



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DIMENSIONAL NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE CULTURA DE TOMATE**

VICTÓRIA PEREIRA AMORIM

Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

Orientador

Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI

Coorientador

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro de 2019

**ANÁLISE DIMENSIONAL NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE CULTURA DE TOMATE**

VICTÓRIA PEREIRA AMORIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

AGROMETEOROLOGIA

SUB-ÁREA

AGROMETEOROLOGIA

ORIENTADOR

PROF. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA

COORIENTADOR

PROF. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro de 2019

A524a

Amorim, Victória Pereira.

Análise dimensional na estimativa de evapotranspiração de cultura de tomate / Victória Pereira Amorim. – Campina Grande, 2019.
63 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, Prof. Dr. Enilson Palmeira Cavalcanti".

Referências.

1. Evapotranspiração. 2. Modelo Adimensional. 3. Teorema π .
4. Agrometeorologia. 5. Buckingham. I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da. II. Cavalcanti, Enilson Palmeira. III. Título.

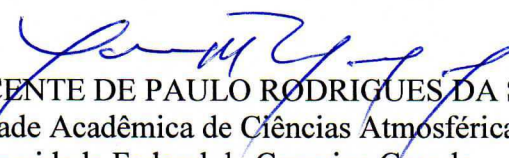
CDU 556.13(043)

VICTÓRIA PEREIRA AMORIM


ANÁLISE DIMENSIONAL NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA
CULTURA DO TOMATE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/02/2019


BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. ENILSON PALMEIRA CAVALCANTI
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS
Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde
Universidade Estadual da Paraíba

*Dedico este trabalho aos meus pais, minhas fontes de incentivo
E a todos aqueles que fazem uso do conhecimento empírico.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador Professor Doutor Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre me orientou neste trabalho.

Agradeço ao meu coorientador Professor Doutor Enilson Palmeira Cavalcanti que contribuiu em momentos cruciais da pesquisa.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Mestrado em Meteorologia, especialmente a Wendy Kaori Matsunaga, Romero Thiago Sobrinho Wanzeler, Júlia Amanda Nanini, André Bezerra Oliveira, que deixaram o cotidiano mais leve e engraçado, além de contribuírem com dicas, ajudas e soluções científicas no momento de dúvidas diante o trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Madson Tavares da Silva, membro da minha banca, que me ajudou várias vezes e contribuiu bastante com a pesquisa, sempre solícito e presente em momentos importantes do trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. João Hugo Baracuy Da Cunha Campos, membro externo da minha banca, que deu grandes contribuições para a finalização da pesquisa.

Agradeço aos funcionários Arilene, Danilo e outros do departamento de Ciências Atmosféricas que sempre foram prestativos e solícitos.

Quero também agradecer à Deus, minha família e amigos pelo apoio incondicional que me deram, especialmente a minha mãe que, mesmo com mais de 3 mil quilômetros de distância, sempre me apoiou e rezou por mim nos momentos de dificuldade.

Contudo, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), meu grande agradecimento ao apoio.

ANÁLISE DIMENSIONAL NA ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DE TOMATE

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido a partir de dados de um experimento de campo com tomates realizado na Estação Agrometeorológica Experimental do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no município de Campina Grande – Paraíba, região Nordeste do Brasil. O experimento foi feito nos anos de 2016 e 2017, com a plantação de dois ciclos do tomateiro e foram utilizados 5 tratamentos diferentes de irrigação (100, 80, 60, 40 e 20% de reposição de água à cultura). O presente trabalho objetivou desenvolver equações empíricas a partir dos parâmetros para estimar a evapotranspiração da cultura de tomate, utilizando a ferramenta de análise dimensional, baseada no teorema π de Buckingham. Foram utilizadas as variáveis de evapotranspiração real, precipitação, umidade do solo, vento a 2 metros, irrigação, evapotranspiração de referência, radiação solar, altura e diâmetro da planta, e partir disso foram desenvolvidos os parâmetros adimensionais, onde foram consideradas as dimensões básicas de massa [M], comprimento [L], e tempo [T]. Em seguida, foram formulados três modelos adimensionais. As análises estatísticas utilizadas foram a de regressão (r^2), para avaliar os resultados, e para a validação dos três modelos foram utilizados os índices raiz do erro quadrado médio (RMSE), raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE), coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EF) e o índice de Willmott (d). Os resultados apresentaram um desempenho satisfatório para o modelo adimensional que envolve as variáveis de irrigação, altura, diâmetro da planta e ET_0 . Além disso, o modelo adimensional com apenas as variáveis fenométricas (altura e diâmetro) apresentou o pior desempenho para todos os tratamentos hídricos. Com isso, concluiu-se que a análise dimensional é uma ferramenta satisfatória para a estimativa de evapotranspiração de culturas quando cultivada sem restrição hídrica, porém com irrigação controlada.

Palavras-chave: Modelo adimensional, teorema π , Buckingham.

DIMENSIONAL ANALYSIS IN THE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE OF TOMATO CULTURE

ABSTRACT

This work was developed from data from a field experiment with tomatoes carried out at the Experimental Agrometeorological Station of the Department of Atmospheric Sciences (DCA) of the Federal University of Campina Grande (UFCG), in the municipality of Campina Grande - Paraíba, Northeastern region of Brazil. The experiment was carried out in the years 2016 and 2017, with the planting of two tomato cycles and five different irrigation treatments (100, 80, 60, 40 and 20% of water replenishment) were used. The present work aimed to develop empirical equations from the parameters to estimate the actual evapotranspiration of the tomato crop, using the dimensional analysis tool, based on the Buckingham π theorem. The variables of real evapotranspiration, precipitation, soil moisture, wind at 2 meters, irrigation, reference evapotranspiration, solar radiation, height and plant diameter were used, and from that, the dimensionless parameters were developed, where were considered the basic dimensions of mass [M], length [L], and time [T]. Then, three dimensionless models were formulated. The statistical analyzes used were the regression (r^2), to evaluate the results, and for the validation of the three models the root mean square error (RMSE), root mean square root normalized error (NRMSE), efficiency coefficient of the Nash-Sutcliffe model (EF) and the Willmott index (d). The results presented a satisfactory performance for the dimensionless model that involves the variables of irrigation, height, plant diameter and ETo. In addition, the dimensionless model with only the phenometric variables (height and diameter) presented the worst performance for all water treatments. Thus, it was concluded that the dimensional analysis is a satisfactory tool for the estimation of crop evapotranspiration when cultivated without water restriction, but with controlled irrigation.

Keywords: Dimensional model, π theorem, Buckingham.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Conceitos básicos de análise dimensional.....	3
2.1.1. Teorema π de Buckingham.....	5
2.2. Cultura do tomate	6
2.3. Influência de fatores meteorológicos no cultivo de tomate.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1. Área de estudo	9
3.2. Área experimental	10
3.3. Monitoramento de umidade do solo.....	11
3.4. Consumo hídrico das culturas	12
3.5. Metodologia do cálculo de análise dimensional.....	13
3.6. Análises Estatísticas	17
3.6.1. Validação dos Modelos	17
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1. Características do cultivo realizado no período seco	19
4.2. Características do cultivo realizado no período chuvoso	23
4.3. Modelos Adimensionais	26
4.4. Análise dos modelos adimensionais.....	28
4.5. Validação dos modelos.....	52
4.5.1. Validação para o período seco.....	52
4.5.2. Validação para o período chuvoso.....	54
5. CONCLUSÕES.....	58
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do município de Campina Grande, Paraíba.....	9
Figura 2 - Estação Agrometeorológica Experimental – UFCG.....	10
Figura 3 – Experimento com cultivo de Tomate Shanty em fase de maturação, de Freitas (2018).	11
Figura 4 – Equipamento completo de medição da umidade do solo, modelo Diviner 2000, com datalogger, cabo de conexão e sensor.....	12
Figura 5 – Variação da altura da planta para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.....	19
Figura 6 – Variação do diâmetro para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.	20
Figura 7 – Variação de demanda hídrica controlada por irrigação para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.	21
Figura 8 – Variação da umidade do solo de 0 a 0,8 m de profundidade para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.	22
Figura 9 – Variação da evapotranspiração da cultura para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.	22
Figura 10 – Variação da altura da planta para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.....	23
Figura 11 – Variação do diâmetro para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.	24

Figura 12 – Variação de demanda hídrica controlada por irrigação para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.	24
Figura 13 – Variação da umidade do solo de 0 a 0,8 m de profundidade para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.	25
Figura 14 – Variação da evapotranspiração da cultura para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.	26
Figura 15 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 100%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	29
Figura 16 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 80%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	30
Figura 17 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 60%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	31
Figura 18 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 40%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	32
Figura 19 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 20%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	33
Figura 20 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 100%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	34
Figura 21 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 80%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	35

Figura 22 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 60%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	36
Figura 23 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 40%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	37
Figura 24 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 20%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\pi_3\pi_6\pi_4$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = HD$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\pi_2\pi_4$).....	38
Figura 25 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 100% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	40
Figura 26 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 80% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	41
Figura 27 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 60% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).....	43
Figura 28 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 40% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).....	44
Figura 29 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 20% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	45
Figura 30 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores	

estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 100% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c)..... 47

Figura 31 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 80% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c)..... 48

Figura 32 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 60% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c)..... 49

Figura 33 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 40% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c)..... 50

Figura 34 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 20% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c)..... 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis selecionadas para o experimento.....	14
Tabela 2 – Sistema de equações dado pelas matrizes A e B.	16
Tabela 3 – Solução das matrizes.	27
Tabela 5 – Validação dos modelos para o tratamento de 100% do ciclo cultivado no ano de 2016.	52
Tabela 6 – Validação dos modelos para o tratamento de 80% do ciclo cultivado no ano de 2016.	53
Tabela 7 – Validação dos modelos para o tratamento de 60% do ciclo cultivado no ano de 2016.	53
Tabela 8 – Validação dos modelos para o tratamento de 40% do ciclo cultivado no ano de 2016.	54
Tabela 9 – Validação dos modelos para o tratamento de 20% do ciclo cultivado no ano de 2016.	54
Tabela 10 – Validação dos modelos para o tratamento de 100% do ciclo cultivado no ano de 2017.....	55
Tabela 11 – Validação dos modelos para o tratamento de 80% do ciclo cultivado no ano de 2017.	55
Tabela 12 – Validação dos modelos para o tratamento de 60% do ciclo cultivado no ano de 2017.	56
Tabela 13 – Validação dos modelos para o tratamento de 40% do ciclo cultivado no ano de 2017.	56
Tabela 14 – Validação dos modelos para o tratamento de 20% do ciclo cultivado no ano de 2017.	57

1. INTRODUÇÃO

No setor agrícola, a irrigação é a técnica que mais utiliza água no mundo, onde o consumo chega a ser cerca de 70% do total de água utilizado, segundo a 4ª edição do Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água da ONU (WWAP, 2012). Esses dados alarmam quanto ao desperdício de água em várias regiões do Brasil que encaram a problemática da seca, sendo necessária urgentemente a racionalização de recursos hídricos. Considerando isso, é importante compreender o conceito de evapotranspiração das plantas e dominar os métodos de estimativa dela, com o objetivo de aprimorar o manejo de irrigação para diversos tipos de cultura, visto que uma das alternativas para se racionalizar o uso da água em projetos agrícolas é estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c), a partir da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente de cultura (K_c) (Carvalho et al., 2011).

