

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

ANDRÉ ALVES PINHEIRO

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO UMIDADE DO SOLO E DADOS
CLIMÁTICOS EM LAVOURA DE CAFEIEIRO CONILON**

ALEGRE – ES

2019

ANDRÉ ALVES PINHEIRO

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO UMIDADE DO SOLO E DADOS
CLIMÁTICOS EM LAVOURA DE CAFEIEIRO CONILON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas

Orientador: Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis

ALEGRE – ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

P654m Pinheiro, André Alves, 1994-
Manejo da irrigação utilizando umidade do solo e dados climáticos em lavoura de cafeeiro conilon / André Alves Pinheiro. - 2019.
73 f. : il.

Orientador: Edvaldo Fialho dos Reis.

Coorientadores: Giovanni de Oliveira Garcia, Hélder de Amorim Mendes.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Irrigação. 2. Agronomia. 3. Café. 4. Solos - Umidade. 5. Evapotranspiração. I. Reis, Edvaldo Fialho dos. II. Garcia, Giovanni de Oliveira. III. Mendes, Hélder de Amorim. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 63

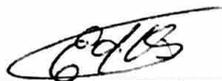
ANDRÉ ALVES PINHEIRO

**MANEJO DA IRRIGAÇÃO UTILIZANDO UMIDADE DO SOLO E DADOS
CLIMÁTICOS EM LAVOURA DE CAFEIEIRO CONILON**

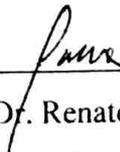
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na linha de pesquisa Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas

Aprovada em 22 de fevereiro de 2019

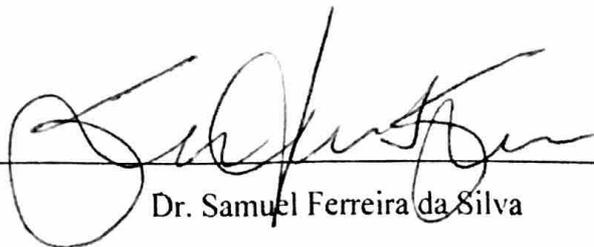
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis
Universidade Federal do Espírito Santo - Orientador



Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos
Universidade Federal do Espírito Santo – Membro interno do PPGPV



Dr. Samuel Ferreira da Silva
Universidade Federal do Espírito Santo – Examinador externo ao PPGPV

A Deus, prioridade de toda minha vida;
Aos familiares que estiveram ao meu lado, pelo apoio e confiança incessante;
Aos amigos, pela companhia e parceria.

DEDICO

“Porque o Senhor dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e o entendimento”

Provérbios 2:6

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por tudo em minha vida, sem Ele nada disso seria possível.

Aos meus familiares, em especial meus pais e irmã, os quais sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e acreditando no meu sucesso e nos meus sonhos.

Ao Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis, pela orientação, amizade, apoio e confiança, desde o período da graduação até o encerramento deste ciclo.

Aos amigos, que fizeram desta caminhada mais branda e animada, amigos estes que tenho imensa consideração e espero tê-los por toda minha vida.

A minha namorada, que está comigo em todos momentos, me incentivando, acalmando, acreditando no meu sucesso e proporcionando momentos valiosos em minha vida.

A todos os mestres que tive o prazer de conhecer, pelo auxílio, conhecimento transmitido e parceria durante o período do mestrado, em especial ao Prof. Dr. Hélder de Amorim Mendes, coorientador do projeto, e ao Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos, amigo e colega pesquisador.

Aos colegas de pesquisa e funcionários da UFES, pelo companheirismo e ajuda interminável em momentos de estudos, experimentos ou trabalhos.

A Universidade Federal do Espírito Santo, ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de cursar o mestrado e pelo crescimento profissional.

Ao IFES – Campus Alegre pela concessão da área experimental para realização da pesquisa, em especial o funcionário Luiz pela disponibilidade e colaboração.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos concedida;

A Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES pelo financiamento do projeto, através do Edital PPE/AGRO.

Portanto, resta-me agradecer à todos pela contribuição em mais essa conquista em minha vida profissional e acadêmica.

RESUMO GERAL

PINHEIRO, André Alves, M. Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, Fevereiro de 2019. **Manejo da irrigação utilizando umidade do solo e dados climáticos em lavoura de cafeeiro conilon.** Orientador: Prof. D. Sc. Edvaldo Fialho dos Reis. Co-orientadores: Prof. D. Sc. Giovanni de Oliveira Garcia; Prof. D. Sc. Hélder de Amorim Mendes.

O desenvolvimento e utilização da tecnologia da irrigação tem propiciado benefícios ao sistema produtivo e evitado possíveis prejuízos com o decréscimo da disponibilidade hídrica. Contudo, são observados problemas na maioria dos projetos de irrigação atuais, como o desperdício de água, elevação dos custos de produção e contaminação de corpos hídricos, decorrentes de um manejo incorreto do sistema. O manejo correto da irrigação pode ser realizado através de dados climáticos ou do conhecimento do teor de água no solo. No primeiro capítulo desta dissertação objetivou-se a comparação das metodologias da reflectometria no domínio do tempo (TDR) e sensor UFES com a estufa e forno elétrico na determinação da umidade do solo e na reposição de água, e no segundo capítulo objetivou-se a realização da reposição de água no solo a partir dos dados de umidade do solo determinados pelo TDR e sensor UFES, comparando-os com a estimativa da evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani. O trabalho foi conduzido em lavoura adulta de *Coffea canephora*, variedade “Conilon Vitória Incaper 8142”, localizada no Instituto Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, realizando a determinação de umidade do solo por quatro métodos e a estimativa da evapotranspiração de referência por duas metodologias, realizando a reposição hídrica na lavoura com o cálculo da irrigação real necessária utilizando os dados de umidade do solo detectados pelo TDR e pelo sensor UFES, associado a RSSF. A metodologia da estufa apresentou desempenho próximo ao método da TDR, superestimando a umidade do solo em 0,68%, enquanto o forno elétrico demonstrou resultados próximos aos observados pelo sensor UFES, subestimando os valores de umidade do solo em 0,58%. Há menor diferença na estimativa da quantidade de água a ser aplicada em um hectare entre a estufa e o TDR, do que quando é feita a comparação da estufa com o sensor UFES. A estimativa de evapotranspiração por Hargreaves-Samani subestimou a irrigação real necessária em 0,46 milímetros comparada ao TDR, apresentando coeficiente K_s de 0,9698 nessa relação, enquanto

Penman-Monteith superestimou a irrigação em 2,17 milímetros em relação ao sensor UFES, com coeficiente Ks de 1,1669.

Palavras-chave: TDR, evapotranspiração, sensor, cafeeicultura, termogravimétrico.

GENERAL ABSTRACT

PINHEIRO, André Alves, M. Sc., Federal University of Espírito Santo, February, 2019. **Irrigation management using soil moisture and climatic data in conilon coffee plantation.** Advisor: Prof. D. Sc. Edvaldo Fialho dos Reis. Co-advisors: Prof. D. Sc. Giovanni de Oliveira Garcia; Prof. D. Sc. Hélder de Amorim Mendes.

The development and use of irrigation technology has provided benefits to the productive system and avoided possible losses with decreasing water availability, However, problems are observed in most current irrigation projects, such as water waste, rising production costs and contamination of water bodies, resulting from improper system management. The correct management of irrigation can be done through climatic data or knowledge of soil water content. In the first chapter of this dissertation we aimed to compare the methodologies of the time domain reflectometry (TDR) and UFES sensor with the stove and electric oven in the determination of soil moisture and in the replacement of water, and in the second chapter was aimed at soil water replacement determined by the TDR and UFES sensor, comparing them with the estimation of evapotranspiration by the Penman-Monteith-FAO and Hargreaves-Samani methods. The work was carried out in the adult field of *Coffea canephora*, "Conilon Vitória Incaper 8142" variety, located at the Federal Institute of Espírito Santo - Campus de Alegre, performing soil moisture determination by four methods and the estimation of reference evapotranspiration by two methodologies, performing the water replenishment in the crop with the calculation of the necessary irrigation using the soil moisture data detected by the TDR and the UFES sensor, associated to WSN. The stove methodology showed close performance to the TDR method, overestimating the soil moisture by 0.68%, while the electric oven showed results close to those observed by the UFES sensor, underestimating the soil moisture values by 0.58%. There is less difference in the estimation of the amount of water to be applied in a hectare between the stove and the TDR than when comparing the stove with the UFES sensor. The estimate of evapotranspiration by Hargreaves-Samani underestimated the actual irrigation required at 0.46 mm compared to TDR, with a Ks coefficient of 0.9698 in this relation, while Penman-Monteith overestimated the irrigation by 2.17 mm in relation to the UFES sensor, with a Ks coefficient of 1.1669.

Keywords: TDR, evapotranspiration, sensor, coffee cultivation, thermogravimetric.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Densidade do solo e valores de umidade referentes a capacidade de campo e ponto de murcha permanente de cada estação da rede de sensores sem fio e a média da área.....	29
Tabela 2. Equação de calibração de cada sensor de resistência a corrente elétrica instalado nos nós sensores da rede de sensores sem fio.....	29
Tabela 3. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico e sensor UFES com a metodologia do TDR, durante o período de irrigação baseada no TDR.....	33
Tabela 4. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico e TDR com a metodologia do sensor UFES, durante o período de irrigação baseada no sensor UFES.....	35
Tabela 5. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos valores de irrigação real necessária calculada com os dados de umidade obtidos pelos métodos da estufa, forno elétrico e sensor UFES com a metodologia do TDR, durante o período de irrigação baseada no TDR. ..	37
Tabela 6. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos valores de irrigação real necessária calculada com os dados de umidade obtidos pelos métodos da estufa, forno elétrico e TDR com a metodologia do sensor UFES, durante o período de irrigação baseada no sensor UFES.	39
Tabela 7. Estimativa dos valores de quantidade de irrigação real necessária (IRN) calculada a partir das metodologias de determinação da umidade do solo do forno elétrico, estufa, sensor UFES e TDR, para a área de um hectare, referente ao período de irrigação baseada no TDR e sensor UFES.....	40

CAPÍTULO II

Tabela 1. Densidade do solo e valores de umidade referentes a capacidade de campo e ponto de murcha permanente de cada estação da rede de sensores sem fio e a média da área.....	56
Tabela 2. Equação de calibração de cada sensor de resistência a corrente elétrica instalado nos nós sensores da rede de sensores sem fio.....	56
Tabela 3. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relativos à comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-Padrão FAO, com o método do TDR, no período de irrigação determinada pelos valores obtidos pelo TDR.....	60
Tabela 4. Comparação de estimativa da quantidade de água a ser irrigada em um hectare baseada no cálculo da irrigação real necessária com os dados de umidade do solo determinado pelo TDR e na estimativa da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.....	61
Tabela 5. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relativos à comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-Padrão FAO, com o método do sensor UFES, no período de irrigação determinada pelos valores obtidos pelo sensor UFES.....	63
Tabela 6. Comparação de estimativa da quantidade de água a ser irrigada em um hectare baseada no cálculo da irrigação real necessária com os dados de umidade do solo determinado pelo sensor UFES e na estimativa da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.	64

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Precipitação acumulada (PREC) e temperatura mínima (MÍN), média (MÉD) e máxima (MÁX), na estação meteorológica automática do INMET, em Alegre-ES, durante o período experimental.	27
Figura 2. Área experimental com a localização da Estação Central e das Estações 1, 2 e 3.....	28
Figura 3. Calibração do aparelho TDR 300 no solo experimental, com apresentação da equação de calibração e do coeficiente de determinação da regressão linear (R^2).....	30
Figura 4. Umidade do solo (%) determinada pelos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, nos eventos de irrigação baseados no TDR.....	33
Figura 5. Umidade do solo (%) determinada pelos métodos da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, nas avaliações realizadas durante a irrigação baseada no sensor UFES.....	35
Figura 6. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, calculada em função dos valores de umidade do solo determinados pelos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, para os eventos de irrigação realizados com base no método do TDR. ..	37
Figura 7. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, calculada em função dos valores de umidade do solo determinados pelos métodos da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, para os eventos de irrigação realizados com base no método do sensor UFES.....	39
Figura 8. Relação dos valores de umidade do solo entre os métodos TDR e sensor UFES e o método padrão da estufa durante os períodos de irrigação utilizando cada um destes, com apresentação do coeficiente K_s (coeficiente angular da equação da reta) e o valor de R^2 (coeficiente de determinação).	42
Figura 9. Relação da Irrigação Real Necessária (IRN) calculada com os dados provenientes da estufa e os métodos TDR e sensor UFES, durante os períodos de irrigação utilizando cada um destes, com apresentação do coeficiente K_s (coeficiente angular da equação da reta) e o valor de R^2 (coeficiente de determinação).....	42

CAPÍTULO II

Figura 1. Precipitação acumulada (PREC) e temperatura mínima (MÍN), média (MÉD) e máxima (MÁX), na estação meteorológica automática do INMET, em Alegre-ES, durante o período experimental.	54
Figura 2. Área experimental com a localização da Estação Central e das Estações 1, 2 e 3.....	55
Figura 3. Calibração do aparelho TDR 300 no solo experimental, com apresentação da equação de calibração e do coeficiente de determinação da regressão linear (R^2).	57
Figura 4. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, em função das metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência (Penman-Monteith e Hargreaves-Samani) e da metodologia de determinação da umidade do solo (TDR), referentes aos eventos de irrigação baseados nos dados de umidade determinados pelo TDR.	60
Figura 5. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, em função das metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência (Penman-Monteith e Hargreaves-Samani) e da metodologia de determinação da umidade do solo (Sensor UFES), referentes aos eventos de irrigação baseados nos dados de umidade determinados pelo sensor UFES.	63
Figura 6. Comparação entre a estimativa de evapotranspiração de referência (ET0) e a irrigação real necessária (IRN), em milímetros, calculada com os dados de umidade observados pelo método TDR, durante o período irrigado de acordo com TDR, com determinação do coeficiente Ks (coeficiente angular da equação da reta) e coeficiente R^2	65
Figura 7. Comparação entre a estimativa de evapotranspiração de referência (ET0) e a irrigação real necessária (IRN), em milímetros, calculada com os dados de umidade observados pelo método sensor UFES, durante o período irrigado de acordo com o sensor UFES, com determinação do coeficiente Ks (coeficiente angular da equação da reta) e coeficiente R^2	66

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	16
OBJETIVOS - CAPÍTULO 1	18
GERAIS	18
ESPECÍFICOS.....	18
OBJETIVOS - CAPÍTULO 2	18
GERAIS	18
ESPECÍFICOS.....	19
REFERÊNCIAS.....	20
CAPÍTULO I – COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E REALIZAÇÃO DE REPOSIÇÃO DE ÁGUA EM LAVOURA CAFEIEIRA	22
RESUMO.....	22
INTRODUÇÃO.....	23
MATERIAL E MÉTODOS	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS.....	45
CAPÍTULO II –MANEJO HÍDRICO POR TDR E SENSOR UFES COMPARADO COM ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	49
RESUMO.....	49
INTRODUÇÃO.....	50
MATERIAL E MÉTODOS	53
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS.....	70

INTRODUÇÃO GERAL

A tecnologia da irrigação tem sido cada vez mais utilizada em cultivos agrícolas, devido ao aumento da produtividade, melhoria no produto final, utilização de áreas outrora marginalizadas e diminuição da pressão da incorporação por novas áreas (FERNANDES et al., 2012; BONOMO et al., 2013; SERRA et al., 2013; DOHLER et al., 2016).

Para a cultura do cafeeiro, esta tecnologia tem se tornado mais significativa, aonde a prática racional da irrigação oferece um aumento na produtividade desses cultivos, independente da área de exploração, através do favorecimento da disponibilidade de nutrientes e da possibilidade de fertirrigação ou aplicação de defensivos (SILVA & REIS, 2017).

De acordo com Martins et al. (2007), o Estado do Espírito Santo possui cerca de 60 a 65% da área de cafeicultura irrigada do Brasil, sendo que mais de 50% desta área é ocupada pelo *Coffea canephora*, espécie característica de regiões com maiores níveis de temperatura e períodos de baixa precipitação entre os meses de abril a setembro.

Esta dependência das plantas à disponibilidade hídrica, é ocasionada pela alteração de diversos mecanismos dos vegetais ocasionada pela ocorrência de déficit deste recurso (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Com isso, a irrigação assume o papel de possibilitar uma agricultura menos arriscada e mais rentável (MANTOVANI et al., 2009), mas o foco desta prática deve ser o manejo da mesma, garantindo que exista responsabilidade no uso dos recursos hídricos, sabendo o momento, a forma e a quantidade correta de irrigar, baseado na capacidade de armazenamento de água no solo e no consumo hídrico das plantas (ROCHA NETO et al., 2015).

