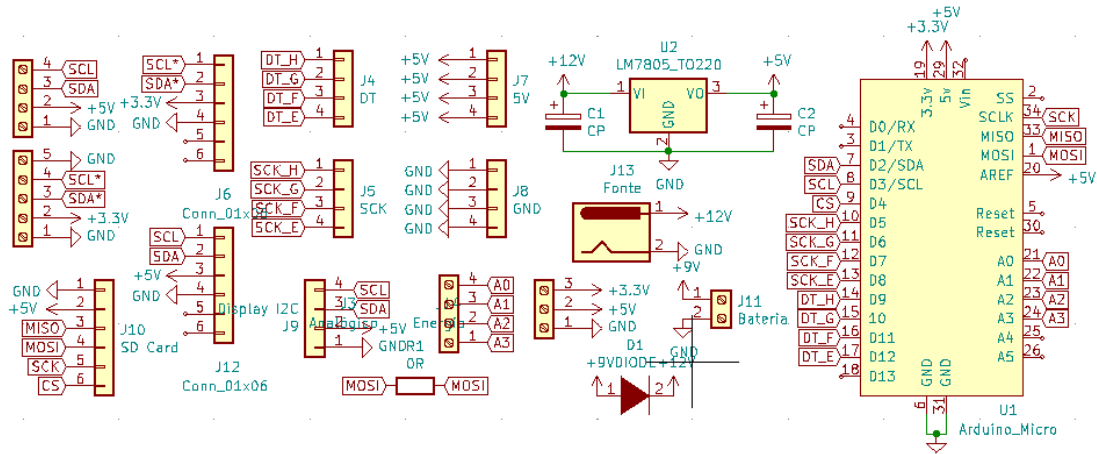


Figura 52. Diagrama esquemático do controlador desenvolvido para a leitura prévia dos sensores.

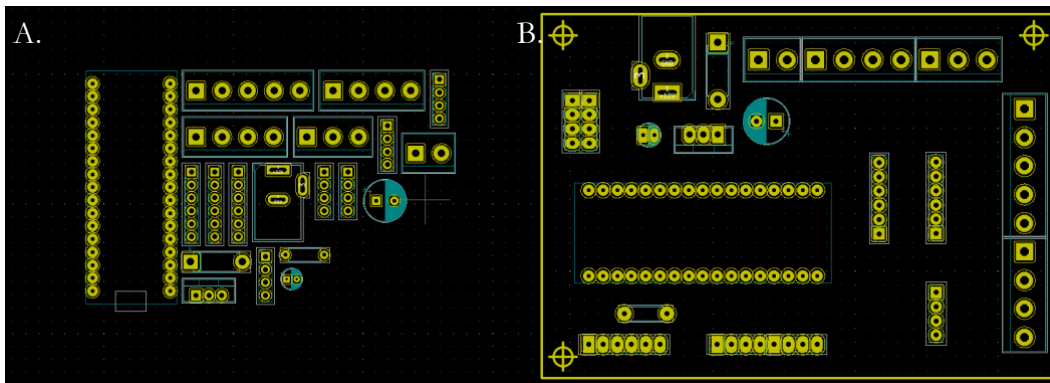


Figura 53. Diagrama gráfico da ferramenta PcbNew, com distribuição dos componentes: A – Aleatória; B – Ajustada.

A terceira fase do processo de modelagem é a definição dos diâmetros de trilha, com sua respectiva isolamento, assim como para furos. Desta forma, pode-se gerar um arquivo *Spectra DSN*, o qual é utilizado no software *freerouting* (versão editada pelo autor) a fim de se obter uma melhor distribuição de trilhas. Com as trilhas definidas, exporta-se o arquivo *spectrasession* do *freerouting* para o *PcbNew*, obtendo desta vez a placa integralizada (Figura 54).

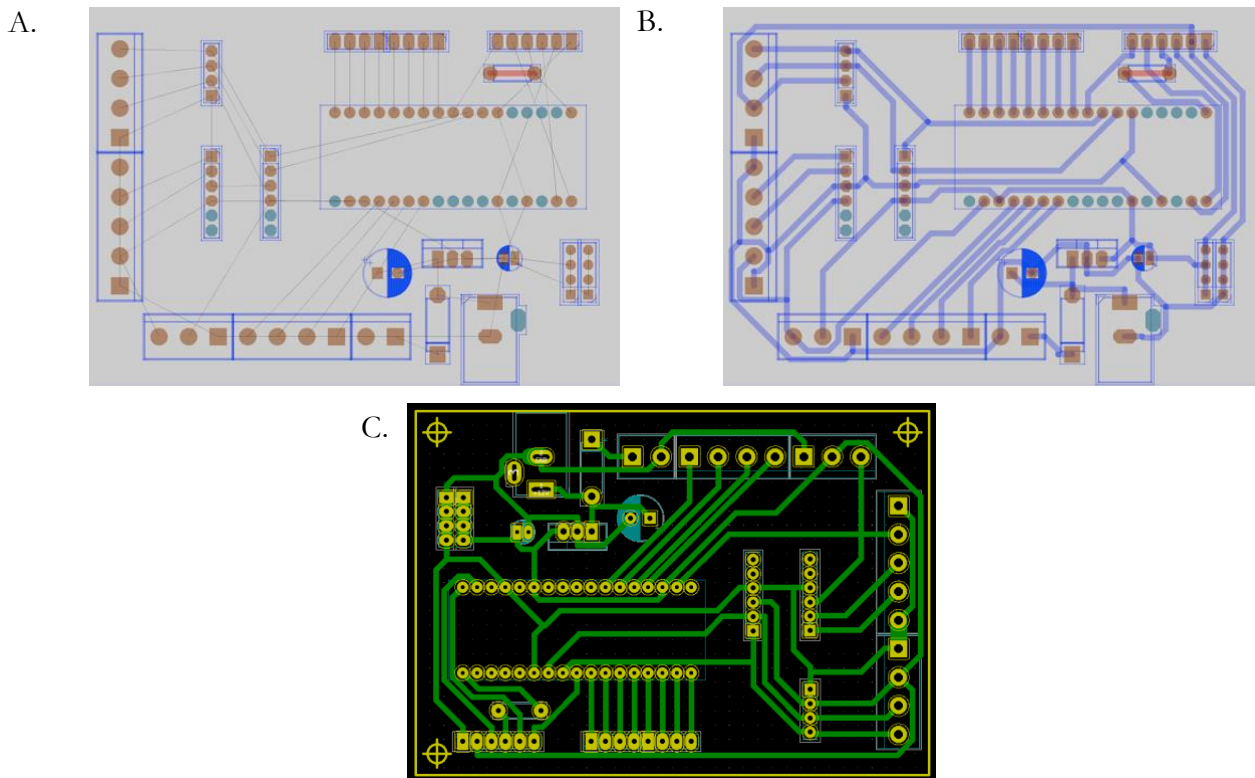


Figura 54. Passo a passo do roteamento de trilhas, sendo: A - importação do spectraDSN no freerouting; B – Roteamento das trilhas; C – Importação das trilhas roteadas no PcbNew.

Após a conclusão das trilhas, pode-se gerar o arquivo de impressão (Figura 55 – A), a partir do “PcbNew”, com auxílio do componente de plotagem, onde se seleciona todas as camadas a serem impressas. Adicionalmente, nesta fase, pode-se gerar uma visualização 3D da placa, a fim de se avaliar a distribuição o posicionamento dos componentes (Figura 55 – B), o que auxilia na montagem da placa e soldagem dos componentes.

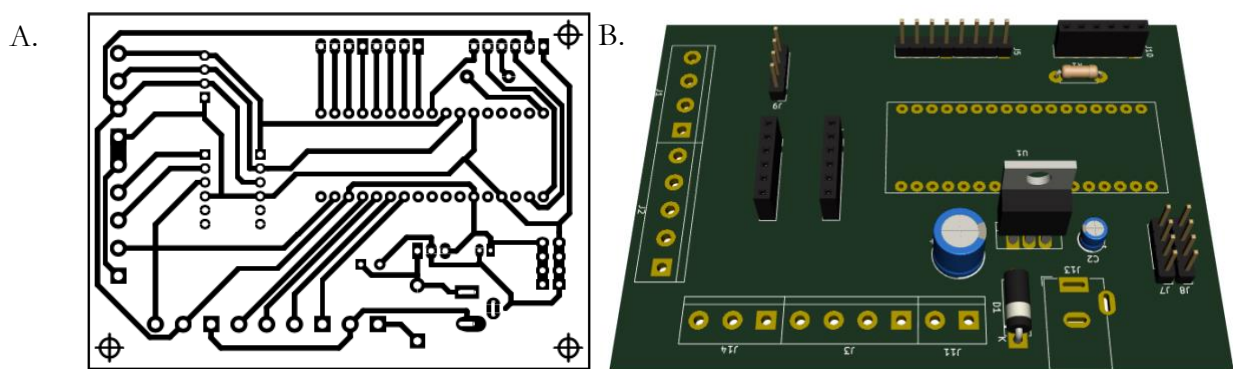


Figura 55. A - Arquivo final gerado para impressão com as trilhas; B - Visualização 3D da placa.

Adicionalmente, o software de controle foi desenvolvido em linguagem C++ por meio da interface de desenvolvimento integrado Arduino (Arduino IDE), versão profissional 2.0 (Figura 56), onde o software foi desenvolvido e passou por processo de *debug* para posterior testes no

microcontrolador, com sua fase inicial realizando o envio de dados para a porta serial da interface e posteriormente com envio ao módulo SD card.

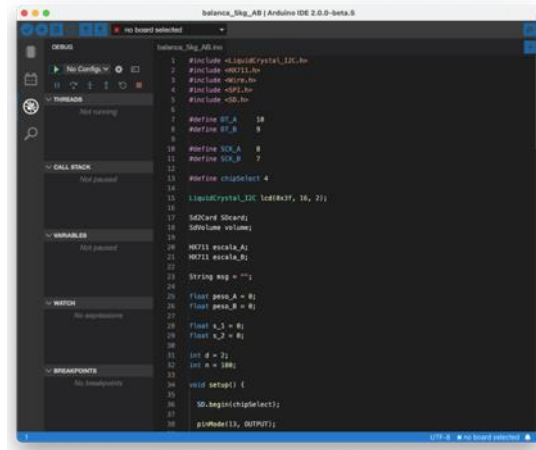


Figura 56. Interface do Arduino IDE Pro - versão 2.0.

### 3.2.6. Leitura e calibração dos sensores

Baseado no método gravimétrico, o processo de leitura e calibração dos sensores consistiu na inserção do mesmo em uma amostra de solo saturada, a qual foi acomodada em um dos lisímetros desenvolvidos, realizando a leitura dos sensores e do peso bruto das amostras em intervalos fixos de 60 segundos, durante um período de aproximadamente 15 dias, ou até que o peso da amostra não apresente mais variações (TEIXEIRA; FONTANA; TEIXEIRA, 2017).

O processo de secagem da amostra foi por via a exposição ao ambiente, em ambiente protegido a sopra, o que resulta em um tempo mais elevado de ensaio, porém com pequenas variações ao longo do tempo, apresentando assim uma maior unidade amostral (TEIXEIRA et al., 2017).

Posteriormente, realizou-se a secagem da amostra a fim de se obter sua massa de sólidos, e com o conhecimento do peso bruto, pode-se calcular a umidade em cada um dos pontos obtidos, durante a secagem da amostra, esse processo foi repetido para todos os sensores para todos os tipos de solo utilizados.

Para a obtenção da tensão de retenção, foram enviadas 3 amostras de cada um dos solos utilizados (Figura 44) a um laboratório especializado para determinação da curva de retenção, obtendo os pontos até a tensão máxima de 1500 kPa, englobando assim a faixa utilizável ao manejo da irrigação (-5 a -70 kPa) (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012; LIBARDI, 2018).

Adicionalmente, realizou-se o cálculo de alguns parâmetros para auxílio da validação de dados, sendo eles: erro absoluto médio (MAE – equação 27), raiz quadrada do erro médio (RMSE – Equação 28), índice de Willmott (d – equação 29), erro percentual absoluto médio (MAPE –

equação 30), coeficiente de determinação ( $R^2$  – equação 31), R-quadrado ajustado ( $R^2_A$  – equação 32) e coeficiente C (equação 33 e Tabela 17)(WILLMOTT et al., 1985; CAMARGO; SENTELHAS, 1997; JIMÉNEZ et al., 2019).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (27)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (28)$$

$$d = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{[\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)^2]} \right) \quad (29)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \right| \quad (30)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (31)$$

$$R^2_{Ajustado} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - 1 - K} \quad (32)$$

$$c = R^2 \cdot d \quad (33)$$

Tabela 17. Classificação do coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas (1997).

Valor de c	Classificação
> 0,85	Excelente
0,76 – 0,85	Muito bom
0,66 – 0,75	Bom
0,61 – 0,65	Regular
0,51 – 0,60	Insatisfatório
0,41 – 0,50	Ruim
≤ 0,41	Péssimo

Onde:

E – valor estimado;

O – valor observado;

i – índice;

n – número de dados;

$\bar{O}$  – média de valores observados; e

K – número de variáveis.

Visando uma análise de dispersão da porção mais distante do modelo selecionado, será realizado o cálculo do erro absoluto médio, com uso da equação 27, de um conjunto de dados que compreende os 10% mais distantes, baseado nos valores de RMSE.

A fim de se avaliar a nova metodologia empregada na calibração (curva completa de secagem), realizou-se a leitura dos sensores, localizados em amostras de solo de pontos de umidade conhecidos, com as tensões de retenção variando de 1 a 8 mca, exceto para o solo quartzarênico, o qual teve como pontos utilizados, de 0,1 a 0,8 mca. Desta forma pode-se testar a equação gerada com os dados da curva completa de secagem, validando a mesma com os pontos conhecidos (ATKINS et al., 1998; VAZ et al., 2013; TIGLAO et al., 2020).

Adicionalmente, para os sensores mais bem avaliados, foram feitas duas repetições das curvas completas de secagem, a fim de se avaliar a continuidade de resposta dos mesmos, realizando assim, uma segunda validação dos dados (ZABOLOTNYI; KOSHEVOI, 2020).

#### **3.2.6.1. Influência do meio poroso**

Visando avaliar a influência do meio poroso, foram selecionados solos com material de diversas origens pedogênicas, sendo utilizados latossolos, solos distróficos férricos e ainda solos orgânicos, desta forma abrangendo uma grande parte dos solos agricultáveis presentes no Brasil (BELL; DEAN; HODNETT, 1987; CHANZY et al., 1998).

Ressalta-se ainda, que solos ferrosos apresentam elevadas interferências no funcionamento de sensores FDR, visto sua alteração no campo elétrico formado entre as placas do capacitor, muitas vezes inviabilizando seu funcionamento, sendo este mais um desafio para os sensores selecionados (BAUMHARDT; LASCANO; EVETT, 2000).

#### **3.2.6.2. Influência da temperatura**

Outra variável ambiental com influência significativa no funcionamento dos sensores é a temperatura do meio, desta forma, testou-se a influência no seu funcionamento, emergindo o elemento sensor em meio líquido com temperaturas de 10 a 40° C, com intervalos fixos de 5° C, avaliando desta forma a alteração de sua resposta em função da variação da temperatura do meio (SUN et al., 2000; DENG et al., 2021).

### 3.2.6.3. Influência da condutividade elétrica

A variação da condutividade elétrica é outro parâmetro influente na resposta de sensores FDR, visto a concentração de íons gerar uma mudança na permissividade elétrica do meio, alterando o efeito capacitivo resultante entre as placas polarizadas (SUN et al., 2000; SURYA et al., 2020).

Assim, será testada a influência da CE de um meio líquido, para a variação de resposta dos sensores selecionados, onde os mesmos terão seus elementos sensores imersos em uma solução, a qual terá sua CE variando de 0 a 5 dS/m, com intervalos fixos de 0,5 dS/m (ATKINS et al., 1998).

### 3.2.6.4. Área de influência do sensor

Outra variável de elevada importância é a área de influência de cada um dos modelos de sensor selecionados, onde sensores com grandes áreas podem sofrer com interferências de corpos estranhos próximos e sensores com pequenas áreas, podem ter seu funcionamento comprometido, quando em solos expansivos em baixo nível de umidade (ATKINS et al., 1998; VAZ et al., 2013; ITURRIA et al., 2019).

Desta forma, foram testados os diâmetros de influência dos sensores, por meio de imersão em água com posterior mudança de posição em direção a um corpo rígido, de características de permissividade dielétrica destoantes do meio em uso, desta forma, considerando o diâmetro efetivo, o qual não sofria efeitos desse corpo (ITURRIA et al., 2019).

### 3.2.6.5. Análise visual pós-teste

Concluídos os testes de calibração e validação dos sensores, os mesmos serão submetidos a uma análise visual, a qual tem por objetivo evidenciar possíveis avarias ocasionadas devido aos testes, classificando os mesmos segundo as divisões descritas na Tabela 18.

Tabela 18. Descrição de índices avaliativos, propostos.

<b>Índices</b>	<b>Classificação</b>	<b>Parâmetros</b>
Situação	Degradado	Apresenta alterações em sua estrutura
	Não degradado	Não apresenta alterações em sua estrutura
Apto ao uso	Sim	Se encontra em condições de uso
	Não	Não se encontra e condições de uso



### 3.2.7. Dispositivo final

Objetiva-se com os testes, não somente a calibração dos sensores para diferentes tipos de solos e condições de uso, mas sim a criação de uma rede de sensores, com atuação em malha, interligados por uma rede ad-hoc, onde cada um dos controladores associados aos sensores se conecta a rede como estação (*sta\_mode*) e repetindo o sinal como ponto de acesso (*ap\_mode*) (SERPANOS; WOLF, 2018; ALAM; SHAKIL; KHAN, 2020).

Para tal uso, empregou-se um controlador esp32 (Figura 57), o qual conta com placa wireless para acesso a internet por redes de 2.4 GHz em bandas 802.11 b/g/n com antena interna, e chip de comunicação BLE 4.2 (*bluetooth low energy*), com processador *dual core* de 240 MHz e 520 KB de SRAM (ESPRESSIF SYSTEMS, 2019).

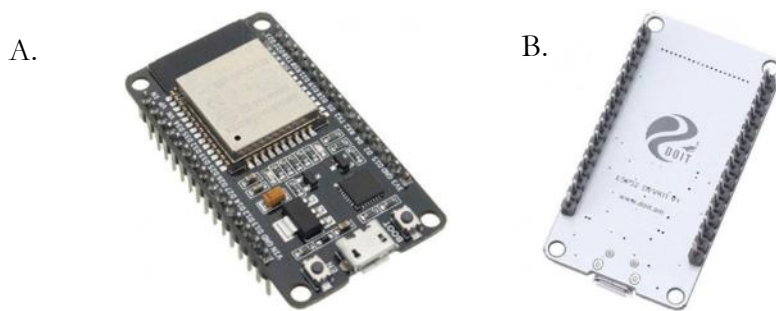


Figura 57. Esp32 modelo WROOM – 32. A - Vista superior; B - Vista inferior.

Complementarmente, com o uso de rede entre os sensores, cria-se a possibilidade de um dispositivo central o qual receba os dados e armazene em um módulo SD card ou ainda em um banco de dados online, como é o caso do Adafruit IO.

Ressalta-se que a estrutura final do dispositivo em campo é composta por uma placa de circuito impressa, contendo todos os componentes necessários para o funcionamento, tendo como fonte de energia uma bateria, recarregada por uma célula fotovoltaica, fornecendo ao sistema autonomia e a isenção de cabeamento.

Desta forma, para a estimativa da possível malha de sensores, será realizado um teste de distância máxima de comunicação entre os sensores, conectados por rede local complementado por um teste de perda de qualidade de banda de internet, quando compartilhada pela mesma rede de sensores.

## 3.3. Resultados e discussão

Apresenta-se neste tópico, os resultados obtidos na calibração de cada um dos sensores capacitivos para cada um dos 8 tipos de solos utilizados, assim como sua resposta a variação de temperatura, condutividade elétrica da solução do solo, diâmetro efetivo de ação, área de influência

dos sensores e os a distância máxima de comunicação via rede local e perda de dados com compartilhamento ativo.

Adicionalmente, se expõe a proposta de dispositivo para estimativa de umidade do solo em tempo real, com todas as funcionalidades ativas, realizando as mensurações e enviando os dados em modo local e para um banco de dados online.