O termo evapotranspiração surgiu no final da década de 40, no artigo denominado de "*An Approach Towards a Rational Classification of Climate*" (Uma abordagem para uma classificação racional do clima) de Thornthwaite (1948), o qual foi uma das grandes contribuições científicas para o tema. A partir disso, o conceito de evapotranspiração foi dado como a combinação de dois processos distintos de perda de água: por evaporação na superfície do solo e por transpiração na cultura. O desenvolvimento de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração, segundo Carvalho et al. (2011), é justificado por fatores como: adequação do método a climatologia local e limitação de dados climáticos e meteorológicos da região em estudo. Atualmente, o método mais utilizado é o *Penman-Monteith*, que após parametrizações feitas por Allen et al. (1998), passou a se chamar *Penman-Monteith FAO*.

Dada à importância da variedade, ajustes e/ou criação de métodos de aferição da evapotranspiração, de acordo com a necessidade de cada região estudada, o presente trabalho propõe uma nova metodologia de estimativa da evapotranspiração de culturas, a análise dimensional. Segundo Indraningtyas et al. (2015), a análise dimensional é um método usado para reduzir a complexidade das variáveis experimentais com base no princípio da homogeneidade dimensional para projetar um modelo em larga escala. Então, quando a análise dimensional é aplicada ao estudo de um fenômeno físico que depende de parâmetros independentes, é possível encontrar uma equação equivalente

para este fenômeno que é apenas uma função de vários parâmetros independentes adimensionais (sendo o intervalo dimensional do fenômeno) (Puig-Bargués et al., 2005).

O método da análise dimensional já é utilizado em outros campos da ciência para solucionar problemas, como por exemplo, em projeto de sistemas de produção (Miragliotta, 2011), em termodinâmica com condutividade térmica (Hassani et al., 2015), penetração de gases em equipamentos submersos (Ma et al., 2016), em redes neurais (Jamadar e Vakharia, 2016), em construções civis (Ciulla et al., 2017) com estudo de proteção contra terremotos (Shu et al., 2016), modelos físicos (Sanchez et al., 2017), dentre outros, deixando clara a importância e utilidade dessa abordagem em diversas áreas.

A cultura que será utilizada para validar o modelo será o tomateiro. Campeche et al. (2017) colocam que o tomateiro é uma hortaliça de grande importância econômica e social, o qual é cultivado no país inteiro. Somente no NEB, a área destinada para o cultivo no ano de 2016 foi de 12.905 ha, destacando-se os estados de Maranhão, Piauí e Ceará com produção de 3.975, 3.375 e 145.286 toneladas, respectivamente, apenas para o mês de setembro de 2017 (IBGE, 2017). Finalmente, todas essas informações destacam a importância de estudos voltados para esse cultivo. Neste sentido, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

Objetivo geral: Desenvolver três diferentes modelos adimensionais visando obter equações simplificadas para estimar a evapotranspiração de culturas de tomate cultivadas sob irrigação no semiárido do Nordeste do Brasil.

Objetivos específicos:

- (i) Verificar a eficiência da análise dimensional na determinação de equação para obtenção da evapotranspiração de culturas de tomate;
- (ii) Padronizar as dimensões das variáveis utilizadas na análise;
- (iii) Correlacionar parâmetros π adimensionais e para a partir deles desenvolver equações;
- (iv) Desenvolver e deduzir equações a partir dos parâmetros π ;
- (v) Validar as equações empíricas para a estimativa da evapotranspiração.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos básicos de análise dimensional

A análise dimensional é uma técnica matemática que utiliza o estudo das dimensões para auxiliar na solução de diversos problemas, especialmente na orientação de modelagens físicas e matemáticas, tratando de formas gerais as equações que descrevem fenômenos físicos, onde tais equações são compostas de variáveis que podem ser dimensionais e não-dimensionais. Primeiramente, o princípio da homogeneidade de Fourier, coloca que toda a equação que demonstra uma lei física ou descreve um processo físico deve ser homogênea, ou seja, todos os termos da equação devem ter as mesmas condições (Çengel e Cimbala, 2007). Neste contexto, Sharp et al. (1992) afirmam que o papel da análise dimensional é tipicamente levar uma equação funcional, não homogênea, relacionando as variáveis individuais envolvidas nos fenômenos e simplificar isso para uma equação que envolve um número menor de parâmetros adimensionais, conseqüentemente homogêneos, ou seja, a análise dimensional ajuda na determinação do arranjo sistemático das variáveis na relação física e na combinação de variáveis dimensionais para formar parâmetros não-dimensionais (Allamraju e Srikanth, 2017).

De acordo com Cavalcanti (2001), é possível reduzir o número de variáveis de uma equação através do agrupamento de grandezas importantes em parâmetros adimensionais, e assim aplicar esse resultado em situações parecidas. Assim, a análise dimensional consegue fornecer uma equação empírica para o a resolução do problema, apesar de não ser fornecida nenhuma informação sobre o valor da constante adimensional. Porém quando se trata de problemas com um número bem maior de grandezas, esse método se torna limitado e trabalhoso.

Para isto, o teorema de π de Buckingham possibilita um melhor desempenho quando há um grande número de variáveis. Através do teorema de π , a análise dimensional é baseada na observação das variáveis e parâmetros que governam um fenômeno e permite encontrar a relação entre as variáveis que formam parâmetros adimensionais, ou seja, é um meio para simplificação de um problema físico empregando a homogeneidade dimensional para reduzir o número das variáveis de análise. Ao ser menor o número de variáveis ou parâmetros, é possível organizar e

expressar mais eficientemente os resultados. Entretanto, a análise dimensional não pode proporcionar uma resposta completa para qualquer problema, devido a mesma ser um instrumento que apenas indica os grupos adimensionais que descrevem o fenômeno e não as relações específicas entre os grupos adimensionais (Munson et al., 2004).

A técnica de análise dimensional tem sido amplamente utilizada em ciências ambientais. Puig-Bargués et al. (2005) utilizam a análise dimensional para estudar a filtração de efluentes em sistemas de irrigação por gotejamento e, posteriormente, encontram equações capazes de descrever o entupimento de filtros através de grupos adimensionais. Já Steeneveld et al. (2007) analisaram o desempenho das equações de diagnóstico para a altura da camada limite estável h com quatro conjuntos de dados de observação que representam uma ampla faixa de latitudes, além do uso da terra e a rugosidade da superfície. Enquanto isso, Zong et al. (2015) desenvolvem uma nova equação usando análise dimensional para prever perdas de carga em filtros de tela auto-limpante com duas geometrias diferentes e duas telas diferentes sob diferentes condições de operação.

Indraningtyas et al. (2015) realizaram um estudo sobre projetos de produção de painéis verdes no processo de aquacultura usando análise dimensional, e a partir disso, projetaram modelos analógicos em escala de processo de montagem de painéis com base no aumento de escala do processo de aquicultura, que podem ser usados para fazer pesquisas futuras para validar modelos, projetar plantas piloto e testar a taxa média de fotossíntese e capacidade de retenção de água. Posteriormente, Flenger (2018) buscou utilizar a análise dimensional para a avaliação de florestas em recuperação em áreas minerárias na Amazônia brasileira e destacou que foi uma abordagem promissora, em que foi possível sintetizar, representar e comparar as condições ambientais dos locais minerados e do ecossistema de referência. Em engenharia agrícola, Albiero (2006) avaliou um novo sistema de preparo de solo com ênfase para a aplicação em sistemas de plantio voltados para agricultura familiar, em que são comparadas a metodologia de análise dimensional com a análise de variância e o autor conclui que a análise dimensional se mostra superior em estudos de dinâmica do solo e avaliações de máquinas de preparo de solo.

2.1.1. Teorema π de Buckingham

Buckingham (1914) definiu o teorema π com a premissa de que se uma equação é dimensionalmente homogênea, ela pode ser reduzida em um conjunto completo de produtos adimensionais e Sonin (2017) complementa isso, colocando que a análise dimensional admite que a forma de qualquer equação fisicamente significativa deve ser tal que a relação entre as grandezas físicas reais permaneça válida independente das magnitudes das unidades de base.

Deste modo, é necessário estabelecer um conjunto completo de quaisquer grandezas A envolvidas, dado por uma função. Essa função deverá expressar fisicamente leis que regem o fenômeno de interesse, assim cada variável n de A_I pode ser expressa por m dimensões básicas (M, L e T). A partir disso, uma relação pode ser estabelecida entre as variáveis e as dimensões que podem ser agrupadas em $n-m$, para obter um número k de parâmetros π adimensionais independentes. Então a quantidade de parâmetros é agrupada em função de $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}$.

A determinação dos parâmetros π pode ser feita por diferentes métodos, dentre eles estão o método revisado por Cavalcanti (2001) e o *Método da Matriz* por Sharp et al. (1992). O primeiro método consiste em selecionar os agrupamentos de π e defini-los separadamente em subgrupos de acordo com suas respectivas grandezas A e dimensões dadas por x, y e z , com o propósito de cada equação resultar em um número adimensional. Assim, substituem-se as dimensões das grandezas A e os expoentes podem ser igualados a zero.

Os próximos parâmetros π poderão ser feitos analogamente, o que irá conduzir a três ou mais equações para cada parâmetro π . Já o segundo método consiste em seguir 4 passos: (i) Determinar a classificação m da matriz dimensional relevante para as variáveis ($i = 1, 2, \dots, n$); (ii) Definir m variáveis repetitivas do conjunto de x_i , isto é, estabelecer apenas o número de dimensões básicas suficientes para descrever o conjunto de quantidades físicas; (iii) Calcular uma matriz resultante a partir da inversão da submatriz dimensional $m \times m$ das variáveis selecionadas no item 2, multiplicada pela matriz dimensional das restantes variáveis x_i ($i = 1, 2, \dots, n - m$) e (iv) Extrair os termos π da matriz resultante.

2.2. Cultura do tomate

O tomateiro é uma planta perene, de porte arbustivo, cultivado como anual, desenvolvendo-se nas formas rasteira, semiereta e ereta. Seu sistema radicular é constituído de raiz principal, raízes secundárias e adventícias, onde a raiz principal ou pivotante pode alcançar 1,5 m de profundidade (Alvarenga, 2013).

Na América do Sul, o Brasil lidera a produção de tomate para processamento industrial, sendo o maior mercado consumidor de seus derivados industrializados (Melo et al., 2005).

Segundo Alvarenga (2004), o ciclo do tomateiro pode ser dividido em três estágios diferentes: o primeiro que vai do transplante das mudas até o início do florescimento e pode durar de quatro a cinco semanas; o segundo que se inicia no florescimento e terminando no início da colheita dos frutos, tendo duração de cinco a seis semanas; e o terceiro que vai do início ao final da colheita. Além disso, Santana (2010) enfatiza a importância de conhecer o início e término das fases, pois isso proporciona uma melhor programação das adubações, desde a quantidade certa de nutrientes que precisam ser repostos até a quantidade de água que a planta necessita em cada fase.

Alvarenga (2004) aponta que apesar de na fase de germinação as sementes do tomateiro serem pouco exigentes com relação a umidade, precisando este estar um pouco acima do ponto de murcha permanente para ocorrer a germinação, nas fases de desenvolvimento e produção essa exigência aumenta consideravelmente, tornando a planta bastante sensível a umidade. Além disso, Alvarenga (2004) também coloca que o tomateiro é uma hortaliça extremamente exigente com relação ao consumo hídrico, em água participa com cerca de 93 a 95% dos seus constituintes, na fase em que o fruto está maduro.