Atualmente, com o conhecimento da crescente demanda e dos conflitos entre os usos dos recursos hídricos, é exigido que exista um planejamento para que a utilização destes recursos ocorra de forma racional e otimizada (SILVA et al., 2015), confirmando a importância da execução de um manejo adequado da irrigação.

Para execução deste manejo supracitado, é necessário o conhecimento de variáveis referentes ao conteúdo de água no solo e ao consumo hídrico das plantas. A determinação da evapotranspiração das culturas é de grande interesse para auxiliar as estratégias de manejo de irrigação em função das condições climáticas de cada região (SALES et al., 2016) e o conhecimento da movimentação e do teor de água no solo é

necessário, já que o crescimento e o desenvolvimento dos vegetais está intrínseco a esta variável (KITIĆ & CRNOJEVIĆ -BENGIN, 2013).

Aliado a esta necessidade de conhecimento de variáveis relacionadas ao aspecto hídrico, a tecnologia de rede de sensores sem fio vem sendo difundida e se apresentado como alternativa significativa para auxiliar a execução do manejo da irrigação com sucesso (VELLIDIS et al., 2008), aumentando a eficiência no uso da água, como visto relatado por Oliveira et al. (2008), através da realização de coleta, processamento e transmissão dos dados em tempo real (GAJBHIYE & MAHAJAN, 2008).

Dentro desse contexto, verifica-se a necessidade de avaliar tecnologias e aprimorar conhecimentos acerca de métodos de determinação de umidade do solo, associados a rede de sensores sem fio, e estimativas de evapotranspiração que possibilitem um manejo correto da prática da irrigação, facilitando o processo de tomada de decisão por parte do usuário do sistema, relacionado a quando, como e quanto irrigar, promovendo um aumento na eficiência do uso dos recursos hídricos e colaborando para a sustentabilidade de cultivos agrícolas.

OBJETIVOS - CAPÍTULO 1

GERAIS

Comparar o desempenho da determinação da umidade do solo e da reposição da água no solo pela metodologia da reflectometria no domínio do tempo (TDR) com as metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES.

Comparar o desempenho da determinação da umidade do solo e da reposição da água no solo pela metodologia do sensor UFES com as metodologias da estufa, forno elétrico e TDR.

ESPECÍFICOS

Comparar os dados de umidade do solo utilizados como base para irrigação, determinados pelo TDR, com os valores desta mesma variável determinados pelas metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES.

Comparar os dados de umidade do solo utilizados como base para irrigação, determinados pelo sensor UFES, com os valores desta mesma variável determinados pelas metodologias da estufa, forno elétrico e TDR.

Comparar os valores de irrigação real necessária calculada a partir da umidade do solo detectada pelo TDR com as metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES.

Comparar os valores de irrigação real necessária calculada a partir da umidade do solo detectada pelo sensor UFES com as metodologias da estufa, forno elétrico e TDR.

Determinar o coeficiente da relação entre a metodologia padrão da estufa, na determinação da umidade do solo e no cálculo da quantidade de água a ser repostada, e a metodologia do TDR e sensor UFES.

OBJETIVOS - CAPÍTULO 2

GERAIS

Realizar a reposição de água em lavoura de *Coffea canephora*, através dos dados obtidos pelo método do TDR, comparando os valores com as estimativas de evapotranspiração por Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani.

Realizar a reposição de água em lavoura de *Coffea canephora*, através dos dados obtidos pelo método do sensor UFES, comparando os valores com as estimativas de evapotranspiração por Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani.

ESPECÍFICOS

Comparar a irrigação real necessária determinada pelo método do TDR com o consumo hídrico estimado pelos métodos de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani.

Comparar a irrigação real necessária determinada pelo método do sensor UFES com o consumo hídrico estimado pelos métodos de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani.

Determinar o coeficiente de relação entre as metodologias de estimativa de evapotranspiração, Penman Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani, e a irrigação real necessária calculada com os dados de umidade do solo oriundos dos métodos do TDR e sensor UFES.

REFERÊNCIAS

- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; SOUZA, J. M.; MAGIERO, M. Desenvolvimento vegetativo do cafeeiro Conilon submetido a diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 2, p. 157-169, 2013.
- DOHLER, R. E.; KLIPPER, A. H.; XAVIER, A. C. Efeito das mudanças climáticas na demanda de irrigação na cultura do café Conilon e do mamoeiro no Espírito Santo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 83-87, 2016.
- FERNANDES, A. L. T.; PARTELLI, F. L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A. A moderna cafeicultura dos Cerrados brasileiros, **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.
- GAJBHIYE, P. MAHAJAN, A. A survey of architecture and node deployment in wireless sensor network. In: **Applications of Digital Information and Web Technologies, 2008. ICADIWT 2008. First International Conference on the**. Ieee, 2008. p. 426-430.
- KITIĆ, G.; CRNOJEVIĆ-BENGIN, V. A Sensor for the Measurement of the Moisture of Undisturbed Soil Samples. **Sensors**, v. 13, n. 2, p. 1692-1705, 2013.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 355 p. 2009.
- MARTINS, C. C.; SOARES, A. A.; BUSATO, C.; REIS, E. F. Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bioscience Journal**, Uberlândia: v. 23, n. 2, p. 61-69, 2007.
- OLIVEIRA, A. D. S. **Avaliação do sensor de umidade TOPDEA no manejo da irrigação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. 71p.
- ROCHA NETO, O. C.; TEXEIRA, A. S. S.; BRAGA, A. P. S.; SANTOS, C. C.; LEÃO, R. A. O. Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 2, p. 266-279, 2015.
- SALES, R. A.; LOUZADA, J. M.; OLIVEIRA, E. C.; PINHEIRO, M. A. B.; SALES, R. A. Estimativa das necessidades hídricas do milho cultivado nas condições edafoclimáticas de São Mateus-ES. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 13 n. 23, p.598-609, 2016.

SERRA, E. L.; SCALCO, M. S.; GUIMARÃES, R. J.; COLOMBO, A.; MORAIS, A. R.; CARVALHO, C. H. M. Funções de produção do cafeeiro irrigado em diferentes densidades de plantio. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 157-165, 2013.

SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. S.; CARMO, F. F.; LÊDO, E. R. F.; SILVA FILHO, J. A. Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves-Samani no Estado do Ceará, Brasil. **Jornal Brasileiro de Engenharia e Biosistemas**, Tupã, v. 9, n. 2, p. 132-141, 2015.

SILVA, J. G. F. da; REIS, E. F. dos. Irrigação e Manejo da Água no Café Conilon. In: FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; FERRÃO, M. A. G.; MUNER, L. H. de. (Eds). *Café conilon*. 2 ed. Vitória, ES: Incaper, 2017. Cap. 15.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Piracicaba, Artmed, 2013. 820p.

VELLIDIS, G.; TUCKER, M.; PERRY, C.; KVIEN, C.; BEDNARZ, C. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 44-50, 2008.

CAPÍTULO I – COMPARAÇÃO DE METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E REALIZAÇÃO DE REPOSIÇÃO DE ÁGUA EM LAVOURA CAFEEIRA

RESUMO

A agricultura necessita de tecnologias e equipamentos para reduzir riscos e evitar prejuízos, como em casos de indisponibilidade hídrica utiliza-se a irrigação, a qual se baseia no fornecimento hídrico para atender a necessidade das culturas. Porém, há a necessidade de realização de um manejo racional desta prática, objetivando o consumo consciente dos recursos hídricos, podendo ser realizado a partir da determinação da umidade do solo, a qual é feita por diversos métodos. Objetivou-se com a realização deste estudo comparar o desempenho da metodologia do TDR, na determinação da umidade do solo e reposição de água, com as metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES, e comparar o desempenho do sensor UFES, na determinação da umidade do solo e reposição de água, com as metodologias da estufa, forno elétrico e TDR. Este experimento foi conduzido em lavoura *Coffea canephora*, variedade “Conilon Vitória Incaper 8142”, localizada no Instituto Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, durante o período de setembro de 2018 a janeiro de 2019, realizando a determinação da umidade do solo pelas metodologias do TDR, sensor UFES, estufa e forno elétrico. A reposição de água no solo foi realizada a partir da determinação da irrigação real necessária calculada com os dados de umidade do solo oriundos do TDR e do sensor UFES, em 10 eventos para cada método, totalizando 20 eventos neste experimento. A metodologia da estufa apresentou desempenho próximo ao método da estufa, superestimando a umidade do solo em 0,68% e diminuindo o valor de irrigação real necessária em 1,53 milímetros, enquanto o forno elétrico demonstrou resultados próximos aos observados pelo sensor UFES, subestimando os valores de umidade do solo em 0,58% e aumentando a irrigação real necessária em 1,29 milímetros. Há menor diferença na estimativa da quantidade de água a ser aplicada em um hectare entre a estufa e o TDR, do que quando é feita a comparação da estufa com o sensor UFES. Os valores de irrigação real necessária calculada com os dados da estufa são menores que os valores com os dados do TDR e maiores que os valores provenientes do sensor UFES.

Palavras-chave: irrigação, TDR, sensor resistivo, forno elétrico, manejo hídrico.

INTRODUÇÃO

Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a que apresenta maior dependência das condições ambientais, sendo a disponibilidade hídrica relevante neste cenário (JESUS JUNIOR et al., 2008), portanto, para contornar possíveis prejuízos no cultivo devido ao decréscimo da umidade do solo e possibilitar aumento na produtividade, através de um ganho de rentabilidade do sistema produtivo (NASCIMENTO et al., 2013), utiliza-se a prática da irrigação a qual consiste na utilização de técnicas e equipamentos para proporcionar o atendimento da necessidade hídrica das culturas.

O Estado do Espírito Santo, conhecido como grande produtor de grãos de café no Brasil, utiliza a tecnologia da irrigação em áreas de lavoura cafeeira para atingir tal destaque nacional (BONOMO et al., 2014), principalmente na região do Norte do referido Estado, aonde apresenta maiores níveis de déficit hídrico (PEZZOPANE et al., 2010).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (2017), são observados benefícios através do uso desta tecnologia, como a otimização do uso do solo e de insumos, aumento na produtividade em relação a cultivos de sequeiros, minimização de riscos meteorológicos e climáticos, regularização da oferta de produtos agrícolas e fomento à instalação de agroindústrias.

Para utilizar a irrigação com sucesso é necessário um correto manejo, porém este está sendo esquecido devido a limitação do foco dos projetos somente na engenharia do sistema (MANTOVANI et al., 2009), sendo necessário o uso do sistema de irrigação que visa a quantidade e o momento devido da suplementação hídrica (MAROUELLI, 2011).

A não realização de um manejo racional da irrigação pode levar a prejuízos ambientais, além do desperdício de água e elevação dos custos de produção, devido à lixiviação excessiva de nutrientes e de resíduos de agroquímicos, o que, conseqüentemente, leva à uma contaminação do lençol freático e corpos hídricos (VALENZUELA, 2009).

A maioria dos agricultores brasileiros que utilizam a irrigação não adotam práticas de manejo adequado da irrigação, com conseqüentes prejuízos econômicos e ambientais ocasionados pela baixa eficiência do sistema (MARTINS et al., 2007).

Sabendo desta problemática, a eficiência no uso da água se torna um grande objetivo a ser conquistado na agricultura brasileira, sendo dependente de uma boa assistência técnica, posse de tecnologias eficientes e informações coerentes sobre estas.

Para o entendimento relacionado à movimentação de água no solo e realização do manejo da irrigação é importante a determinação da umidade do solo (MIRANDA et al., 2001), podendo ser realizada por diversos métodos, como o termogravimétrico e os métodos não destrutivos, como os sensores de umidade, sonda de nêutrons, TDR, entre outros (MEDEIROS et al., 2007).

O método termogravimétrico padrão é realizado utilizando estufa elétrica, o qual apresenta alta precisão, porém é um método destrutivo e com limitação pelo tempo de 24 horas necessárias para a obtenção do resultado (SANTOS et al., 2006), como alternativa a este método surge a utilização de forno elétrico, sendo uma prática que proporciona benefícios como a redução de gastos e de tempo necessário para determinação da umidade do solo (BUSKE et al., 2014).

Os métodos não destrutivos, que utilizam de outras variáveis do solo para estimativa da umidade, necessitam de calibração para obtenção de bons resultados em sua utilização, porém são de grande interesse principalmente por necessitarem de menor mão-de-obra e pela visualização do resultado da medição em menor tempo (MEDEIROS et al., 2007).

Dentre essas tecnologias, destaca-se a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR), que apresenta boa exatidão e possibilidade de automatização dos dados (COELHO et al., 2006). A tecnologia do TDR foi considerada promissora a partir dos estudos realizados por Topp et al (1980), sendo os primeiros estudos brasileiros com esta metodologia realizados por Herrmann Júnior (1993) e Tommaselli & Bacchi (1995).

Porém esta técnica apresenta algumas deficiências como a falta de informações na literatura sobre a precisão das leituras em solos brasileiros e pelo custo do equipamento (EMBRAPA, 2004). Surge assim como alternativa ao custo do equipamento, a utilização de sensores de umidade do solo com menor custo de aquisição e que tenham desempenho próximo ao TDR.

Com avanço tecnológico recorrente, atualmente têm-se permitido o desenvolvimento de dispositivos de comunicação sem fio, proporcionando uma redução nos custos e no consumo de energia (AKYILDIZ et al., 2002). Considerando que esses dispositivos podem ser sensores de umidade do solo, pode-se pensar na possibilidade de utilização de um sistema de irrigação ligado por redes de comunicação sem fio, ou seja, redes de sensores sem fio (RSSF), que podem realizar a coleta e transmissão dos dados monitorados, auxiliando a tomada remota de decisões relacionadas à irrigação (GONÇALVES, 2016).

Em trabalho realizado por Guimarães et al. (2011), os autores constataram que um sistema de irrigação associado a uma rede de sensores sem fio pode conseguir conciliar precisão na aplicação da lâmina de água irrigada e baixo custo de implantação do mesmo. Desta forma, têm-se uma tecnologia que pode incrementar a prática da irrigação e proporcionar melhor níveis de eficiência nos cultivos, porém ainda há a necessidade de maiores informações e estudos sobre esta ferramenta, haja visto que é uma tecnologia recente.

Portanto, teve-se por objetivo neste trabalho avaliar o desempenho da metodologia do TDR na determinação da umidade do solo e na realização da reposição de água em lavoura de cafeeiro conilon, comparando com os métodos da estufa, forno elétrico e sensor UFES, e avaliar o desempenho do sensor UFES na determinação da umidade do solo e na realização da reposição de água em lavoura de cafeeiro conilon, comparando-o com as metodologias da estufa, forno elétrico e TDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área de lavoura de cafeeiro conilon, constituída pelos 13 clones da variedade “Conilon Vitória Incaper 8142”, plantada no ano de 2010 em um espaçamento de 3,0 x 1,1 metros, com práticas de poda programada realizada após as colheitas dos anos de 2016 e 2017, a qual está localizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Campus de Alegre, Fazenda Caixa D’Água, em Rive, distrito de Alegre-ES, sob latitude 20°25'51" S, longitude 41°27'24" W e altitude de 137 m.

Todas análises e procedimentos laboratoriais necessários para a condução da pesquisa foram realizadas no Laboratório de Recursos Hídricos do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES).

O período experimental compreende de setembro de 2018 a janeiro de 2019, sendo que durante este garantiu-se que os níveis fitossanitários e nutricionais da lavoura foram satisfatórios, não existindo limitação ao desenvolvimento das plantas.

A precipitação acumulada e as temperaturas mínimas, médias e máximas do período de estudo foram obtidas da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), localizada na área experimental do CCAUE-UFES (Figura 1).

A realização da reposição de água na lavoura foi realizada por aspersão convencional, com um sistema disposto em 18 metros entre linhas por 18 metros entre aspersores, sendo operado na pressão média de 30 mca.

Foi realizada a análise de uniformidade da aplicação de água através da metodologia de Christiansen (1942), calculando assim o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), utilizando a Equação 1, obtendo-se o valor de 83% e classificando este sistema em relação à uniformidade como “Bom”, de acordo com a literatura de Mantovani et al. (2009).

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n \times L_m} \right) \quad (1)$$

em que: CUC, Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, (%); L_i , lâmina obtida no coletor “i”, (mm); L_m , lâmina média de todas observações, (mm); e, n, número de coletores.