### **3.3.1. Resposta a variação da umidade**

#### **3.3.1.1. Crowtail**

O sensor crowtail apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 58 e Tabela 19, sendo avaliado como excelente, segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas, exceto para o solo sertãozinho, obtendo classificação muito boa.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1 para 7 dos solos utilizados, com RMSE inferior a 1,2% para 6 dos solos utilizados, com os piores valores para os solos distrófico férrico e sertãozinho com 2,35% e 4% respectivamente, com um índice de confiança superior a 94%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 3% para todos os solos, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

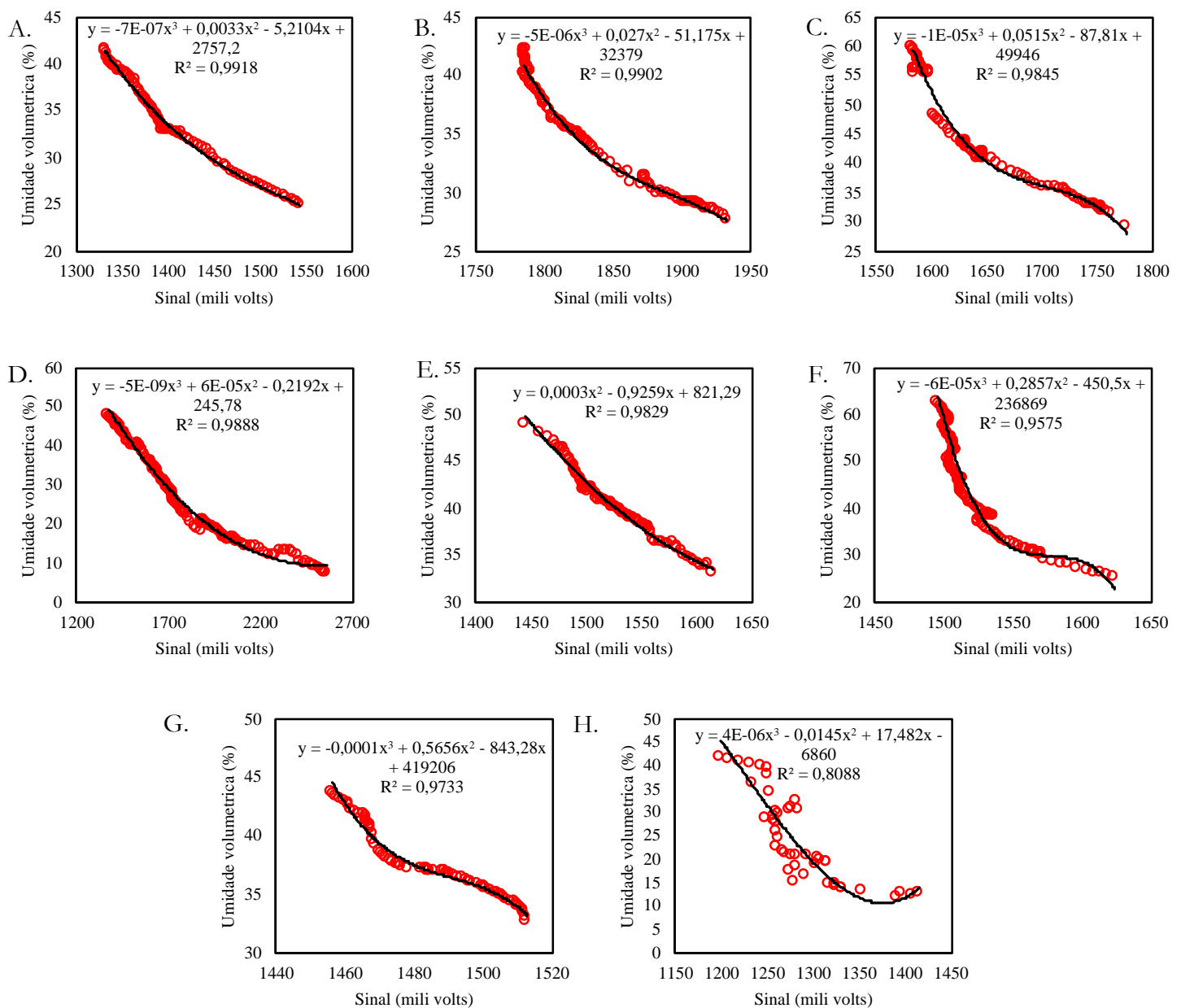


Figura 58. Resposta do sensor crowtail a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 19. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor crowtail a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,3812	0,4747	0,9975	0,0107	0,9582	0,9577	0,9558	Excelente
L. amarelo	0,3670	0,4638	0,9974	0,0100	0,9902	0,9901	0,9877	Excelente
L. vermelho	0,7966	1,1560	0,9961	0,0169	0,9845	0,9843	0,9806	Excelente
Quartzarênico	0,6756	1,1905	0,9970	0,0229	0,9888	0,9887	0,9858	Excelente
Siltoso	0,4033	0,4965	0,9957	0,0098	0,9820	0,9818	0,9777	Excelente
Distrófico F.	1,8888	2,3433	0,9873	0,0431	0,9679	0,9677	0,9556	Excelente
Orgânico	0,3545	0,5950	0,9896	0,0092	0,9892	0,9890	0,9780	Excelente
Sertãozinho	0,0362	4,0123	0,9449	0,0269	0,8088	0,8046	0,7642	Muito bom

### 3.3.1.2. CS 1.2

Embora amplamente fabricado por diversas empresas, com a mesma conformação e descrição, este modelo apresenta resposta uniforme, quando em solos distintos com vários níveis de umidade, como apresentado na Figura 59 e Tabela 20, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1 para 6 dos solos utilizados, com RMSE inferior a 1,2% para 7 dos solos utilizados, com os piores valores para os solos carbonatado e sertãozinho com 1,2% e 4,1% respectivamente, com um índice de confiança superior a 97%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 6% para todos os solos, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

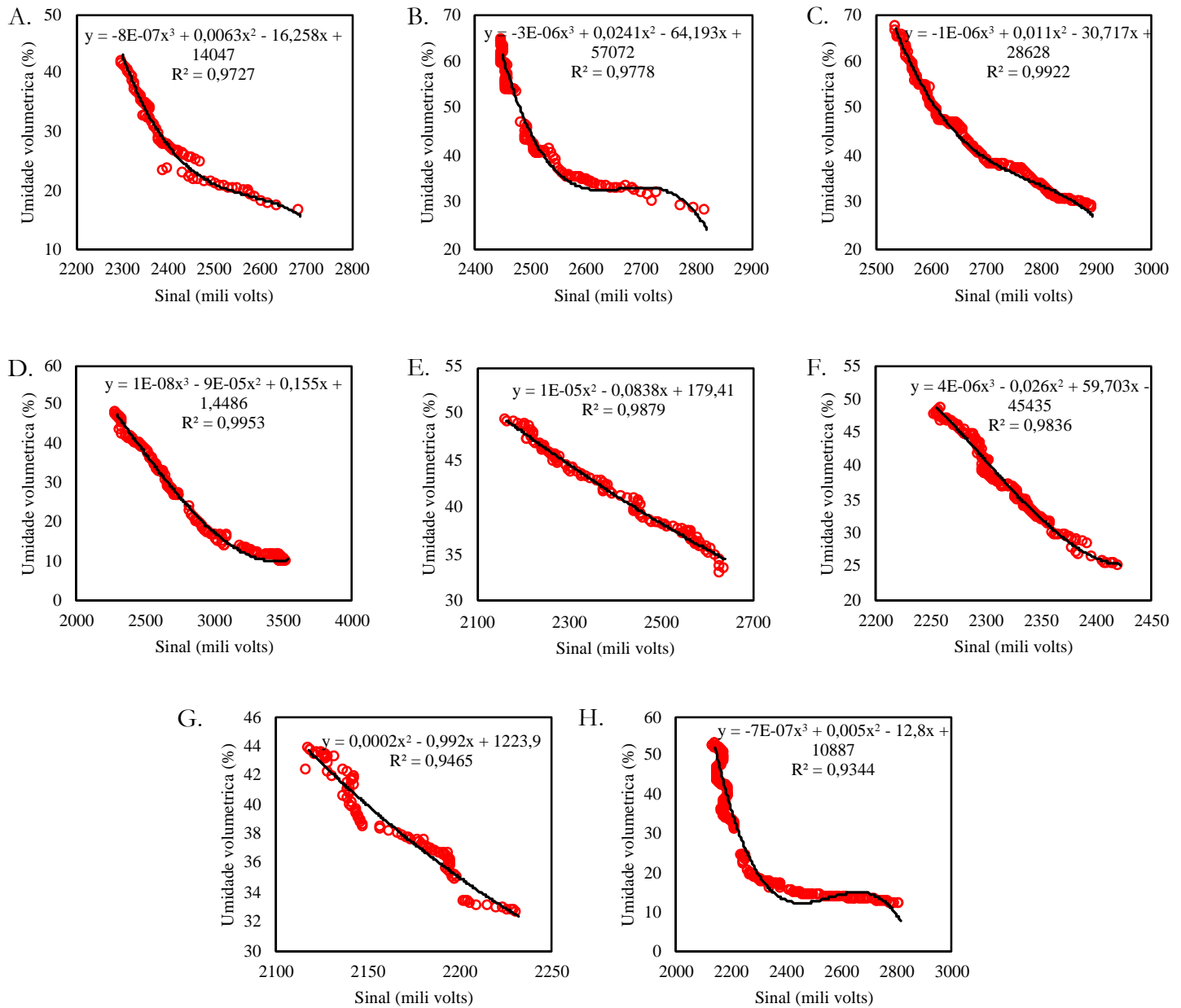


Figura 59. Resposta do sensor CS 1.2 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 20. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor CS 1.2 a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,8736	1,2024	0,9925	0,0333	0,9727	0,9724	0,9724	Excelente
L. amarelo	1,3330	1,7116	0,9940	0,0278	0,9778	0,9776	0,9719	Excelente
L. vermelho	0,6253	0,9681	0,9979	0,0131	0,9923	0,9922	0,9901	Excelente
Quartzarênico	0,7849	1,1118	0,9981	0,0301	0,9953	0,9953	0,9934	Excelente
Siltoso	0,3842	0,4892	0,9970	0,0094	0,8023	0,8805	0,9879	Excelente
Distrófico F.	0,5628	0,8248	0,9958	0,0141	0,9836	0,9835	0,9795	Excelente
Orgânico	0,6376	0,7665	0,9865	0,0166	0,9465	0,9459	0,9333	Excelente
Sertãozinho	2,1883	4,1095	0,9770	0,0520	0,9408	0,9406	0,9344	Excelente

### 3.3.1.3. Grove

O sensor grove apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 60 e Tabela 21

, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1,2 para todos solos utilizados, com RMSE inferior a 1,45% para 6 dos solos utilizados, com os piores valores para os latosolos amarelo e vermelho com 1,7% e 1,94% respectivamente, com um índice de confiança superior a 94%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 3% para 7 dos os solos, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

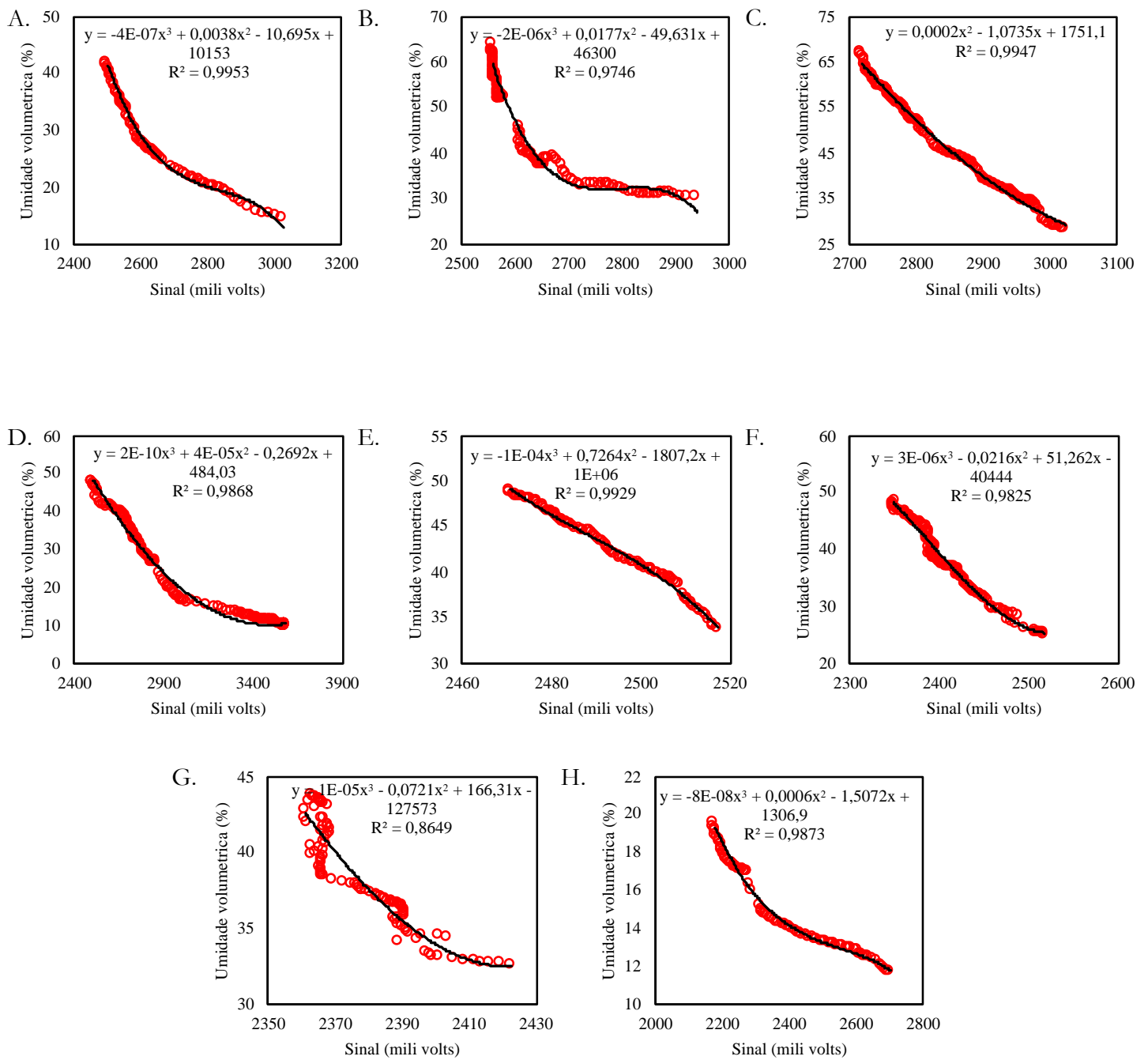


Figura 60. Resposta do sensor Grove a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 21. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Grove a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,6668	0,7585	0,9975	0,0268	0,9797	0,9795	0,9772	Excelente
L. amarelo	1,3655	1,7720	0,9934	0,0291	0,9734	0,9732	0,9669	Excelente
L. vermelho	1,0582	1,9410	0,9932	0,0175	0,9944	0,9944	0,9876	Excelente
Quartzarênico	1,0171	1,6206	0,9960	0,0437	0,9868	0,9867	0,9828	Excelente
Siltoso	0,3045	0,3643	0,9979	0,0073	0,8601	0,8587	0,8583	Excelente
Distrófico F.	0,4228	0,9690	0,9943	0,0115	0,9840	0,9839	0,9783	Excelente
Orgânico	1,1965	1,4467	0,9482	4,9774	0,9521	0,9516	0,9028	Excelente
Sertãozinho	0,3751	0,4535	0,9899	0,0257	0,9887	0,9886	0,9787	Excelente

### 3.3.1.4. Octopus

O sensor Octopus apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 61 e Tabela 22, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1,25 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 1,6% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos carbonatado e quartzarênico com 1,52% e 1,26% respectivamente, com um índice de confiança superior a 98%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 5% para todos os solos, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.



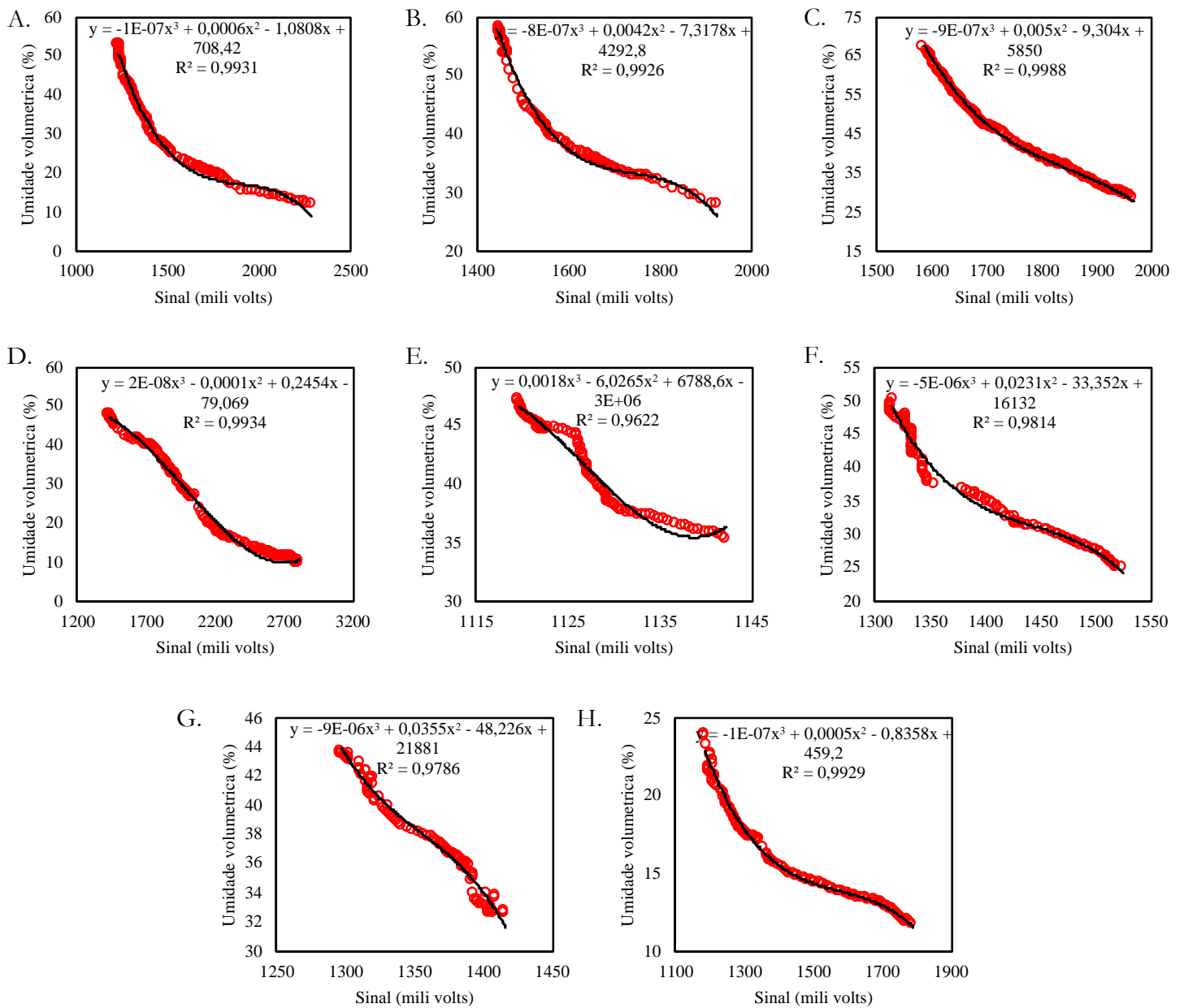


Figura 61. Resposta do sensor Octopus a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 22. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Octopus a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	1,2466	1,5235	0,9963	0,0423	0,9932	0,9931	0,9894	Excelente
L. amarelo	0,6412	0,7877	0,9981	0,0155	0,9643	0,9640	0,9625	Excelente
L. vermelho	0,2079	0,3766	0,9997	0,0043	0,9963	0,9963	0,9960	Excelente
Quartzarênico	0,7415	1,2657	0,9976	0,0304	0,9909	0,9908	0,9885	Excelente
Siltoso	0,5729	0,7266	0,9899	0,0141	0,9663	0,9659	0,9566	Excelente
Distrófico F.	0,7953	1,0610	0,9814	0,0201	0,9814	0,9812	0,9767	Excelente
Orgânico	0,4473	0,5302	0,9940	0,0121	0,9892	0,9891	0,9833	Excelente
Sertãozinho	0,1797	0,2717	0,9982	0,0097	0,9929	0,9928	0,9911	Excelente

### 3.3.1.5. PM WCS 3

O sensor PM WCS 3 apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, ressaltando-se somente que este modelo de sensor apresenta sua resposta como permissividade dielétrica em Faraday / m e não em variação de tensão (mili volts) como os demais, com sua resposta apresentada na Figura 62 e Tabela 25, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,2 para todos solos utilizados, com RMSE inferior a 0,7% para todos solos utilizados, com os piores valores para os solos distrófico férrico e latosolo amarelo com 0,65% para ambos, com um índice de confiança superior a 97%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 0,4% para todos os solos, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

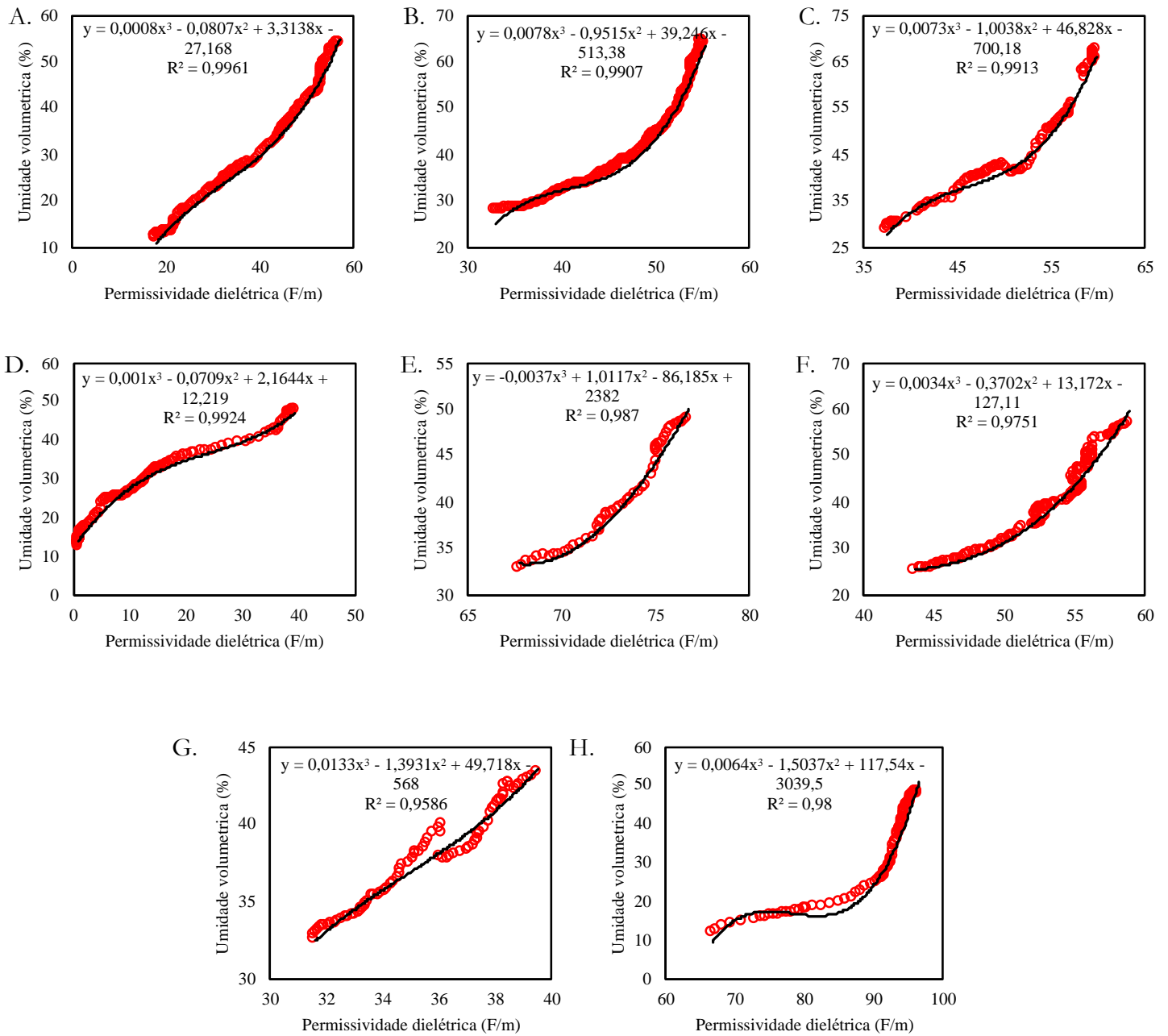


Figura 62. Resposta do sensor PM WCS 3 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 23. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor PM WCS 3 a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,0880	0,4872	0,9980	0,0022	0,9956	0,9956	0,9936	Excelente
L. amarelo	0,1916	0,6564	0,9976	0,0034	0,9913	0,9913	0,9890	Excelente
L. vermelho	0,1316	0,4110	0,9978	0,0030	0,9913	0,9912	0,9891	Excelente
Quartzarênico	0,0876	0,3139	0,9981	0,0033	0,9924	0,9923	0,9905	Excelente
Siltoso	0,0337	0,1560	0,9967	0,0008	0,9870	0,9868	0,9838	Excelente
Distrófico F.	0,1834	0,6469	0,9911	0,0043	0,9932	0,9932	0,9844	Excelente
Orgânico	0,1425	0,4356	0,9763	0,0037	0,9586	0,9581	0,9359	Excelente
Sertãozinho	0,0285	0,5167	0,9948	0,0010	0,9800	0,9798	0,9749	Excelente