Filgueira (2000) afirma que devido a umidade e temperatura elevadas, no ar e no solo a produção de tomate no período chuvoso (primavera-verão) é uma atividade desafiadora e arriscada, o que aumenta os problemas fitossanitários e como consequência, há maior exigência em pulverizações e tratos culturais, o que torna a produção mais cara. Portanto, técnicas ou práticas que possam aumentar a produção, facilitar o cultivo ou reduzir o custo de produção são muito importantes para obter-se maiores rendimentos econômicos nessa atividade (Campagnol et al., 2014).

Então Churata-Masca & André (1992) colocam que o manejo da irrigação é importante na cultura do tomate, pois o déficit de água durante o estágio de maturação favorece o aumento do conteúdo de sólidos solúveis em frutos de tomate, e Cahn et al. (2002) corrobora com ideia, colocando isso como fato importante. Para melhorar a qualidade de frutos o manejo de água deve minimizar a quantidade de água aplicada a partir do início da maturação e antecipar a data da última irrigação (Koetz et al., 2010). Esta estratégia de manejo minimiza o apodrecimento de frutos em razão da menor intensidade de doenças (Marouelli & Silva, 2008).

2.3. Influência de fatores meteorológicos no cultivo de tomate

O tomateiro é classificado como cultura cosmopolita, pela tolerância às variações climáticas, conduzido em regiões de clima tropical, subtropical e temperado (Filgueira, 2000). Além disso, o tomate é uma das hortaliças mais importantes do Brasil, por ser um produto popularizado pela sua fonte de vitaminas e sais minerais para o ser humano. Luz et al. (2007) colocam que a produção do tomate perde apenas para a produção de batata. Apesar da sua popularidade, a condução do plantio é difícil, visto que a planta é sensível a determinadas alterações ambientais, o que pode causar um risco econômico elevado. Portanto, algumas interações de fatores meteorológicos são colocadas a seguir:

De acordo com Freitas (2018), é recomendado que o tomateiro seja cultivado em áreas que tenham baixos valores de umidade relativa e precipitação, visto que a planta é muito sensível a altos valores, com riscos de proliferação de patógenos. Além disso, se a planta for submetida à altas temperaturas (acima de 27°C), combinadas com altos valores de umidade relativa, pode ter a germinação de pólen afetada, o que acarretará em um rendimento menor do cultivo. Então, segundo Alvarenga (2013) e Battilani et al. (2012) para um bom desenvolvimento da cultura, a faixa recomendada de umidade relativa é de 50 a 70%.

Com isso, Marouelli et al. (1991) e Prieto (1997) afirmam que o estágio de frutificação é o mais sensível ao déficit hídrico no solo, uma vez que irrigações inadequadas comprometem o rendimento e a qualidade de fruto. Segundo Silva et al. (2000) e Santana (2011), a quantidade de água aplicada por irrigação deve ser suficiente para elevar a umidade do solo à capacidade de campo, na camada que atinge até 40 cm e que corresponde a profundidade efetiva do sistema radicular.

A temperatura é uma das variáveis mais relevantes para o crescimento vegetativo do tomateiro. Dusi et al. (1993) colocam que temperaturas do ar entre 20 e 25°C durante a germinação, favorecem seu bom desempenho. É também colocado que temperaturas noturnas relativamente altas podem ajudar a planta a crescer mais rápido. Já na fase de desenvolvimento vegetativo, a faixa de temperatura ideal é entre 18 e 25°C, porém, com temperaturas acima de 32°C a planta é prejudicada, tendo o desenvolvimento dos frutos inibidos, formando tomates secos e sua floração caindo. Apesar disso, Battilani et al. (2012) afirma que existem tomateiros criados especificamente para climas semiáridos quentes e que podem responder positivamente a altas temperaturas (entre 35 e 40°C).

Alvarenga (2013) e Battilani et al. (2012) ratificam que, além da temperatura do ar, a temperatura do solo é crucial para a planta, assim sendo a faixa de temperatura do solo ideal entre 25 e 35°C, para um bom desenvolvimento radicular. Com relação a interferência do vento, Dusi et al. (1993) ainda apontam que ventos quentes e fortes podem prejudicar a floração e a formação de frutos da planta.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Campina Grande, localizado no interior do estado da Paraíba, no agreste paraibano, na parte oriental do Planalto da Borborema, com latitude de 07° 13' 50" S, longitude de 35° 52' 52" W, altitude de 551 metros acima do nível médio do mar. O município tem uma área de aproximadamente 640 km² (Figura 1). A população estimada do município, segundo IBGE (2018), é de 407.472 habitantes.

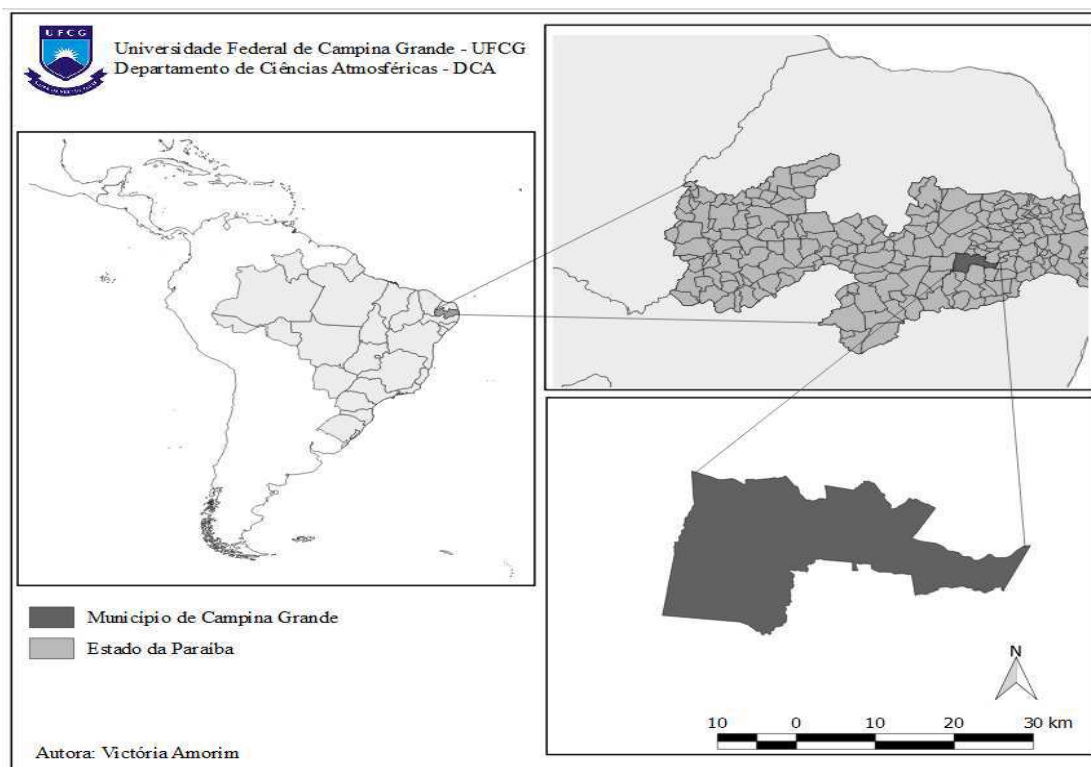


Figura 1 - Localização do município de Campina Grande, Paraíba.

Segundo a classificação de Köppen, o tipo de clima do município é classificado como As' (quente e úmido com chuva de outono-inverno), e de acordo com Dantas (2011), o município apresenta clima tropical de altitude, apesar de estar localizado na área que abrange o semiárido brasileiro, e durante o verão tem as temperaturas máximas em torno de 30°C e mínimas em 20°C, já durante o inverno as temperaturas máximas e mínimas caem para 18°C e 13°C, respectivamente, apresentando o período chuvoso no

início de maio e término em agosto, e o período seco tendo seu pico no trimestre da primavera, principalmente no mês de novembro.

3.2. Área experimental

O experimento de tomate foi realizado na Estação Agrometeorológica Experimental (EstAgro) ($7^{\circ}12'52,85''$ S e $35^{\circ}54'26,78''$ O) do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (Figura 2), durante o desenvolvimento da tese de Freitas (2018) intitulada como *Calibração do Modelo Aquacrop e Necessidades Hídricas da Cultura do Tomateiro Cultivada em Condições Tropicais*.



Figura 2 - Estação Agrometeorológica Experimental – UFCG.

O sistema de irrigação escolhido para todas as culturas foi o por gotejamento, e para o presente estudo, foram considerados os canteiros com tratamento hídrico de 100, 80, 60, 40, e 20% de reposição da água que evapotranspirou no dia anterior. Dessa forma, foram feitos 2 ciclos de cultivo de tomate com os cinco tratamentos hídricos. O primeiro ciclo se iniciou em setembro de 2016 com o término em dezembro de 2016 e o segundo ciclo em março de 2017, com término em junho de 2017. É importante ressaltar que o primeiro ciclo foi feito durante o período seco e o segundo ciclo durante o período chuvoso, logo, os resultados serão discutidos em cima das análises de seca e chuva.



Figura 3 – Experimento com cultivo de Tomate Shanty em fase de maturação, de Freitas (2018).

3.3. Monitoramento de umidade do solo

Para a determinação da umidade do solo, foram instalados 2 tubos de acesso de cano em PVC por canteiro, com as seguintes medidas: 1 m de comprimento, 56,5 mm de diâmetro externo e 51 mm de diâmetro interno, com 0,05 m acima do nível da superfície, para prevenir possíveis inundações dentro dos tubos. A medição da umidade do solo foi por meio da sonda de capacitância modelo Diviner 2000 (Figura 4).

As leituras foram executadas três vezes por semana (segundas, quartas e sextas). Freitas (2018) tratou os dados de umidade do solo calculando a média de cada ponto de profundidade, sendo a varredura da sonda feita a cada 0,1 m de profundidade, até o nível de 0,8 m. Após isso, foi feita a média dos dois tubos de cada canteiro para obter a média final da umidade do solo. O datalogger do equipamento armazena os dados de umidade do solo em porcentagem, com calibração do fabricante.



Figura 4 – Equipamento completo de medição da umidade do solo, modelo Diviner 2000, com datalogger, cabo de conexão e sensor.

3.4. Consumo hídrico das culturas

Com os dados de umidade do solo coletados pela sonda capacitiva Diviner 2000 e dados meteorológicos coletados durante o experimento, no site do INMET através da Estação Meteorológica Automática de Campina Grande, localizada na Embrapa Algodão, foi possível determinar o balanço hídrico do solo, determinando a evapotranspiração da cultura (ET_c), com base na seguinte equação:

$$ET_c = P + I \pm R + A - D_p - \Delta S \quad (1)$$

em que:

ET_c: Evapotranspiração da cultura (mm);

P: Precipitação pluviométrica (mm);

I: Lâmina de irrigação (mm);

R: Escoamento superficial (mm);

A: Ascensão capilar (mm);

D_p: Drenagem profunda (mm);

ΔS: Variação do armazenamento de água do solo (mm) no intervalo de tempo.

Considerando-se que a topografia dos canteiros do experimento é plana, o

escoamento superficial (R) foi desconsiderado. Além disso, a ascensão capilar (A) e a drenagem profunda (Dp) também foram desconsideradas, com a justificativa de que o lençol freático da região tem profundidade superior a 1 metro e o volume de controle do tomateiro está até 0,8 m, e não ter ocorrido chuvas extremas durante o período do experimento, fazendo-se o uso apenas da irrigação controlada.