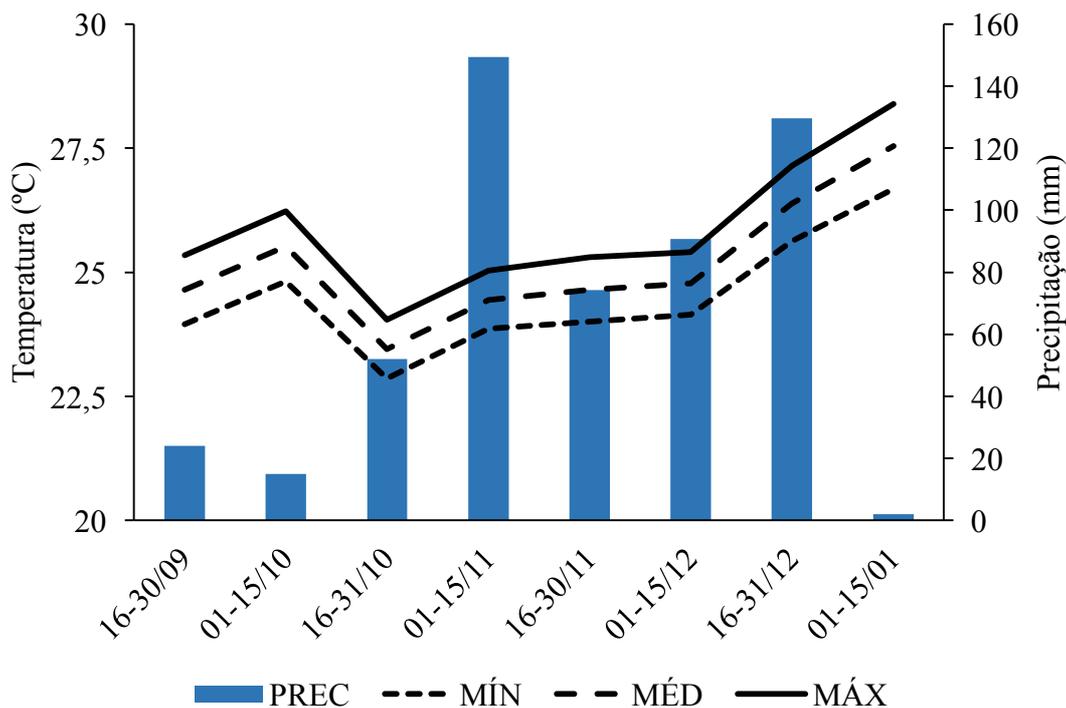


Figura 1. Precipitação acumulada (PREC) e temperatura mínima (MÍN), média (MÉD) e máxima (MÁX), na estação meteorológica automática do INMET, em Alegre-ES, durante o período experimental.

Juntamente com análise de uniformidade, foi realizada a quantificação da água aplicada e a água perdida por evaporação e arraste. Também foi realizada a medição da vazão dos aspersores com auxílio de um tubo flexível, recipiente com volume conhecido e cronômetro. Dessa forma, a intensidade de aplicação (Equação 2) e a eficiência do sistema na aplicação de água foram determinadas (Equação 3).

$$I_a = \frac{Q_a}{E_l \times E_{asp}} \times 3600 \quad (2)$$

em que: I_a , intensidade de aplicação, (mm/h); Q_a , vazão dos aspersores, (m^3/h); E_l , espaçamento entre linhas laterais, (m); E_{asp} , espaçamento entre aspersores, (m).

$$E_a = \frac{L_{col}}{L_{apl}} \times 100 \quad (3)$$

em que: E_a , eficiência de aplicação, (%); L_{col} , lâmina coletada pelos coletores, (mm); E , L_{apl} , lâmina aplicada pelos aspersores, (mm).

Utilizou-se para a condução do experimento uma rede de sensores sem fio (RSSF), elaborada e implantada por Hott (2018), a qual é constituída por um nó sorvedouro (Estação Central) e três nós sensores (Estação 1, Estação 2 e Estação 3), que são

estações localizadas em diferentes pontos da lavoura como demonstrado na Figura 2 e que possuem um sensor de resistência à corrente elétrica (Sensor UFES), instalados a 20 centímetros de profundidade e a 50 centímetros das plantas, utilizados para determinação indireta da umidade do solo.



Figura 2. Área experimental com a localização da Estação Central e das Estações 1, 2 e 3.

Fonte: Google Earth (2019).

Seguindo os procedimentos propostos pela metodologia da EMBRAPA (2011) e utilizando amostras deformadas, foram determinadas: a textura do solo como argilosa, através da análise granulométrica e do triângulo textural da EMBRAPA, a densidade do solo, de acordo com o método da proveta, e a umidade do solo, em base gravimétrica, referente à capacidade de campo (-10 kPa) e ao ponto de murcha permanente (-1500 kPa), cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

A rede de sensores sem fio foi responsável pela leitura dos sensores, processamento dos dados e transmissão dos mesmos através da tecnologia *Short Message Service*, conhecida como mensagem SMS, para o aparelho celular do usuário do sistema, determinando a umidade do solo através de uma equação de calibração para cada nó sensor, a qual também foi elaborada por Hott (2018) e encontram-se expostas na Tabela 2, as quais utilizam a leitura de cada sensor para calcular a umidade do solo no momento.

Tabela 1. Densidade do solo e valores de umidade referentes a capacidade de campo e ponto de murcha permanente de cada estação da rede de sensores sem fio e a média da área.

Estação	Densidade do Solo (kg/dm³)	Capacidade Campo (kg/kg)	Ponto de Murcha Permanente (kg/kg)
E1	1,13	0,270	0,137
E2	1,09	0,317	0,167
E3	1,14	0,279	0,144
Média da área	1,12	0,289	0,149

Tabela 2. Equação de calibração de cada sensor de resistência a corrente elétrica instalado nos nós sensores da rede de sensores sem fio.

Estação	Equação de calibração
E1	$U = 6,0947 + 0,0256 \times L_{\text{sensor}}$
E2	$U = 7,7391 + 0,0206 \times L_{\text{sensor}}$
E3	$U = 7,0529 + 0,0271 \times L_{\text{sensor}}$

Legenda: L_{sensor} : Leitura do sensor UFES.

A leitura dos sensores foi padronizada para as 16:00 horas, diariamente, e no dia da realização da reposição de água no solo, além da leitura dos sensores da RSSF, determinou-se a umidade do solo pelo aparelho TDR 300 e amostras de solo foram coletadas, com auxílio de sonda específica medindo 20 centímetros, para determinação da umidade pelo método da estufa e do forno elétrico, também no horário de 16:00 horas e na profundidade de 0 a 20 centímetros, sendo todas análises feitas em triplicata. Para a determinação da umidade do solo pelo aparelho TDR 300 foi utilizada uma equação de calibração deste método ao solo da área experimental (Equação 4), elaborando uma regressão linear entre as leituras do aparelho TDR com a umidade determinada pela estufa na mesma profundidade (Figura 2), para garantir que a utilização da equação padrão do aparelho não prejudique os valores de umidade da real situação do solo.

$$U = 6,5202 + 0,5849 \times U_{\text{TDR}} \quad (4)$$

em que: U, umidade do solo, (%); e, U_{TDR} , umidade observada pelo aparelho TDR 300, (%).

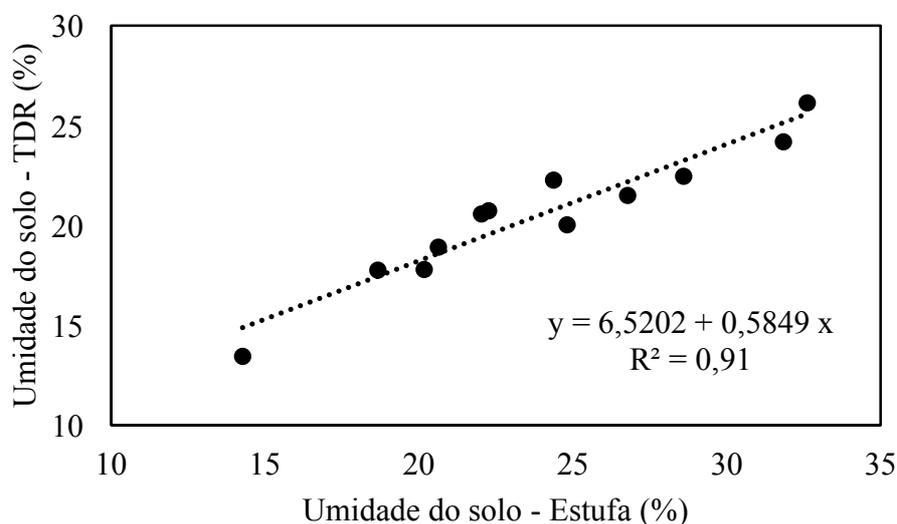


Figura 3. Calibração do aparelho TDR 300 no solo experimental, com apresentação da equação de calibração e do coeficiente de determinação da regressão linear (R^2)

As amostras de solo coletadas foram levadas ao laboratório e determinou-se a massa úmida de cada uma antes de se encaminharem para seu respectivo método de determinação da umidade do solo. O método padrão da estufa utilizou um aparelho de circulação forçada de ar, onde as amostras ficaram por 24 horas a uma temperatura de 105 °C. No método do forno elétrico utilizou-se um aparelho de 1000 watts e as amostras, em média com 50 gramas de solo, ficaram por 30 minutos no aparelho. Após o tempo devido de cada método, foi determinado a massa seca das amostras e determinou-se a umidade através da Equação 5.

$$U = \frac{M_{\text{su}} - M_{\text{ss}}}{M_{\text{ss}}} \times 100 \quad (5)$$

em que: U, umidade do solo, (%); M_{su} , massa de solo úmido, (g); e, M_{ss} , massa de solo seco, (g).

A reposição de água no solo foi realizada a cada 3 dias, quando não teve ocorrência de chuvas durante estes dias, utilizando a média dos valores de umidade atual do solo determinada pelo aparelho TDR 300 no dia, em 10 repetições (1º ao 10º evento de

irrigação) e, posteriormente, a média da umidade calculada pelos sensores UFES no dia, em 10 repetições (11º ao 20º evento de irrigação), totalizando 20 eventos nesta pesquisa, possibilitando a visualização de possíveis consequências no manejo de acordo com cada método base para a realização da irrigação. A profundidade efetiva das raízes (Z) foi determinada como 20 centímetros e utilizou-se os valores médios da área das variáveis umidade na capacidade de campo (U_{cc}) e densidade do solo (D_s), expostos na Tabela 1.

Utilizou-se a metodologia proposta por Bernardo et al. (2009), para determinar a Irrigação Real Necessária (Equação 6), Irrigação Total Necessária (Equação 7) e Tempo de Aplicação (Equação 8), auxiliando na execução do manejo na lavoura.

$$IRN = \frac{U_{cc} - U_a}{10} \times D_s \times Z \quad (6)$$

em que: IRN, irrigação real necessária, (mm); U_{cc} , Umidade na capacidade de campo, (%); U_a , umidade atual do solo determinada pelo TDR ou sensor UFES, (%); D_s , densidade do solo, (kg/dm^3); e, Z, profundidade efetiva das raízes, (cm).

$$ITN = \frac{IRN}{E_a} \quad (7)$$

em que: ITN, irrigação total necessária, (mm); IRN, irrigação real necessária, (mm); e, E_a , eficiência de aplicação, em decimal.

$$TA = \frac{ITN}{I_a} \quad (8)$$

em que: TA, tempo de aplicação, (h); ITN, irrigação total necessária, (mm); e, I_a , intensidade de aplicação (mm/h).

Avaliou-se neste experimento o desempenho das metodologias do TDR e sensor UFES na determinação da umidade do solo e no cálculo da quantidade de água a ser repostada no solo, comparando-os com as metodologias da estufa e forno elétrico.

Para análise dos dados obtidos utilizou-se as ferramentas estatísticas: Coeficiente de correlação de Pearson (r), viés (BIAS) para o erro sistemático, erro médio absoluto percentual (EMAP), calculados pelas Equações 9, 10 e 11, respectivamente. Os procedimentos estatísticos foram realizados através da utilização do software R (R core team, 2016). Também se analisou o comportamento dos dados pela determinação do coeficiente de relação entre o estimado e o observado (K_s), sendo o coeficiente angular (β_1) da reta, definida pela regressão linear, a qual tem seu início da reta na origem do

plano cartesiano, ou seja, o coeficiente linear (β_0) é nulo (Equação 12) (TOLEDO & OVALLE, 2008).

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

$$\text{Bias} = n_d^{-1} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (10)$$

$$\text{EMAP} = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \times 100 \quad (11)$$

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n E_i O_i}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \quad (12)$$

em que: E_i , valores estimados; O_i , valores observados; n , número de observações; e , n_d , número de pares dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentados os dados das determinações da umidade do solo pelos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, durante o período de realização da irrigação a partir dos dados obtidos pelo aparelho TDR 300, e na Tabela 3 apresenta-se as comparações dos dados de umidade do solo com o método referencial deste período (TDR), com a apresentação de índices estatísticos.

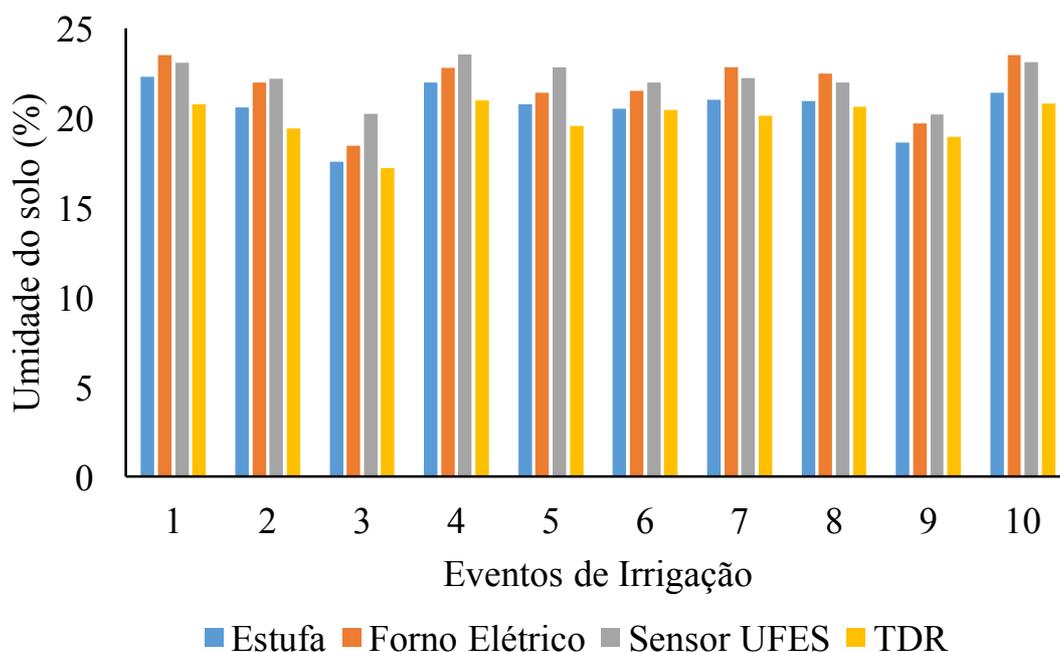


Figura 4. Umidade do solo (%) determinada pelos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, nos eventos de irrigação baseados no TDR.

Tabela 3. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico e sensor UFES com a metodologia do TDR, durante o período de irrigação baseada no TDR.

Métodos	Bias (% de umidade do solo)	EMAP (%)	r
Estufa	- 0,68	3,73	0,93
Forno Elétrico	- 1,93	9,65	0,92
Sensor UFES	- 2,26	11,45	0,82

É observado na Figura 4 e na Tabela 3 que as metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES superestimaram a umidade do solo em relação aos dados obtidos pelo TDR. O TDR subestimou a percentagem de umidade do solo, em 0,68%, quando comparada a metodologia da estufa, de acordo com o índice Bias, sendo que essa mesma relação para os métodos do forno elétrico e do sensor UFES foi de 1,93% e 2,26%, respectivamente.

Em relação ao erro médio absoluto percentual entre as metodologias e o TDR, o menor erro foi encontrado na comparação da estufa com o TDR, 3,73%, seguido pelo forno elétrico, 9,65%, e sensor UFES, 11,45% de diferença para a medição da umidade do solo realizada com TDR.

Os dados obtidos pelas metodologias da estufa e forno elétrico apresentaram correlação (r) quase perfeita com os dados provenientes do TDR, 0,93 e 0,92, respectivamente, enquanto com o sensor UFES a correlação é classificada como muito alta, de acordo com a literatura de Cunha et al. (2013)

O comportamento da metodologia do TDR de apresentar menores valores de umidade do solo do que o calculado a partir dos dados observados na estufa foi constatado em 90% dos eventos (Figura 4), resultados estes corroborados pelas pesquisas realizadas por Nunes et al. (2015) e Lacerda (2005). Estes resultados encontrados podem ser explicados pelo comportamento da curva de calibração do aparelho TDR 300 neste solo, a qual apresenta diferenças em relação ao método da estufa. Mesmo com as diferenças observadas, a relação da estufa com o TDR foi a que apresentou maior precisão e exatidão entre os resultados.

Os dados mais discrepantes foram observados com o forno elétrico e, principalmente, com o sensor UFES. Buske et al. (2014) relataram a característica do forno elétrico, como fonte de aquecimento para determinar a umidade do solo, de superestimar esta variável quando comparado ao método da estufa, confirmando o observado nesta pesquisa e evidenciando sua diferença com o TDR.