### 3.3.1.6. SoilWatch 10

O sensor SoilWatch 10 apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 63 e Tabela 24, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1,61 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 2% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos distrófico férrico e latosolo vermelho com 1,97% e 1,86% respectivamente, com um índice de confiança superior a 97%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 4,1%, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

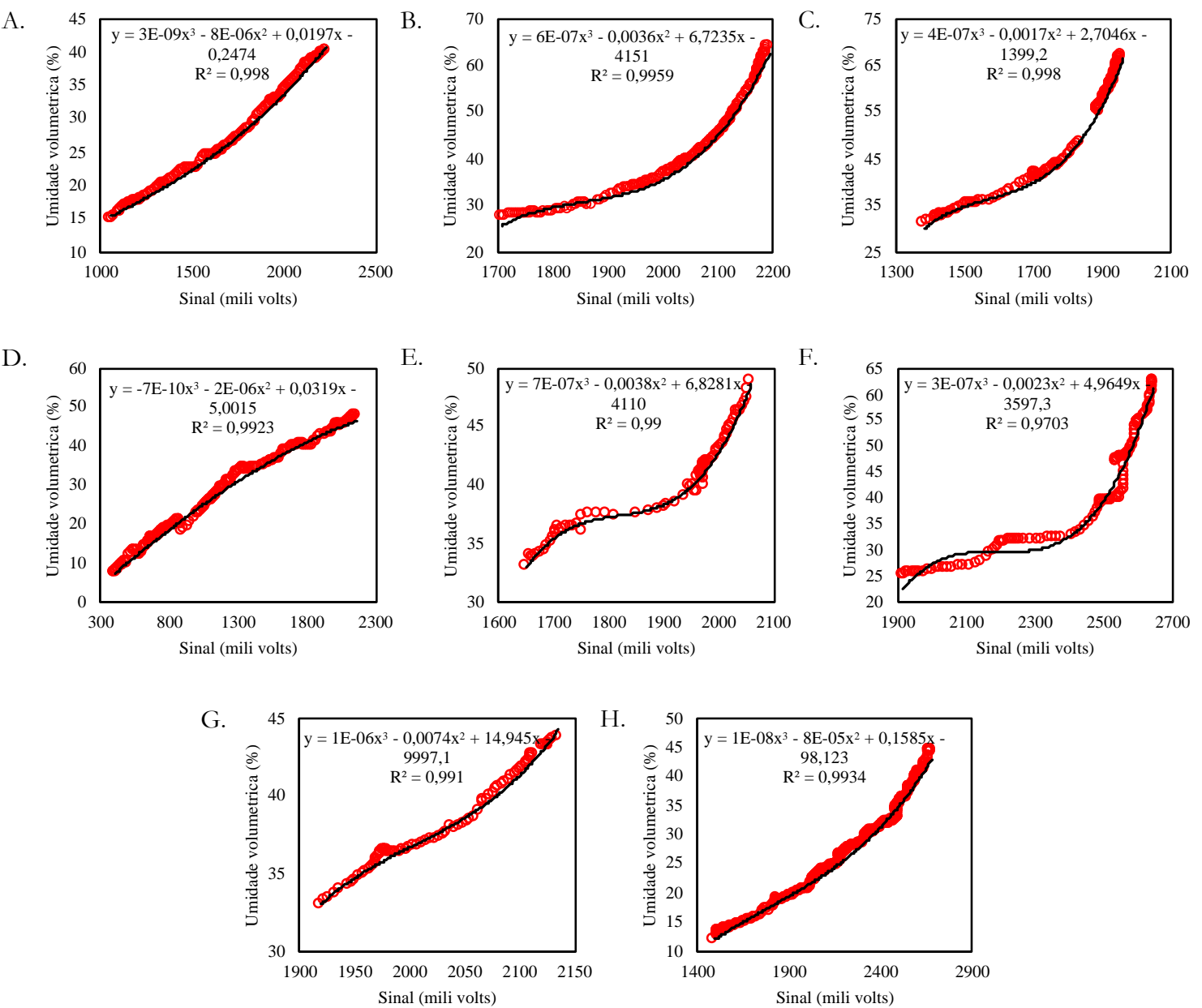


Figura 63. Resposta do sensor SoilWatch 10 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 24. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,2720	0,3464	0,9995	0,0098	0,9891	0,9890	0,9886	Excelente
L. amarelo	0,2315	0,6657	0,9989	0,0042	0,9851	0,9850	0,9840	Excelente
L. vermelho	1,3596	1,8619	0,9935	0,0297	0,9947	0,9947	0,9883	Excelente
Quartzarênico	0,7087	1,2723	0,9967	0,0221	0,9923	0,9923	0,9890	Excelente
Siltoso	0,3519	0,4235	0,9969	0,0087	0,9900	0,9899	0,9870	Excelente
Distrófico F.	1,6104	1,9740	0,9924	0,0417	0,9703	0,9701	0,9629	Excelente
Orgânico	0,3061	0,3900	0,9960	0,0080	0,9925	0,9924	0,9885	Excelente
Sertãozinho	0,2652	0,7972	0,9975	0,0072	0,9892	0,9892	0,9870	Excelente

### 3.3.1.7. Stemma

O sensor Stemma apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 64 e Tabela 25, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1,41 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 2% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos siltoso e latosolo vermelho com 0,75% e 1,98% respectivamente, com um índice de confiança superior a 99%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 2,3%, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

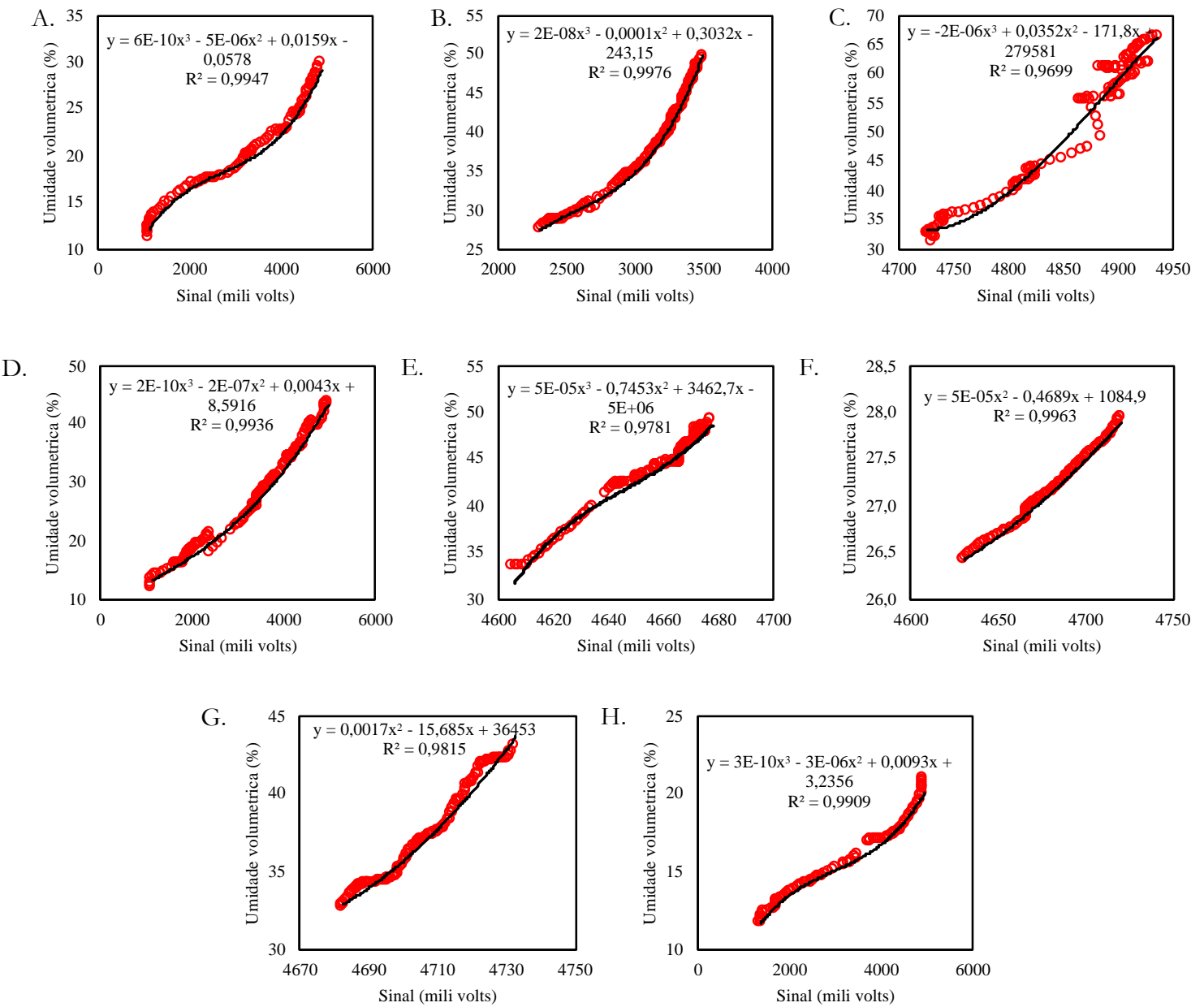


Figura 64. Resposta do sensor Stemma a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 25. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Stemma a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,3139	0,3755	0,9987	0,0165	0,9947	0,9946	0,9934	Excelente
L. amarelo	0,1840	0,3968	0,9990	0,0042	0,9983	0,9983	0,9973	Excelente
L. vermelho	1,4161	1,9829	0,9922	0,0235	0,9876	0,9875	0,9799	Excelente
Quartzarênico	0,4921	0,7132	0,9983	0,0188	0,9909	0,9908	0,9893	Excelente
Siltoso	0,3473	0,7490	0,9910	0,0077	0,9663	0,9661	0,9576	Excelente
Distrófico F.	0,0127	0,0252	0,9991	0,0004	0,9963	0,9963	0,9954	Excelente
Orgânico	0,3420	0,4178	0,9953	0,0089	0,9815	0,9814	0,9769	Excelente
Sertãozinho	0,1792	0,2467	0,9977	0,0107	0,9909	0,9908	0,9886	Excelente

### 3.3.1.8. VH400

O sensor VH400 apresentou comportamento uniforme de resposta a todos os tipos de solos utilizados, como sua resposta apresentada na Figura 65 e Tabela 26, sendo avaliado como excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 1,05 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 1,3% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos quartzarênico e distrófico férrico com 1,29% para ambos, com um índice de confiança superior a 97%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 2,6%, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.



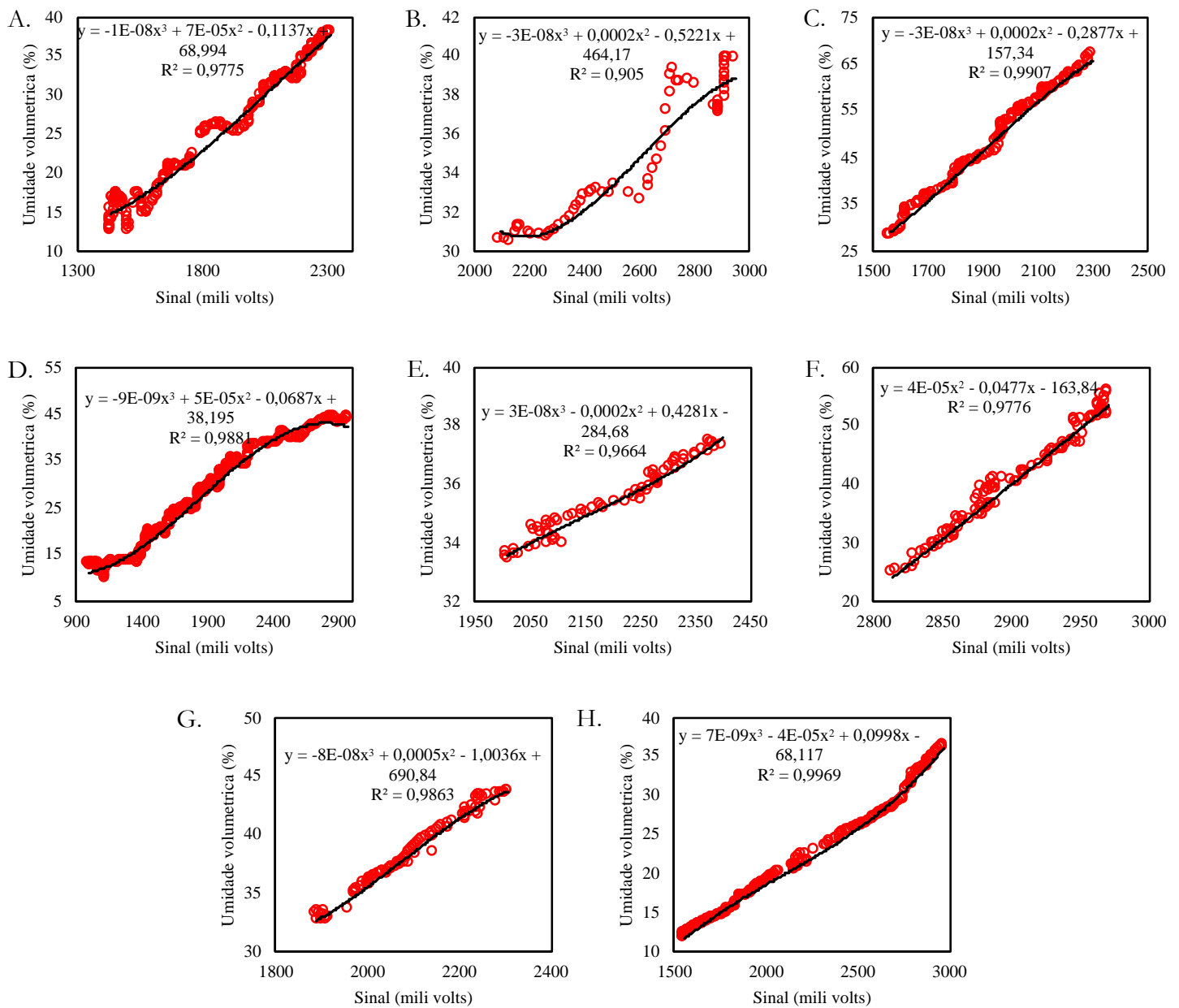


Figura 65. Resposta do sensor VH400 a variação de umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 26. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor VH400 a variação da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,3073	1,2600	0,9941	0,0102	0,9775	0,9774	0,9718	Excelente
L. amarelo	0,8003	1,0315	0,9745	0,0221	0,9050	0,9035	0,8819	Excelente
L. vermelho	0,6428	1,0524	0,9977	0,0132	0,9907	0,9906	0,9884	Excelente
Quartzarênico	0,4109	1,2809	0,9960	0,0107	0,9881	0,9881	0,9841	Excelente
Siltoso	0,1792	0,2155	0,9914	0,0050	0,9663	0,9658	0,9580	Excelente
Distrófico F.	1,0411	1,2870	0,9943	0,0259	0,9776	0,9774	0,9720	Excelente
Orgânico	0,3099	0,3905	0,9965	0,0081	0,9892	0,9891	0,9858	Excelente
Sertãozinho	0,3154	0,6184	0,9984	0,0112	0,9962	0,9962	0,9946	Excelente

### 3.3.1.9. Análise comparativa

Apresenta-se na Tabela 27, uma média dos parâmetros estatísticos para resposta de cada um dos sensores para a variação da umidade dos solos, onde todos os sensores apresentam classificação excelente, com destaque ao sensor PM WCS 3, com melhor avaliação nos parâmetros estatísticos, quando comparado com os demais.

Tabela 27. Síntese da média dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta dos sensores para a variação da umidade do solo.

Modelo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Crowtail	0,5247	1,3425	0,9882	0,0164	0,9587	0,9580	0,9483	Excelente
CS 1.2	0,9238	1,3980	0,9923	0,0246	0,9514	0,9510	0,9695	Excelente
Grove	0,8009	1,1657	0,9888	0,6424	0,9649	0,9646	0,9541	Excelente
Octopus	0,6041	0,8179	0,9961	0,0186	0,9843	0,9842	0,9805	Excelente
PM WCS 3	0,1109	0,4530	0,9938	0,0027	0,9862	0,9860	0,9801	Excelente
SoilWatch 10	0,6382	0,9664	0,9965	0,0165	0,9879	0,9878	0,9844	Excelente
Stemma	0,4110	0,6134	0,9964	0,0119	0,9883	0,9882	0,9848	Excelente
VH400	0,5009	0,8920	0,9929	0,0133	0,9738	0,9735	0,9671	Excelente

### 3.3.2. Resposta a variação da tensão de retenção

Ressalta-se, que embora a tensão de retenção seja representada nos gráfico e tabelas com valores positivos, ela é na verdade uma grandeza com valor negativo a qual retém a umidade adsorvida no solo, sendo portanto, exigida uma força de mesma intensidade porém com valor oposto, para sua remoção da matriz do solo (LIBARDI, 2018).

#### 3.3.2.1. Crowtail

Assim como para umidade, a resposta do sensor a variação da tensão de retenção foi classificada como excelente segundo de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos, com seus dados apresentados na Figura 66 e Tabela 28.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,9 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 1,22% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e sertãozinho com 0,38% e 1,22% respectivamente, com um índice de confiança superior a 95%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 20% para 6 dos solos utilizados, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

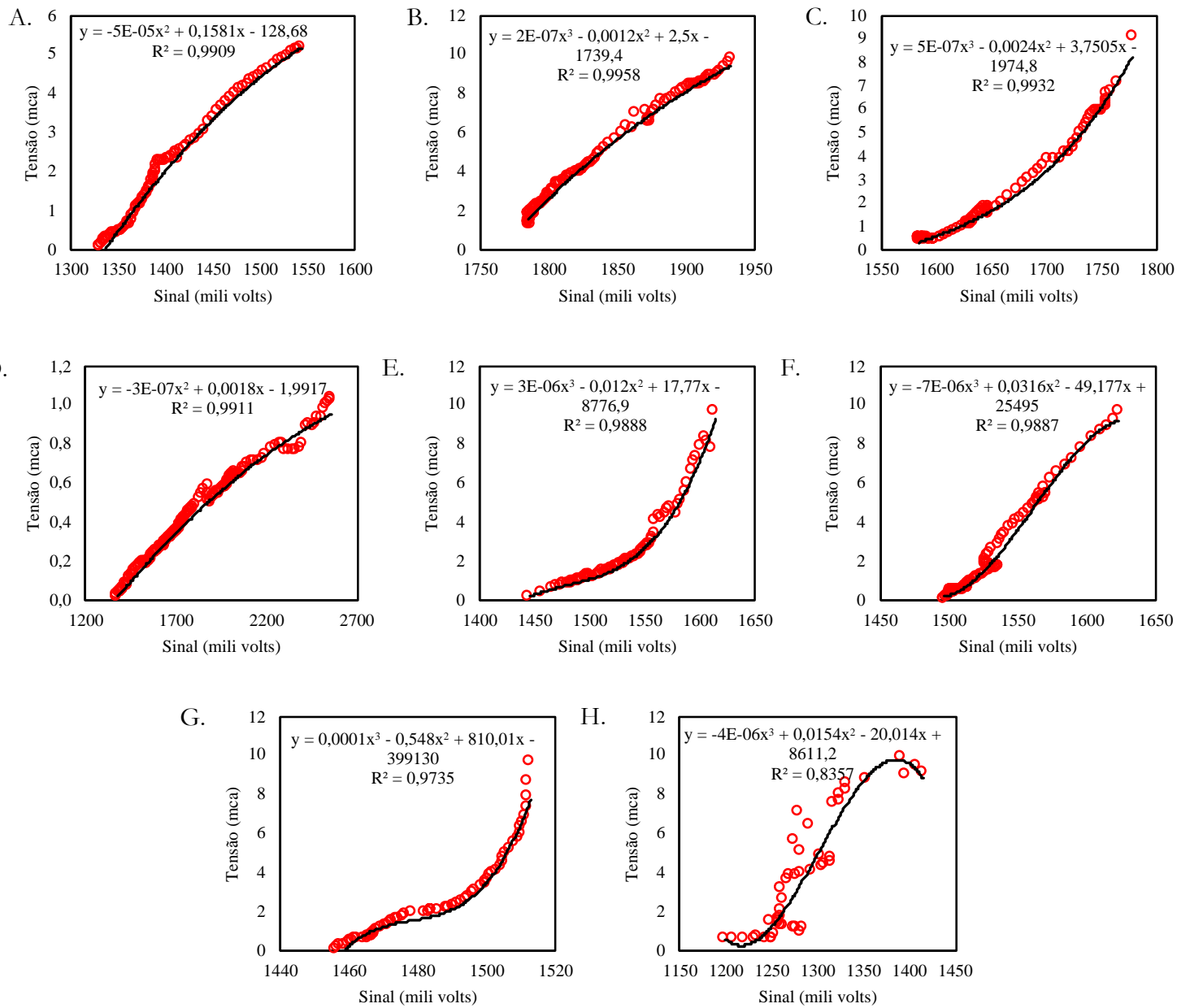


Figura 66. Resposta do sensor Crowtail a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 28. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Crowtail a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,1112	0,1439	0,9978	0,1768	0,9959	0,9959	0,9937	Excelente
L. amarelo	0,1457	0,1750	0,9989	0,0497	0,9958	0,9958	0,9948	Excelente
L. vermelho	0,1434	0,1782	0,9983	0,1228	0,9932	0,9931	0,9915	Excelente
Quartzarênico	0,0083	0,0225	0,9978	0,0448	0,9911	0,9911	0,9889	Excelente
Siltoso	0,2001	0,2707	0,9959	0,1123	0,9888	0,9887	0,9848	Excelente
Distrófico F.	0,1799	0,2548	0,9969	0,2607	0,9887	0,9886	0,9856	Excelente
Orgânico	0,2484	0,3580	0,9932	0,1851	0,9735	0,9731	0,9662	Excelente
Sertãozinho	0,9058	1,2237	0,9536	0,4438	0,8357	0,8320	0,8320	Excelente