Para o cálculo da variação do armazenamento de água no perfil do solo (ΔS) foi utilizada a seguinte equação, considerando a profundidade de 0,8 m:

$$\Delta S = (\theta_2 - \theta_1) \cdot Z_{BH} \quad (2)$$

em que:

Δ Variação do armazenamento de água nos dias considerados (mm);

θ_2 Umidade do solo encontrada no tempo 2 (final), m^3m^{-3} ;

θ_1 Umidade do solo encontrada no tempo 1 (inicial), m^3m^{-3} ;

Z_{BH} Profundidade considerada para o balanço hídrico (0,8 m)

3.5. Metodologia do cálculo de análise dimensional

De acordo com teorema π de Buckingham é necessário padronizar e reduzir as dimensões de cada variável, a fim de que se obtenha apenas as características básicas das dimensões.

Neste trabalho serão consideradas as dimensões básicas de massa [M], comprimento [L], e tempo [T]. Todas as dimensões dos parâmetros serão convertidas nestas 3 formas básicas, como mostra a Tabela 1.

Considerando essas variáveis, a seguinte relação pode ser estabelecida:

$$F(ET_c, V, H, P, US, I, ET_0, R_s, D) = 0 \quad (3)$$

O número de π é obtido a partir de $k = n - m$, em que n é o número de grandezas, e m é o número de dimensões. Os passos da análise dimensional usando o teorema de Buckingham π podem ser definidos como:

1) O número de parâmetros que são usados como variáveis, $n = 9$;

2) Dimensões básicas são M, L e T, logo o valor de $m = 3$, assim o número de dimensões de π é dado por $k = n - m$, $k = 9 - 3$, $k = 6$, então o valor de $\pi = 6$, sendo este o número de parâmetros adimensionais;

3) A função π é formada pela Equação (4):

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \quad (4)$$

Sendo assim, os grupos π obtidos pela aplicação do método de Buckingham, tomando as variáveis ETc , V e H como base, são:

$$\pi_1 = ETc^{X_{1,1}} V^{X_{2,1}} H^{X_{3,1}} P \quad (5)$$

$$\pi_2 = ETc^{X_{1,2}} V^{X_{2,2}} H^{X_{3,2}} US \quad (6)$$

$$\pi_3 = ETc^{X_{1,3}} V^{X_{2,3}} H^{X_{3,3}} I \quad (7)$$

$$\pi_4 = ETc^{X_{1,4}} V^{X_{2,4}} H^{X_{3,4}} ET_0 \quad (8)$$

$$\pi_5 = ETc^{X_{1,5}} V^{X_{2,5}} H^{X_{3,5}} Rs \quad (9)$$

$$\pi_6 = ETc^{X_{1,6}} V^{X_{2,6}} H^{X_{3,6}} D \quad (10)$$

Tabela 1 – Variáveis selecionadas para o experimento.

	Variável	Nome	Unidade	Dimensão
01	Evapotranspiração da cultura	ETc^*	mm/dia	$M^1 L^0 T^{-1}$
02	Precipitação	P	mm/dia	$M^1 L^0 T^{-1}$
03	Umidade do solo	US	mm/dia	$M^1 L^0 T^{-1}$
04	Velocidade do vento a 2 metros	V^*	m/s	$M^0 L^1 T^{-1}$
05	Irrigação	I	mm/dia	$M^1 L^0 T^{-1}$
06	Evapotranspiração de referência	ET_0	mm/dia	$M^1 L^0 T^{-1}$
07	Radiação solar	Rs	W/m ²	$M^1 L^0 T^{-3}$
08	Altura da planta	H^*	cm	$M^0 L^1 T^0$
09	Diâmetro da planta	D	cm	$M^0 L^1 T^0$

* Variáveis repetitivas (escolhidas para base).

Foi utilizado conceito de matrizes para resolver o sistema de equações, segundo Sharp et al (1992), visto que é o método mais adequado de utilizar em um problema envolvendo um grande número de variáveis e além disso, se destaca pelo seu ótimo desempenho em revelar a base dimensional real de um conjunto de grandezas físicas e na formulação dos parâmetros π de uma maneira ordenada.

Para exemplificar a resolução a partir de matrizes, retomam-se as dimensões básicas (M, L e T) para inserir na matriz dimensional (Eq. 11) que pertence a x_i e passos prosseguem da seguinte forma:

$$\begin{array}{c}
 \\
 \\
 \text{L} \\
 \text{T} \\
 \text{M}
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad \cdot \quad \cdot \quad x_n \\
 \left| \begin{array}{ccccccc}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & \cdot & \cdot & a_{1n} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & \cdot & \cdot & a_{2n} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \cdot & \cdot & a_{3n}
 \end{array} \right|
 \end{array}
 \quad (11)$$

Sharp et al. (1992) colocam que se a classificação dessa matriz for 3, todas as dimensões básicas serão necessárias para descrever o subespaço das variáveis x_i . Então seguindo o teorema π , três variáveis de base devem ser escolhidas (variáveis repetitivas), que neste caso serão x_1, x_2 e x_3 . Deste modo a matriz (11) será dividida em matriz A_1 e A_2 , tal que:

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} a_{14} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1n} \\ a_{24} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2n} \\ a_{34} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{3n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

É necessário assumir o inverso da matriz A_1 como A_1^{-1} , e seguindo ficará da seguinte forma:

$$D = A_1^{-1}A_2 \quad (14)$$

Finalizando a última etapa do exemplo de resolução, com a extração do termo π , tem-se a seguinte equação para essa matriz dimensional:

$$\pi_i = \frac{x_i}{(x_1)^{d_{1k}} (x_2)^{d_{2k}} (x_3)^{d_{3k}}} \quad (15)$$

em que k representa a variação numérica dos termos da matriz dimensional de x_i .

Aplicando analogamente a resolução do exemplo acima para os dados da pesquisa, temos os valores de ET_c , V e H colocados na matriz A , de acordo com suas dimensões (M, L e T):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Os valores das dimensões de P , US , I , ET_0 , Rs e D são colocados na matriz B , da mesma forma:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -3 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Portanto, o sistema de equações é definido pela Tabela 2, em que os valores da matriz A estão destacados em negrito, e os demais valores correspondem a matriz B .

Tabela 2 – Sistema de equações dado pelas matrizes A e B .

	ET_c	V	H	P	θ	I	ET_0	Rs	D
M	1	0	0	1	1	1	1	1	0
L	0	1	1	0	0	0	0	0	1
T	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-3	0

Para a solução das matrizes, é dada a matriz X:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ x_{31} & x_{32} & \cdots & x_{3p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Assim pode ser dada a equação para a solução de matrizes, a qual segue os seguintes passos, até chegar à equação final colocada como equação (19):

$$A \cdot X + B = O$$

$$(A^{-1} \cdot A) \cdot X = A^{-1} \cdot (-B)$$

$$I \cdot X = A^{-1} \cdot (-B) \quad (19)$$

em que A^{-1} é a matriz transposta de A e I é a matriz identidade ($I = A^{-1} \cdot A$).

3.6. Análises Estatísticas

Para a análise dos resultados, aplicou-se a análise de regressão e coeficiente de determinação (R^2) para o entendimento das relações estabelecidas entre cada parâmetro adimensional escolhido. O software RStudio foi utilizado para o cálculo do R^2 e para a produção das imagens utilizadas nos resultados.

3.6.1. Validação dos Modelos

A validação tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos através de indicadores estatísticos, os quais comparam valores reais observados em condição de campo com valores simulados pelos modelos. Foram usados os seguintes indicadores estatísticos:

A raiz do erro quadrado médio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Si - Oi)^2}{n_o}} \quad (20)$$

O RMSE indica valores de 0 a ∞ e é considerado um bom ajuste quando o resultado se aproxima de 0 e um desempenho fraco quanto mais se afasta de 0.

A raiz do erro quadrático médio normalizado (NRMSE):

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{o}} \sqrt{\frac{\sum(Si-Oi)^2}{n_o}} \times 100 \quad (21)$$

Os valores obtidos pelo NRMSE são dados em porcentagem, visto que a simulação é classificada da seguinte forma: excelente em valores menores que 10%, boa em valores entre 10 e 20%, justa se estiver entre 20 e 30% e ruim caso seja acima de 30%.

O coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EF):

$$EF = 1 - \frac{\sum(Si-Oi)^2}{\sum(Oi-\bar{o})^2} \quad (22)$$

Já os valores obtidos por EF devem variar de $-\infty$ a 1, sendo interpretado o valor igual a 1 como ideal, já que traduz a relação perfeita entre os dados observados e simulados.

E por último, o índice de acordo de Willmott (d):

$$d = 1 - \frac{\sum(Si-Oi)^2}{\sum(|Si-\bar{o}|+|Oi-\bar{o}|)^2} \quad (23)$$

O qual tem variação de 0 a 1 e a interpretação dada é que zero significa nenhuma concordância e 1 indica concordância perfeita.

Para todas as equações dos indicadores, tem-se que:

Si: Valores simulados pelos modelos;

Oi: Valores observados em campo;

\bar{o} : Média dos valores observados;

n_o : Número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características do cultivo realizado no período seco

De acordo com a Figura 5, que descreve a variação da altura da planta com blocos de 10 dias, durante o período seco do experimento (ano de 2016) para cada tratamento de irrigação, é possível avaliar que nos tratamentos de 100 e 80% a altura da planta mantém um crescimento linear e nos outros tratamentos de 60, 40 e 20%, a partir do dia 50 há uma pequena diminuição no crescimento. Apesar de não haver diferenças significativas de crescimento entre os tratamentos, o tratamento de 100% foi o que apresentou maior variação do começo até o final do ciclo.

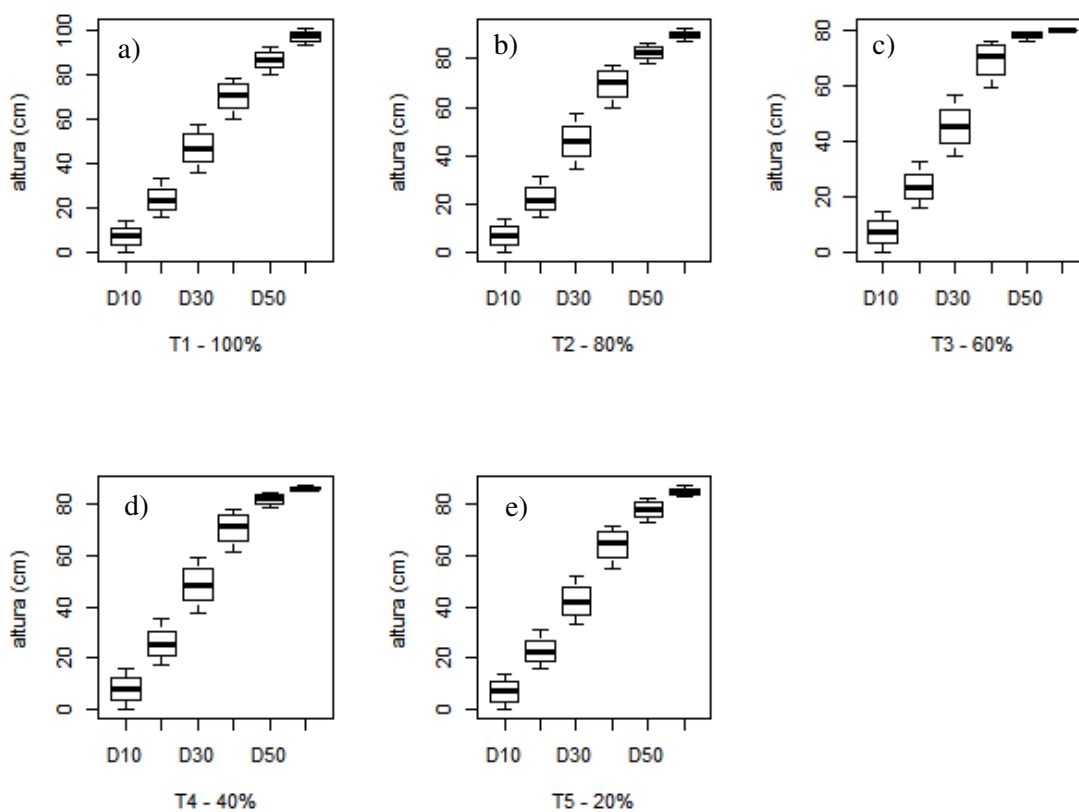


Figura 5 – Variação da altura da planta para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.