A Figura 5 e a Tabela 4 demonstram os dados de umidade do solo e suas respectivas comparações, determinados pelas metodologias da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, no período de irrigação realizada com base na umidade do solo determinado pelo sensor UFES.

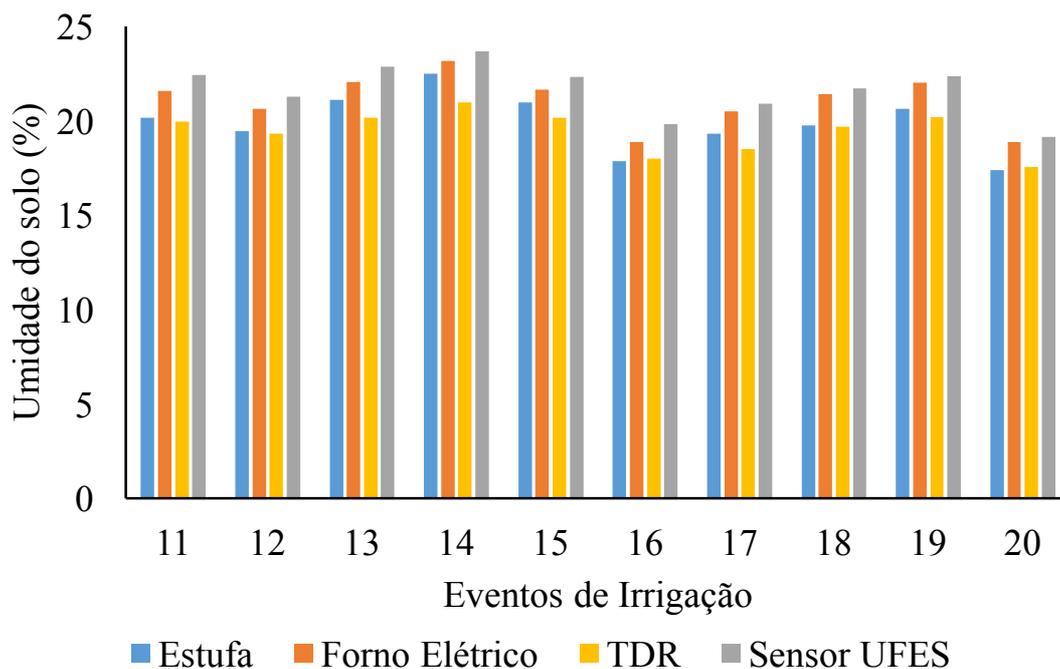


Figura 5. Umidade do solo (%) determinada pelos métodos da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, nas avaliações realizadas durante a irrigação baseada no sensor UFES.

Tabela 4. Biais, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico e TDR com a metodologia do sensor UFES, durante o período de irrigação baseada no sensor UFES.

Métodos	Bias (% de umidade do solo)	EMAP (%)	r
Estufa	1,74	8,11	0,98
Forno Elétrico	0,58	2,66	0,98
TDR	2,20	10,11	0,98

Nota-se na Figura 2 que as metodologias da estufa, forno elétrico e TDR subestimaram a umidade do solo em relação aos dados do sensor UFES em todos eventos de irrigação. Este comportamento do sensor UFES em apresentar os maiores valores de umidade do solo também foi relatado por Hott (2018), o que pode ser relacionado com a fácil

variação da corrente elétrica do solo devido a diversos fatores, como a concentração de íons, fator este determinante para quantificação da umidade do solo por este método.

Observa-se na Tabela 4 que todas metodologias apresentaram o mesmo alto valor de correlação com os dados do sensor UFES ($r=0,98$) e o índice Bias da relação entre os dados de umidade do solo determinados pelas diferentes metodologias e o determinado pelo sensor UFES variou de 0,58% a 2,20%, sendo que a maior variabilidade encontrada foi com o TDR, chegando a um erro médio absoluto percentual de 10,11%, como já visto na Tabela 3, e a menor diferença foi observada com o forno elétrico, na qual o sensor UFES determinou a umidade do solo 0,58% a mais que o forno elétrico.

A relação de maior proximidade entre os dados oriundos do sensor UFES e forno elétrico, com EMAP de apenas 2,66%, pode ser explicado pela característica particular das duas metodologias em superestimar a umidade do solo e também pode ser relacionado ao tempo utilizado para secagem das amostras no forno elétrico, podendo este ter sido ineficiente para retirada de toda massa de água do solo.

Na comparação entre a estufa e o sensor UFES, o índice Bias demonstrou que a umidade do solo medida pela estufa é 1,74% menor que o determinado pelo sensor UFES, corroborando com os resultados encontrados por Neto et al. (2016), totalizando um erro médio percentual de 8,11%.

Os erros observados entre as metodologias da estufa e TDR com o sensor UFES se tornam insignificativos a nível de campo, pois a aquisição e a utilização destas metodologias apresentam maiores empecilhos para o manejo da irrigação do que o sensor UFES.

A utilização de sensores resistivos para determinação da umidade do solo de forma satisfatória, como visto nesta pesquisa, também foi relatada por Figueiredo et al. (2018), obtendo resultados constantes e próximos do que se espera teoricamente, também utilizando equipamentos de baixo custo.

A Figura 6 apresenta a variação dos valores de irrigação real necessária calculados utilizando os dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, em diferentes eventos de irrigação, durante o período de utilização dos dados do TDR para o manejo hídrico. A comparação dos dados calculados pelas metodologias citadas acima com o método de referência no período, TDR, é realizada através de índices estatísticos e exposta na Tabela 5.

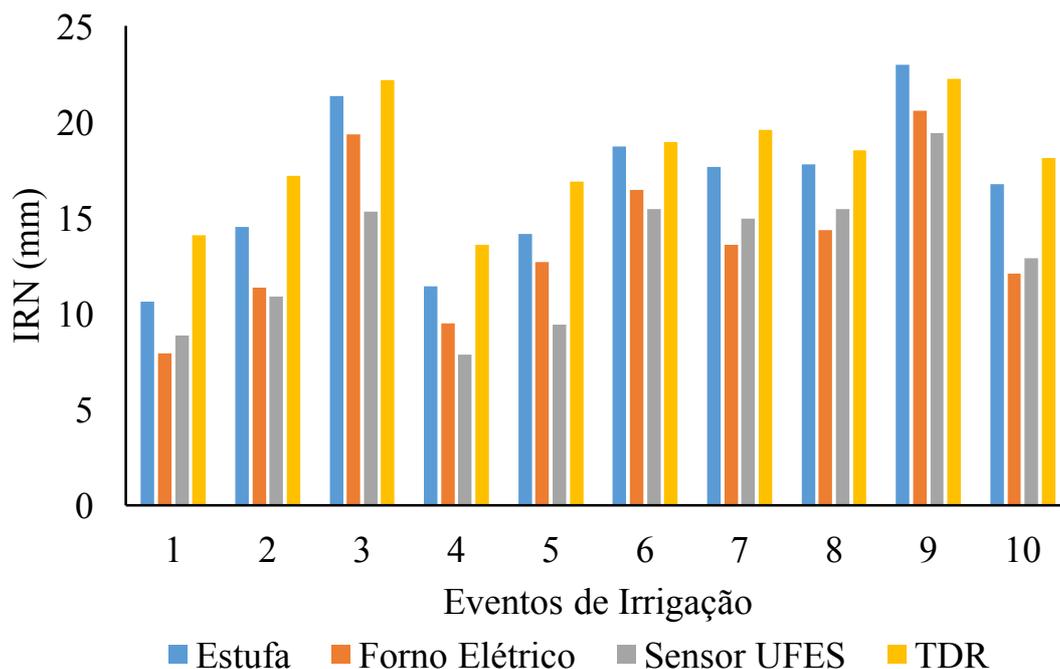


Figura 6. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, calculada em função dos valores de umidade do solo determinados pelos métodos da estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, para os eventos de irrigação realizados com base no método do TDR.

Tabela 5. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos valores de irrigação real necessária calculada com os dados de umidade obtidos pelos métodos da estufa, forno elétrico e sensor UFES com a metodologia do TDR, durante o período de irrigação baseada no TDR.

Métodos	Bias (mm)	EMAP (%)	r
Estufa	1,53	10,18	0,98
Forno Elétrico	4,35	25,29	0,94
Sensor UFES	5,09	29,16	0,91

Observa-se que as metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES determinaram menores valores de irrigação real necessária quando comparadas ao TDR durante os eventos de irrigação (Figura 6), sendo que esta diferença pode ser constatada pelo índice Bias apresentado na Tabela 5, o qual demonstra que o TDR calculou uma lâmina superior em 1,53 milímetros para a estufa, 4,35 milímetros para o forno elétrico e 5,09 milímetros para o sensor UFES, sendo que para todas as metodologias a correlação dos

dados com o TDR é classificada como quase perfeita (Cunha et al., 2013), demonstrando um grau muito forte de relação entre os referidos dados.

Como os dados de irrigação real necessária são determinados de acordo com a umidade do solo obtida por cada método, nota-se, novamente, uma relação de maior proximidade entre os dados da metodologia da estufa com o TDR, com um erro médio absoluto de 10,18%, ou seja, a irrigação real necessária calculada pela metodologia da estufa é, em média, 10,18% menor que o determinado com os dados obtidos pelo TDR.

Além das particularidades da metodologia do TDR, como a possibilidade de interferência na constante dielétrica do solo, e conseqüentemente, na determinação da umidade do mesmo, essa variação ainda se deve à curva de calibração deste aparelho no solo, o que pode ser ajustado com maiores repetições de amostragens e análises.

As metodologias do forno elétrico e sensor UFES tiveram maior diferença nos resultados comparados com os dados provenientes do TDR, com valores na ordem de 25,29% e 29,16% de erro médio absoluto, respectivamente, evidenciando novamente a maior diferença entre essas metodologias e o TDR, como já havia sido observado na análise da determinação da umidade do solo.

Observa-se na Figura 7 e na Tabela 6, a variação dos valores de irrigação real necessária determinados com os dados de umidade do solo provenientes dos métodos da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, no período de irrigações baseadas no sensor UFES, com suas respectivas comparações utilizando índices estatísticos.

Em geral, a irrigação real necessária neste período (Figura 7) teve valores maiores já que nestes meses (Dezembro e Janeiro) foram observados altos valores de temperatura e baixos índices de precipitação, principalmente no mês de janeiro, como pode ser verificado na Figura 1.

Como a determinação da lâmina de água a ser aplicada no solo, ou seja, a irrigação real necessária, é feita utilizando a umidade do solo, há uma relação, inversamente proporcional, de consequência entre essas duas variáveis, como pode ser notado para a metodologia do sensor UFES, a qual apresentou os maiores valores de umidade do solo (Figura 5) e, na Figura 7, todas metodologias determinaram maiores valores de irrigação real necessária do que o sensor UFES, com os dados apresentando alto grau de relação linear positiva ($r=0,98$), indicando baixa variabilidade entre essas metodologias (Tabela 6).

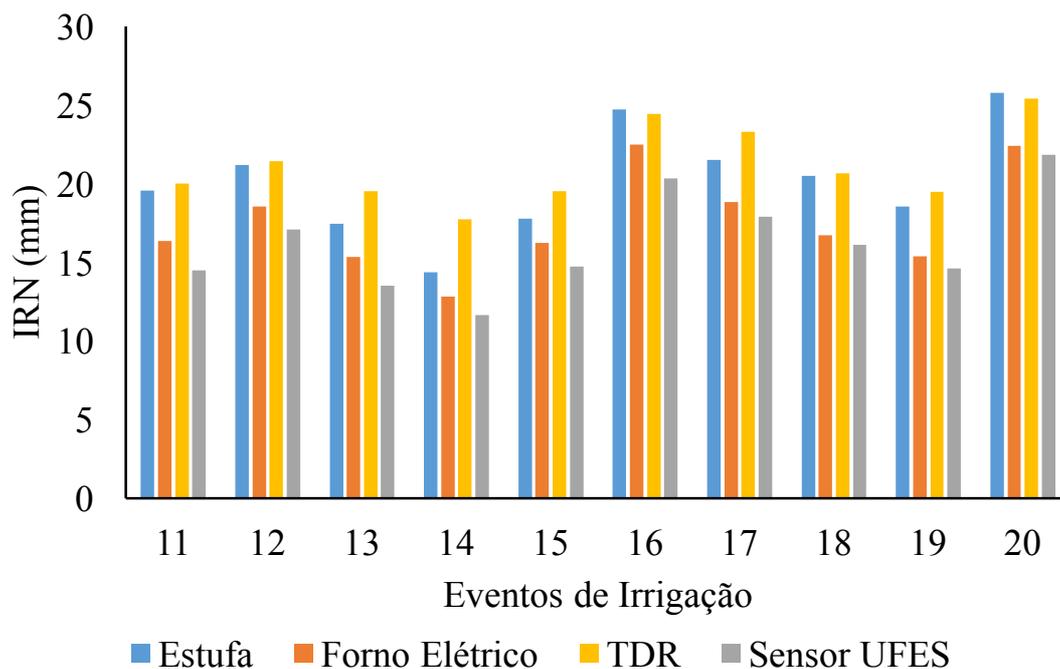


Figura 7. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, calculada em função dos valores de umidade do solo determinados pelos métodos da estufa, forno elétrico, TDR e sensor UFES, para os eventos de irrigação realizados com base no método do sensor UFES.

Tabela 6. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relacionados à comparação dos valores de irrigação real necessária calculada com os dados de umidade obtidos pelos métodos da estufa, forno elétrico e TDR com a metodologia do sensor UFES, durante o período de irrigação baseada no sensor UFES.

Métodos	Bias (mm)	EMAP (%)	r
Estufa	- 3,91	24,59	0,98
Forno Elétrico	- 1,29	8,31	0,98
TDR	- 4,93	32,14	0,98

Pela proximidade dos dados de umidade do solo do forno elétrico com o sensor UFES, devido as características de consequência similar dos dois métodos, os resultados de IRN entre essas metodologias também apresentaram menor diferença, com o sensor UFES determinando uma lâmina de irrigação menor em 1,29 milímetros do que o forno

elétrico, com um erro médio de 8,31%, valores que podem ser considerados insignificantes, já que esta variação é passível de ocorrência em condições de campo.

As relações entre as metodologias da estufa e TDR com o sensor UFES, na análise dos dados de irrigação real necessária, apresentaram as maiores amplitudes de erros, com a estufa e o TDR superestimando a quantidade de IRN comparado ao sensor UFES, com valores de EMAP de 24,59% e 32,14%, respectivamente. Observa-se esse mesmo comportamento, com a maior diferença relacionado ao TDR, no índice Bias, o qual demonstra que a lâmina de irrigação calculado pelo sensor UFES apresentou valores inferiores na ordem de 3,91 com a estufa e 4,93 com o TDR.

Com a determinação da umidade do solo pela estufa, forno elétrico, sensor UFES e TDR, e em consequência do manejo realizado nos eventos de irrigação baseados no TDR e no sensor UFES, realizou-se a estimativa da quantidade de água a ser irrigada em um hectare com cada metodologia, objetivando a apresentação da diferença de valores entre esses métodos, cujos resultados estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7. Estimativa dos valores de quantidade de irrigação real necessária (IRN) calculada a partir das metodologias de determinação da umidade do solo do forno elétrico, estufa, sensor UFES e TDR, para a área de um hectare, referente ao período de irrigação baseada no TDR e sensor UFES.

Métodos	Irrigação Real Necessária (m³/ha)	
	Período baseado no TDR	Período baseado no sensor UFES
Estufa	1.659,20	2.012,51
Forno Elétrico	1.377,46	1.750,80
Sensor UFES	1.304,07	1.621,62
TDR	1.812,71	2.114,32

Observa-se o mesmo comportamento entre os dois períodos, com os valores de IRN em ordem crescente para as metodologias do sensor UFES, forno elétrico, estufa e TDR.

No período de irrigação baseada no TDR, essa metodologia teve estimativa de irrigação de 1.812,71 metros cúbicos de água em um hectare, já as metodologias da estufa, forno

elétrico e sensor UFES apresentaram valores menores, na ordem de 8,47%, 24,01% e 28,06% a menos, respectivamente.

Nos eventos de irrigação baseados nos dados oriundos do sensor UFES, estimou-se para esta metodologia apenas 1.621,62 metros cúbicos para um hectare, com todas as outras metodologias apresentando valores superiores. O forno elétrico superestimou essa quantidade em 7,97%, estufa em 24,10% e TDR em 30,38%.

Há uma diferença na irrigação real necessária entre os dois períodos, sendo o período baseado no sensor UFES com maiores valores, o que pode ter ocorrido devido à época do ano, a qual apresentou maiores valores de temperatura (Figura 1), aumentando assim o consumo hídrico das plantas, ou pela baixa quantidade de água aplicada no solo, já que a irrigação foi baseada na metodologia que determinou menores valores, mantendo a umidade do solo em menores níveis e proporcionando maiores valores na estimativa da irrigação real necessária.