### 3.3.2.2. CS 1.2

O sensor CS 1.2 apresenta na estimativa de tensão de retenção desempenho semelhante ao encontrado para a análise de umidade, com classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos, como exposto na Figura 67 e Tabela 27.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,54 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,82% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e siltoso com 0,82% e 0,49% respectivamente, com um índice de confiança superior a 97%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 26% para 6 dos solos utilizados, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

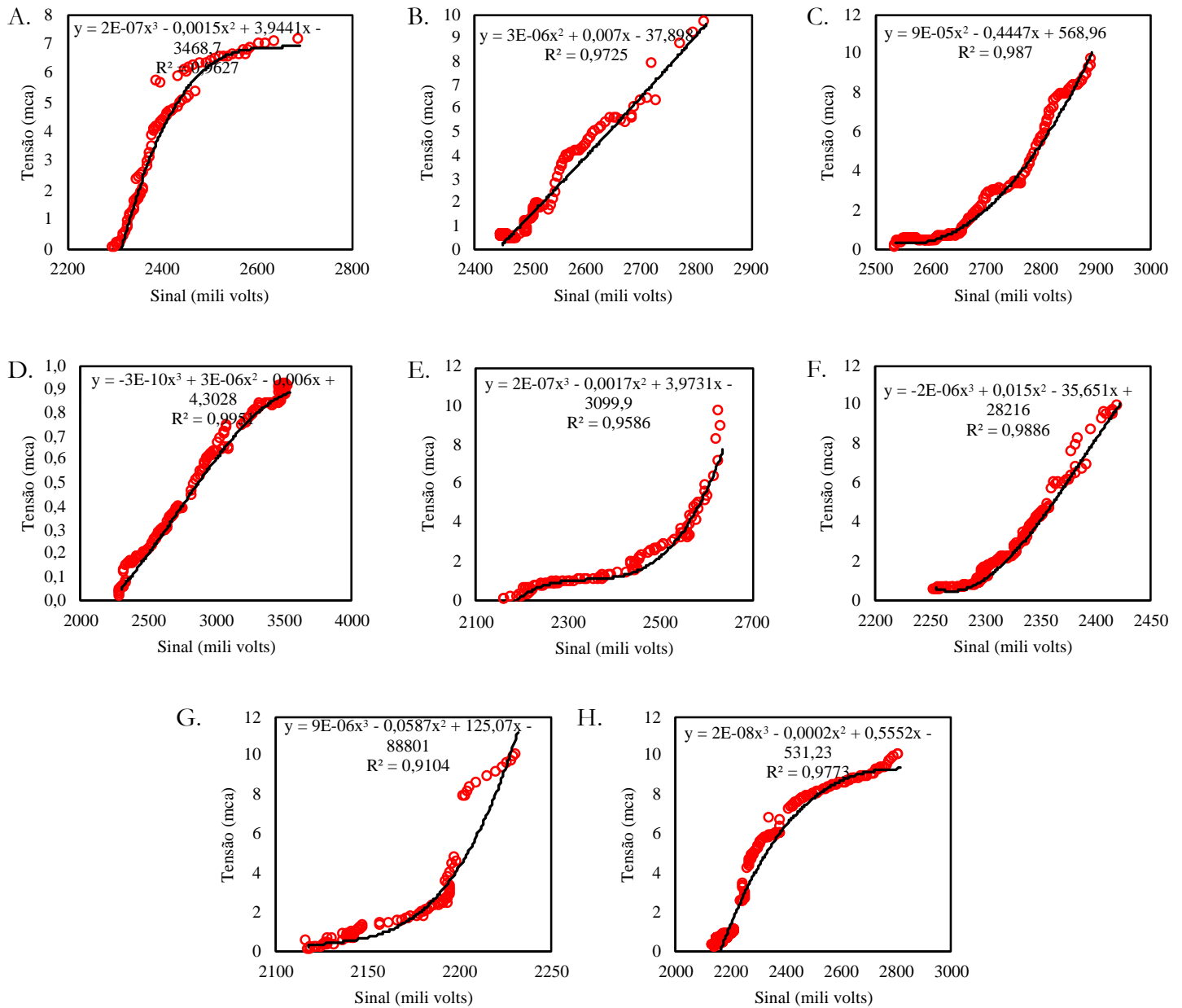


Figura 67. Resposta do sensor CS 1.2 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 29. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor CS 1.2 a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,2818	0,4135	0,9912	0,1735	0,9627	0,9622	0,9543	Excelente
L. amarelo	0,2414	0,3474	0,9930	0,2542	0,9725	0,9723	0,9657	Excelente
L. vermelho	0,1514	0,3211	0,9967	0,1645	0,9879	0,9869	0,9838	Excelente
Quartzarênico	0,0119	0,0209	0,9988	0,0920	0,9951	0,9951	0,9939	Excelente
Siltoso	0,2262	0,4889	0,9969	0,1384	0,9879	0,9878	0,9586	Excelente
Distrófico F.	0,1261	0,2709	0,9970	0,0842	0,9886	0,9885	0,9856	Excelente
Orgânico	0,5313	0,8183	0,9758	0,4350	0,9104	0,9094	0,8884	Excelente
Sertãozinho	0,2148	0,4777	0,9947	0,4048	0,9408	0,9406	0,9773	Excelente

### 3.3.2.3. Grove

Assim como para a umidade, o sensor grove apresentou resposta excelente para a variação da tensão de retenção da água no solo, com classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos, os quais são apresentadas na Figura 68 e Tabela 30.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,96 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,78% para 7 dos solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e siltoso com 1,38% e 0,78% respectivamente, com um índice de confiança superior a 89%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 35% para 6 dos solos utilizados, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

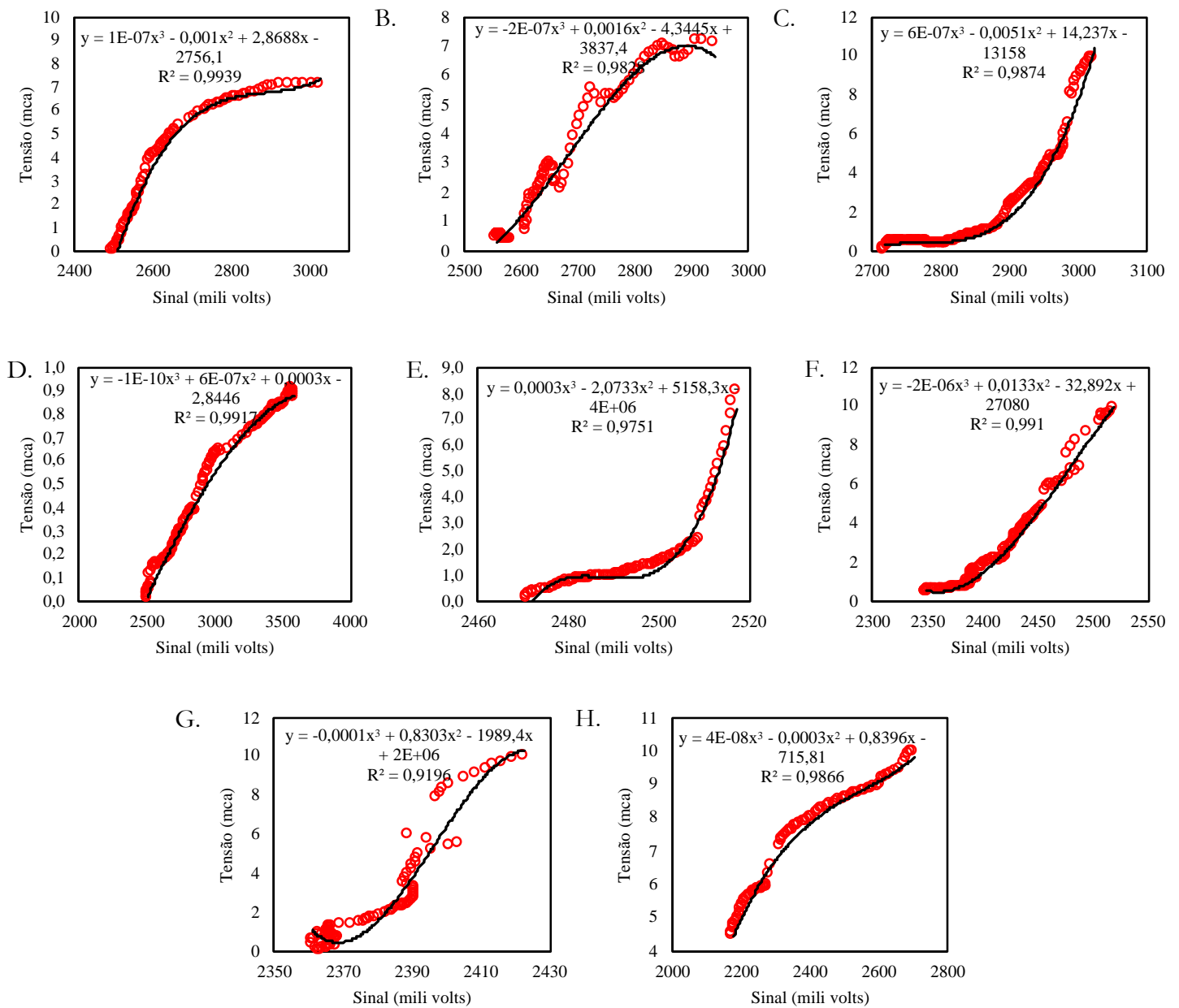


Figura 68. Resposta do sensor Grove a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 30. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Grove a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,1426	0,1883	0,9983	0,1090	0,9797	0,9795	0,9923	Excelente
L. amarelo	0,2125	0,3411	0,9943	0,2288	0,9766	0,9764	0,9719	Excelente
L. vermelho	0,0838	0,2970	0,9965	0,1464	0,9874	0,9873	0,9839	Excelente
Quartzarênico	0,0188	0,0272	0,9979	0,0846	0,9917	0,9917	0,9896	Excelente
Siltoso	0,6798	0,7796	0,9345	1,0273	0,9751	0,9749	0,9112	Excelente
Distrófico F.	0,3777	0,4827	0,9903	0,3527	0,9910	0,9909	0,9814	Excelente
Orgânico	0,9577	1,3760	0,8935	2,7018	0,9196	0,9188	0,8217	Excelente
Sertãozinho	0,1432	0,1872	0,9966	0,0215	0,9866	0,9864	0,9832	Excelente

#### **3.3.2.4. Octopus**

O sensor octopus tem sua resposta a variação da tensão de retenção apresentada na Figura 69 e Tabela 31, obtendo classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,56 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,85% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e o distrófico férrico com 0,85% e 0,25% respectivamente, com um índice de confiança superior a 98%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 18% para 7 dos solos utilizados, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.



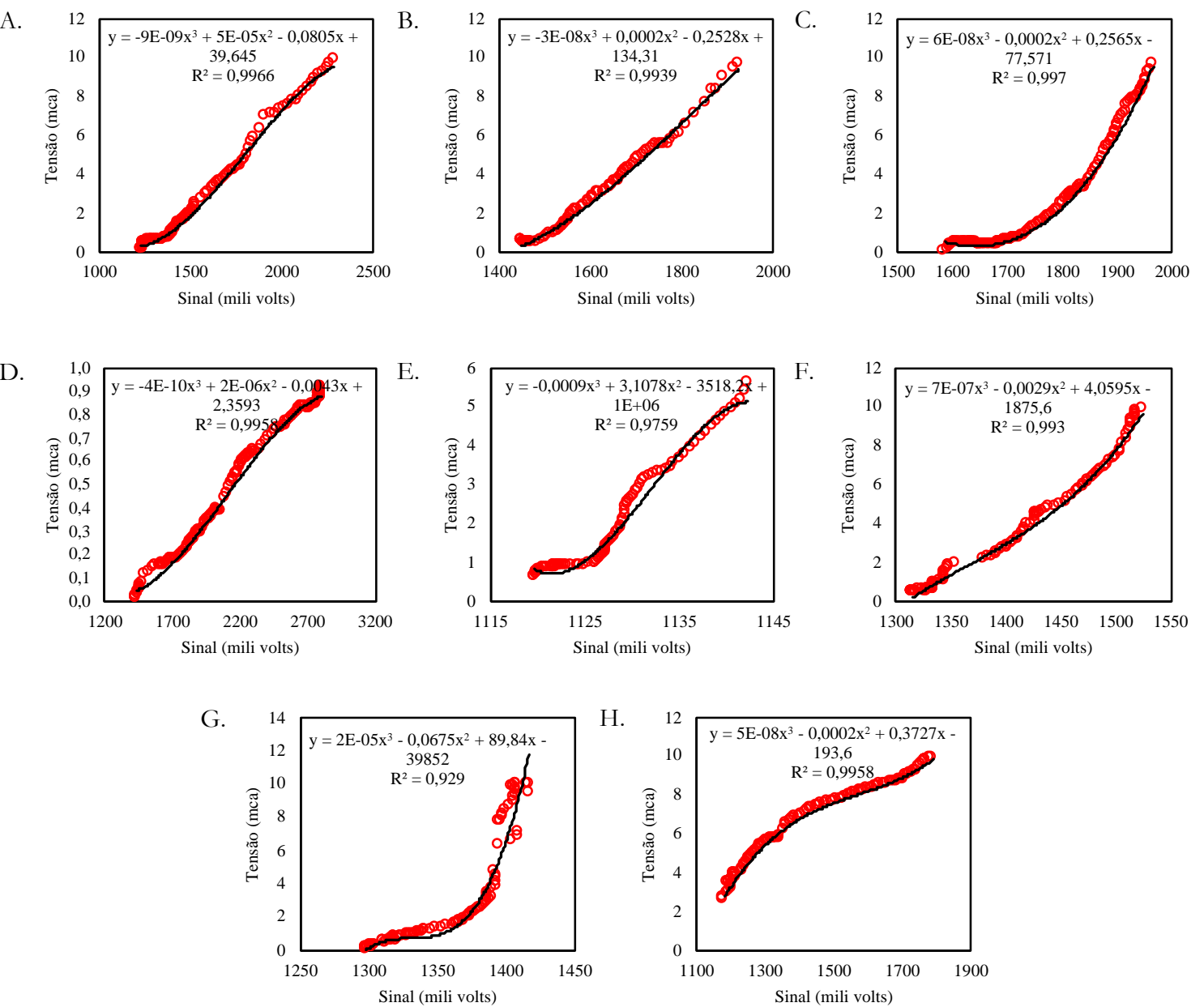


Figura 69. Resposta do sensor Octopus a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 31. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Octopus a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	$R^2$	$R^2_{Ajustado}$	C	Desempenho
Carbonatado	0,1188	0,1545	0,9992	0,1358	0,9966	0,9966	0,9958	Excelente
L. amarelo	0,1576	0,1827	0,9985	0,1223	0,9939	0,9938	0,9924	Excelente
L. vermelho	0,0726	0,1543	0,9992	0,3147	0,9970	0,9970	0,9962	Excelente
Quartzarênico	0,0117	0,0195	0,9989	0,1059	0,9958	0,9958	0,9947	Excelente
Siltoso	0,1791	0,2184	0,9935	0,1226	0,9759	0,9756	0,9696	Excelente
Distrófico F.	0,2097	0,2510	0,9982	0,1417	0,9930	0,9929	0,9912	Excelente
Orgânico	0,5512	0,8447	0,9813	0,1881	0,9290	0,9283	0,9116	Excelente
Sertãozinho	0,1030	0,1314	0,9989	0,0197	0,9958	0,9958	0,9947	Excelente

### 3.3.2.5. PM WCS 3

O sensor PM WCS 3 apresentou resposta semelhante a variação da umidade, para a variação da tensão de retenção, as quais então presentes na Figura 70 e Tabela 32, obtendo classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,025 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,09% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos sertãozinho e siltoso com 0,09% e 0,087% respectivamente, com um índice de confiança superior a 99%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 6% para todos os solos utilizados, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

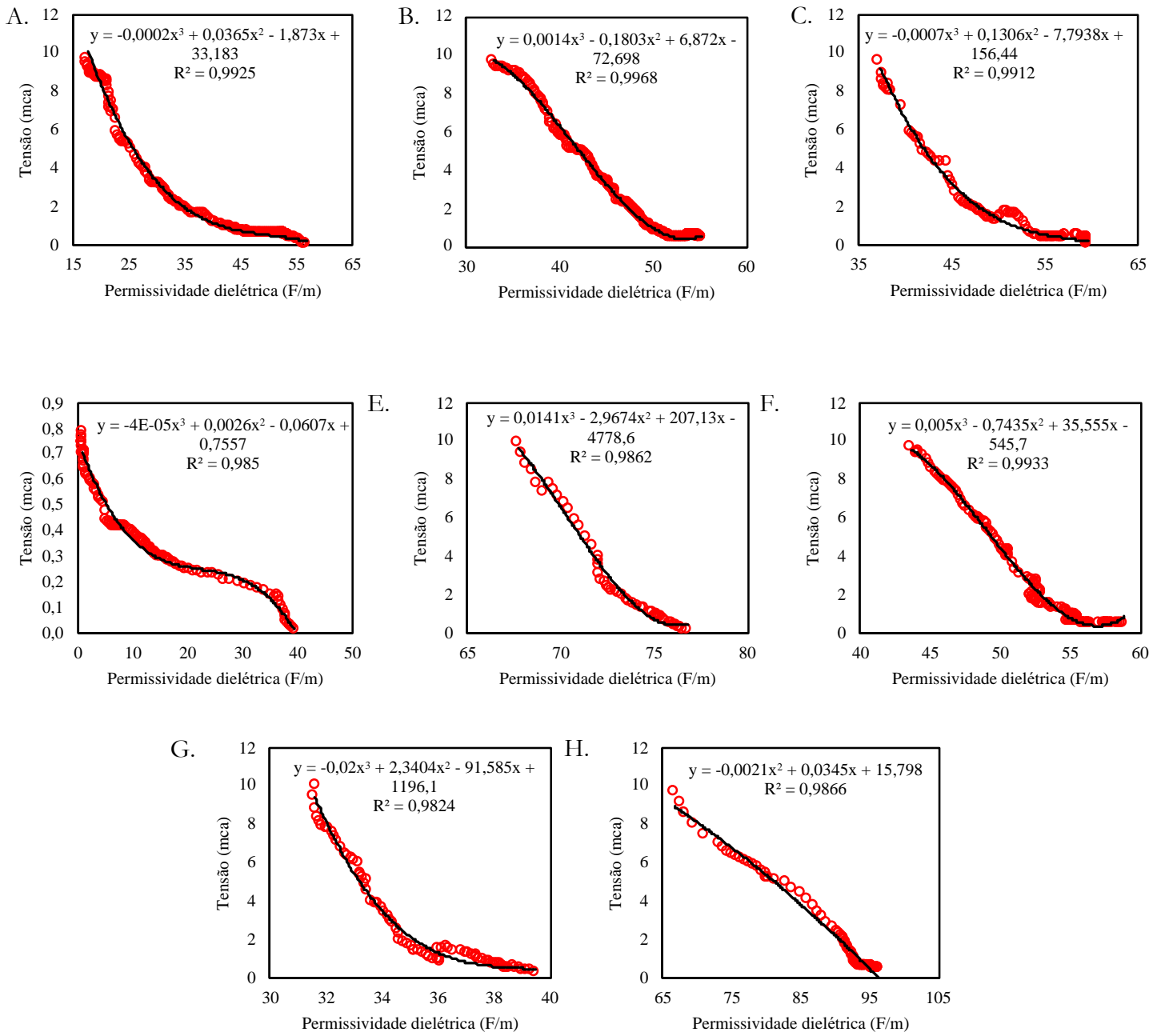


Figura 70. Resposta do sensor PM WCS 3 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 32. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor PM WCS 3 a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,0078	0,1074	0,9981	0,0035	0,9925	0,9925	0,9906	Excelente
L. amarelo	0,0091	0,0972	0,9992	0,0189	0,9907	0,9907	0,9968	Excelente
L. vermelho	0,02444	0,0860	0,9978	0,0591	0,9912	0,9911	0,9890	Excelente
Quartzarênico	0,0023	0,0090	0,9962	0,0090	0,9850	0,9849	0,9813	Excelente
Siltoso	0,0196	0,0876	0,9965	0,0173	0,9862	0,9859	0,9827	Excelente
Distrófico F.	0,0216	0,0863	0,9963	0,0184	0,9933	0,9933	0,9916	Excelente
Orgânico	0,0475	0,1450	0,9955	0,0319	0,9824	0,9822	0,9780	Excelente
Sertãozinho	0,0245	0,0909	0,9966	0,0270	0,9866	0,9865	0,9833	Excelente

### 3.3.2.6. SoilWatch 10

O sensor SoilWatch 10 apresenta sua resposta a variação de tensão de retenção na Figura 71 e Tabela 33, obtendo classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,048 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,15% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e carbonatado com 0,15% e 0,11% respectivamente, com um índice de confiança superior a 99%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 6% para todos os solos utilizados, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