A variação do diâmetro da planta apresenta crescimento linear em todos os tratamentos, porém quando os tratamentos de 100 e 20% são comparados, pode-se notar

que a variação do diâmetro do tratamento de 20% é consideravelmente mais baixa (Figura 6). Isso deixa claro que o controle da necessidade hídrica da planta de tomate tem influência no crescimento dela ao longo do ciclo durante o período seco do ano, principalmente na fase de senescência.

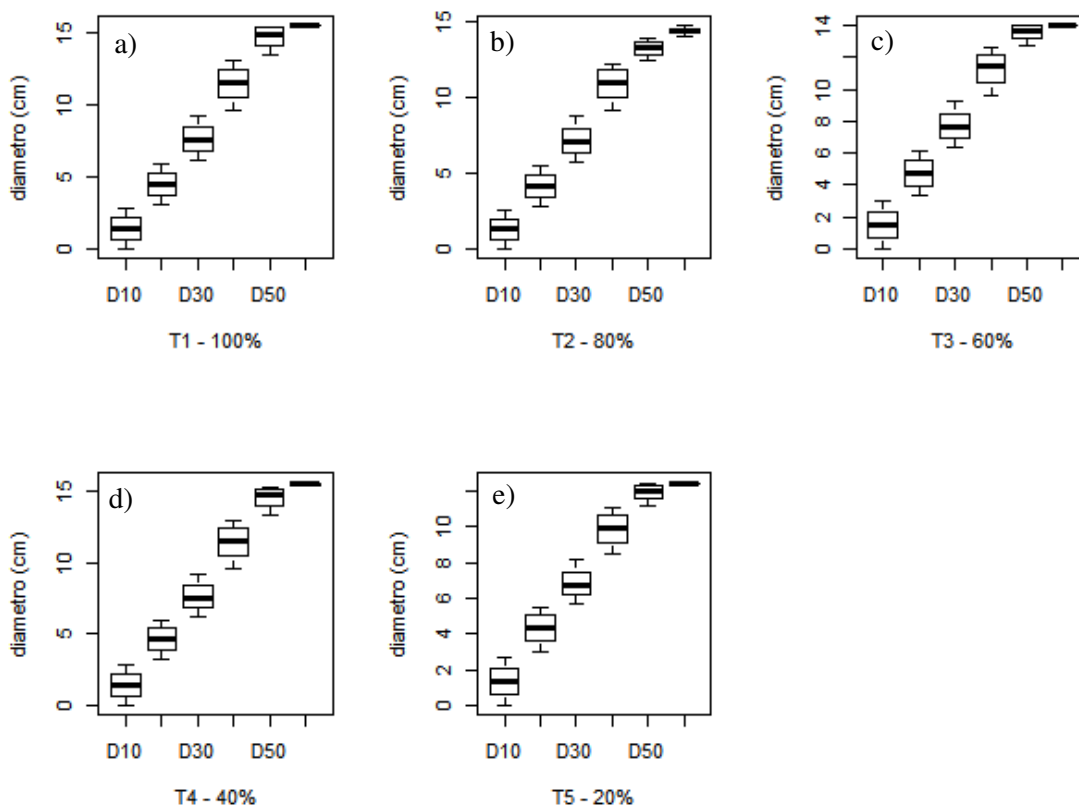


Figura 6 – Variação do diâmetro para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.

A Figura 7 apresenta a variação da irrigação controlada da plantação durante todo o experimento para cada tratamento. Para todo o experimento, a técnica de irrigação utilizada foi a por gotejamento, por ser uma técnica mais eficiente com relação a economia de água. Em todos os tratamentos nota-se uma variação em forma de parábola, isso se deve a necessidade hídrica da planta em suas diferentes fases de crescimento, as quais se dão pela primeira fase – a vegetativa – que não necessita de alta demanda hídrica, a segunda fase – a reprodutiva – que já possui uma demanda maior, por causa do aumento do coeficiente de cultivo (K_c) e a última fase, a de senescência, a qual o K_c decai, então a demanda hídrica também diminui.

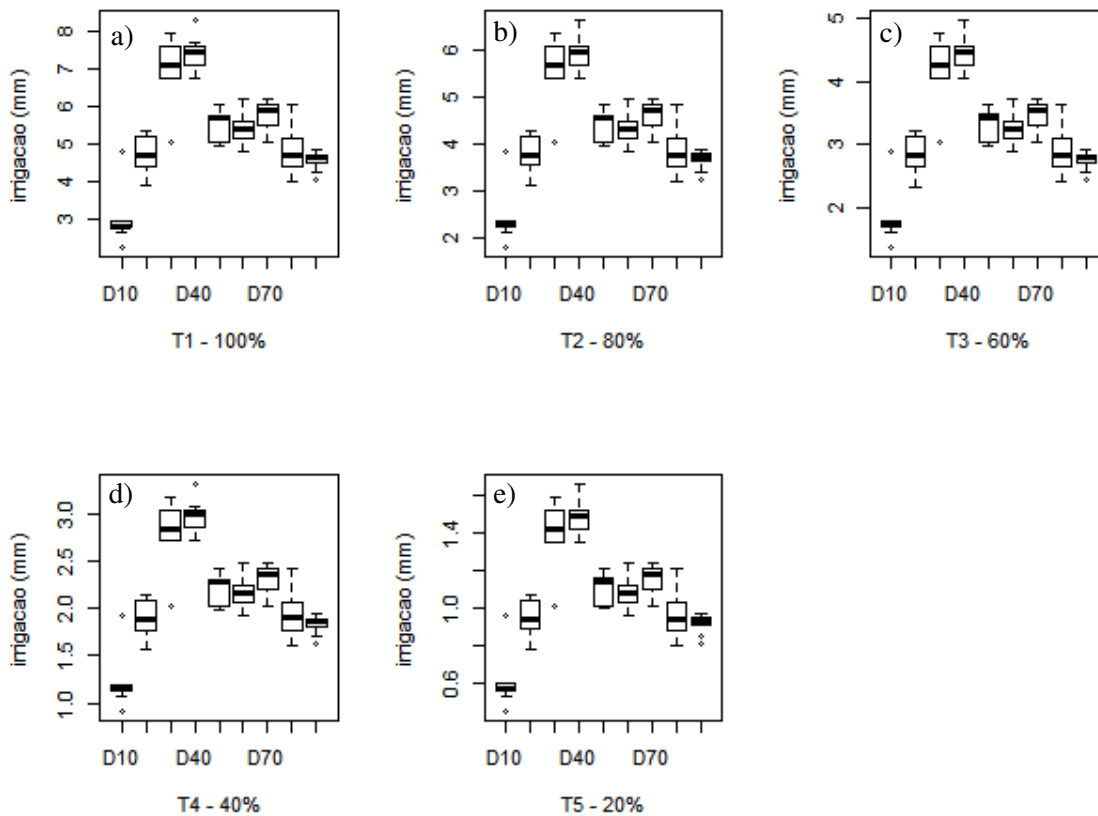


Figura 7 – Variação de demanda hídrica controlada por irrigação para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.

Na Figura 8 são apresentadas as médias obtidas para a umidade do solo de cada tratamento de irrigação. É possível notar que nos tratamentos de 100 e 80% a umidade do solo acompanha a parábola da variação da irrigação. Em todos os tratamentos a umidade do solo cai consideravelmente devido a diminuição da demanda hídrica na fase senescência e por se tratar de um período seco.

A Figura 9 apresenta os dados de evapotranspiração obtidos pelo balanço hídrico do solo, com dados medidos em campo. A variação da evapotranspiração em todos os tratamentos acompanhou a variação dos estágios de desenvolvimento da planta, onde o pico com os maiores valores de evapotranspiração acontece durante a fase reprodutiva.

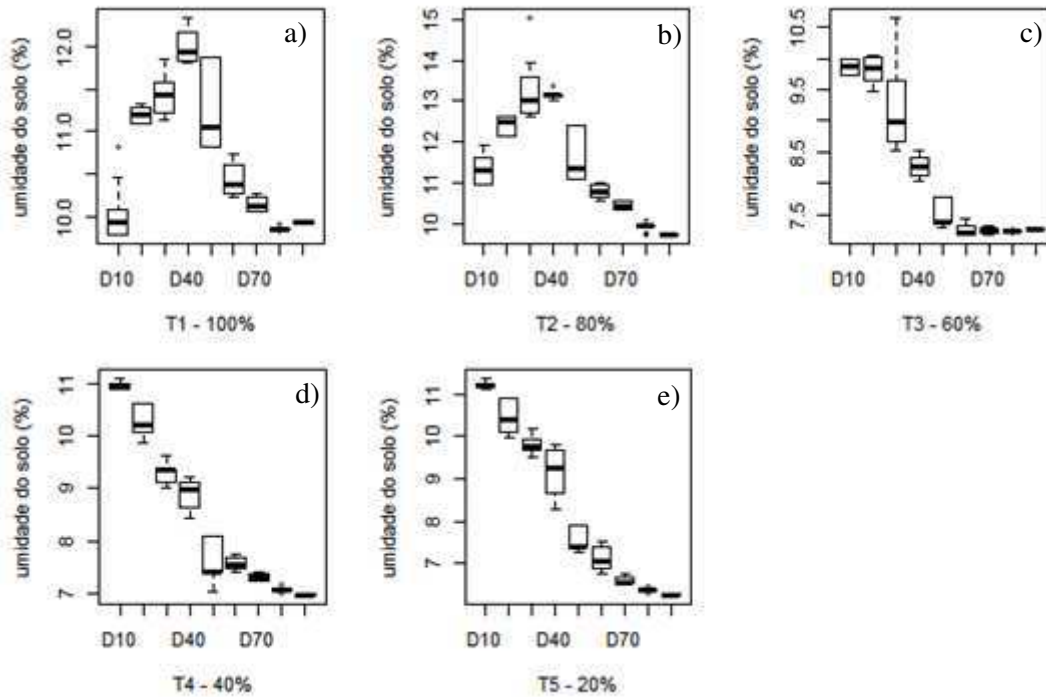


Figura 8 – Variação da umidade do solo de 0 a 0,8 m de profundidade para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.