Pode-se observar um menor consumo hídrico com a utilização do sensor UFES e o maior com o TDR, evidenciando o observado nas Figuras 6 e 7. Há a necessidade do conhecimento da real situação das plantas com a execução do manejo da irrigação com cada uma dessas metodologias, para verificar se tem possibilidade de integração da redução da quantidade de água aplicada e da manutenção de um ótimo desenvolvimento das plantas, sem ocorrência de restrição hídrica.

Os comportamentos dos valores de umidade do solo e da irrigação real necessária, determinados pelos métodos do TDR e com o sensor UFES, durante os respectivos períodos de irrigação baseada em cada método, comparados com os valores das mesmas variáveis calculados a partir da pesagem das amostras após o processo realizado em estufa, são apresentados na Figura 5 e 6.

A partir da metodologia utilizada, a qual a linha de tendência da reta é iniciada na origem dos eixos, é gerado o coeficiente de cada método (K_s) sendo igual ao coeficiente angular da equação originada neste processo.

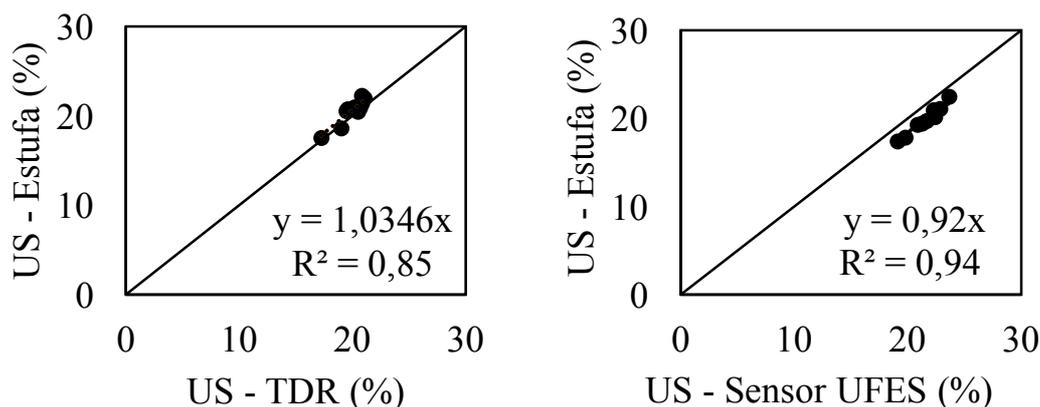


Figura 8. Relação dos valores de umidade do solo entre os métodos TDR e sensor UFES e o método padrão da estufa durante os períodos de irrigação utilizando cada um destes, com apresentação do coeficiente K_s (coeficiente angular da equação da reta) e o valor de R^2 (coeficiente de determinação).

Legenda: US: umidade do solo; y: umidade do solo estimada; e, x: umidade do solo observada pelo método de referência.

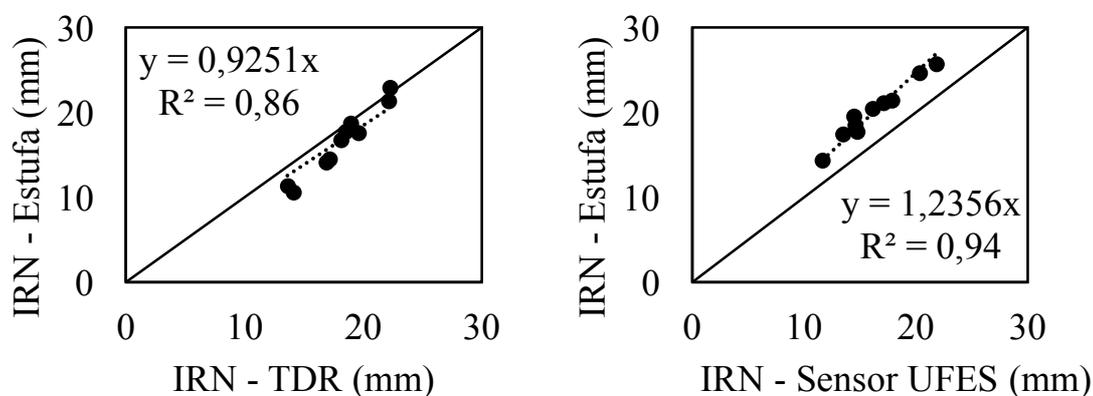


Figura 9. Relação da Irrigação Real Necessária (IRN) calculada com os dados provenientes da estufa e os métodos TDR e sensor UFES, durante os períodos de irrigação utilizando cada um destes, com apresentação do coeficiente K_s (coeficiente angular da equação da reta) e o valor de R^2 (coeficiente de determinação).

Legenda: IRN: Irrigação Real Necessária; y: consumo hídrico estimado; e, x: consumo hídrico observado pelo método de referência.

Pode-se observar que o coeficiente K_s demonstra o comportamento da estufa, em superestimar a umidade do solo em relação ao TDR, em 3,46%, e subestimar em relação ao sensor UFES, em 8% (Figura 8).

No entanto, é notável na Figura 69 que a situação se inverte, o cálculo da irrigação real necessária a partir dos dados de umidade provenientes da estufa, diminuiu a quantidade de água a ser repostada em 7,49% do calculado pelo TDR, no período em que o TDR era o método referencial, e aumentou a quantidade de água a ser repostada em 23,56% do resultado obtido pelo cálculo considerando o sensor UFES como o método de referência.

O modelo de relação entre a estufa e o sensor UFES é o mais explicativo, com valores do índice de concordância da regressão linear de 0,94 nos dois casos acima, demonstrando grau de relação quase perfeita entre as variáveis (Cunha et al., 2013). Já na comparação dos dados da estufa com o TDR, este mesmo índice foi de 0,85 e 0,86, nas Figuras 8 e 9, respectivamente, ou seja, o modelo ajustado consegue explicar mais de 85% dos dados observados.

A relação do TDR com a estufa demonstra os bons resultados dessa metodologia, porém, analisando condições de campo e considerando que o manejo da irrigação é pouco realizado, a utilização do sensor UFES para auxiliar na determinação da irrigação real necessária pode ser satisfatória, já que apresenta uma diferença para a estufa que pode ser considerada insignificativa no campo, além da possibilidade de melhoria na utilização desta tecnologia e do baixo custo de implantação.

A utilização dos métodos do TDR e sensor UFES, mesmo com suas diferenças com as outras metodologias, para cálculo da quantidade de água a ser repostada se deve aos demais benefícios proporcionados pelos mesmos, como a praticidade, acurácia, economia de tempo e facilidade na determinação de amostras na área de cultivo (GARZELLA et al., 2004; NUNES et al., 2015).

A calibração constante dos sensores UFES no solo em que se está trabalhando, através da correlação do sinal lido pelo sensor com a umidade do solo no mesmo momento (DORNELES & RUIVARO, 2012) é recomendada para garantia de bons resultados, já que autores, como Zazueta & Xin (1994) consideram que a calibração destes aparelhos apresentam certa instabilidade, devido a algumas características e propriedades do solo, o que proporcionam diferenças com a metodologia considerada como padrão, como também observado por Alcantud & Rosa (2017) e Pereira (2014).

CONCLUSÕES

- As metodologias da estufa, forno elétrico e sensor UFES superestimaram a umidade do solo em 0,68%, 1,93% e 2,26%, e diminuíram a irrigação real necessária em 1,53, 4,35 e 5,09 milímetros, quando comparados com o TDR, respectivamente.
- Os métodos do forno elétrico, estufa e TDR determinaram menores valores de umidade do solo em 0,58%, 1,74% e 2,20% e, conseqüentemente, superestimaram a irrigação real necessária na área em 1,29, 3,91 e 4,93 milímetros, quando comparados ao sensor UFES, respectivamente.
- A metodologia do TDR apresentou desempenho próximo ao método da estufa neste experimento, enquanto o sensor UFES demonstrou resultados próximos aos observados pelo forno elétrico
- A estimativa da quantidade de água a ser aplicada em um hectare pelo TDR foi superior em 153,51 metros cúbicos do que o estimado com os dados da estufa, durante período de realização da irrigação baseada nos dados do TDR.
- A realização de estimativa do valor da irrigação real necessária para um hectare com os dados de umidade do sensor UFES apresentou 390,89 metros cúbicos a menos do que a estimativa com os dados da estufa, durante os eventos de irrigação baseados no sensor UFES.
- A irrigação real necessária calculada pela estufa é 7,49% menor que a calculada pelo TDR e 23,56% maior que a calculada pelo sensor UFES.

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. **Computer Networks**, v. 38, n. 4, p. 393-422, 2002.
- ALCANTUD, M. B.; ROSA, P. R. Aplicação de redes de sensores sem fio na agricultura de precisão: uma reflexão teórica. **Colloquim Exactarum**, v. 9, n. Especial, p. 36-41, 2017.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A. & MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 625p.
- BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PEZZOPANE, J. R. M.; SOUZA, J. M. Alternativas de manejo de água de irrigação em cultivos de conilon. **Coffee Science**, v. 9, p. 537-545, 2014.
- BUSKE, T. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; TORRES, R. R.; ROSSO, R. B.; BRAGA, F. de V. A. Determinação da umidade do solo por diferentes fontes de aquecimento. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 2, p. 315-325, 2014.
- COELHO, E. F.; VELLAME, L. de M.; FILHO, M. A. C.; LEDO, C. A. da S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 23-30, 2006.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**: v. 4 - safra 2016/17 - n. 5 - quinto levantamento. Brasília: CONAB, 2017, 166 p.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**, Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. Bulletin, 670.
- CUNHA, P. C. R.; NASCIMENTO, J. L.; SILVEIRA, P. M.; ALVES JÚNIOR, J. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 114-122, 2013.
- DORNELES, J. G. L.; RUIVARO, C. Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH2O para manejo de irrigação. Vivências: **Revista Eletrônica de Extensão da URI**, v. 8, n. 14, p. 210-218, 2012.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.
- EMBRAPA. **Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos**, Documentos, Outubro, 2004, ISSN:1517-4786, São Carlos-SP.

FIGUEIREDO, H. B.; FERREIRA, B. O.; REZENDE, R. A. D.; CORRÊA, A. D. F.; COSTA, M. do S. S. Desenvolvimento de sensor resistivo para aplicação em sistema de controle automática de irrigação. In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA. **Anais...** Maceió, AL: 2018.

GARZELLA, T. C.; MOLIN, J. P. Avaliação em campo de um TDR para determinação da umidade. In: **12º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**. Resumos, Piracicaba, 2004.

GOOGLE EARTH-MAPAS. Disponível em: <http://mapas.google.com>. Acesso em: 20/02/2019.

GONÇALVES, C. R. **Unidade de controle e automação para gestão de sistemas de irrigação utilizando energia solar e rede IEEE 802.11**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Campinas, p. 80. 2016.

GUIMARÃES, V. G. **Automação e monitoramento remoto de sistemas de irrigação visando agricultura familiar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, p. 81, 2011.

HERRMANN JÚNIOR, P. S. P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de micro-ondas**. São Carlos: USP. 1993. 124 p. Dissertação de Mestrado.

HOTT, M. de O. Rede de sensores sem fio de baixo custo para o monitoramento de umidade do solo em cultivos irrigados. 2018. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias e Engenharia da UFES. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos – Estações Automáticas**. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTYxNw==. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019.

JESUS JUNIOR, W. C.; MORAES, W. B.; COSMI, F. C.; MORAES, W. B.; VALADARES JÚNIOR, R.; CECÍLIO, R. A.; ALVES, F. R.; VALE, F. X. R. Aquecimento global e o potencial impacto na agricultura. XX Congresso Brasileiro de Fruticultura. 54th Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture. **Anais**, 2008.

- LACERDA, R.D. Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 5, n. 1, 12p., 2005.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**, Viçosa: UFV, 355 p. 2009.
- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; SOUSA, V. F. Manejo da água de irrigação. In: Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF; Embrapa Informação Tecnológica, 2011. p. 156-232.
- MARTINS, C. C.; SOARES, A. A.; BUSATO, C.; REIS, E. F. Manejo da irrigação por gotejamento no cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 61-69, 2007.
- MEDEIROS, J. D. F.; CASTRO, N.; GOLDENFUM, J. A.; CLARKE, R. T. Calibração de sondas do TDR em um latossolo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 19-25, 2007.
- MIRANDA, L. N.; AZEVEDO, J. A.; MIRANDA, J. C. C.; GOMES, A. C. Produtividade do feijoeiro em resposta a adubação fosfatada e a regimes de irrigação em solos do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 4, p. 703-710, 2001.
- NASCIMENTO, P. S.; COSTA, B. R. S.; SILVA, J. A.; BASSOI, L. H. Aplicação dos conceitos geoestatísticos para o manejo da irrigação no vale do submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42., Fortaleza. **Anais...** Jaboticabal, SP: 2013.
- NETO, M. O. R.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C.; CRUZ, T. M. L.; NETO, O. C.; NUNES FILHO, J. L. N. Automação e manejo da irrigação na cultura da melancia. **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, n. 4, p. 93-104, 2016.
- NUNES, M. S.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRAGA, F. de V. A.; BRAGAGNOLO, J. Uso do TDR 300 na determinação da umidade volumétrica do solo para manejo da irrigação da soja safrinha. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 90, n. 3, p. 250-255, 2015.
- PEREIRA, F. N. de S. Rede de sensores sem fio para fins de manejo da irrigação. 2014. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF. Juazeiro-BA.
- PEZZOPANE, J. R. M.; CASTRO, F. da S.; PEZZOPANE, J. E. M.; BONOMO, R.; SARAIVA, G. Zoneamento de risco climático para a cultura do café conilon no Estado do Espírito Santo. **Revista Ciência Agronômica**. v. 41, n. 03, p. 341-348, 2010.

- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em 20/11/2018.
- SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, A. S. de; VELLAME, L. M.; BRANDÃO, F. J. C. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade de solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006.
- TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de reflectometria de microondas para dois solos paulistas típicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995. **Anais...** Viçosa: UFV, 1995. v.1, p. 24-26.
- TOLEDO, L. G.; OVALLE, I. I. **Estatística básica**. 2 ed. São Paulo: Ed. Atlas S. A., 2008.
- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v. 16, p. 574-582, 1980.
- VALENZUELA, J. C. **Agro-environmental evaluation of irrigation land I**. Water use in Bardenas irrigation district (Spain). *Agricultural Water Management*, v. 96, p. 179-187, 2009.
- ZAZUETA, F. S.; XIN, J. **Soil moisture sensors**. University of Florida, 1994. Disponível em: <http://www.p2pays.org/ref/08/0797.pdf>.

CAPÍTULO II –MANEJO HÍDRICO POR TDR E SENSOR UFES COMPARADO COM ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

RESUMO

Em cultivos agrícolas a deficiência hídrica é um fator limitante significativo, pois o decréscimo da disponibilidade de água afeta diversos fatores vitais das plantas, para contornar tal questão é utilizada a prática da irrigação. Contudo, a atenção na utilização desta tecnologia não deve ser apenas na engenharia do sistema, mas também no uso racional dos recursos hídricos. Sendo assim, o conhecimento da necessidade hídrica das culturas é de suma importância para realização deste manejo corretamente. Objetivou-se neste estudo avaliar a reposição hídrica a partir dos dados de umidade do solo, detectados pelas metodologias do TDR e sensor UFES, comparando-os com as estimativas da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani. A condução do presente trabalho foi realizada em lavoura adulta de *Coffea canephora*, variedade “Conilon Vitória Incaper 8142”, pertencente ao Instituto Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, onde se realizou a detecção da umidade do solo pelo aparelho TDR 300 e as leituras do sensor UFES, com a reposição de água calculada nos 10 primeiros eventos com os dados oriundos da metodologia do TDR e, posteriormente, em mais 10 eventos com os dados obtidos pelo sensor UFES. Utilizou-se os dados da estação meteorológica do INMET, localizada em Alegre, para cálculo da estimativa diária da evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani. As metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência Hargreaves-Samani e Penman-Monteith subestimaram a irrigação real necessária na comparação com os valores do TDR, em 0,46 e 1,49 milímetros, e superestimaram a mesma variável em 4,76 e 2,16 milímetros, quando comparadas aos resultados do sensor UFES, respectivamente. Os coeficientes K_s que demonstram maior proximidade entre as metodologias de estimativa da evapotranspiração para cada método utilizado como base para irrigação foram de 0,9698 (Hargreaves-Samani e TDR) e 1,1669 (Penman-Monteith e sensor UFES).

Palavras-chave: umidade do solo, irrigação, estufa, clima.

INTRODUÇÃO

A ocorrência de déficit hídrico no solo, mesmo em pequena quantidade, pode afetar o desenvolvimento e a produtividade das culturas, pois o mesmo apresenta influência direta sobre o metabolismo das plantas, afetando o transporte e translocação de solutos, a turgescência celular, a abertura e fechamento dos estômatos e a expansão do sistema radicular no solo (TAIZ & ZEIGER, 2013).