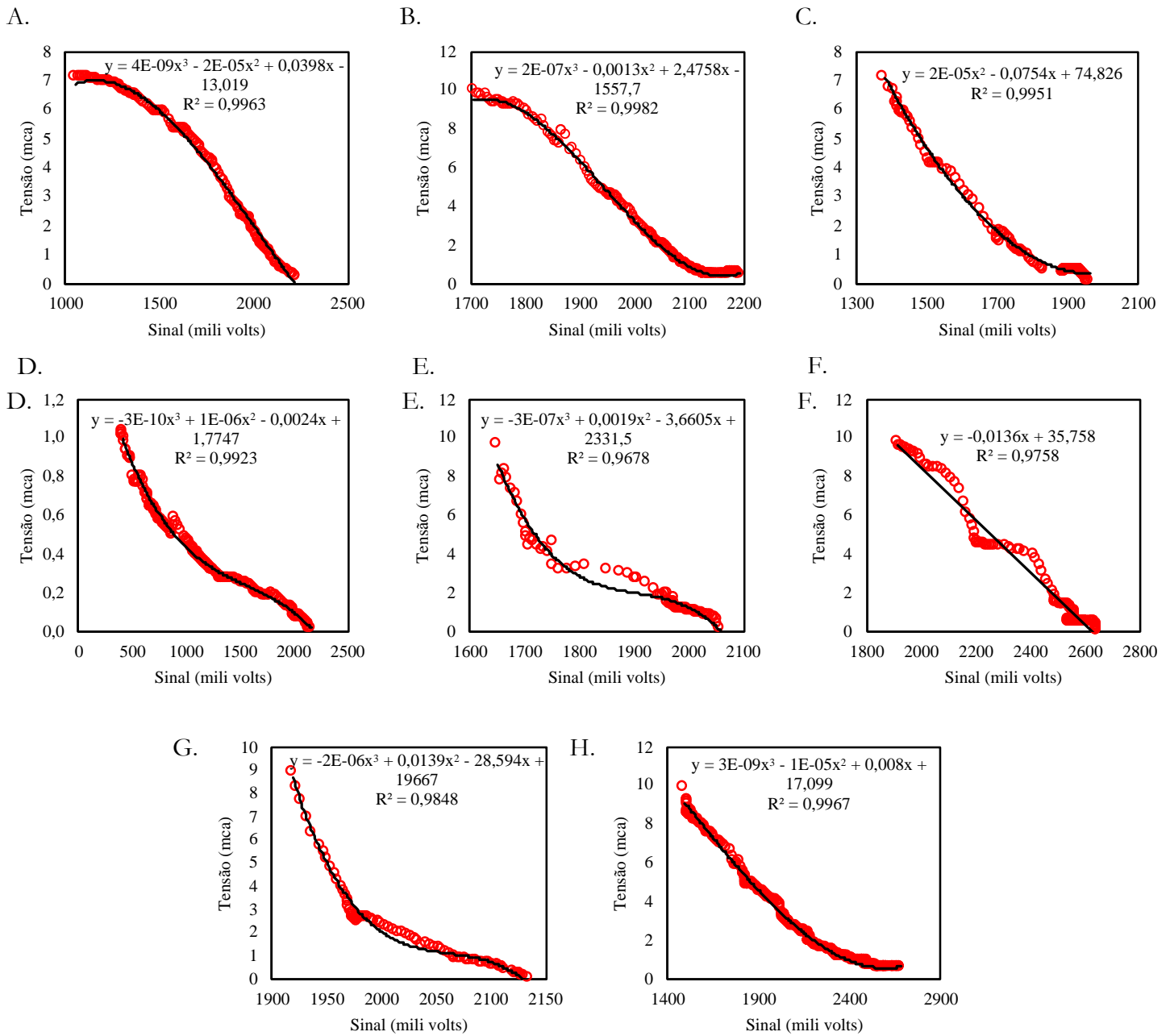


Figura 71. Resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 33. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor SoilWatch 10 a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,1212	0,1480	0,9990	0,0788	0,9960	0,9960	0,9950	Excelente
L. amarelo	0,1594	0,3071	0,9971	0,3072	0,9984	0,9984	0,9955	Excelente
L. vermelho	0,1445	0,1862	0,9977	0,1445	0,9951	0,9951	0,9928	Excelente
Quartzarênico	0,0107	0,0228	0,9978	0,0693	0,9923	0,9923	0,9901	Excelente
Siltoso	0,3159	0,3915	0,9916	0,1694	0,9678	0,9674	0,9597	Excelente
Distrófico F.	0,3720	0,4710	0,9938	0,6277	0,9758	0,9756	0,0698	Excelente
Orgânico	0,2398	0,2681	0,9948	0,2490	0,9848	0,9846	0,9797	Excelente
Sertãozinho	0,0798	0,2440	0,9975	0,1338	0,9967	0,9967	0,9942	Excelente

### 3.3.2.7. Stemma

Apresenta-se na Figura 72 e Tabela 34 a resposta do sensor Stemma a variação da tensão de retenção de cada um dos solos, obtendo classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para 7 dos solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,59 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,68% para 7 dos solos utilizados, com os piores valores para os solos orgânico e latossolo vermelho com 0,68% e 1,98% respectivamente, com um índice de confiança superior a 77%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 5% para 5 dos solos utilizados, com valores de R<sup>2</sup> e R<sup>2</sup> ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.

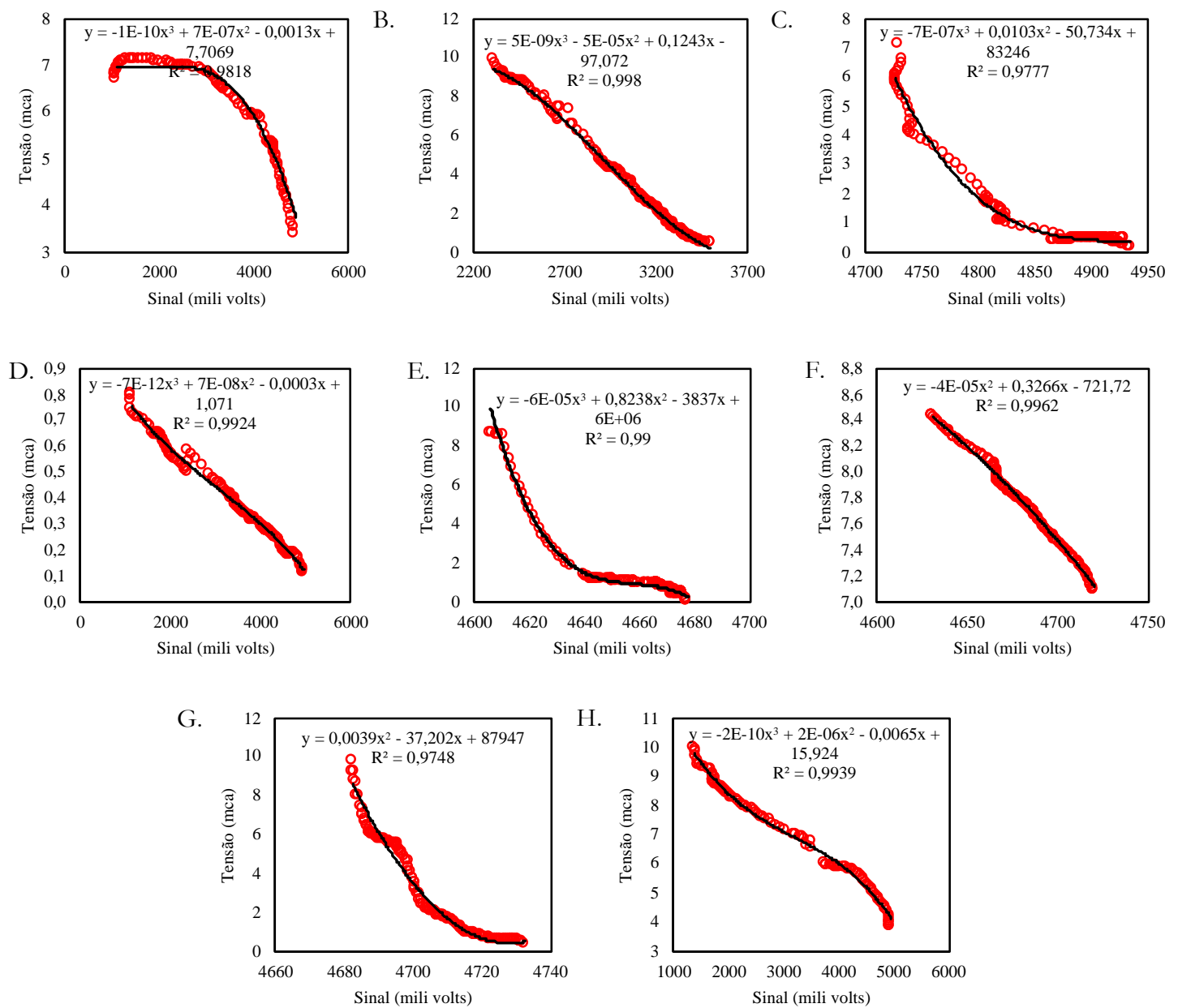


Figura 72. Resposta do sensor Stemma a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 34. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor Stemma a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,1147	0,1432	0,9954	0,0208	0,9818	0,9916	0,9773	Excelente
L. amarelo	0,0496	0,1304	0,9995	0,0431	0,9980	0,9980	0,9975	Excelente
L. vermelho	0,3428	1,9827	0,9921	0,5389	0,9699	0,9657	0,9622	Excelente
Quartzarênico	0,0096	0,0151	0,9981	0,0297	0,9924	0,9924	0,9905	Excelente
Siltoso	0,1740	0,4620	0,9783	0,3239	0,9901	0,9900	0,9686	Excelente
Distrófico F.	0,3115	0,4114	0,7735	0,0407	0,9962	0,9962	0,7706	Muito bom
Orgânico	0,5910	0,6702	0,9818	0,4132	0,9815	0,9814	0,9637	Excelente
Sertãozinho	0,1077	0,1362	0,9985	0,0180	0,9909	0,9908	0,9894	Excelente

### 3.3.2.8. VH400

O sensor VH400 apresenta sua resposta a variação de tensão de retenção na Figura 73 e Tabela 35, obtendo classificação excelente segundo o coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas para todos os solos.

Adicionalmente, o sensor obteve um erro absoluto médio inferior a 0,4 para todos os solos utilizados, com RMSE inferior a 0,62% para todos os solos utilizados, com os piores valores para os solos sertãozinho e distrófico férrico com 0,62% e 0,56% respectivamente, com um índice de confiança superior a 98%, segundo o coeficiente d de Willmot.

O sensor obteve ainda um erro percentual absoluto médio inferior a 20% para 7 dos solos utilizados, com valores de  $R^2$  e  $R^2$  ajustado muito semelhantes, o que mostra uma pequena dispersão da composição amostral coletada durante os ensaios.



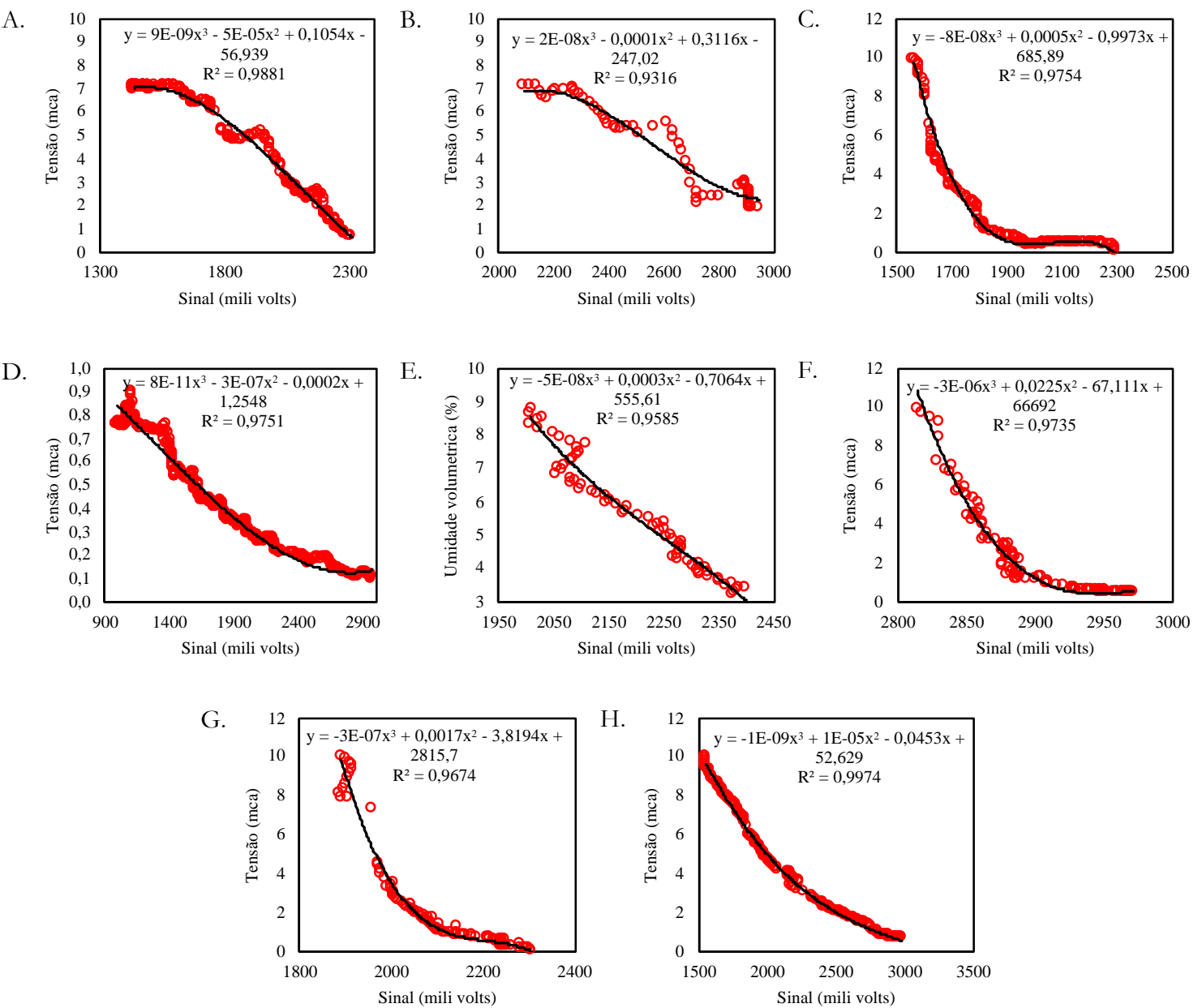


Figura 73. Resposta do sensor VH400 a variação da tensão de retenção da umidade dos solos: A – Carbonatado; B – L. amarelo; C – L. vermelho; D – Quartzarênico; E – Siltoso; F – Distrófico férrico; G – Orgânico; H – Sertãozinho.

Tabela 35. Síntese dos parâmetros estatísticos para avaliação da resposta do sensor VH400 a variação da tensão de retenção da umidade do solo.

Solo	MAE	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Carbonatado	0,1072	0,2471	0,9972	0,0422	0,9881	0,9881	0,9853	Excelente
L. amarelo	0,3911	0,4940	0,9820	0,1201	0,9316	0,9305	0,9149	Excelente
L. vermelho	0,1085	0,3996	0,9937	0,1593	0,9754	0,9754	0,9693	Excelente
Quartzarênico	0,0098	0,0393	0,9918	0,0507	0,9751	0,9751	0,9671	Excelente
Siltoso	0,2570	0,3281	0,9893	0,0445	0,9585	0,9579	0,9482	Excelente
Distrófico F.	0,4808	0,5534	0,9861	0,4561	0,9735	0,9733	0,9599	Excelente
Orgânico	0,2761	0,4971	0,9916	0,1927	0,9863	0,9862	0,9780	Excelente
Sertãozinho	0,0384	0,6180	0,9984	0,0241	0,9974	0,9974	0,9958	Excelente

### 3.3.3. Análise de dispersão dos pontos com maior RMSE

Assim como proposto no tópico 3.2.6, foi realizada uma triagem nos dados, selecionando o grupo dos 10% com maiores valores de RMSE, com posterior cálculo de seu erro absoluto médio, apresentado na Tabela 36.

Tabela 36. Erro absoluto médio, dos 10% com maiores valores de RMSE.

Sensor	Solos							
	Carbonatado	L. Ama.	L. Verm.	Quartzarenico	Siltoso	Distrófico	Orgânico	Sertãozinho
Crowtail	0,3022	0,3500	0,3464	0,0576	0,6311	0,6036	0,7400	2,7340
CS 1.2	0,9933	0,7067	0,7156	0,0432	0,9150	0,6519	1,9880	0,9336
Grove	0,3933	0,8000	0,7550	0,0589	1,2627	0,7806	3,3160	0,4289
Octopus	0,3187	0,3292	0,3667	0,0400	0,4290	0,4815	2,0100	0,2808
PM WCS 3	0,7006	0,3479	0,5269	0,0520	0,5783	0,5178	0,6511	0,5220
SoilWatch	0,2487	0,4488	0,3627	0,0490	0,8233	0,9707	0,4267	0,3975
Stemma	0,2864	0,2829	0,8460	0,0306	1,1389	0,4521	1,1507	0,2918
Vegetronics	0,6025	1,0357	0,9678	0,0848	0,6986	1,0750	1,3510	0,3275

\* valores se referem ao erro absoluto médio em mca.

Observa-se que o solo orgânico apresentou os piores valores para todos os sensores, com um valor médio de 1,4542 para todos os sensores, com valor extremo de 3,3160 para o sensor grove. Desta mesma forma, observa-se uma maior dispersão para os solos siltoso e distrófico, obtendo valores de 0,8096 e 0,6917 respectivamente.

### 3.3.4. Validação dos dados por pontos discretos

Como proposto no tópico 2.9, apresenta-se na Tabela 37, a síntese dos parâmetros estatísticos, que correlacionam a leitura dos dados da curva completa com os dados pontuais de umidade do solo, ressalta-se, que a medida de potencial mátrico foi a variável selecionada para a validação, visto sua maior empregabilidade no manejo da irrigação.

Complementarmente, a metodologia de calibração por pontos é vista como uma excelente ferramenta de calibração, visto sua capacidade de extrair do equipamento informações importantes para gatilhos de irrigação, ainda que esse não esteja corretamente calibrado pra estimativa de umidade (SHARMA; IRMAK; KUKAL, 2021).

Tabela 37. Síntese dos parâmetros estatísticos, referentes a validação de dados por medidas pontuais.

Modelo	Solo	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
Crowtail	Carbonatado	0,1582	0,9678	0,1679	0,9759	0,956	0,9446	Excelente
	L. amarelo	0,1925	0,9689	0,0472	0,9758	0,9559	0,9455	Excelente
	L. vermelho	0,196	0,9683	0,1166	0,9733	0,9533	0,9425	Excelente
	Quartzarênico	0,0247	0,9678	0,0425	0,9712	0,9514	0,9400	Excelente
	Siltoso	0,2977	0,966	0,1066	0,969	0,9491	0,9360	Excelente
	Distrófico F.	0,2802	0,9669	0,2476	0,9689	0,949	0,9369	Excelente
	Orgânico	0,3938	0,9634	0,1758	0,954	0,9341	0,9191	Excelente
	Sertãozinho	1,3460	0,9249	0,4216	0,8189	0,7987	0,7575	Bom
CS 1.2	Carbonatado	0,4548	0,9614	0,1648	0,9434	0,9237	0,9070	Excelente
	L. amarelo	0,3821	0,9632	0,2414	0,953	0,9334	0,9179	Excelente
	L. vermelho	0,3532	0,9667	0,1562	0,9681	0,9474	0,9359	Excelente
	Quartzarênico	0,0229	0,9688	0,0874	0,9751	0,9552	0,9448	Excelente
	Siltoso	0,5377	0,9669	0,1314	0,9681	0,9482	0,9361	Excelente
	Distrófico F.	0,2979	0,967	0,0799	0,9688	0,9489	0,9369	Excelente
	Orgânico	0,9001	0,9465	0,4132	0,8921	0,8730	0,8444	Muito bom
	Sertãozinho	0,5254	0,9648	0,3845	0,9219	0,9029	0,8895	Excelente
Grove	Carbonatado	0,2071	0,9683	0,1035	0,9601	0,9403	0,9297	Excelente
	L. amarelo	0,3752	0,9644	0,2173	0,957	0,9373	0,9230	Excelente
	L. vermelho	0,3267	0,9666	0,1390	0,9676	0,9478	0,9353	Excelente
	Quartzarênico	0,0299	0,9679	0,0803	0,9718	0,9520	0,9407	Excelente
	Siltoso	0,8575	0,9064	0,9759	0,9555	0,9359	0,8662	Excelente
	Distrófico F.	0,5309	0,9605	0,3350	0,9711	0,9512	0,9329	Excelente
	Orgânico	1,5136	0,8666	2,5667	0,9012	0,8820	0,7810	Muito bom
	Sertãozinho	0,2059	0,9667	0,0204	0,9668	0,9469	0,9346	Excelente
Octopus	Carbonatado	0,1699	0,9692	0,1290	0,9766	0,9567	0,9466	Excelente
	L. amarelo	0,2009	0,9685	0,1161	0,974	0,9540	0,9433	Excelente
	L. vermelho	0,1697	0,9692	0,2989	0,977	0,9571	0,9469	Excelente
	Quartzarênico	0,0214	0,9689	0,1006	0,9758	0,9559	0,9455	Excelente
	Siltoso	0,2402	0,9636	0,1164	0,9563	0,9365	0,9216	Excelente
	Distrófico F.	0,2761	0,9682	0,1346	0,9731	0,9531	0,9422	Excelente
	Orgânico	0,9291	0,9518	0,1786	0,9104	0,8911	0,8665	Excelente
	Sertãozinho	0,1445	0,9689	0,0187	0,9758	0,9559	0,9455	Excelente
PM WCS 3	Carbonatado	0,1181	0,9681	0,0033	0,9726	0,9528	0,9416	Excelente
	L. amarelo	0,1069	0,9692	0,0179	0,9708	0,9510	0,941	Excelente
	L. vermelho	0,0946	0,9678	0,0561	0,9713	0,9514	0,9401	Excelente
	Quartzarênico	0,0099	0,9663	0,0085	0,9653	0,9455	0,9327	Excelente
	Siltoso	0,0963	0,9666	0,0164	0,9664	0,9464	0,9342	Excelente
	Distrófico F.	0,0949	0,9664	0,0174	0,9734	0,9535	0,9407	Excelente
	Orgânico	0,1595	0,9656	0,0303	0,9627	0,9429	0,9296	Excelente

SoilWatch 10	Sertãozinho	0,0999	0,9667	0,0256	0,9668	0,947	0,9346	Excelente
	Carbonatado	0,1628	0,969	0,0748	0,976	0,9561	0,9458	Excelente
	L. amarelo	0,3378	0,9671	0,2918	0,9784	0,9584	0,9463	Excelente
	L. vermelho	0,2048	0,9677	0,1372	0,9751	0,9552	0,9437	Excelente
	Quartzarênico	0,025	0,9678	0,0658	0,9724	0,9526	0,9412	Excelente
	Siltoso	0,4306	0,9618	0,1609	0,9484	0,9287	0,9122	Excelente
	Distrófico F.	0,5181	0,9639	0,5963	0,9562	0,9365	0,9218	Excelente
	Orgânico	0,2949	0,9649	0,2365	0,9651	0,9452	0,9312	Excelente
Stemma	Sertãozinho	0,2684	0,9675	0,1271	0,9767	0,9568	0,945	Excelente
	Carbonatado	0,1575	0,9655	0,0197	0,9621	0,9519	0,929	Excelente
	L. amarelo	0,1434	0,9695	0,0409	0,978	0,958	0,9482	Excelente
	L. vermelho	2,1809	0,9623	0,5119	0,9505	0,927	0,9147	Excelente
	Quartzarênico	0,0166	0,9681	0,0282	0,9725	0,9527	0,9415	Excelente
	Siltoso	0,5082	0,9489	0,3077	0,9702	0,9504	0,9207	Excelente
	Distrófico F.	0,4525	0,7502	0,0386	0,9762	0,9563	0,7324	Bom
	Orgânico	0,7372	0,9523	0,3925	0,9618	0,9421	0,916	Excelente
VH400	Sertãozinho	0,1498	0,9685	0,0171	0,971	0,9511	0,9405	Excelente
	Carbonatado	0,2718	0,9672	0,04	0,9683	0,9485	0,9366	Excelente
	L. amarelo	0,5434	0,9525	0,114	0,9129	0,8932	0,8696	Excelente
	L. vermelho	0,4395	0,9638	0,1513	0,9558	0,9363	0,9213	Excelente
	Quartzarênico	0,0432	0,962	0,0481	0,9555	0,936	0,9193	Excelente
	Siltoso	0,3609	0,9596	0,0422	0,9393	0,9195	0,9014	Excelente
	Distrófico F.	0,6087	0,9565	0,4332	0,954	0,9343	0,9125	Excelente
	Orgânico	0,5468	0,9618	0,183	0,9665	0,9467	0,9297	Excelente
Sertãozinho	0,6798	0,9684	0,0228	0,9774	0,9575	0,9466	Excelente	

Embora os sensores capacitivos tenham elevada sensibilidade as mudanças na estrutura que os circundam, pode-se observar uma elevada concordância entre a equação gerada com os dados de curva completa, quando validados por pontos discretos (SOUZA et al., 2013; PIZETTA et al., 2017).