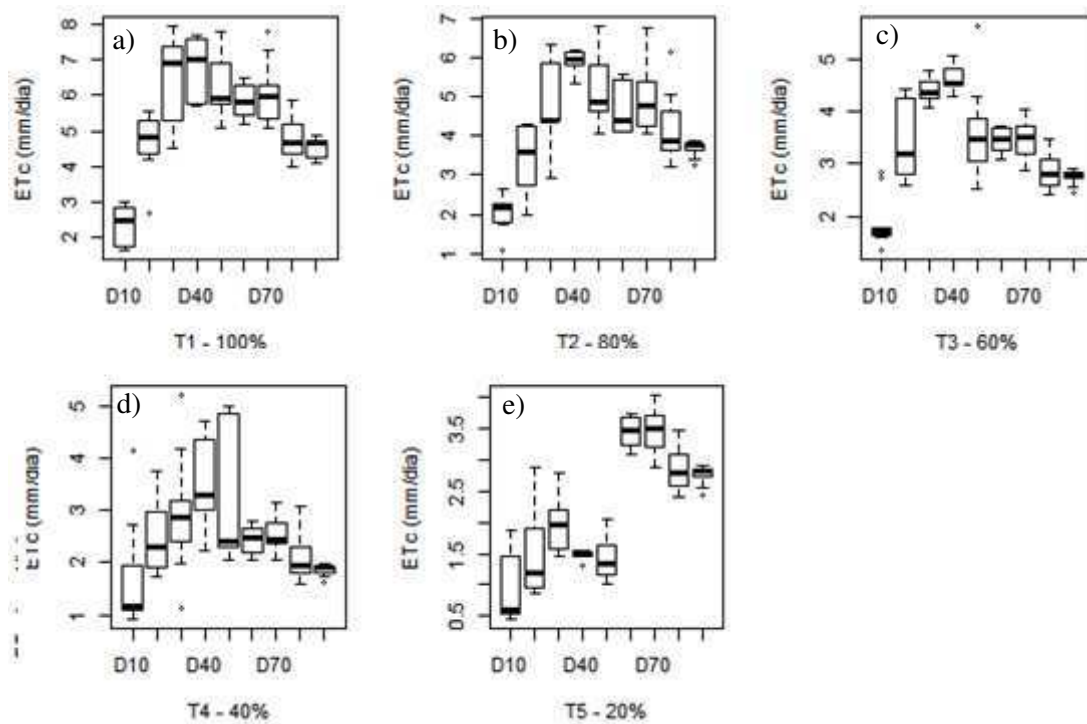


Figura 9 – Variação da evapotranspiração da cultura para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2016.

4.2. Características do cultivo realizado no período chuvoso

A Figura 10 descreve a variação da altura da planta com blocos de 10 dias, durante o período chuvoso do experimento no ano de 2017 para cada tratamento de necessidade hídrica. Apesar da semelhança de crescimento da planta com o período seco, pode-se perceber que no período chuvoso, a altura da planta em todos os tratamentos cresceu de forma mais homogênea devido a precipitação do período. O tratamento que obteve a maior altura média foi o de 80% e o que obteve a menor altura média foi o de 60%.

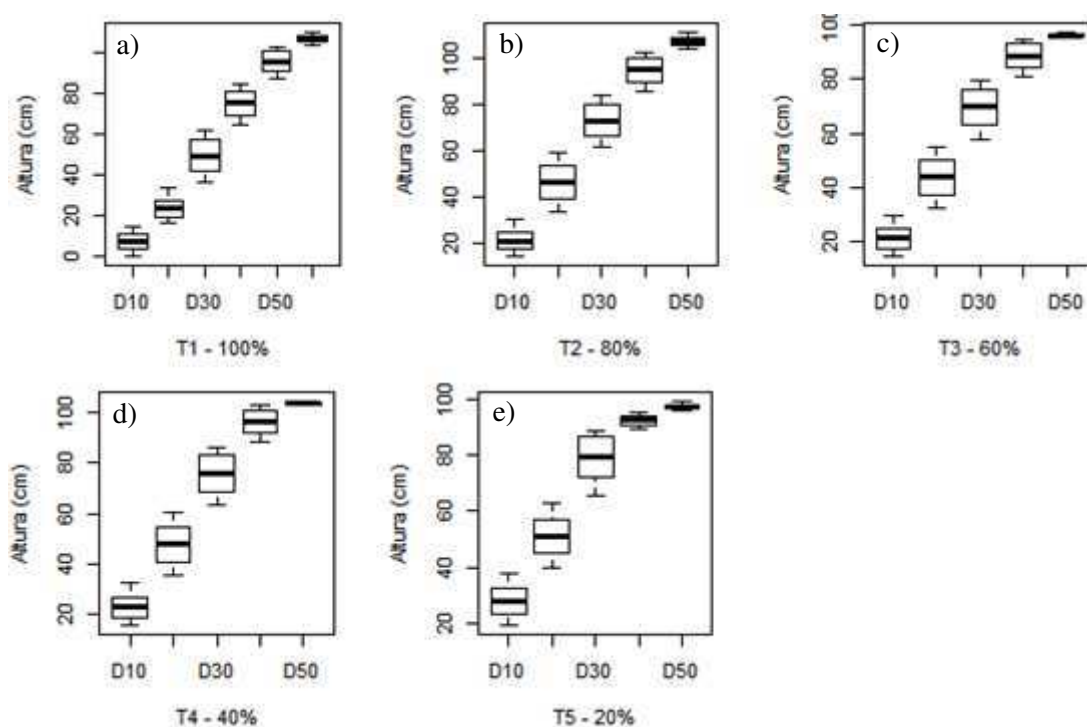


Figura 10 – Variação da altura da planta para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.

A variação do diâmetro da planta apresenta crescimento linear em todos os tratamentos, porém o valor médio do diâmetro do tratamento de 20% das necessidades hídricas da planta, com 7,98 cm, foi maior do que o valor médio do diâmetro do tratamento de 100%, com 7,57 cm (Figura 11). Segundo Freitas (2018), isso se deve a dificuldade de manejo do experimento durante o período chuvoso, já que foi feito em campo aberto. A Figura 12 apresenta a variação da irrigação controlada da plantação durante todo o experimento para cada tratamento.

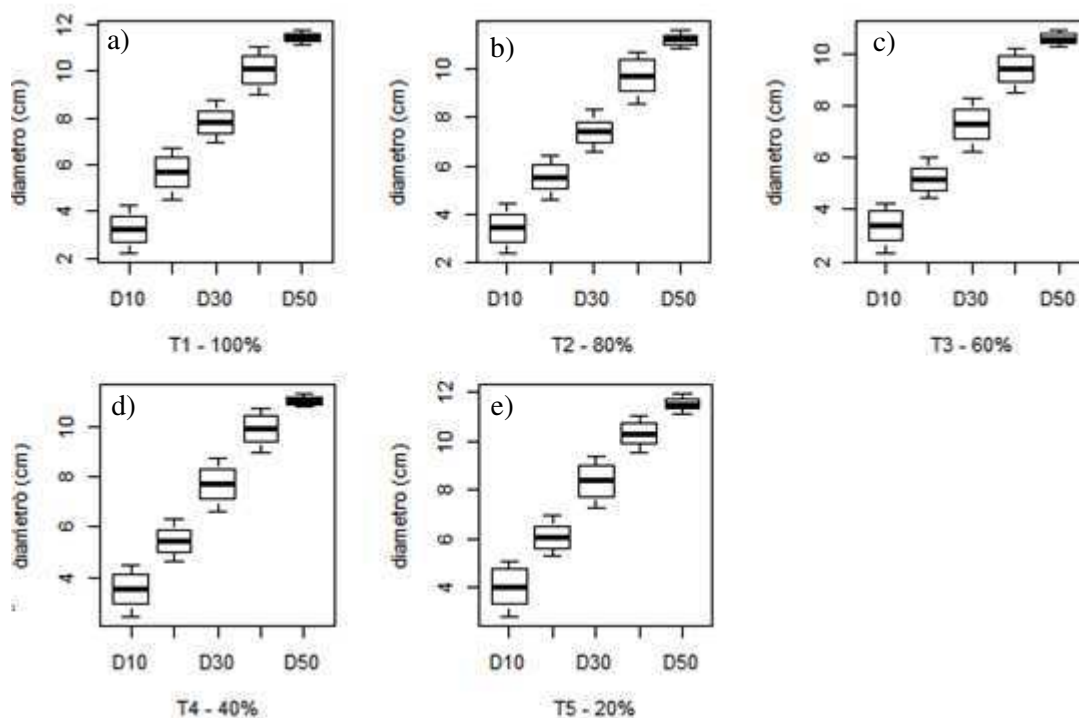


Figura 11 – Variação do diâmetro para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.

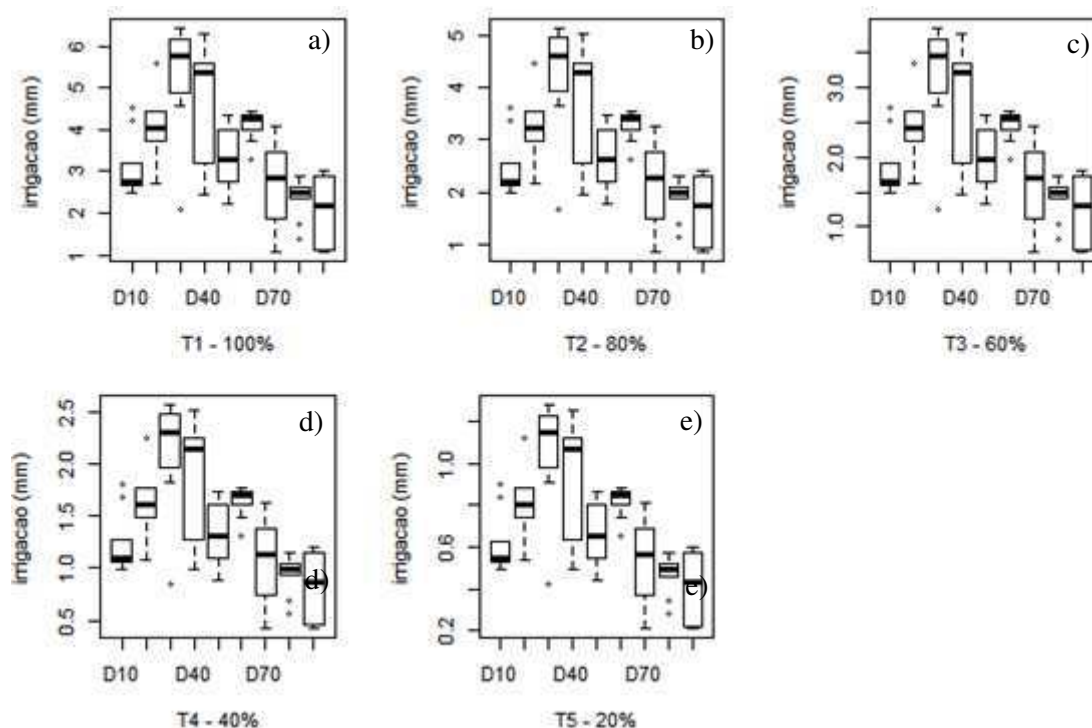


Figura 12 – Variação de demanda hídrica controlada por irrigação para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.

Apesar da irrigação seguir um padrão de aumento e redução de acordo com a necessidade hídrica da planta durante o seu desenvolvimento, a irrigação se tornou mais irregular, justamente devido a precipitação. Isso é percebido no D60 de todos os tratamentos, devido ao período de 10 dias em que a precipitação foi mais baixa que os outros dias do ciclo, produzindo uma demanda hídrica da planta foi maior.

Na Figura 13 são apresentadas as médias obtidas para a umidade do solo de cada tratamento de irrigação. É possível notar que durante o período chuvoso a umidade do solo não se mantém constante nem segue um padrão como no período seco, em nenhum dos tratamentos. No tratamento de 40%, os 20 primeiros dias mantém um valor de 14,30% de umidade no solo, enquanto que os outros tratamentos de 100, 80, 60 e 20% foram de 13,4%, 14%, 12,9% e 13,6%, respectivamente. Nos primeiros 20 dias houve registro de chuvas fortes, então um dos motivos da diferença do tratamento de 40% para os outros pode ter sido em face do alagamento no canteiro, devido ao escoamento superficial nos demais canteiros.