Com a expansão de cultivos agrícolas sob condições de sequeiro, a deficiência hídrica tem se tornado importante fator limitante ao crescimento vegetal, pois as plantas estão constantemente expostas a estresses abióticos, e assim, conseqüentemente, há prejuízos na produção das plantas (PARTELLI et al., 2013; PINTO et al., 2008), portanto, a utilização da irrigação é ferramenta importante para solucionar esta questão.

Sabendo da importância da irrigação para o estabelecimento de cultivos agrícolas, tem ocorrido um aumento na utilização da mesma no Brasil, por exemplo, em 1960, 462 mil hectares eram equipados para esta prática, já em 2014, estima-se que existiam mais de 6,1 milhões de hectares irrigados, sendo um aumento de aproximadamente 7,3% ao ano, de acordo com censo realizado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2016).

Com a viabilidade da implantação da irrigação no campo atualmente, esta tecnologia tem se tornado de suma importância para a produção em regiões que outrora eram marginalizadas por apresentarem déficit hídrico, proporcionando uma redução na necessidade de incorporação de novas áreas (ANA, 2015).

De acordo com Leite Júnior & Faria (2016), a irrigação é essencial para proporcionar maiores produções em lavoura cafeeiras, suprimindo a necessidade das plantas, sendo que quanto menor for o período de exposição das plantas à restrição hídrica, ocorrerá um aumento na possibilidade de altas produtividades.

Bernardo et al. (2009) explicam que para a execução de um projeto de irrigação com um manejo correto deve-se atentar para os aspectos sociais e ecológicos da região, onde se objetiva melhorar ou manter as características físicas, químicas e biológicas do solo, maximizar a produtividade, a eficiência do uso da água e a manutenção da umidade do solo em condições propícias ao bom desenvolvimento da cultura.

Nesta perspectiva, é de grande importância conhecer a necessidade hídrica real das plantas e gerenciar a quantidade de água aplicada nos cultivos agrícolas.

Para garantir o sucesso no aproveitamento da água pelas plantas através do manejo da irrigação é necessário a utilização de medidores da umidade do solo, possibilitando o monitoramento do teor de água no solo, visando evitar desperdícios deste recurso

(BAYER et al., 2013). Dentre os medidores de umidade já conhecidos, destaca-se a possibilidade de utilização de sensores de umidade de resistência a corrente elétrica, os quais apresentam características de baixo custo, simplicidade técnica e precisão na obtenção de dados. Este dispositivo se baseia na leitura da corrente elétrica aplicada no solo, a qual apresenta comportamento diferente com a variação do teor de água no meio, possibilitando a inferência sobre a umidade presente no solo (SANTOS et al., 2015).

Aliado a estes sensores de umidade do solo, tem-se tornado interessante a utilização de redes de sensores sem fio, as quais realizam transmissão *wireless* de ondas eletromagnéticas, ou seja, os pacotes de dados, no acompanhamento do manejo de culturas agrícolas, como no caso do monitoramento da umidade do solo, visando a obtenção remota de dados, facilitando a tomada de decisões, diminuindo custo operacional, possibilitando a instalação em áreas remotas, reduzindo consumo de energia, incrementando a produtividade, e, principalmente, promovendo uso racional da água, conforme descrito por Alcantud e Rosa (2017).

Outra tecnologia não destrutiva para determinação da umidade do solo é a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), o qual se baseia na relação entre a velocidade de pulsos de micro-ondas com o conteúdo de água no solo (TOMMASELLI & BACCHI, 2001; EVETT, 2003).

Tal tecnologia é destacada pela automação nas medidas, utilização de diferentes sondas em um único aparelho e pela sua exatidão, porém há necessidade de calibração prévia a utilização em cada solo (VAZ et al., 2004; REGALADO et al., 2003).

Existe também a possibilidade de racionalização do uso da água e manejo da irrigação através de variáveis climáticas que estimam a evapotranspiração da cultura, que consiste no consumo de água pela cultura, baseado na evapotranspiração de referência e do coeficiente cultural (MINUZZI et al., 2014).

Para quantificação da evapotranspiração de referência diário são utilizados cálculos com dados meteorológicos, como o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1973), recomendado para uso pela FAO - Food and Agriculture Organization (ALLEN et al., 1998), porém o mesmo apresenta alto nível de exigência de dados, como umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar.

Perante a dificuldade de obtenção destas variáveis, surgiu como alternativa o uso de equações empíricas simplificadas que necessitam de relações estatísticas ou experimentos de campo para serem eficientes, como é o caso da equação de

Hargreaves-Samani, a qual é baseada apenas nos valores de temperatura do ar (HARGREAVES & SAMANI, 1982; 1985).

Portanto, esta pesquisa objetivou a avaliação da reposição hídrica baseada nos dados de umidade do solo obtidos pelos métodos do TDR e sensor UFES, comparados com a estimativa de evapotranspiração de referência calculada pelos métodos Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-Padrão FAO.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em lavoura de cafeeiro conilon, localizada no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Campus de Alegre, Fazenda Caixa D'Água, em Rive, distrito de Alegre-ES, com altitude de 137 metros, latitude 20°25'51" S e longitude 41°27'24" W, durante o período de setembro de 2018 a janeiro de 2019. O Laboratório de Recursos Hídricos e seus equipamentos pertencentes ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo foram utilizados para execução de análises necessárias para esta pesquisa.

Esta lavoura, implantada no ano de 2010 com os 13 clones da variedade “Conilon Vitória Incaper 8142”, com espaçamento de 3,0 x 1,1 metros, é mantida em níveis fitossanitários e nutricionais adequados para garantir bom desenvolvimento às plantas. Após as colheitas dos anos de 2016 e 2016, foi realizada a prática da poda programada, objetivando o revigoramento das plantas.

A precipitação acumulada e as temperaturas mínimas, médias e máximas do período experimental estão apresentadas na Figura 1, dados estes coletados da estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019), localizada na área experimental do CCAE-UFES, no município de Alegre-ES.

Para realização do manejo da irrigação, utilizou-se a irrigação por aspersão convencional, posicionada em 18x18 metros entre linhas e entre aspersores, respectivamente.

Calculou-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) deste sistema de irrigação (CHRISTIANSEN, 1942) utilizando a Equação 1, operando na pressão média de 30 mca. O resultado desta análise foi de 83% de uniformidade deste sistema, classificando-o como “Bom”, baseado na literatura de Mantovani et al. (2009).

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |L_i - L_m|}{n \times L_m} \right) \quad (1)$$

em que: CUC, coeficiente de uniformidade de christiansen, (%); L_i , lâmina obtida no coletor “i”, (mm); L_m , lâmina média de todas observações, (mm); e, n, número de coletores.

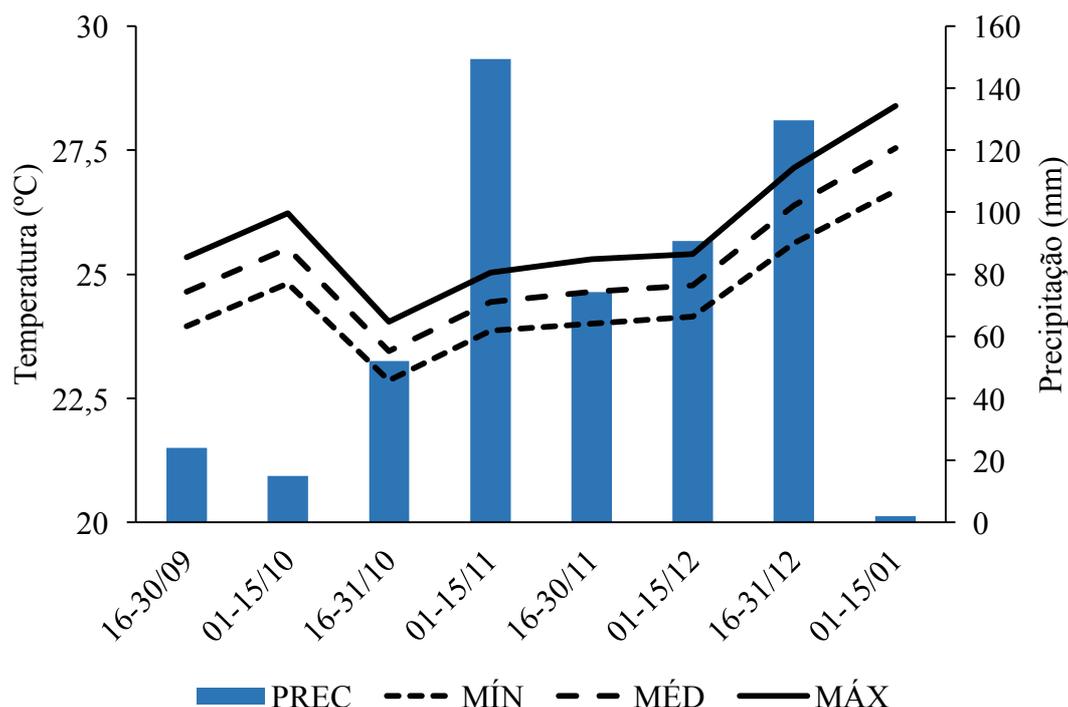


Figura 1. Precipitação acumulada (PREC) e temperatura mínima (MÍN), média (MÉD) e máxima (MÁX), na estação meteorológica automática do INMET, em Alegre-ES, durante o período experimental.

Realizou-se a medição da vazão dos aspersores, junto com a análise de uniformidade, utilizando tubo flexível, recipiente com volume conhecido e cronômetro, também foi quantificada a quantidade de água aplicada e água perdida, determinando a intensidade de aplicação de água (Equação 2) e a eficiência dessa aplicação (Equação 3).

$$I_a = \frac{Q_a}{E_l \times E_{asp}} \times 3600 \quad (2)$$

em que: I_a , intensidade de aplicação, (mm/h); Q_a , vazão dos aspersores, (m³/h); E_l - espaçamento entre linhas laterais, (m); E_{asp} , espaçamento entre aspersores, (m).

$$E_a = \frac{L_{col}}{L_{apl}} \times 100 \quad (3)$$

em que: E_a , eficiência de aplicação, (%); L_{col} , lâmina coletada pelos coletores, (mm); L_{apl} , lâmina aplicada pelos aspersores, (mm).

A rede de sensores sem fio (RSSF) utilizada no experimento foi implantada por Hott (2018), a qual consiste na comunicação entre um nó sorvedouro (Estação Central) e três nós sensores (Estações 1, 2 e 3), sendo que nó sensor possui um dispositivo determinação indireta da umidade do solo baseada na metodologia de resistência a

corrente elétrica (Sensor UFES), elaborado também por Hott (2018) e instalado a 20 centímetros de profundidade e a 50 centímetros da planta. As localizações das estações da rede de sensores sem fio na lavoura estão demonstradas na Figura 2.



Figura 2. Área experimental com a localização da Estação Central e das Estações 1, 2 e 3.

Fonte: Google Earth (2019).

A densidade do solo, determinada pelo método da proveta, e a umidade do solo, em base gravimétrica, referente à capacidade de campo (-10 kPa) e ao ponto de murcha permanente (-1500 kPa), foram elaboradas de acordo com EMBRAPA (2011), utilizando amostras deformadas do solo experimental (Tabela 1). Seguindo a mesma metodologia, através da análise granulométrica e com auxílio do triângulo textural da EMBRAPA, determinou-se a textura do solo como argilosa para toda área do experimento.

A coleta de dados para determinação da umidade do solo foi realizada no dia da realização da reposição hídrica no mesmo, portanto, no dia estabelecido as leituras dos sensores UFES e as coletas de dados com o aparelho TDR 300 foram realizadas as 16:00 horas, sempre em triplicata.

A rede é constituída por quatro estações que apresentam autonomia devido à energia solar para realizar a leitura, processamento e transmissão dos dados da leitura dos sensores com a tecnologia *Short Message Service*, conhecida como mensagem SMS, para aparelho celular pré-estabelecido.

Com os dados transmitidos pela RSSF e equações de calibração dos sensores de cada estação (HOTT, 2018), apresentadas na Tabela 2, pode-se determinar a umidade do solo.

Tabela 1. Densidade do solo e valores de umidade referentes a capacidade de campo e ponto de murcha permanente de cada estação da rede de sensores sem fio e a média da área.

Estação	Densidade do Solo (kg/dm³)	Capacidade Campo (kg/kg)	Ponto de Murcha Permanente (kg/kg)
E1	1,13	0,270	0,137
E2	1,09	0,317	0,167
E3	1,14	0,279	0,144
Média da área	1,12	0,289	0,149

Tabela 2. Equação de calibração de cada sensor de resistência a corrente elétrica instalado nos nós sensores da rede de sensores sem fio.

Estação	Equação de calibração
E1	$U = 6,0947 + 0,0256 \times L_{\text{sensor}}$
E2	$U = 7,7391 + 0,0206 \times L_{\text{sensor}}$
E3	$U = 7,0529 + 0,0271 \times L_{\text{sensor}}$

Legenda: L_{sensor} : Leitura do sensor UFES.

A determinação da umidade do solo pela metodologia da reflectometria no domínio do tempo (TDR) foi realizada pela utilização do aparelho TDR 300, utilizando uma sonda de 20 centímetros, baseado no manual deste equipamento e utilizando uma equação de calibração (Equação 4), a qual consiste em uma regressão linear relacionando os valores detectados pelo TDR com os valores de umidade do solo determinados pelo método padrão da estufa no mesmo momento (Figura 3).

$$U = 6,5202 + 0,5849 \times U_{\text{TDR}} \quad (4)$$

em que: U, umidade do solo, (%); e, U_{TDR} , umidade observada pelo aparelho TDR 300, (%).

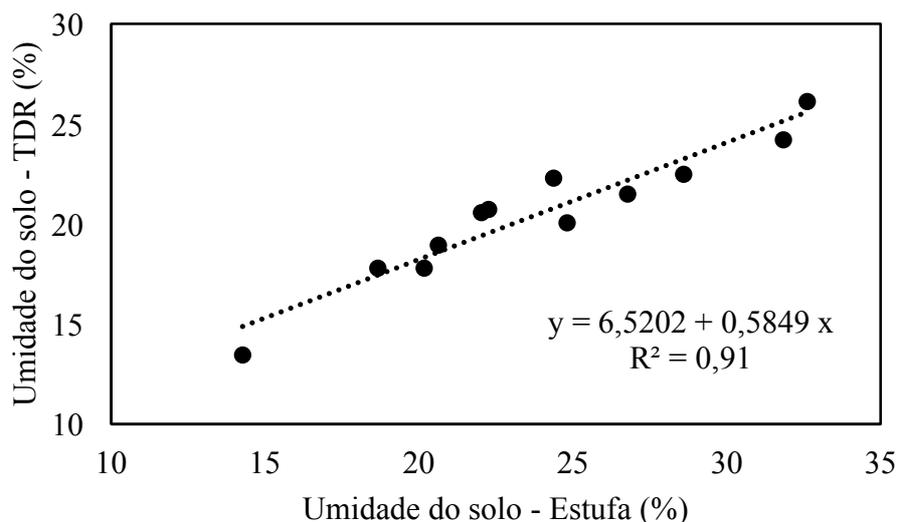


Figura 3. Calibração do aparelho TDR 300 no solo experimental, com apresentação da equação de calibração e do coeficiente de determinação da regressão linear (R^2).

A partir da determinação da umidade do solo pelos métodos supracitados realizou-se a reposição de água no solo a cada 3 dias, segundo os procedimentos propostos por Bernardo et al. (2009), calculando a Irrigação Real Necessária (Equação 5) utilizando a média dos valores de umidade atual do solo detectados pelo método do TDR, em 10 repetições (1º ao 10º evento de irrigação) e, posteriormente, com a média dos dados de umidade do solo provenientes das leituras do sensor UFES, em 10 repetições (11º ao 20º evento de irrigação), totalizando 20 eventos de irrigação em todo período experimental.

Determinou-se a profundidade efetiva das raízes (Z) com 20 centímetros e utilizou-se os valores médios da área das variáveis umidade na capacidade de campo (U_{cc}) e densidade do solo (D_s), expostos na Tabela 1.

$$IRN = \frac{U_{cc} - U_a}{10} \times D_s \times Z \quad (6)$$

em que: IRN, irrigação real necessária, (mm); U_{cc} , umidade na capacidade de campo, (%); U_a , umidade atual do solo determinada pelo TDR ou sensor UFES, (%); D_s , densidade do solo, (kg/dm^3); e, Z , profundidade efetiva das raízes, (cm).