### 3.3.5. Validação por curva completa

Visando uma análise mais profunda da primeira regressão gerada, realizou-se 5 repetições das curvas completas de secagem, para os 3 sensores mais bem avaliados, sendo eles: PM WCS 3, SoilWatch 10 e VH400, com uma síntese destes dados presentes na Tabela 38.

Tabela 38. Síntese dos parâmetros estatísticos, referentes a validação de dados por medidas pontuais.

Modelo	Solo	RMSE	d	MAPE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>Ajustado</sub>	C	Desempenho
PM WCS 3	Carbonatado	0,1288	0,9481	0,0038	0,9528	0,9428	0,9034	Excelente
	L. amarelo	0,1166	0,9492	0,0207	0,951	0,9411	0,9027	Excelente
	L. vermelho	0,1032	0,9479	0,065	0,9515	0,9415	0,9019	Excelente
	Quartzarênico	0,0108	0,9463	0,0099	0,9456	0,9356	0,8949	Excelente
	Siltoso	0,1051	0,9466	0,019	0,9467	0,9366	0,8962	Excelente
	Distrófico F.	0,1035	0,9464	0,0202	0,9535	0,9436	0,9025	Excelente
	Orgânico	0,174	0,9457	0,035	0,9431	0,933	0,8919	Excelente
	Sertãozinho	0,109	0,9467	0,0297	0,9471	0,9371	0,8967	Excelente
SoilWatch 10	Carbonatado	0,1776	0,949	0,0866	0,9561	0,9462	0,9074	Excelente
	L. amarelo	0,3685	0,9472	0,3379	0,9584	0,9484	0,9079	Excelente
	L. vermelho	0,2234	0,9478	0,1589	0,9552	0,9453	0,9054	Excelente
	Quartzarênico	0,0273	0,9479	0,0762	0,9526	0,9426	0,9029	Excelente
	Siltoso	0,4698	0,942	0,1863	0,929	0,919	0,8752	Excelente
	Distrófico F.	0,5652	0,9441	0,6904	0,9367	0,9268	0,8844	Excelente
	Orgânico	0,3217	0,945	0,2739	0,9454	0,9353	0,8934	Excelente
	Sertãozinho	0,2928	0,9476	0,1471	0,9568	0,9468	0,9067	Excelente
VH400	Carbonatado	0,2965	0,9473	0,0464	0,9485	0,9386	0,8986	Excelente
	L. amarelo	0,5928	0,9329	0,1321	0,8943	0,8839	0,8343	Muito bom
	L. vermelho	0,4795	0,944	0,1752	0,9363	0,9266	0,8839	Excelente
	Quartzarênico	0,0471	0,9422	0,0557	0,936	0,9263	0,8819	Excelente
	Siltoso	0,3937	0,9398	0,0489	0,9201	0,91	0,8647	Excelente
	Distrófico F.	0,664	0,9367	0,5017	0,9345	0,9246	0,8754	Excelente
	Orgânico	0,5965	0,942	0,2119	0,9468	0,9368	0,8919	Excelente
	Sertãozinho	0,7416	0,9484	0,0265	0,9575	0,9475	0,9081	Excelente

Observa-se pequena variabilidade entre os grupos amostrais testados, onde a regressão gerada no primeiro teste foi validada, atingindo avaliação excelente para todos 8 solos testados, com os 3 melhores sensores.

### 3.3.6. Resposta a variação da temperatura

Apresenta-se neste tópico a resposta de cada um dos sensores a variação de temperatura de um meio líquido com pH neutro e condutividade elétrica igual a 0 dS/m, o qual teve sua temperatura variada de 10 a 40 °C, com intervalos fixos de 5 °C (SUN et al., 2000).

Os sensores Crowtail, CS 1.2 e Stemma apresentaram comportamento parabólico, o qual obteve como ajuste uma equação do segundo grau, com redução de resposta associado ao acréscimo de temperatura, com aparente estabilização em temperaturas mais elevadas, exibindo

variação de resposta de 92, 83 e 107 mili volts representando aproximadamente 6%, 4% e 4 % respectivamente, como apresentado na Figura 74 – A, B e C.

Os sensores Grove, Octopus e SoilWatch apresentaram comportamento linear a variação de temperatura, obtendo como ajuste uma equação de primeiro grau ao intervalo testado, com redução de resposta associado a elevação de temperatura sem aparente estabilização no intervalo testado, exibindo variação de resposta de 29, 88 e 29 mili volts representando 1%, 7% e 1% respectivamente, como apresentado na Figura 74 – D, E e F.

Adicionalmente, os sensores PM WCS 3 e VH400 não apresentaram variação de resposta significativa a mudança de temperatura do meio, obtendo resposta padrão de 77 F/m e 2986 mili volts respectivamente, como apresentado na Figura 74 – G e H.

Em suma, embora afetados pela variabilidade térmica, os sensores não apresentaram elevada discrepância de resposta, o que corrobora para sua empregabilidade, ressaltando ainda, que a instalação destes equipamentos em camadas mais profundas, permite um efeito tampão do solo, na variabilidade térmica do seu entorno (LINMAO et al., 2012; DENG et al., 2021).

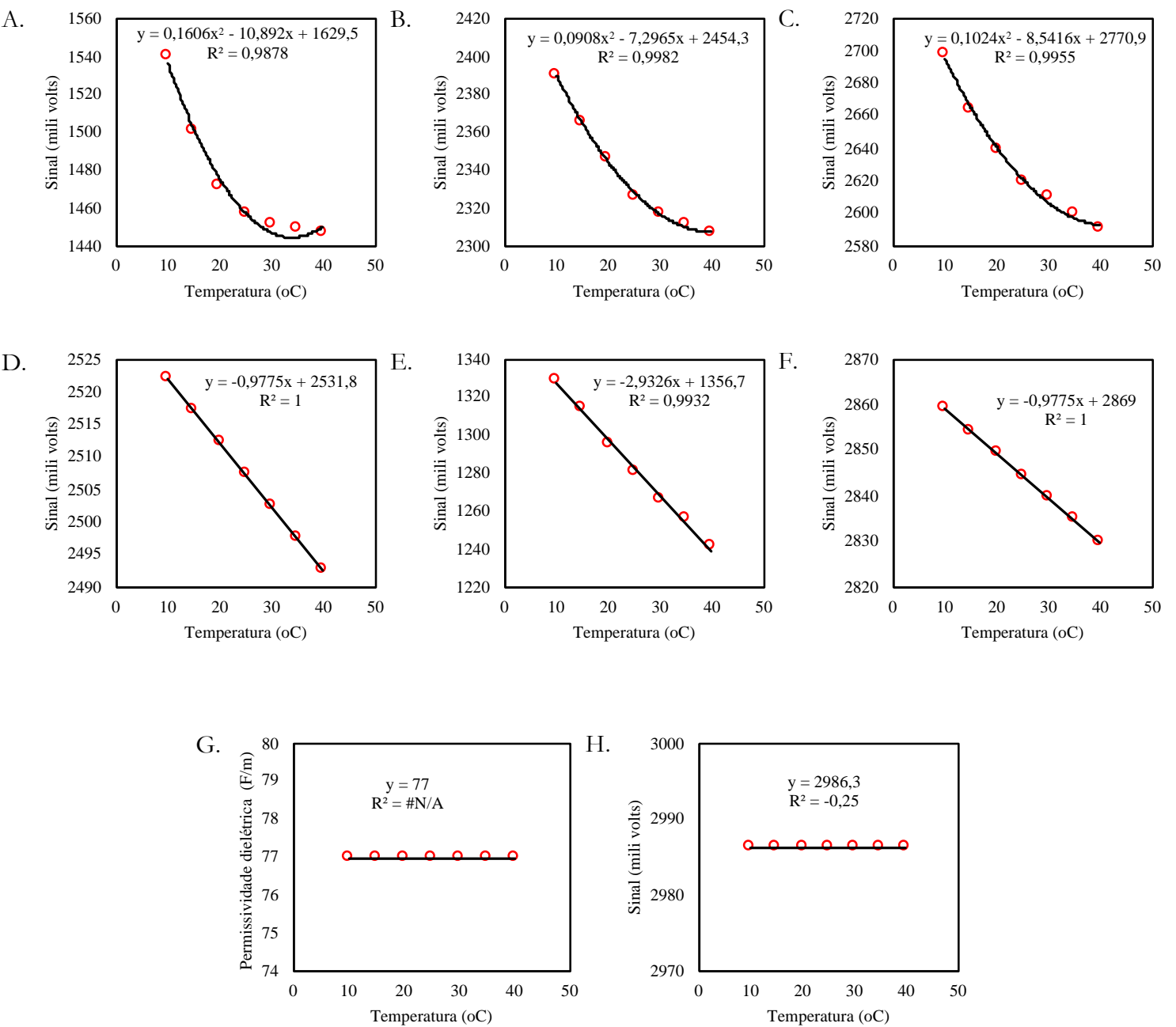


Figura 74. Resposta dos sensores FDR a variação de temperatura de meio líquido, sendo: A – Crowtail; B – CS 1.2; C – Stemma; D – Grove; E – Octopus; F – SoilWatch; G – PM WCS 3; H – VH400.

### 3.3.7. Resposta a variação da condutividade elétrica da solução

Apresenta-se neste tópico a resposta de cada um dos sensores a variação de condutividade elétrica de um meio líquido composto por água previamente destilada, acrescida de NaCl, obtendo valores de condutividade elétrica de 0,5 a 5 dS/m, com intervalos fixos de 0,5 dS/m (ZABOLOTNYI; KOSHEVOI, 2020).

Os sensores Crowtail, CS 1.2 e Octopus apresentaram comportamento paraboloide, com ajuste a equação do segundo grau, exibindo queda de resposta associada ao aumento da

condutividade elétrica da solução com aparente estabilização da resposta a valores mais elevados, manifestando variação de resposta de 1681, 1300 e 200 mili volts, representando aproximadamente 60%, 27% e 16% respectivamente, como apresentado na Figura 75 – A, B e C.

Os sensores Grove e Stemma apresentaram comportamento linear, com ajuste a equação do primeiro grau, exibindo queda de resposta associada ao aumento da condutividade elétrica da solução, manifestando variação de resposta de 43 e 1300 mili volts, representando aproximadamente 2% e 27% respectivamente, como apresentado na Figura 75 – D e E.

Os sensores PM WCS 3 e SoilWatch 10 apresentaram comportamento linear, com ajuste a equação do primeiro grau, exibindo aumento de resposta associada ao aumento da condutividade elétrica da solução, manifestando variação de resposta de 10 F/m e 83 mili volts, representando aproximadamente 3% e 27% respectivamente, como apresentado na Figura 75 – F e G.

De forma distinta, o sensor VH400 apresentou comportamento paraboloide, com ajuste a equação do segundo grau, exibindo aumento de resposta associada ao aumento da condutividade elétrica da solução com aparente estabilização para valores mais elevados, manifestando variação de resposta de 63 mili volts, representando aproximadamente 2%, como apresentado na Figura 75 – H.

Reconhecidamente um parâmetro de elevada influência na resposta de sensores capacitivos, apresentou influencia sob grande parte dos equipamentos testados, variando a resposta estacionário de alguns modelos em até 20%, devido a variação da permissividade dielétrica aparente do meio (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980; CARDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2015).



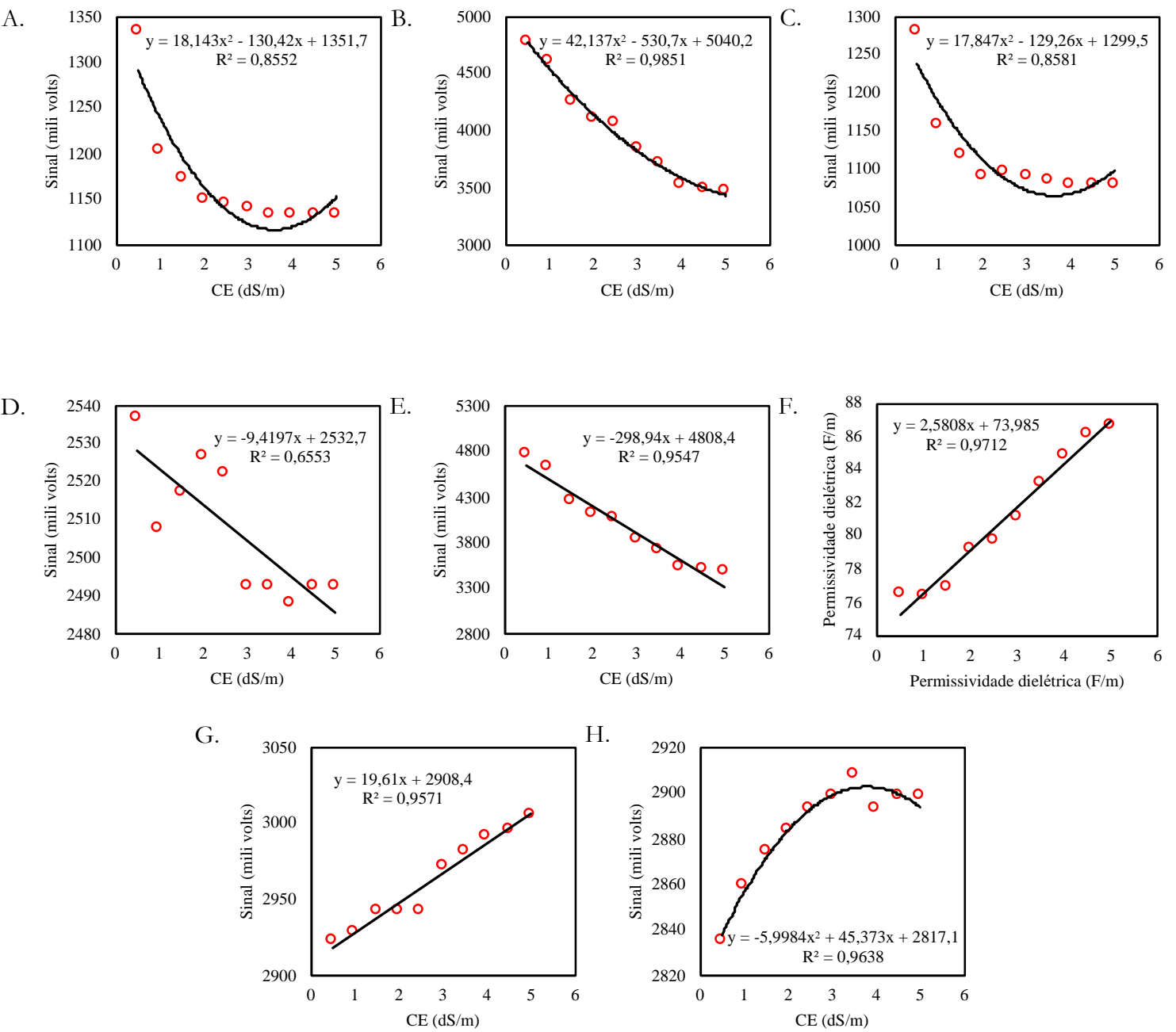


Figura 75. Resposta dos sensores FDR a variação de temperatura de meio líquido, sendo: A – Crowtail; B – CS 1.2; C – Octopus; D – Grove; E – Stemma; F – PM WCS 3; G – SoilWatch; H – VH400.

### 3.3.8. Raio de atuação

Apresenta-se neste tópico, através da Tabela 39 o raio e o volume de solo com potencial para interferência na resposta dos sensores FDR a variação do material circundante do mesmo.

Tabela 39. Apresentação das variáveis relacionadas ao raio e volume de solo influentes nas leituras de cada um dos sensores utilizados.

<b>Modelo</b>	<b>r (cm)</b>	<b>R (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>
Crowtail	1,00	2,2	6,00	41,47
CS 1.2	1,00	2,2	6,00	41,47
Grove	1,00	2,1	6,00	39,58
Octopus	1,00	2,1	6,00	39,58
PM WCS 3	1,20	2,0	6,00	45,24
SoilWatch 10	0,70	2,2	6,00	29,03
Stemma	1,00	1,5	6,00	28,27
VH400	0,50	1,0	6,00	9,42

Assim como Iturria et al (2019), foram encontrados volumes inferiores a 50 cm<sup>3</sup> para todos os modelos, o que apresenta bom potencial para utilização, pois o mesmo não sofre influência de corpos próximos, como rochas e raízes, porém podendo vir perder contato com o mesmo, quando utilizado em solos expansivos (KIZITO et al., 2008).

### 3.3.9. Faixa operacional útil e resolução de resposta

Adicionalmente, ressalta-se que a faixa útil de resposta dos sensores corresponde a aproximadamente 30% de seu espectro de resposta, como apresentado na Tabela 40. Em sensores de resposta analógica, entretanto, a resolução de leitura é de aproximadamente 5 bytes / mV, o que pode ser otimizando com a realização de mais leituras, com posterior extração de média (SPELMAN; KINZLI; KUNBERGER, 2013; PACHAURI et al., 2021).

Tabela 40. Comparação da faixa útil de resposta dos sensores, associados a unidade de resposta e a resolução de leitura, dentro da faixa de tensão de 0,1 a 4 mca.

<b>Modelo</b>	<b>Extremos</b>		<b>Unidade</b>	<b>Resolução</b>
Crowtail	1330	2560	mV	4,8
CS 1.2	2100	3500	mV	4,8
Grove	2150	3550	mV	4,8
Octopus	1200	1950	mV	4,8
PM WCS 3	1	80	F/m	0,01
SoilWatch 10	500	2750	mV	4,8
Stemma	1000	5000	bytes	1
VH400	950	3000	mV	4,8

### 3.3.10. Análise visual pós-teste

A calibração dos sensores para cada um dos tipos de solo, teve duração de 15 dias contínuos, integralizando desta forma, 120 dias de uso para cada um dos sensores, podendo ou

não haver tempo de espera neste período. Desta forma, buscou-se, após a conclusão dos ensaios de calibração uma avaliação visual de cada um dos sensores utilizados, com intuito de diagnosticar eventuais depreciações por agentes químicos ou físicos, os quais possam vir a inviabilizar seu uso no campo (FRANCESCA et al., 2009).

Observa-se nos sensores Crowtail, CS 1.2 e Grove (Figura 76 – A a F) degradações de aparência química, com infiltração, bolhas e visível desgaste da resina isolante, com caso de total remoção da mesma em alguns pontos do sensor CS 1.2, acrescidos de sinais de elevada abrasão no sensor.