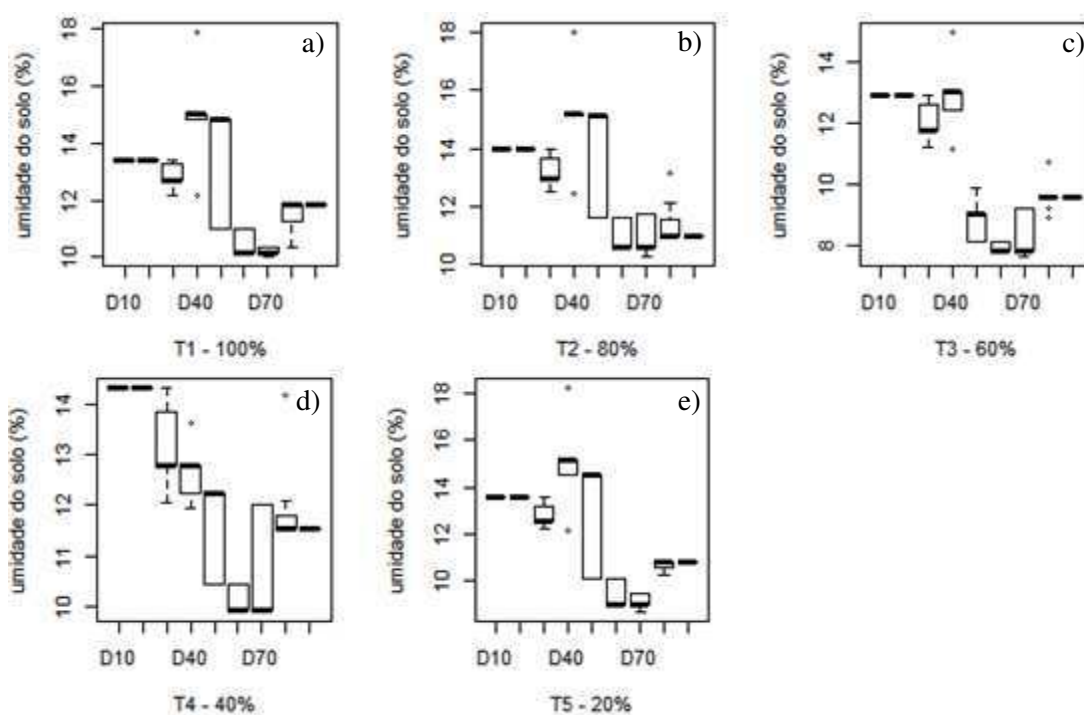


Figura 13 – Variação da umidade do solo de 0 a 0,8 m de profundidade para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição de necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.

A Figura 14 apresenta os dados de evapotranspiração obtidos pelo balanço hídrico do solo, com dados medidos em campo. Durante o período chuvoso, assim como as outras variáveis abordadas acima, é possível perceber que a ETc se comporta de forma irregular em todos os tratamentos. O valor mais alto da ETc foi de 6,4 mm no tratamento de 100% e o mais baixo foi de 3,80 mm no tratamento de 20%. Os picos máximos de evapotranspiração de todos os tratamentos coincidem com dias em que não ocorreu precipitação.

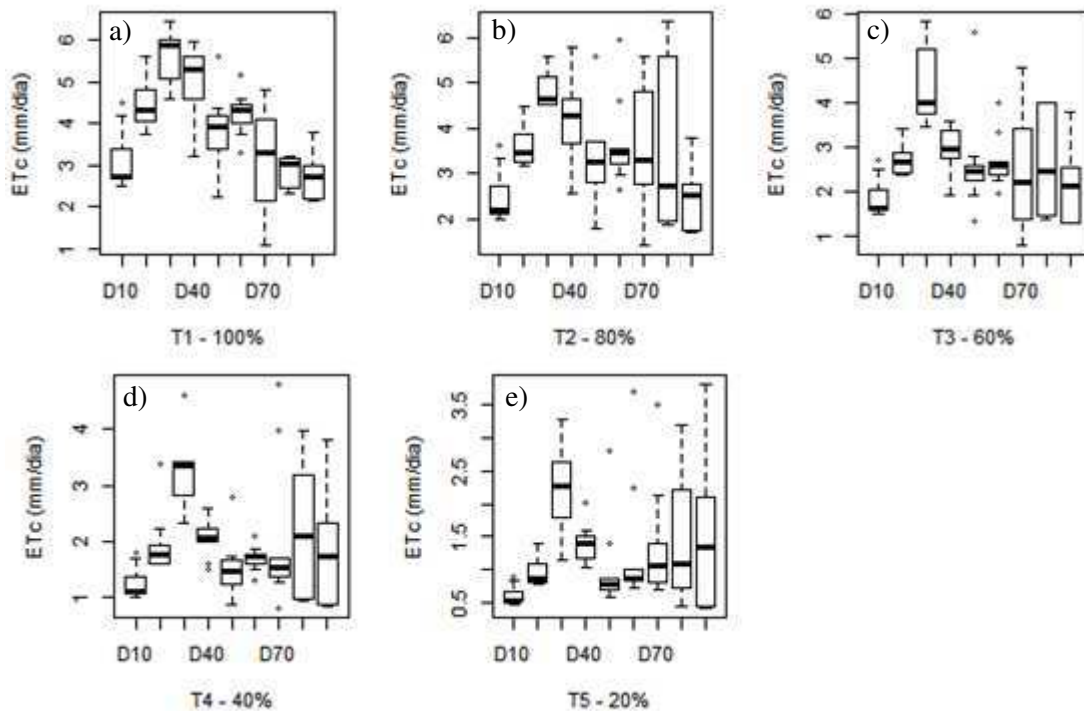


Figura 14 – Variação da evapotranspiração da cultura para os tratamentos a) 100%, b) 80%, c) 60%, d) 40% e e) 20% de reposição da necessidade hídrica da cultura, realizados durante o primeiro ciclo do estudo no ano de 2017.

4.3. Modelos Adimensionais

Após a definição do sistema de equações dados pelas matrizes A e B (Tabela 2), foi obtida a matriz resultante, ou seja, a solução das matrizes, apresentada na Tabela 3, a qual a partir dela foram gerados os parâmetros adimensionais de π .

Tabela 3 – Solução das matrizes.

	$X_{m,1}$	$X_{m,2}$	$X_{m,3}$	$X_{m,4}$	$X_{m,5}$	$X_{m,6}$
ET_c	-1	-1	-1	-1	-1	0
V	0	0	0	0	-2	0
H	0	0	0	0	2	-1

Os parâmetros π podem ser extraídos a partir da Tabela 3, fornecendo as seguintes equações:

$$\pi_1 = \frac{P}{ET_c} \quad (24)$$

$$\pi_2 = \frac{US}{ET_c} \quad (25)$$

$$\pi_3 = \frac{I}{ET_c} \quad (26)$$

$$\pi_4 = \frac{ET_0}{ET_c} \quad (27)$$

$$\pi_5 = \frac{H^2 R}{ET_c V^2} \quad (28)$$

$$\pi_6 = \frac{H}{D} \quad (29)$$

A partir desses parâmetros definidos, foram estabelecidas algumas correlações entre eles, a fim de desenvolver três modelos adimensionais com equações empíricas que possam estimar a evapotranspiração real. O primeiro modelo é o mais completo com relação a quantidade de variáveis, já que relaciona irrigação, altura, diâmetro da planta e a ET_0 . O segundo modelo contempla apenas as variáveis fenométricas da planta e o terceiro modelo obtém as variáveis de umidade do solo e ET_0 . Os três modelos são apresentados da seguinte forma:

O Modelo Adimensional 1 com:

$$\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4} \quad (30)$$

em que:

$$ETc = a \frac{I H}{D ET_0} + b \quad (31)$$

Modelo Adimensional 2, com a equação (29):

$$ETc = a \frac{H}{D} + b$$

Modelo Adimensional 3:

$$\frac{\pi_2}{\pi_4} \quad (32)$$

em que:

$$ETc = a \frac{US}{ET_0} + b \quad (33)$$

em que a e b são constantes a serem determinadas de acordo com o r^2 .

4.4. Análise dos modelos adimensionais

Os modelos adimensionais foram testados a partir de análises de regressão com os dados dos ciclos do período seco (de setembro a dezembro de 2016) e do período chuvoso (de março a junho de 2017) para cada tratamento. Da Figura 15 até a Figura 19 são apresentados os três modelos para cada tratamento, todos referentes ao primeiro ciclo feito durante o período seco. A Figura 15 apresenta uma correlação entre a evapotranspiração calculada em campo através do balanço hídrico do solo e a evapotranspiração estimada por cada modelo. O modelo adimensional um (Figura 15a) foi o que apresentou melhor resultado de acordo com o r^2 , já que este modelo representa

aproximadamente 70% da evapotranspiração real. Já o modelo adimensional 2 (Figura 15b) apresenta um desempenho mais baixo, com aproximadamente 50% da ETc estimada em campo e o modelo adimensional 3 (Figura 15c) apresentou péssimo desempenho, com apenas 13%.

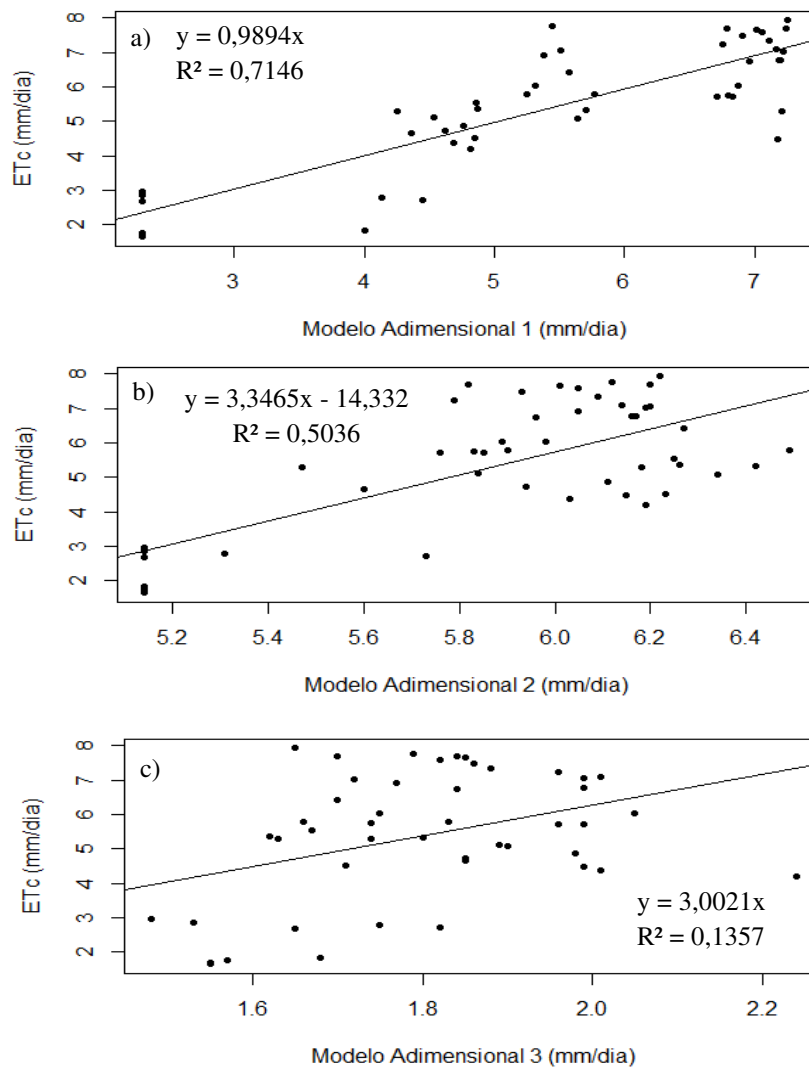


Figura 15 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 100%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

Na Figura 16 os três modelos são apresentados da mesma forma que na Figura 15, porém para o tratamento de 80% de reposição da evapotranspiração do tomateiro.