Seguindo a metodologia de Bernardo et al. (2009), também foram determinadas a Irrigação Total Necessária (Equação 6), considerando a eficiência do sistema na aplicação de água, e o Tempo de Irrigação (Equação 7), auxiliando a prática da irrigação.

$$ITN = \frac{IRN}{Ea} \quad (6)$$

em que: ITN, irrigação total necessária, (mm); IRN, irrigação real necessária, (mm); e, Ea, eficiência de aplicação, em decimal.

$$TA = \frac{ITN}{Ia} \quad (7)$$

em que: TA, tempo de aplicação, (h); ITN, irrigação total necessária, (mm); e, Ia, intensidade de aplicação (mm/h).

As estimativas da evapotranspiração de referência realizadas pela metodologia padrão de Penman-Monteith-Padrão FAO (MONTEITH, 1973) e pela metodologia de Hargreaves-Samani (HARGREAVES & SAMANI, 1982; 1985), segundo as Equações 8 e 9, utilizaram dados obtidos da estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizada na Área Experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES), sob código OMM 86828, latitude 20°44,5'32" S e longitude 41°29'20" O.

$$ET0 = \frac{0,4808\Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900U_2}{T_{med} + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34U_2)} \quad (8)$$

em que: ET0, estimativa da evapotranspiração Penman-Monteith-Padrão FAO, (mm); Δ , declinação da curva de saturação do vapor d'água, (kPa/°C); R_n , saldo de radiação, (MJ/m²d); G, densidade do fluxo de calor no solo (MJ/m²d); γ , fator psicométrico (MJ/kg); U_2 , velocidade do vento (média diária) a 2 m acima da superfície do solo, (m/s); e_s , pressão de saturação do vapor, (kPa); e_a , pressão real do vapor (kPa); e, T_{med} , temperatura média, (°C).

$$ET0 = 0,408 \times 0,0023 \times Ra (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,8) \quad (9)$$

em que: ET0, estimativa da evapotranspiração Hargreaves-Samani; Ra, radiação solar na ausência de atmosfera, (MJ/m²d); T_{max} , temperatura máxima do dia, (°C); T_{min} , temperatura mínima do dia, (°C); e, T_{med} , temperatura média do dia, (°C).

Avaliou-se neste experimento a quantidade de água a ser repostada calculada a partir da determinação da umidade do solo com as metodologias do TDR e sensor UFES comparada com a evapotranspiração de referência estimada pelos métodos de Penman-Monteith-Padrão FAO e Hargreaves-Samani neste mesmo período e o desempenho do sensor UFES e do TDR na realização do manejo hídrico na cultura do cafeeiro conilon.

O software *Excel* foi utilizado para armazenagem dos dados e para determinação do coeficiente que representa a razão entre os métodos de estimativa e o observado (K_s), este coeficiente se refere ao coeficiente angular (β_1) da regressão linear entre os métodos, sendo que nesta metodologia o coeficiente linear (β_0) é nulo (Equação 10) (TOLEDO & OVALLE, 2008).

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n E_i O_i}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2} \quad (10)$$

em que: E_i , valores estimados; O_i , valores observados; e, n , número de observações.

A partir do *software* estatístico R (R core team, 2016) os dados experimentais foram analisados utilizando os índices estatísticos: coeficiente de correlação de Pearson, viés (BIAS) para o erro sistemático, erro médio absoluto percentual (EMAP), utilizando as Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n E_i O_i - \sum_{i=1}^n O_i \sum_{i=1}^n E_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n E_i^2 - (\sum_{i=1}^n E_i)^2}} \quad (11)$$

$$\text{Bias} = n_d^{-1} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i) \quad (12)$$

$$\text{EMAP} = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \times 100 \quad (13)$$

em que: E_i , valores estimados; O_i , valores observados; n , número de observações; e, n_d , número de pares dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 e Tabela 3 são apresentadas as variações, com suas respectivas comparações, da quantidade de irrigação real necessária, em milímetros, baseada nas estimativas de evapotranspiração de referência, Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, e nos valores calculados com os dados de umidade do solo obtidos pelo TDR, durante o período em que o manejo da irrigação foi realizado com o TDR.

Na Figura 4, pode-se observar que as evapotranspirações estimadas pelas metodologias de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani apresentaram comportamentos próximos aos valores de irrigação real necessária calculada com os dados do TDR, compreendendo assim que a tecnologia do TDR pode conseguir apresentar desempenho que representa a diminuição do teor de água no solo em quantidades próximas ao que é estimado pela evapotranspiração de referência, no mesmo período.

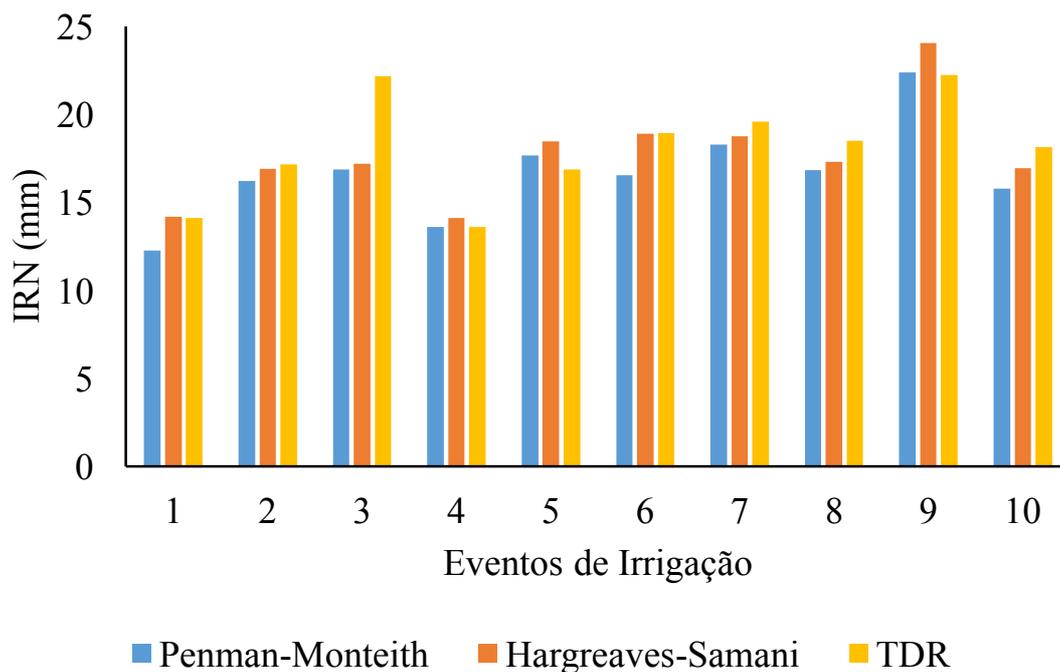


Figura 4. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, em função das metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência (Penman-Monteith e Hargreaves-Samani) e da metodologia de determinação da umidade do solo (TDR), referentes aos eventos de irrigação baseados nos dados de umidade determinados pelo TDR.

Tabela 3. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relativos à comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-Padrão FAO, com o método do TDR, no período de irrigação determinada pelos valores obtidos pelo TDR.

Métodos	Bias (mm)	EMAP (%)	r
Hargreaves-Samani	0,46	6,33	0,78
Penman-Monteith	1,49	8,93	0,81

Realizando a comparação dos dados obtidos nesse período, através de índices estatísticos apresentados na Tabela 3, nota-se que entre a estimativa da evapotranspiração de referência por Hargreaves-Samani e a irrigação real necessária calculada com os dados de umidade do solo do TDR ocorreu a menor diferença, aonde Hargreaves-Samani subestimou a IRN em 0,46 milímetros, enquanto Penman-Monteith subestimou a mesma variável em 1,49 milímetros.

Dessa forma, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith tiveram valores de erro médio absoluto quando comparados ao TDR que podem ser considerados como insignificantes para a realização de um manejo da irrigação, principalmente em áreas que outrora não eram irrigadas ou irrigadas sem algum controle de eficiência na referida prática, ou seja, a irrigação com os dados provenientes do TDR aumenta a irrigação em 6,33% e 8,93% os milímetros de água estimados por Hargreaves-Samani e Penman-Monteith, respectivamente.

Para a comparação das duas metodologias de estimativa de evapotranspiração com a irrigação real necessária a partir da umidade do solo detectada pelo TDR observou-se uma correlação muito alta entre os dados (Cunha et al., 2013), indicando forte relação de intensidade entre os conjuntos de dados.

Tal comportamento pode ser relacionado com o desempenho da estimativa da evapotranspiração de referência pela metodologia de Hargreaves-Samani em superestimar os valores obtidos por Penman-Monteith-Padrão FAO, visto na Figura 4, o que se deve às características de Hargreaves-Samani não ser um método tão complexo como o modelo de Penman-Monteith-Padrão FAO, o qual pondera um maior número de variáveis climáticas e se ajustam melhor em diferentes condições, o mesmo também foi relatado por Borges Júnior et al. (2017) e Bragança et al. (2010).

Para maior entendimento da variação ocorrida na irrigação real necessária entre as três metodologias analisadas acima (TDR, Penman-Monteith e Hargreaves-Samani), estimou-se a quantidade de água a ser irrigada em um hectare, utilizando os valores de IRN para os eventos de irrigação expostos na Figura 4 (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação de estimativa da quantidade de água a ser irrigada em um hectare baseada no cálculo da irrigação real necessária com os dados de umidade do solo determinado pelo TDR e na estimativa da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.

Métodos	Quantidade de água a ser irrigada (m³/ha)
TDR	1.812,71
Penman-Monteith	1.663,50
Hargreaves-Samani	1.766,90

É observado que a quantidade de água a ser irrigada por Penman-Monteith refere-se a 91,77% do montante estimado para o TDR, totalizando 149,21 metros cúbicos, enquanto a mesma relação para a metodologia de Hargreaves-Samani tem o resultado de 97,47%, com uma diferença de 45,81 metros cúbicos, demonstrando mais uma vez a proximidade entre os valores calculados e estimados pelas metodologias do TDR e Hargreaves-Samani.

Observando esta diferença entre o calculado pelo TDR e o estimado pelas metodologias de Hargreaves-Samani e Penman-Monteith, infere-se que há necessidade de compreensão se há necessidade de fator de correção para a evapotranspiração de referência (K_c – coeficiente cultural) ou se a metodologia do TDR está determinando uma lâmina de irrigação maior que a quantidade necessária.

Na Figura 5 encontra-se os valores de irrigação real necessária, em milímetros, determinados pela estimativa de evapotranspiração de referência de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani e calculado a partir dos dados de umidade do solo obtidos pelo sensor UFES, nos eventos de irrigação baseados no sensor UFES. Na Tabela 5 são apresentados índices estatísticos que realizam a comparação entre as metodologias e os dados supracitados.

Analisando a Figura 5, pode-se observar que os menores valores de irrigação real necessária foram determinados pelo sensor UFES, com comportamento distinto da metodologia do TDR, observado na Figura 4. As metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência desempenharam papel diferente nessa comparação, sendo que Penman-Monteith-Padrão FAO apresentou a menor diferença com o sensor UFES, enquanto é notável que o modelo de Hargreaves-Samani propiciou maior diferença com o método base dos eventos de irrigação (sensor UFES).

De acordo com as comparações feitas na Tabela 5, pode-se observar através do índice Bias, o qual representa a variação dos métodos de estimativa com o método de referência, que ocorreu maiores diferenças entre os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência com o sensor UFES, do que o observado com o TDR, discutido acima, porém com melhores valores de correlação (r), indicando uma relação com grau mais acentuado entre as metodologias de evapotranspiração e o sensor UFES. Neste caso, o índice Bias proporciona o entendimento que a metodologia de Penman-Monteith aumenta a irrigação real necessária em 2,17 milímetros quando comparado ao sensor UFES. Já Hargreaves-Samani ocasiona uma maior diferença, aumentando este montante de água a ser irrigada em 4,76 milímetros.

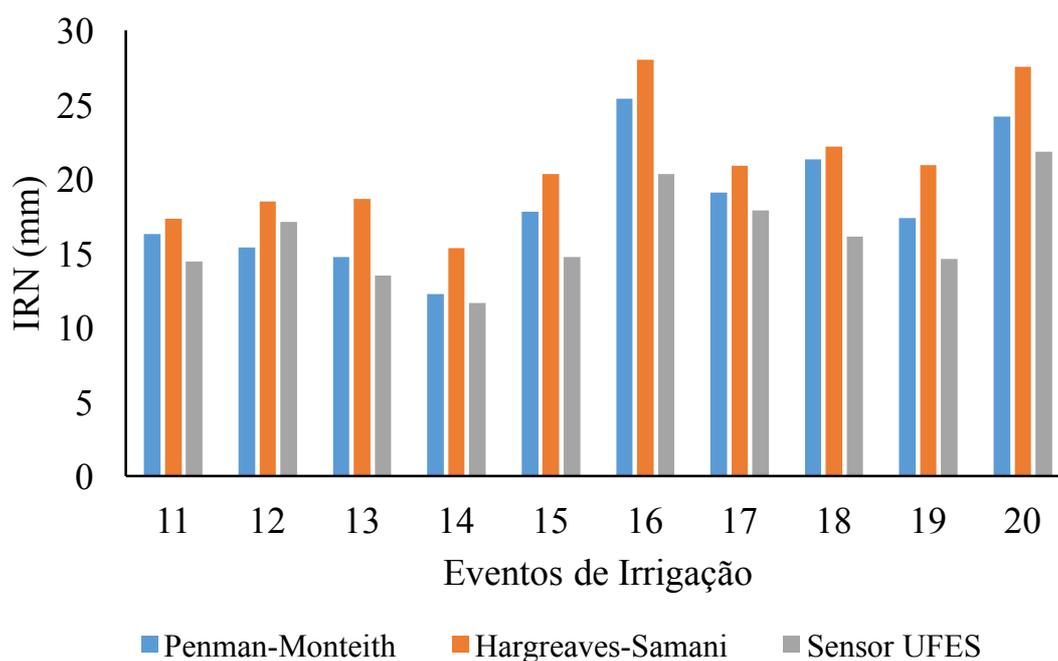


Figura 5. Irrigação Real Necessária (IRN), em milímetros, em função das metodologias de estimativa de evapotranspiração de referência (Penman-Monteith e Hargreaves-Samani) e da metodologia de determinação da umidade do solo (Sensor UFES), referentes aos eventos de irrigação baseados nos dados de umidade determinados pelo sensor UFES.

Tabela 5. Bias, erro médio absoluto percentual (EMAP) e coeficiente de correlação de Pearson (r) relativos à comparação dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith-Padrão FAO, com o método do sensor UFES, no período de irrigação determinada pelos valores obtidos pelo sensor UFES.

Métodos	Bias (mm)	EMAP(%)	r
Hargreaves-Samani	- 4,76	29,82	0,89
Penman-Monteith	- 2,17	15,16	0,88

Essa diferença mais acentuada na comparação com o sensor UFES pode ser ocasionada pela maior dificuldade de obtenção de dados de umidade do solo com maior exatidão, já

que esta metodologia sofre maior influência de fatores externos nas leituras de corrente elétrica, e conseqüentemente, na determinação da umidade do solo.

Porém, mesmo com as diferenças já citadas e os erros médios absolutos observados para Penman-Monteith e Hargreaves-Samani de 15,16% e 29,82%, respectivamente, quando comparados ao sensor UFES, é importante ressaltar que a utilização da técnica da determinação da umidade do solo através da leitura da resistência a corrente elétrica, neste trabalho o sensor UFES, tem vantagens como a possibilidade de manejo remoto e o baixo custo de implantação que podem fomentar a sua utilização mesmo com as limitações observadas.

Na Tabela 6 são apresentadas as estimativas da quantidade de água a ser irrigada em um hectare a partir dos dados de irrigação real necessária das metodologias sensor UFES, Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, do 11º ao 20º evento de irrigação.

Tabela 6. Comparação de estimativa da quantidade de água a ser irrigada em um hectare baseada no cálculo da irrigação real necessária com os dados de umidade do solo determinado pelo sensor UFES e na estimativa da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e Hargreaves-Samani.

Métodos	Quantidade de água a ser irrigada (m³/ha)
Sensor UFES	1.621,62
Penman-Monteith	1.838,00
Hargreaves-Samani	2.097,30

Observa-se na tabela acima que diferentemente do TDR, o sensor UFES apresentou a menor quantidade de água a ser irrigada em um hectare, com 216,38 metros cúbicos a menos que a estimativa para Penman-Monteith e 475,68 metros cúbicos a menos que a estimativa para Hargreaves-Samani.

Essas diferenças de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani para o sensor UFES, de 113,34% e 129,33%, respectivamente, ressaltam a maior proximidade dos resultados do sensor UFES com a metodologia de Penman-Monteith-Padrão FAO e devem ser consideradas, juntamente com o entendimento do desenvolvimento da cultura sob irrigação pelo sensor UFES, para melhoria dos valores a partir desta metodologia.

Como observado neste experimento, as plantas apresentaram um desenvolvimento normal durante a irrigação pelo sensor UFES, portanto há uma economia significativa na aplicação de água na lavoura, sendo necessário outros estudos para compreensão deste comportamento a longo prazo e em outras épocas do ano.