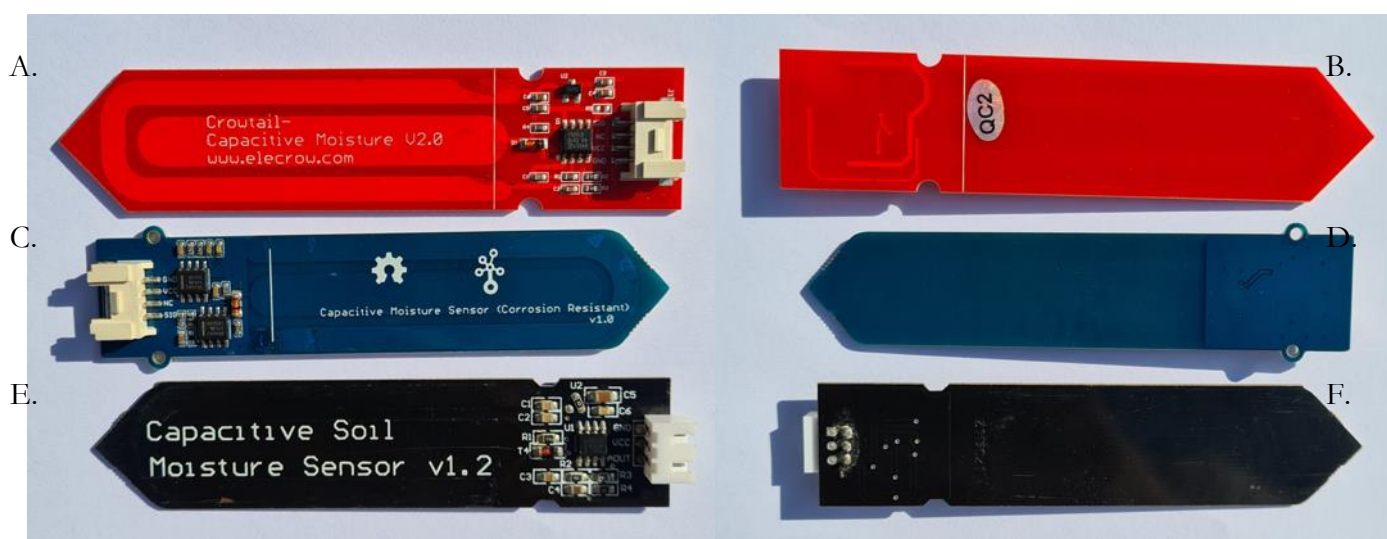


Figura 76. Sensores classificados como avariados, na análise visual pós teste de calibração, sendo: A – Crowtail em vista superior; B – Crowtail em vista inferior; C – Grove em vista superior; D – Grove em vista inferior; E – CS 1.2 em vista superior; F – CS 1.2 em vista inferior.

Ressalta-se que embora os sensores Octopus e Stemma tenham semelhanças construtivas com os modelos anteriores, os mesmos não vieram a apresentar desgaste ou depreciação visível como os anteriores, como se observa na Figura 77 - A a D.

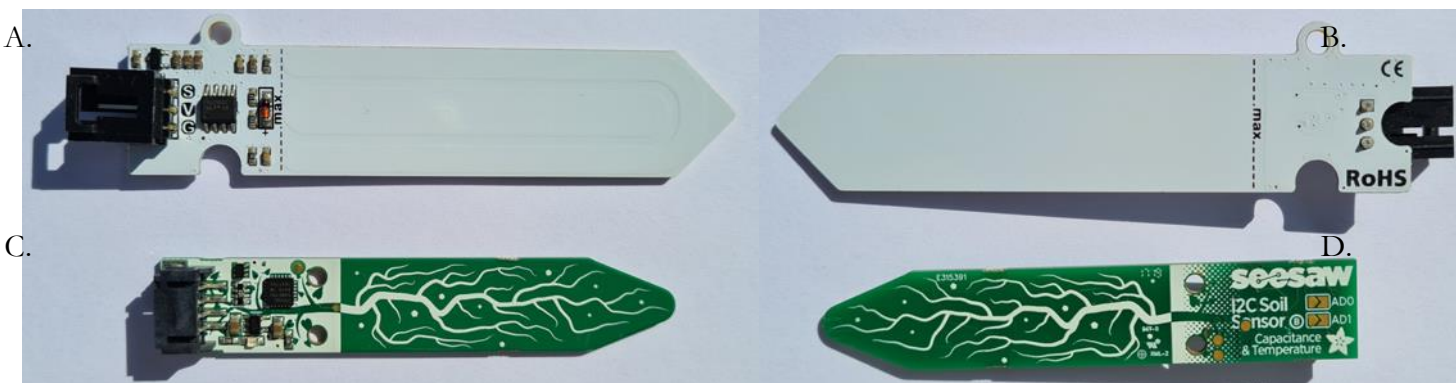


Figura 77. Sensores Octopus e Stemma, na análise visual pós teste de calibração, sendo A - Octopus em vista superior; B - Octopus em vista inferior; C - Stemma em vista superior; D - Stemma em vista inferior.

Adicionalmente, os sensores PM WCS 3, SoilWatch 10 e VH400 apresentaram os menores sinais de desgaste ou degradação na análise visual pós teste, como se observa na Figura 78 – A a F, com a estrutura dos sensores com sinais nulos ou leves de abrasão.



Figura 78. Sensores SoilWatch 10, PM WCS 3 e VH400, análise visual pós teste de calibração, sendo: A – SoilWatch 10 em vista superior; B – SoilWatch 10 em vista inferior; C – PM WCS 3 em vista superior; D – PM WCS 3 em vista inferior; E – VH400 em vista superior; F – VH400 em vista inferior.

Em síntese, apresenta-se na Tabela 41 a análise comparativa do estado final dos sensores, posterior ao período total de testes.

Tabela 41. Situação final dos sensores após o período integral de testes.

Modelo	Situação	Apto ao uso
Crowtail	Degradado	Sim
CS 1.2	Degradado	Não
Grove	Degradado	Sim
Octopus	Não degradado	Sim
PM WCS 3	Não degradado	Sim
SoilWatch 10	Não degradado	Sim
Stemma	Não degradado	Sim
VH400	Não degradado	Sim

Ressalta-se, que a degradação dos sensores pode ter sido impulsionada por técnicas construtivas, onde os sensores Crowtail, CS 1.2, Grove, Octopus e Stemma apresentam em sua construção placa de fibra de vidro, com cobre em camada simples ou dupla face, isolada com resina de secagem com luz ultravioleta (JEONG et al., 2018).

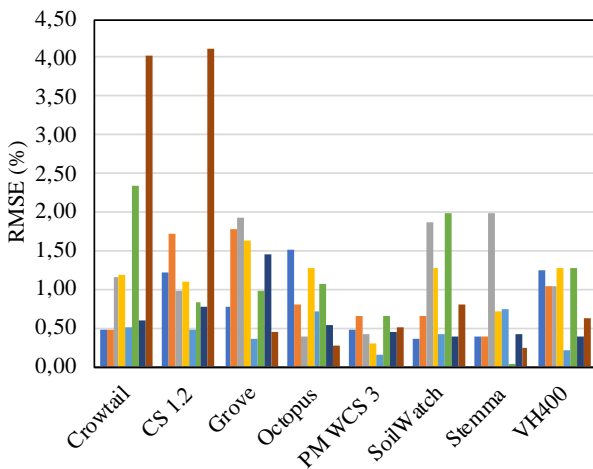
Entretanto os sensores com melhor durabilidade, PM WCS 3, SoilWatch 10 e VH400 apresentam construção em placa de fibra de vidro em multicamadas, onde o isolamento das placas do capacitor são o próprio material constituinte (fibra de vidro).

Destaca-se ainda, que os 3 sensores supracitados, apresentam isolamento do circuito eletrônico / cabeamento em resina plástica, sendo desta forma, sensores prontos para o uso e comparação aos demais, sensores com circuito eletrônico exposto, exigindo do usuário o isolamento do mesmo.

### 3.3.11. Comparação com outros autores

Assim como outros autores, foi encontrado um valor de RMSE inferior a 4% e 0,5 mca (Figura 79), para a estimativa de umidade volumétrica e tensão de retenção da água no solo, respectivamente. Adicionalmente, os diâmetros de influência corroboram com a recomendação técnica dos sensores e com dados encontrados na bibliografia (VAZ et al., 2013; ITURRIA et al., 2019).

A.



B.

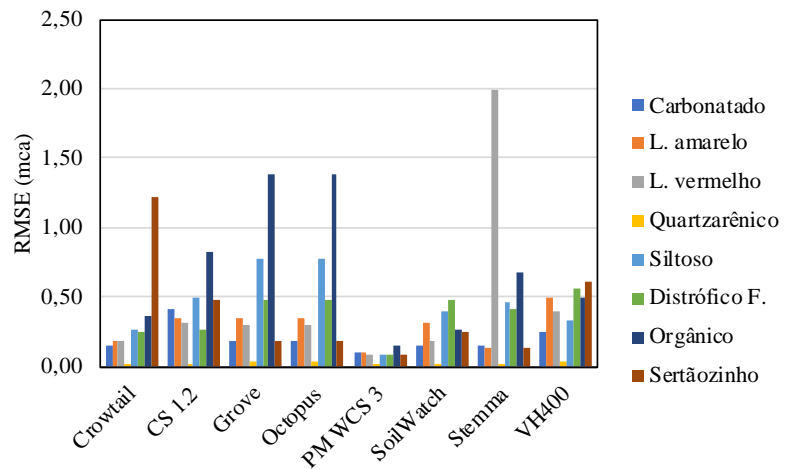


Figura 79. Comparação dos erros de calibração de cada um dos sensores, para todos os tipos de solo, sendo: A - Umidade volumétrica; B - Tensão de retenção.

### 3.3.12. Usabilidade dos sensores

Destaca-se, que embora sensores para monitoramento do solo não estejam plenamente calibrados, retornando com valores de umidade ou tensão de retenção corretos, alguns pontos interessantes podem ser extraídos dos mesmos, como é o caso de gatilhos de início e fim de irrigação, os quais são os pontos mais requeridos no manejo da irrigação, em campo (VIJ et al., 2020; SHARMA; IRMAK; KUKAL, 2021).

Assim, a instalação destes sensores em campo com monitoramento somente de sua variável de saída, pode auxiliar na estimativa de altas ou baixas taxas de evapotranspiração, bem

com indícios de movimentos da água no solo, seja por movimentos de capilaridade ou escoamento superficial.

Em suma, o comportamento dos sensores pode apresentar elevada variação quando exposto a solos de diferentes características, requerendo assim calibrações de instalação e de conferência, a fim de se explorar o máximo do potencial dos mesmo (SHARMA; IRMAK; KUKAL, 2021).

### 3.3.13. Datalogger e banco de dados

Propõe-se como objeto final deste estudo, a construção de um datalogger (Figura 80– A e B, Figura 81) capaz de realizar a leitura de todos os sensores utilizados, em intervalos previamente definidos, armazenando-os localmente em um cartão de memória, ou ainda enviando os mesmo a um banco de dados online.

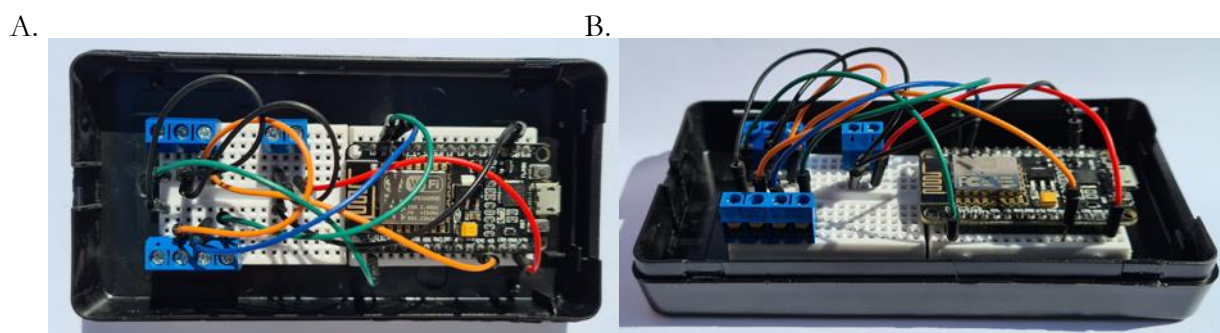


Figura 80. Circuito eletrônico (versão prototipada) do datalogger, responsável pela leitura em campo dos sensores. A – Vista superior; B – Vista lateral.



Figura 81. Dispositivo final para coleta dos dados em campo, com alimentação via fonte, com entrada para sensores com comunicação I2C e analógica.



O banco de dados conta com hospedagem no site Adafruit IO, disponível de forma gratuita, com recebimento de dados em intervalos fixos de 10 minutos, 24 horas por dia, com exibição tabelada e também em gráfico de distribuição temporal, podendo ser acessado por meio da Figura 82.



Figura 82. QRCode do banco de dados online, o qual apresenta a distribuição temporal dos dados dos sensores FDR.

O datalogger conta com atuação em malha, com compartilhamento de rede em modo AD-HOC, recebendo acesso a partir de um nó e compartilhando aos demais por rede wireless, obtendo alcance máximo de aproximadamente 125 m, sem barreiras.

O dispositivo conta um microcontrolador Esp8266, munido com sistema de alimentação a partir de bateria estacionária (ou fonte externa), a qual permite carregamento via células fotovoltaicas, fornecendo autonomia de funcionamento por longos períodos, visto seu baixo consumo energético.

### 3.4. Conclusão

Os mini lisímetros de pesagem associados ao software de controle desenvolvido para coleta e armazenamento de dados dos sensores FDR, operou com eficiência e confiabilidade, não resultando em perdas de dados ou erros no processo.

Os resultados dos ensaios geraram curvas de calibrações com elevada confiabilidade de estimativa, para todos os sensores, tanto para a umidade quanto para a tensão de retenção da água no solo, apresentando estabilidade temporal de resposta ao longo de 120 dias de ensaio.

Os sensores Crowtail, Grove e CS 1.2, embora bem avaliados durante os ensaios, não apresentaram potencial para uso no manejo da irrigação, pois sofreram degradação da placa ao longo do ensaio.

Os sensores Octopus e Stemma apresentaram boa resistência durante os testes, entretanto por apresentarem seu circuito exposto, requisitam proteção adicional, não podendo desta forma atingirem a melhor classificação.

Os sensores PM WCS 3, SoilWatch 10 e VH400 apresentaram as melhores classificações nos ensaios para os solos selecionados, contando com elevada durabilidade e isolamento do circuito eletrônico.

Destaca-se o sensor PM WCS 3, como o mais bem avaliado em todos os testes, o qual também fornece temperatura do solo como parâmetro estimado, variável a qual pode auxiliar o manejo da irrigação com estimativa de fluxo de calor no solo.

Em suma, a utilização de sensores FDR para auxílio do manejo da irrigação se apresenta viável, requerendo, no entanto, a calibração em laboratório para cada o solo em questão, permitindo assim um manejo adequado da irrigação via sensores de solo.

## Referências

ALAM, M.; SHAKIL, K. A.; KHAN, S. **Internet of things (IoT): Concepts and applications**. [s.l: s.n.]

ARAÚJO PRIMO, J. T. de et al. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 20–29, 2015.

ARDUINO INC. **Arduino Reference**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/en/>>. Acesso em: 7 mar. 2020.

ATKINS, R. T. et al. Soil moisture determinations using capacitance probe methodology. **Cold Regions Research and Engineering Lab**, n. January, 1998.

BARBON, G. et al. Taking Arduino to the Internet of Things: The ASIP programming model. **Computer Communications**, v. 89–90, p. 128–140, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.016>>.

BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1940–1946, 2000.

BELL, J. P.; DEAN, T. J.; HODNETT, M. G. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part II. Field techniques, evaluation and calibration. **Journal of Hydrology**, v. 93, n. 1–2, p. 79–90, 15 ago. 1987. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169487901958>>. Acesso em: 21 ago. 2019.

BESSA, W. K. S. M. **AVALIAÇÃO DO MÉTODO CAPACITIVO DE PLACAS COPLANARES PARA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DOS GRÃOS DE SOJA EM MOVIMENTO**. 2013. Universidade Federal do Paraná, 2013. Disponível em: <[https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/33767/R - D - WILLIAM KUHL SVOBODA MARQUES BESSA.PDF?sequence=1&isAllowed=y](https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/33767/R_-_D_-_WILLIAM_KUHL_SVOBODA_MARQUES_BESSA.PDF?sequence=1&isAllowed=y)>.



BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1453–1460, set. 2009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2008.0082>>.

BOUYOUCOS, G. An Electrical Resistance Method for Making Continuous Measurement of Moisture in Concrete Pavements and in Soils under Road Conditions. **Agronomy Journal**, v. 32, n. 10, p. 817–818, out. 1940. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1940.00021962003200100011x>>.

BROOKS, D. **Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design**. 1. ed. [s.l.] Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, p. 89–97, 1997.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Effect of Temperature and Salinity on the Precision and Accuracy of Landscape Irrigation Soil Moisture Sensor Systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 7, p. 04014076, jul. 2015. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000847>>.

CARVALHO, D. F. et al. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 363–372, 2007. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/eagri/v27n2/a05v27n2.pdf>>.

CARVALHO, D. F. (UFRRJ); OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada**. 1. ed. Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2012.

CHANG, K. **Handbook of Microwave and Optical Components, Fiber and Electro-Optical Components**. [s.l.] Wiley-Interscience, 1991. v. 4

CHANZY, A. et al. Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes. **European Journal of Soil Science**, v. 49, n. 4, p. 637–648, dez. 1998. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2389.1998.4940637.x>>.

COELHO, R. D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. ESALQ - USP, 2007. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-06112007-101254/publico//CoelhoLivreDocencia2007.pdf>>.

DENG, X. et al. A calibration-free capacitive moisture detection method for multiple soil environments. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 173, n. October 2020, p. 108599, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108599>>.

ESPRESSIF SYSTEMS. Datasheet ESP32 Series. **Espressif Systems**, p. 1–61, 2019. Disponível em: <[www.espressif.com](http://www.espressif.com)>.

- FARIA, R. T. De; CAMPECHE, F. D. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão Construction and calibration of high precision lysimeters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 237–242, 2006. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n1/v10n1a35.pdf>>.
- FRANCESCA, V. et al. Soil Moisture Measurements: A Comparison of Instrumentation Performances. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, n. February, p. 51, 2009.
- GKIOLMAS, A. et al. An environmental education project that measures particulate matter via an Arduino interface. **Sustainable Futures**, v. 2, n. February, p. 100027, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sftr.2020.100027>>.
- GONZÁLEZ, I.; CALDERÓN, A. J. Integration of open source hardware Arduino platform in automation systems applied to Smart Grids/Micro-Grids. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 36, n. October, p. 100557, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100557>>.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física - Eletromagnetismo**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HOWELL, T. A. et al. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. **Transactions - American Society of Agricultural Engineers**, v. 38, n. 4, p. 1019–1024, 1995.
- ITURRIA, I. et al. Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad. p. 765–772, 2019.
- JEONG, Y. J. et al. Improved durability of soil humidity sensor for agricultural IoT environments. In: 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), **Anais...IEEE**, jan. 2018. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8326223/>>.
- JIMÉNEZ, A. de los Á. C. et al. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, n. September, p. 104413, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104413>>.
- KELLEY, O. J. et al. A Comparison of Methods of Measuring Soil Moisture under Field Conditions 1. **Agronomy Journal**, v. 38, n. 9, p. 759–784, set. 1946. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj1946.00021962003800090001x>>.
- KHANDPUR, R. S. **Printed Circuit Boards - design, fabrication and aseembly**. [s.l.] McGraw-Hill Companies, 2011.
- KICAD. **Kicad**. Disponível em: <<https://kicad.org>>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3–4, p. 367–378, 2008.
- KONDAVEETI, H. K. et al. A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, v. 40, p. 100364, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2021.100364>>.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. São Paulo, SP - Brasil: Ed. USP, 2018.

LINMAO, Y. et al. FDR Soil Moisture Sensor for Environmental Testing and Evaluation. **Physics Procedia**, v. 25, p. 1523–1527, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.271>>.

MERINO, A. A. **Escuela Técnica Superior de Ingeniería Sistema de adquisición y control de lisímetro de pesada en maceta con Arduino**. 2016. Universidad Politécnica de Cartagena, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6625/tfg-ant-sis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

PACHAURI, R. K. et al. Development of arduino assisted data acquisition system for solar photovoltaic array characterization under partial shading conditions. **Computers and Electrical Engineering**, v. 92, n. May, p. 107175, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107175>>.

PALTINEANU, I. C.; STARR, J. L. Real-time Soil Water Dynamics Using Multisensor Capacitance Probes: Laboratory Calibration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 6, p. 1576–1585, 1997.

PAVEETHRA, S. R. et al. Theoretical modelling and implementation of home energy management system using IoT based automation system. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.644>>.

PINTO, M. F. et al. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para Marinaldo. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 15, n. 19, p. 211–217, 2011.

PIZETTA, S. C. et al. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 458–468, 2017.

PORTELA, J. C.; LIBARDI, P. L.; VAN LIER, Q. de J. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 49–54, 2001.

RÊGO SEGUNDO, A. K. **Desenvolvimento De Sensor De Teor De Água Do Solo E De Sistema De Controle E Automação Em Malha Fechada Para Uso Em Irrigação**. 2010. Universidade Federal de Viçosa, 2010. Disponível em: <[http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3563/texto\\_completo.pdf?sequence=1](http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3563/texto_completo.pdf?sequence=1)>.

ROQUE, W. **Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade , temperatura e condutividade elétrica do solo** . 2008. Universidade de Campinas, 2008.

RUIZ-PENÁLVER, L. et al. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. **Agricultural Water Management**, v. 151, p. 103–113, 2015.

SERPANOS, D.; WOLF, M. **Internet-of-Things (IoT) Systems**. [s.l: s.n.]

SHARMA, K.; IRMAK, S.; KUKAL, M. S. Propagation of soil moisture sensing uncertainty into estimation of total soil water, evapotranspiration and irrigation decision-making. **Agricultural Water Management**, v. 243, n. August 2020, p. 106454, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106454>>.

SILVA, A. M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005a. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-27012006-043239/>>.

SILVA, L. D. B. da; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 705–712, dez. 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162005000300016&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162005000300016&lng=pt&tlng=pt)>.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; MAGGIOTTO, S. R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 53–58, 1999.

SILVA, I. de O. **Desenvolvimento De Um Sensor Capacitivo Para O Monitoramento De Umidade Do Solo**. 2005b. Universidade Federal do Ceará, 2005.

SOUZA, C. F. et al. Calibração de sondas FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597–606, 2013.

SOUZA, C. F. et al. Monitoramento Do Teor De Água No Solo Em Tempo Real Com As Técnicas De Tdr E Fdr. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 26, 2018.

SPELMAN, D.; KINZLI, K.-D.; KUNBERGER, T. Calibration of the 10HS Soil Moisture Sensor for Southwest Florida Agricultural Soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 12, p. 965–971, dez. 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000647>>.

SUN, Z. J. et al. The effect of soil electrical conductivity on moisture determination using time-domain reflectometry in sandy soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 80, n. 1, p. 13–22, 2000.

SURYA, S. G. et al. An in-field integrated capacitive sensor for rapid detection and quantification of soil moisture. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 321, n. June, 2020.

T. A. HOWELL et al. Calibration and Scale Performance of Bushland Weighing Lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 4, p. 1019–1024, 1995. Disponível em: <[https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/202806/erick\\_s\\_machado.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/202806/erick_s_machado.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>.