Nas Figuras 6 e 7 foram determinados os coeficientes Ks de cada método de estimativa de evapotranspiração, comparando-os com a metodologia utilizada para realização da irrigação em cada período. Utilizou-se a metodologia estatística que estabelece o início da linha de tendência dos dados na origem dos eixos cartesianos e determinando que o coeficiente angular desta reta é o coeficiente de cada método.

A referida metodologia utilizada nesta discussão também foi utilizada para determinação de coeficientes relacionados à estimativas de evapotranspiração por Barbosa (2010).

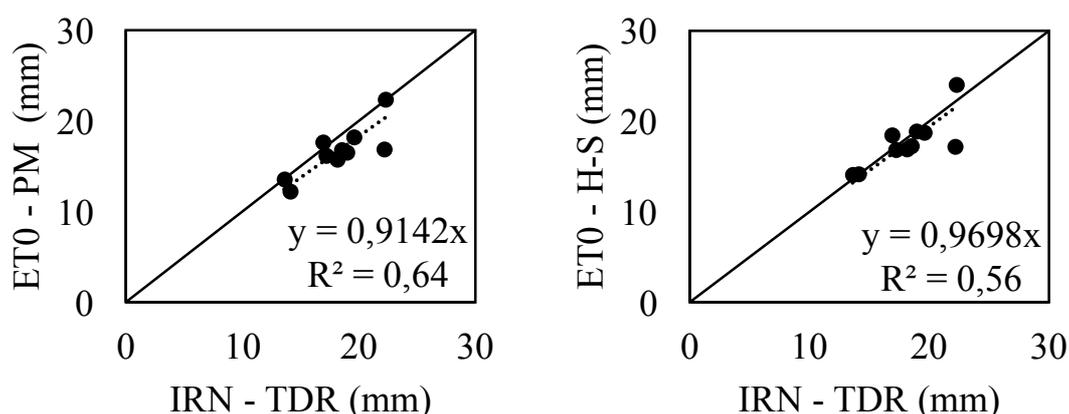


Figura 6. Comparação entre a estimativa de evapotranspiração de referência (ET0) e a irrigação real necessária (IRN), em milímetros, calculada com os dados de umidade observados pelo método TDR, durante o período irrigado de acordo com TDR, com determinação do coeficiente Ks (coeficiente angular da equação da reta) e coeficiente R^2 .

Legenda: ET0: estimativa da evapotranspiração de referência; IRN: irrigação real necessária; PM: Penman-Monteith-Padrão FAO; H-S: Hargreaves-Samani; y: consumo hídrico estimado; e, x: consumo hídrico observado.

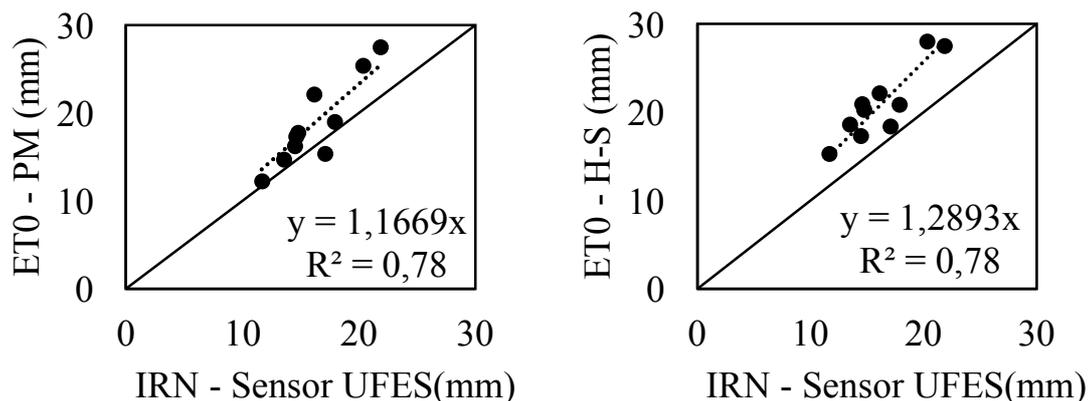


Figura 7. Comparação entre a estimativa de evapotranspiração de referência (ET0) e a irrigação real necessária (IRN), em milímetros, calculada com os dados de umidade observados pelo método sensor UFES, durante o período irrigado de acordo com o sensor UFES, com determinação do coeficiente Ks (coeficiente angular da equação da reta) e coeficiente R².

Legenda: ET0: estimativa da evapotranspiração de referência; IRN: irrigação real necessária; PM: Penman-Monteith-Padrão FAO; H-S: Hargreaves-Samani; y: consumo hídrico estimado; e, x: consumo hídrico observado.

Durante todo período experimental, a determinação dos coeficientes Ks para os métodos de estimativa da evapotranspiração, apresentou melhores índices de determinação dos dados em relação ao coeficiente de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani comparado ao sensor UFES (0,78), sendo modelos mais explicativos do que os modelos relacionados ao TDR.

A evapotranspiração estimada por Penman-Monteith teve desempenho de 8,58% inferior à irrigação real necessária calculada pelo TDR, com Ks de 0,9142, e 16,69% superior à irrigação real necessária calculada pelo sensor UFES, com Ks de 1,1669, apresentando maior proximidade dos valores obtidos pela metodologia do sensor UFES, quando comparada com a outra estimativa de evapotranspiração utilizada neste trabalho. No cálculo para estimativa da evapotranspiração por Hargreaves-Samani obteve-se resultados com mesmo comportamento observado nas comparações que utilizaram Penman-Monteith. Hargreaves-Samani subestimou a IRN em 3,02% comparado ao calculado pelo TDR, apresentando coeficiente Ks de 0,9698, valor menor do que o observado na comparação com o sensor UFES, demonstrando maior proximidade desta metodologia do que o notado com o sensor UFES, porém esta relação apresentou baixo

índice de concordância da regressão linear, com 56% dos dados explicados por este modelo.

No período em que utilizou-se o sensor UFES como metodologia referencial, obteve-se maior concordância entre os dados ($R^2=0,78$), porém o modelo de Hargreaves-Samani superestimou a irrigação real necessária em 28,93%, isto se deve à falta de adaptação desta metodologia de estimativa da evapotranspiração para o nosso clima, já que este foi elaborado para região de clima árido, tendo como consequência desta adaptação uma característica de superestimação dos dados, como observado neste trabalho e em trabalhos de Tagliaferre (2006) e Bragança et al. (2010).

Portanto, após a análise da determinação dos coeficientes para cada situação (Figuras 6 e 7), entende-se que estes podem ser utilizados para adequação entre a metodologia de estimativa do consumo hídrico e o real consumo das plantas, podendo ser considerados na utilização do coeficiente cultural, calculando a evapotranspiração potencial da cultura, já que é necessário a correção quando as condições de clima, ambiente e cultura do campo têm diferenças às condições referenciais, variando também de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura (ALLEN et al., 1998; ROSA, 2018).

Os coeficientes K_s encontrados nesta situação podem também ser utilizados para calibração dos métodos de quantificação da água no solo, adicionando o conhecimento da estimativa da evapotranspiração das plantas a estas metodologias, aprimorando o resultado do manejo realizado a partir destas.

Com os resultados satisfatórios observados nesta pesquisa, o aparelho TDR, os dados climáticos para estimativa da evapotranspiração e o sensor UFES podem ser utilizados para monitoramento e realização da reposição de água no solo em cultivos agrícolas, permitindo maior eficiência no uso dos recursos hídricos e nos investimentos realizados (CARVALHO et al., 2011; NETO et al., 2011).

Cada uma destas metodologias apresentam suas vantagens e desvantagens, como o TDR que é rápido na obtenção de resultados, mas apresenta um custo de implantação que pode ser considerado alto dependendo do porte do empreendimento rural (COSTA et al., 2017), a determinação da evapotranspiração que é de grande importância para planejar e manejar a tecnologia da irrigação (BIGGS et al., 2015), porém a escolha de qual método utilizar depende da disponibilidade de variáveis meteorológicas que estão disponíveis (CARMO et al., 2005), e o sensor UFES, que associado a rede de sensores sem fio, surge como uma alternativa tecnológica de baixo custo, possibilitando o

monitoramento remoto (SILVA, 2018) e instantâneo da umidade do solo e, conseqüentemente, o manejo da agricultura irrigada (NETO et al., 2016).

Dessa forma, é compreensível que as metodologias estudadas apresentam necessidade de calibração e correções para cada situação de campo, porém dependendo do poder aquisitivo do produtor rural, da oferta de dados e conhecimento e da necessidade de acurácia no manejo da irrigação pode se determinar quais metodologias seriam mais indicadas para cada caso.

Como, por exemplo, o sensor UFES se apresenta como indicado para produtores de pequeno e médio porte que visam menor custo de implantação e monitoramento remoto da irrigação na lavoura, o TDR é importante para situações que se possa realizar um investimento maior e que necessite de resultados mais acurados e o manejo da irrigação via dados climáticos pode ser interessante para casos em que se tenha uma ampla gama de variáveis meteorológicas (Penman-Monteith), garantindo resultados mais representativos da região, ou em casos que se tenha uma menor oferta de dados meteorológicos, como somente a temperatura do ar, estimando a evapotranspiração por Hargreaves-Samani.

CONCLUSÕES

- As metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência Hargreaves-Samani e Penman-Monteith subestimaram a irrigação real necessária na comparação com os valores do TDR, em 0,46 e 1,49 milímetros, respectivamente.
- A irrigação real necessária foi superestimada pelos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani em 2,17 e 4,76 milímetros, respectivamente, quando comparados ao sensor UFES.
- A estimativa da irrigação em um hectare com o sensor UFES reduz a quantidade de água em 216,38 e 475,68 metros cúbicos, quando comparados as estimativas da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, respectivamente.
- O TDR estima uma irrigação para um hectare superior às irrigações via Penman-Monteith e Hargreaves-Samani em 149,21 e 45,81 metros cúbicos, respectivamente.
- A comparação entre a evapotranspiração de referência de Hargreaves-Samani e a irrigação real necessária calculada com a umidade do solo detectada pelo TDR apresentou maior similaridade do que a metodologia de Penman-Monteith, determinando o coeficiente K_s em 0,9698.
- O coeficiente K_s que apresentou maior proximidade entre as evapotranspirações de referência e a irrigação real necessária calculada com os dados obtidos pelo sensor UFES foi 1,1669, representando a relação de Penman-Monteith com o sensor UFES.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil – 2014**. Brasília: ANA, 2016. 33 p.
- ALCANTUD, M. B.; ROSA, P. R. Aplicação de redes de sensores sem fio na agricultura de precisão: uma reflexão teórica. **Colloquim Exactarum**, v. 9, n. Especial, p.36-41, 2017.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p.
- ANA - Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2014.. Brasília: **Portal Brasil**, publicado em 21 abril de 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/03/ana-divulga-relatorio-de-conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso: 08/02/2018.
- BAYER, A.; MAHBUB, I.; CHAPPELL, M.; RUTER, J.; VAN IERSEL, M. W. Water use and growth of Hibiscus acetosella “Panama Red”grown with a soil moisture sensor- controlled irrigation system. **HortScience**, v. 48, n. 8, p. 980–987, 2013.
- BARBOSA, V. S. Avaliação do desempenho do irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de referência para as condições da região sul do estado do Espírito Santo. 2010. 67 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias da UFES. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A. & MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 625p.
- BIGGS, T.; PETROPOULOS, G. P.; VELPURI, N. M.; MESSINA, A. Remote Sensing of Evapotranspiration from Croplands. In: THENKABAIL, P. **Handbook of Remote Sensing**. Taylor- Francis., 2015.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; OLIVEIRA, A. L. M.; ANDRADE, C. de L. T. de.; PINHEIRO, M. A. B. Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 38-49, 2017.
- BRAGANÇA, R.; REIS, E. F. dos; GARCIA, G. de O.; PEZZOPANE, J. E. M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no estado do Espírito Santo. **Idesia**, Chile, v. 28, n. 2, p. 21-29, 2010.
- CARMO, R. L.; OJIMA, A. L. R. O.; OJIMA, R.; NASCIMENTO, T. T.. Água virtual: o Brasil como grande exportador de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE RECURSOS HÍDRICOS, 16, **Anais..** Trabalho completo, João Pessoa, SBRH, CD-ROM, 2005.

CARVALHO, D. F.; NETO, D. H. O.; RIBEIRO, R. L. D.; GUERRA, J. G. M.; ROUWS, J. R. C. Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da beterraba. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 269-277, 2011.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p. Bulletin, 670.

COSTA, B. F. D. da. Reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação do conteúdo de água em solos tropicais do Distrito Federal. 2017. 64 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília, Brasília-DF.

CUNHA, P. C. R.; NASCIMENTO, J. L.; SILVEIRA, P. M.; ALVES JÚNIOR, J. Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 114-122, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.

EVETT, S. R. Soil water measurement by time domain reflectometry. **Encyclopedia of Water Science**, Marcel Dekker, Inc. New York, p.894-898, 2003.

GOOGLE EARTH-MAPAS. Disponível em: <http://mapas.google.com>. Acesso em: 20/02/2019.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimation of potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Division*. **ASCE**, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HOTT, M. de O. Rede de sensores sem fio de baixo custo para o monitoramento de umidade do solo em cultivos irrigados. 2018. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Centro de Ciências Agrárias e Engenharia da UFES. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados Meteorológicos – Estações Automáticas**. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTYxNw==. Acesso em: 20 de fevereiro de 2019.

- LEITE JÚNIOR, M. C. R.; FARIA, M. A. de. Utilização da irrigação no controle do potencial matricial de água no solo e sua influência na produtividade do cafeeiro. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 14, n. 1, p. 533-544, 2016.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 355 p. 2009.
- MINUZZI, R. B.; RIBEIRO, A. J.; SILVA, D. O.; KUNESKI, A. C. Estimativa da evapotranspiração de referência diária por Penman-Monteith FAO com dados de temperatura do ar para Santa Catarina. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 548-558, 2014.
- MONTEITH, J. L. **Principles of environmental physics**. Edward Arnold, London, 1973. 241p.
- NETO, M. O. R.; TEIXEIRA, A. S.; SANTOS, C. C.; CRUZ, T. M. L.; NETO, O. C.; NUNES FILHO, J. L. N. Automação e manejo da irrigação na cultura da melancia. **Revista Agrogeambiental**, v. 8, n. 4, p. 93-104, 2016.
- NETO, D. H. O.; CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CEDDIA, M. B. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo da beterraba orgânica sob cobertura morta de leguminosa e gramínea. **Horticultura Brasileira**, v. 29, n. 3, p. 330-334, 2011.
- PARTELLI, F.L.; MARRÉ, W.B.; FALQUETO, A.R.; VIEIRA, H.D.; CAVATTI, P.C. Seasonal vegetative growth in genotypes of Coffea canephora, as related to climatic factors. **Journal of Agricultural Science**, v. 5, n. 8, p.108-116, 2013.
- PINTO, C. M.; TÁVORA, F. J. F. A.; BEZERRA, M. A.; CORRÊA, M. C. de M. Crescimento, distribuição do sistema radicular em amendoim, gergelim e mamona a ciclos de deficiência hídrica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 3, p. 429-436, 2008.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2016. Disponível em: <https://www.r-project.org>. Acesso em 20/11/2018.
- REGALADO, C. M.; CARPENA, R. M.; SOCORRO, A. R.; MORENO, J. M. H. Time domain reflectometry models as a tool to understand the dielectric response of volcanic soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, p. 313-390, 2003.
- ROSA, M. C. A. A. Avaliação do coeficiente cultural pelo método do balanço hídrico. 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agronômica) – Instituto Superior de Agronomia. Universidade de Lisboa, Lisboa.

SANTOS, W. S. E.; PEREIRA, M. F. L.; PEREIRA, R. B. de O.; BIANCHINI, A. Medidor de umidade de solo baseado em resistência elétrica do solo para aplicação agrícola. Escola Regional de Informática da Sociedade Brasileira de Computação – Regional de Mato Grosso. **Anais**, 2015.

SILVA, G. V. da. Monitoramento remoto do Rio Araranguá para a irrigação no plantio de arroz através de uma rede de sensores sem fio (RSSF). 2018. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Campus Araranguá. Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá-SC.

TAGLIAFERRE, C. Desempenho do irrigâmetro e de dois tipos de minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência. 110f. Tese(Doutorado) - UFV, Viçosa, 2006

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Piracicaba, Artmed, 2013. 820p.

TOLEDO, L. G.; OVALLE, I. I. **Estatística básica**. 2 ed. São Paulo: Ed. Atlas S. A., 2008.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E. E.; TORRADO, P. V.; BACCHI, O. O. S. **Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos**. São Carlos: EMBRAPA, 4p. (Embrapa. Comunicado Técnico 61), 2004.