TALAVIYA, T. et al. Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 4, p. 58–73, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.04.002>>.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual De Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA - Solos, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; FONTANA, G. K. D. A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília - DF: EMBRAPA - Solos, 2017.

TIGLAO, N. M. et al. Agrinex: A low-cost wireless mesh-based smart irrigation system. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 161, p. 107874, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107874>>.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574–582, 1980.

UHLAND, R. E. Rapid Method for Determining Soil Moisture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 15, n. C, p. 391–393, 1951. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1951.036159950015000C0088x>>.

VAZ, C. M. P. et al. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 2, 2013.

VIJ, A. et al. IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 1250–1257, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>>.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

ZABOLOTNYI, O.; KOSHEVOI, M. An effective method of bulk materials moisture measurement using capacitive sensors. **Journal of Stored Products Research**, v. 89, p. 101733, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101733>>.

#### 4. CONCLUSÃO

A eletrônica embarcada se apresenta como excelente ferramenta para auxílio das atividades agrícolas, com destaque ao manejo da água na agricultura irrigada, com soluções de baixo custo, formuladas com as características locais, a fim de fornecer ao usuário o melhor desempenho e usabilidade.

Em suma, o manejo da irrigação a partir de dados coletados pelos dispositivos de baixo custo calibrados acima, apresentam alta viabilidade técnica, seja para a estimativa de evapotranspiração diária ou mesmo para a mensuração pontual de umidade e tensão de retenção, parâmetros os quais podem ser utilizados como gatilhos de início e fim de irrigação, ou planejamento de lâmina a ser aplicada.

Adicionalmente, estuda-se a possibilidade da instalação conjunta, da estação desenvolvida, com algum dos sensores FDR, visando auxílio do ajuste do coeficiente  $k_c$ , corroborando para otimização do cálculo da evapotranspiração das culturas, obtida pelo produto da evapotranspiração diária e  $k_c$  da cultura em uso, para a fase atual do cultivo.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A. Código fonte da estação

```

#include <Adafruit_MQTT_Client.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
#include <Adafruit_MQTT.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266mDNS.h>
#include <ArduinoOTA.h>
#include <NTPClient.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <Wire.h>
#include <FS.h>

#define AIO_SERVER "io.adafruit.com"
#define AIO_SERVERPORT 1883
#define AIO_USERNAME "Azevedo"
#define AIO_KEY "aio_gyYE56N3F14SpuasKd2m6slR"

#define pin_led 2 // 2 led indicador envio dados
#define pin_rad A0 // sensor iv
#define wind 14 // anemometro
#define pin_net 16 // led indicador conexão internet
#define dht 12 // dht22
#define pluv 13 // pluviometro

IPAddress ip(192, 168, 0, 111);
IPAddress gateway(192, 168, 0, 1);
IPAddress subnet(255, 255, 255, 0);

WiFiClient clientt;

Adafruit_MQTT_Client mqtt(&clientt, AIO_SERVER, AIO_SERVERPORT, AIO_USERNAME, AIO_KEY);
Adafruit_BME280 bme;
WiFiClientSecure client;
WiFiUDP udp;

NTPClient ntpClient(udp, "europe.pool.ntp.org", (-3 * 3600), 60000);

Adafruit_MQTT_Publish _t_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/t_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _ur_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/ur_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _vv_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/vv_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _r_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/r_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _p_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/p_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _chuva_atual = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/chuva_atual" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _eto = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/eto" , MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _chuva_dia = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/chuva_dia" ,
MQTT_QOS_1);
Adafruit_MQTT_Publish _vv_rajada = Adafruit_MQTT_Publish(&mqtt, AIO_USERNAME "/feeds/vv_rajada" ,
MQTT_QOS_1);

int last_day;

int day;
int month;
int year;

```



```

int hour;
int minute;
int second;

unsigned long tempo = 0;

float const perimetro = 0.62832;
float const intervalo = 10000;

bool estado2 = false;
bool estado = false;
bool minu = false;

String          textFix          =          "GET          /forms/d/e/1FAIpQLSer7A1Xk-
Cxa4d2AIBDSYVBWifMtq1J57FDdw/formResponse?ifq&entry.98937418=";
String data_hora = "";
String conteudo;
String msg = "";

float t_max_d = 0;
float t_min_d = 0;
float t_med_d = 0;
float p_max_d = 0;
float p_min_d = 0;
float p_med_d = 0;
float h_max_d = 0;
float h_min_d = 0;
float h_med_d = 0;
float rad_d = 0;
float ppt_d = 0;
float vv_d = 0;

float eto = 0;
float ppt = 0;
float rad = 0;
float rpm = 0;
float p_max = 0;
float p_min = 0;
float p_med = 0;
float t_max = 0;
float t_min = 0;
float t_med = 0;
float h_max = 0;
float h_min = 0;
float h_med = 0;
float vv_2m = 0;
float vv_max = 0;
float chuva = 0;

float v = 0;
float t = 0;
float p = 0;
float h = 0;
float r = 0;
float i = 0;
float d = 0;
float k = 0;

int erro = 0;

void inicia_arquivos();
void salva_dados();
void wind_speed();
void gera_dado();
void writeFile();
void bluetooth();
void mensura();

```

```

void evapo();
void date();

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  SPIFFS.begin();
  Wire.begin();

  Serial.println("Connecting..");
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin("Erro", "sdfvsdngytn");
  //WiFi.config(ip, gateway, subnet);

  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED)
  {
    Serial.print(".");
    delay(500);
  }

  Serial.println();
  Serial.print("Connected to ");
  Serial.println(WiFi.SSID());
  Serial.println(WiFi.localIP());
  Serial.println();

  ntpClient.begin();

  while (!ntpClient.update())
  {
    ntpClient.forceUpdate();
    delay(500);
  }

  String hora = ntpClient.getFormattedTime();
  String data = ntpClient.getFormattedDate();

  hour = ntpClient.getHours();
  minute = ntpClient.getMinutes();
  second = ntpClient.getSeconds();

  year = (data.substring(0, 4)).toInt();
  month = (data.substring(5, 7)).toInt();
  day = (data.substring(8, 10)).toInt();

  last_day = day;

  ArduinoOTA.setHostname("Estacao_RC");

  // No authentication by default
  ArduinoOTA.setPassword("sdfbsdfnsu");

  ArduinoOTA.onStart([]() {
    String type;
    if (ArduinoOTA.getCommand() == U_FLASH) {
      type = "sketch";
    } else { // U_FS
      type = "filesystem";
    }
  });

  // NOTE: if updating FS this would be the place to unmount FS using FS.end()
  Serial.println("Start updating " + type);
});
ArduinoOTA.onEnd([]() {
  Serial.println("\nEnd");
});
ArduinoOTA.onProgress([](unsigned int progress, unsigned int total) {
  Serial.printf("Progress: %u%%\r", (progress / (total / 100)));
});

```

```

ArduinoOTA.onError([](ota_error_t error) {
  Serial.printf("Error[%u]: ", error);
  if (error == OTA_AUTH_ERROR) {
    Serial.println("Auth Failed");
  } else if (error == OTA_BEGIN_ERROR) {
    Serial.println("Begin Failed");
  } else if (error == OTA_CONNECT_ERROR) {
    Serial.println("Connect Failed");
  } else if (error == OTA_RECEIVE_ERROR) {
    Serial.println("Receive Failed");
  } else if (error == OTA_END_ERROR) {
    Serial.println("End Failed");
  }
});
ArduinoOTA.begin();

bme.begin(0x76);

pinMode(pin_net, OUTPUT);
pinMode(pin_led, OUTPUT);
pinMode(wind, INPUT);
pinMode(pluv, INPUT);

digitalWrite(pin_net, HIGH);
digitalWrite(pin_led, HIGH);

tempo = millis();

estado = digitalRead(wind);

p = (bme.readPressure()) / 1000;
t = bme.readTemperature();
h = bme.readHumidity();

p_max = p;
p_min = p;

t_max = t;
t_min = t;

h_max = h;
h_min = h;

erro = 0;

File File_k = SPIFFS.open("/k.txt", "a");
k = (readFile("/k.txt")).toFloat();
File_k.close();

if (k == 0) inicia_arquivos();
}

void loop()
{
  ArduinoOTA.handle();

  if (Serial.available() > 0) bluetooth();

  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

    WiFi.disconnect();
    WiFi.begin("Erro", "cnglksejnrglerg");

    //WiFi.reconnect();
    digitalWrite(pin_net, HIGH);
    Serial.println("Reconectando...");

    erro ++;

```

```

    delay(5000);

}
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
{
    erro = 0;
    digitalWrite(pin_net, LOW);
}

if ((millis() - tempo) > intervalo )
{
    tempo = millis();

    date();

    if ( minute == 0 or
        minute == 10 or
        minute == 20 or
        minute == 30 or
        minute == 40 or
        minute == 50 ) {

        minu = true;

    }

    else minu = false;

    mensura();
}

if (minu == true and i > 20) gera_dado();

if (i > 120 or erro > 12) {
    Serial.println("Reiniciando...");
    digitalWrite(2, HIGH);
    gera_dado();
    ESP.restart();
}

if (digitalRead(wind) != estado)
{
    rpm ++;
    estado = !estado;
}

if (digitalRead(pluv) != estado2) {
    ppt ++;
    estado2 = !estado2;
}

delay(10);

}

void date()
{
    ntpClient.update();

    String hora = ntpClient.getFormattedTime();
    String data = ntpClient.getFormattedDate();

    hour = ntpClient.getHours();
    minute = ntpClient.getMinutes();
    second = ntpClient.getSeconds();

    year = (data.substring(0, 4)).toInt();

```

```

month = (data.substring(5, 7)).toInt();
day = (data.substring(8, 10)).toInt();

data_hora = String(day) + "/" + String(month) + "/" + String(year);
data_hora += "-" + String(hour) + ":" + String(minute) + ":" + String(second);
}

void mensura()
{
  digitalWrite(pin_led, LOW);

  if (ppt != 0) {
    int valor = ppt;
    int resto = valor % 2;
    if (resto != 0) ppt ++;
  }

  ppt *= 0.125;

  chuva = chuva + (ppt);

  p = (bme.readPressure()) / 1000;
  t = bme.readTemperature();
  h = bme.readHumidity();
  r = analogRead(pin_rad);

  r = r * (3300 / 1024);

  r = -0.0026 * r * r + 8.3299 * r - 5732;

  if (r < 0) r = 0;

  p_med = p_med + p;
  t_med = t_med + t;
  h_med = h_med + h;
  rad = rad + r;

  if (p > p_max) p_max = p;
  if (p < p_min) p_min = p;
  if (t > t_max) t_max = t;
  if (t < t_min) t_min = t;
  if (h > h_max) h_max = h;
  if (h < h_min) h_min = h;

  wind_speed();

  i = i + 1;

  Serial.println(data_hora);
  Serial.println("Temp: " + String(t, 2) + " °C");
  Serial.println("UR: " + String(h, 2) + "%");
  Serial.println("Pres: " + String(p, 2) + " kPa");
  Serial.println("VV: " + String(v, 2) + " m/s");
  Serial.println("Rad: " + String(r, 0) + " W/m2");
  Serial.println("Ppt: " + String(chuva, 2) + " mm");
  Serial.println("Wifi status: " + String(WiFi.status()));
  Serial.println("WL_Connected: " + String(WL_CONNECTED));
  Serial.println("Número erros: " + String(erro));
  Serial.println("Número loops: " + String(int(i)));
  Serial.print("IP: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  Serial.println("_____");

  ppt = 0;
  v = 0;

  digitalWrite(pin_led, HIGH);
}

```

```

void gera_dado()
{
  p_med = p_med / i;
  t_med = t_med / i;
  h_med = h_med / i;
  rad = rad / i;
  vv_2m = vv_2m / i;
  chuva = chuva;

  t_max_d = (readFile("/t_max_d.txt")).toFloat();
  t_min_d = (readFile("/t_min_d.txt")).toFloat();
  p_max_d = (readFile("/p_max_d.txt")).toFloat();
  p_min_d = (readFile("/p_min_d.txt")).toFloat();
  h_max_d = (readFile("/h_max_d.txt")).toFloat();
  h_min_d = (readFile("/h_min_d.txt")).toFloat();
  rad_d = (readFile("/rad_d.txt" )).toFloat();
  ppt_d = (readFile("/ppt_d.txt" )).toFloat();
  vv_d = (readFile("/vv_d.txt" )).toFloat();
  k = (readFile("/k.txt" )).toFloat();

  k ++;
  rad_d += rad;
  vv_d += vv_2m;
  ppt_d += chuva;

  if (t_max_d < t_max) writeFile(String(t_max), "/t_max_d.txt");
  if (t_min_d > t_min) writeFile(String(t_min), "/t_min_d.txt");
  if (p_max_d < p_max) writeFile(String(p_max), "/p_max_d.txt");
  if (p_min_d > p_min) writeFile(String(p_min), "/p_min_d.txt");
  if (h_max_d < h_max) writeFile(String(h_max), "/h_max_d.txt");
  if (h_min_d > h_min) writeFile(String(h_min), "/h_min_d.txt");

  writeFile(String(ppt_d), "/ppt_d.txt");
  writeFile(String(rad_d), "/rad_d.txt");
  writeFile(String(vv_d), "/vv_d.txt");
  writeFile(String(k ), "/k.txt" );

  if (day != last_day) evapo();

  envia_dados();

  minu = false;

  i = 0;
  p_med = 0;
  t_med = 0;
  h_med = 0;
  rad = 0;
  vv_2m = 0;
  vv_max = 0;
  chuva = 0;
  eto = 0;

  p = (bme.readPressure()) / 1000;
  t = bme.readTemperature();
  h = bme.readHumidity();

  p_max = p;
  p_min = p;
  t_max = t;
  t_min = t;
  h_max = h;
  h_min = h;

  data_hora = "";
}

```

```

void envia_dados()
{
  if (client.connect("docs.google.com", 443) == 1)
  {
    String toSend = textFix;
    toSend += data_hora;
    toSend += "&entry.1649281181=";
    toSend += t_max;
    toSend += "&entry.9622530866=";
    toSend += t_min;
    toSend += "&entry.1602641851=";
    toSend += t_med;
    toSend += "&entry.2270651981=";
    toSend += h_max;
    toSend += "&entry.9621586753=";
    toSend += h_min;
    toSend += "&entry.21124556470=";
    toSend += h_med;
    toSend += "&entry.7832224836=";
    toSend += p_max;
    toSend += "&entry.168842545=";
    toSend += p_min;
    toSend += "&entry.19868529364=";
    toSend += p_med;
    toSend += "&entry.17978732380=";
    toSend += rad;
    toSend += "&entry.17314913294=";
    toSend += vv_2m;
    toSend += "&entry.3950654762=";
    toSend += vv_max;
    toSend += "&entry.16054927456=";
    toSend += chuva;
    toSend += "&submit=Submit HTTP/1.1";

    client.println(toSend);
    client.println("Host: docs.google.com");
    client.println();
    client.stop();
    Serial.println("Dados enviados ao google");
  }

  else
  {
    Serial.println("Erro ao enviar dados ao google");
  }

  mqtt.connect();
  mqtt.processPackets(5000);

  _t_atual.publish(t_med);
  _ur_atual.publish(h_med);
  _vv_atual.publish(vv_2m);
  _r_atual.publish(rad);
  _p_atual.publish(p_med);
  _chuva_dia.publish(ppt_d);
  _vv_rajada.publish(vv_max);

  if (day != last_day)
  {
    _eto.publish(eto);
    last_day = day;
  }

  if (! _chuva_atual.publish(chuva)) {
    Serial.println("Falha ao enviar dados a adafruit.");
  }
  else
  {
    Serial.println("Dados enviados a adafruit");
  }
}

```

```

}

mqtt.disconnect();
Serial.println("_____");

tempo = millis();
}

void wind_speed()
{
rpm = rpm / 2;

rpm = (rpm * 60) / (intervalo / 1000);

v = ((4 * 3.14 * 147 * rpm) / 60) / 1000;

if (v > vv_max) vv_max = v;

vv_2m = vv_2m + v;
rpm = 0;
}

void evapo()
{
t_max_d = (readFile("/t_max_d.txt")).toFloat();
t_min_d = (readFile("/t_min_d.txt")).toFloat();
p_max_d = (readFile("/p_max_d.txt")).toFloat();
p_min_d = (readFile("/p_min_d.txt")).toFloat();
h_max_d = (readFile("/h_max_d.txt")).toFloat();
h_min_d = (readFile("/h_min_d.txt")).toFloat();
rad_d = (readFile("/rad_d.txt" )).toFloat();
vv_d = (readFile("/vv_d.txt" )).toFloat();
k = (readFile("/k.txt" )).toFloat();

const float pi = 3.1415;
const float albedo = 0.23;
const float c_sb = 4.903 / 1000000000;

float latitude = -0.3964;
float altitude = 457;
float dia_ano = (month - 1) * 30 + day;

//rad_d = 1.3 * 600 * rad_d / 1000000;
rad_d = 1.3 * rad_d / (k * 11.6);

t_med_d = (t_max_d + t_min_d) / 2;
p_med_d = (p_max_d + p_min_d) / 2;

vv_d /= k;

float t_max_k = t_max_d + 273.16;
float t_min_k = t_min_d + 273.16;

float c_psi = 0.000665 * p_med_d;
float e0_tmax = 0.6108 * exp((17.27 * t_max_d) / (t_max_d + 237.3));
float e0_tmin = 0.6108 * exp((17.27 * t_min_d) / (t_min_d + 237.3));
float e0_tmed = 0.6108 * exp((17.27 * t_med_d) / (t_med_d + 237.3));
float es = (e0_tmax + e0_tmin) / 2;
float ea = (e0_tmin * (h_max_d / 100) + e0_tmax * (h_min_d / 100)) / 2;
float delta = (4098 * e0_tmed) / sq(t_med_d + 237.3);
float dr = 1 + 0.033 * cos((2 * pi / 365) * dia_ano);
float dec_sol = 0.4093 * sin(((2 * pi / 365) * dia_ano) - 1.405);
float w_sol = acos((-tan(latitude)) * (tan(dec_sol)));
float ra = 37.586 * dr * (w_sol * sin(latitude) * sin(dec_sol) + cos(latitude) * cos(dec_sol) * sin(w_sol));
float rso = (0.75 + (2 / 100000) * altitude) * ra;
float roc = (1 - albedo) * rad_d;
float rol = -c_sb * ((pow(t_max_k, 4) + pow(t_min_k, 4)) / 2) * (0.34 - 0.14 * sqrt(ea)) * (1.35 * (rad_d / rso) - 0.35);
float rn = roc + rol;

```



```

float g = 0;

eto = (0.408 * delta * (rn - g) + c_psi * (900 / (t_med_d + 273.3)) * vv_d * (es - ea)) / (delta + c_psi * (1 + 0.34 * vv_d));
//eto = (0.408 * delta * (rn - g) + c_psi * (37 / (t_med_d + 273.3)) * vv_d * (es - ea)) / (delta + c_psi * (1 + 0.34 * vv_d));
//eto = (0.408 * delta * (rn - g) + c_psi * (6.2 / (t_med_d + 273.3)) * vv_d * (es - ea)) / (delta + c_psi * (1 + 0.34 * vv_d));

Serial.println();
Serial.println("A evapotranspiração é: " + String(eto, 2) + " mm");
Serial.println();

if (eto < 0) eto = 0;

inicia_arquivos();

}

String readFile(String arquivo) {
  File rFile = SPIFFS.open(arquivo, "r");

  conteudo = rFile.readStringUntil('\r'); //desconsidera '\r\n'

  return conteudo;
  rFile.close();
}

void writeFile(String valor, String arquivo) {

  File rFile = SPIFFS.open(arquivo, "w+");
  rFile.println(valor);
  rFile.close();
}

void inicia_arquivos()
{
  p = (bme.readPressure()) / 1000;
  t = bme.readTemperature();
  h = bme.readHumidity();

  SPIFFS.format();

  writeFile(String(t), "/t_max_d.txt");
  writeFile(String(t), "/t_min_d.txt");
  writeFile(String(p), "/p_max_d.txt");
  writeFile(String(p), "/p_min_d.txt");
  writeFile(String(h), "/h_max_d.txt");
  writeFile(String(h), "/h_min_d.txt");
  writeFile(String(0), "/rad_d.txt");
  writeFile(String(0), "/ppt_d.txt");
  writeFile(String(0), "/vv_d.txt");
  writeFile(String(0), "/k.txt");
}

void bluetooth()
{
  msg = Serial.readStringUntil('*');

  if (msg.equalsIgnoreCase("reboot"))
  {
    Serial.println("Reiniciando controlador...");
    ESP.restart();
  }

  if (msg.equalsIgnoreCase("status"))
  {
    t_max_d = (readFile("/t_max_d.txt")).toFloat();
    t_min_d = (readFile("/t_min_d.txt")).toFloat();
    p_max_d = (readFile("/p_max_d.txt")).toFloat();
    p_min_d = (readFile("/p_min_d.txt")).toFloat();
    h_max_d = (readFile("/h_max_d.txt")).toFloat();
  }
}

```

```

h_min_d = (readFile("/h_min_d.txt")).toFloat();
rad_d = (readFile("/rad_d.txt" )).toFloat();
ppt_d = (readFile("/ppt_d.txt" )).toFloat();
vv_d = (readFile("/vv_d.txt" )).toFloat();
k = (readFile("/k.txt" )).toFloat();

Serial.println("T max: " + String(t_max_d) + " °C");
Serial.println("T min: " + String(t_min_d) + " °C");
Serial.println("P max: " + String(p_max_d) + " hPa");
Serial.println("P min: " + String(p_min_d) + " hPa");
Serial.println("U max: " + String(h_max_d) + " %");
Serial.println("U min: " + String(h_min_d) + " %");
Serial.println("Rad: " + String(1.3 * rad_d / (k * 11.6)) + " MJ/m2");
Serial.println("VV x: " + String(vv_d / k) + " m/s");
Serial.println("PPT : " + String(ppt_d) + " mm / dia");
Serial.println("K: " + String(k) + " leituras");
Serial.println("_____");

}

if (msg.equalsIgnoreCase("reset"))
{
  inicia_arquivos();
  Serial.println("Arquivos resetados!");
}

}

void soma()
{
  ppt += 0.25;
}

```