Novamente o modelo adimensional 1 (Figura 16a) apresentou melhor desempenho com relação aos outros modelos, com aproximadamente 60% de ajuste. O modelo adimensional 2 (Figura 16b) para esse tratamento obteve um ajuste de aproximadamente 40% e modelo adimensional 3 se apresentou um pouco pior neste tratamento se comparado com o tratamento de 100%, com ajuste de 2% apenas. Contudo, os modelos adimensionais 2 e 3 não apresentaram resultados satisfatórios para esse tratamento de 80% durante o período chuvoso.

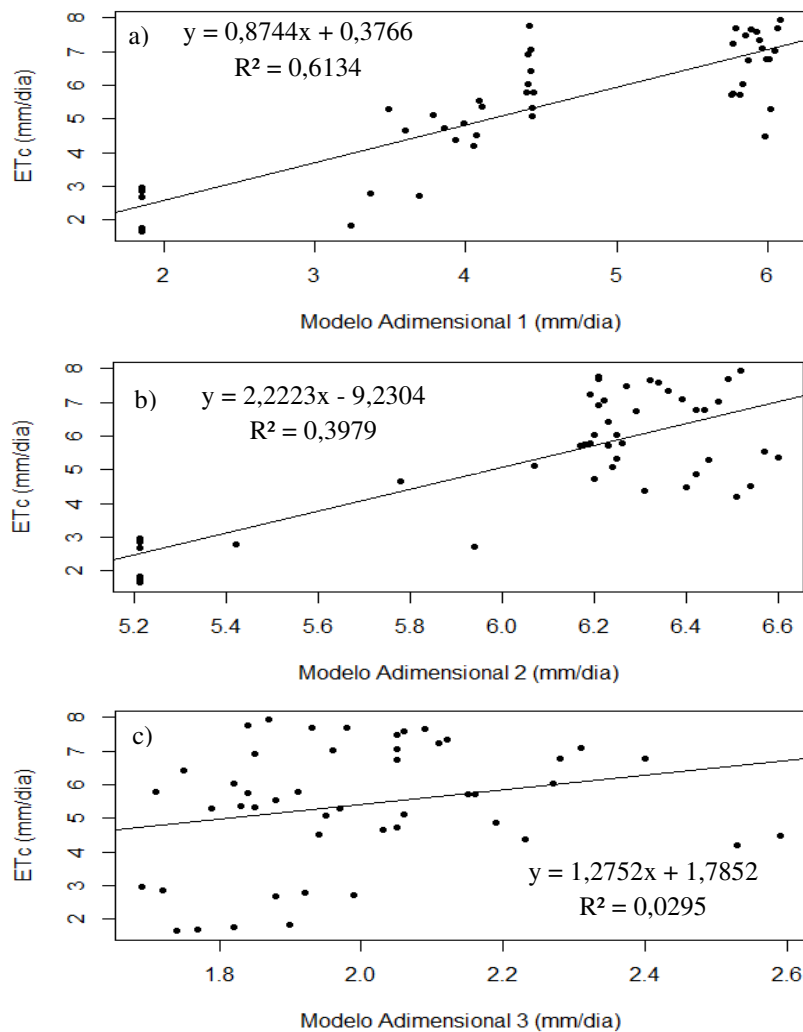


Figura 16 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 80%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

Na Figura 17, onde são apresentados os modelos para o tratamento de 60%, o modelo adimensional 1 (Figura 17a) continua apresentando o melhor desempenho com

relação aos outros modelos, com um valor de 70% de coeficiente de determinação. O modelo adimensional 2 (Figura 17b) apresentou um aumento do r^2 com relação ao tratamento de 80%, e ainda indica um resultado melhor, se comparado com o tratamento de 100% também, com o valor de aproximadamente 60% de ajuste, enquanto que o tratamento de 80 e 100% apresentam 30 e 50% de ajuste, respectivamente. Apesar disso, o modelo adimensional 2 não obteve bom desempenho satisfatório no contexto geral, já que o ideal é o ajuste ser acima de 70%. O modelo adimensional 3 se apresenta com péssimo desempenho, com o valor de r^2 oscilando para mais ou para menos nos tratamentos de 100, 80 e 60%, porém sempre com valores baixíssimos.

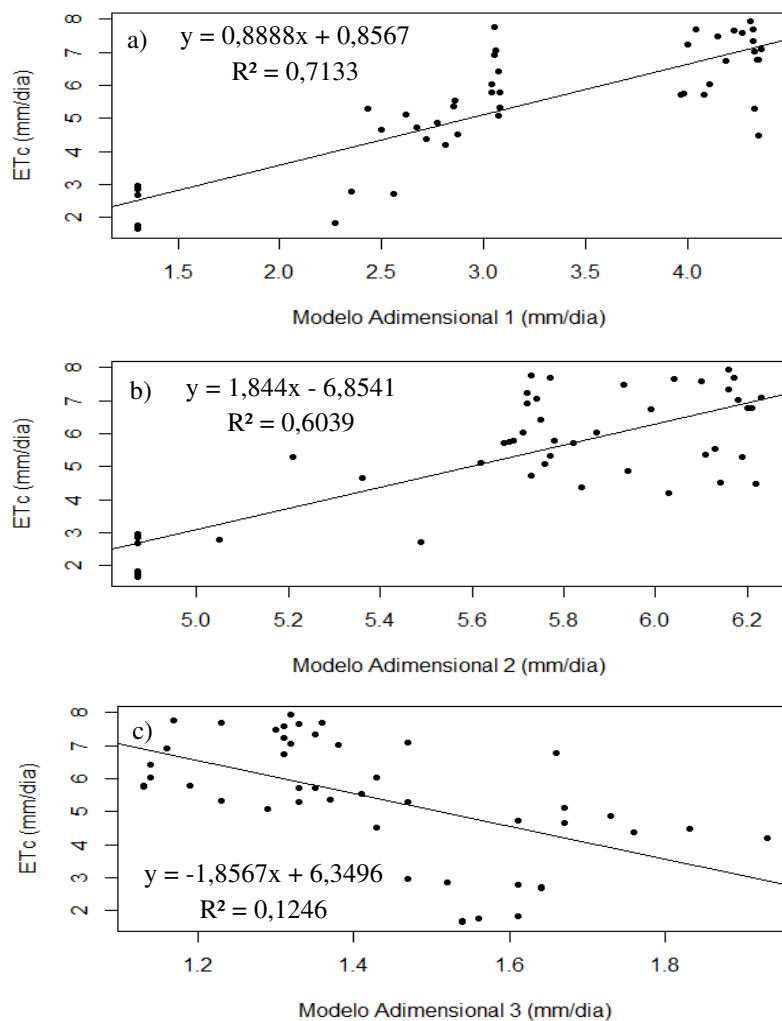


Figura 17 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 60%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

As Figuras 18 e 19 apresentam os modelos para os tratamentos de 40% e 20%, respectivamente. O modelo adimensional 1 (Figura 18a e 19a) apresentou desempenho pior com relação aos outros modelos, obtendo valores de aproximadamente 17 e 23% respectivamente. O modelo adimensional 2 (Figura 18b e 19b) também apresentou valores mais baixos do r^2 com relação aos outros tratamentos, atingindo valores de aproximadamente 0,2 e 12% para os tratamentos de 40 e 20% respectivamente.

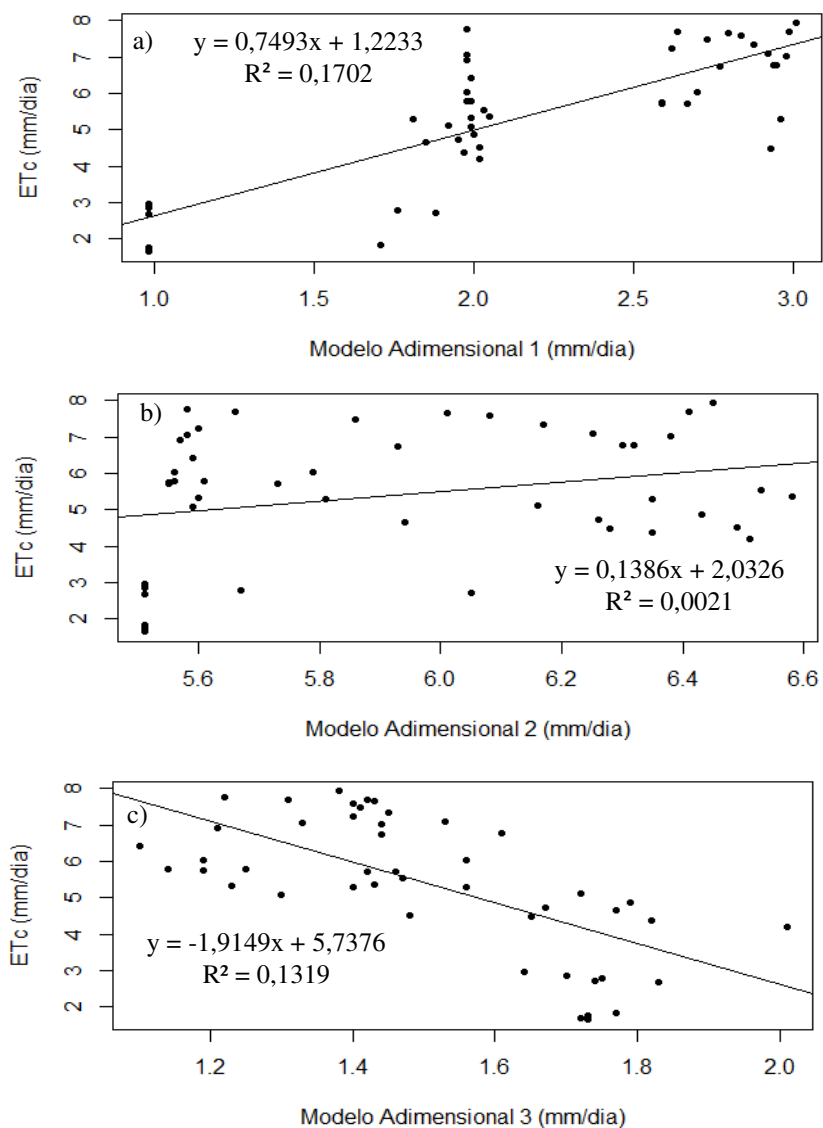


Figura 18 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 40%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

O modelo adimensional 3 continuou apresentando péssimo desempenho para estes dois últimos tratamentos, e apesar de o modelo adimensional 3 ter obtido o valor maior que os tratamentos de 80 e 60%, ainda assim o modelo permanece com ajuste não satisfatório. Com isso, é possível colocar que o modelo 3 foi o pior modelo adimensional e isso se deve ao fato dele depender somente das variáveis fenométricas da planta (altura e diâmetro), as quais, segundo Freitas (2018) os tratamentos estudados não influenciaram de modo significativo na variável altura da planta (cm) durante o período seco.

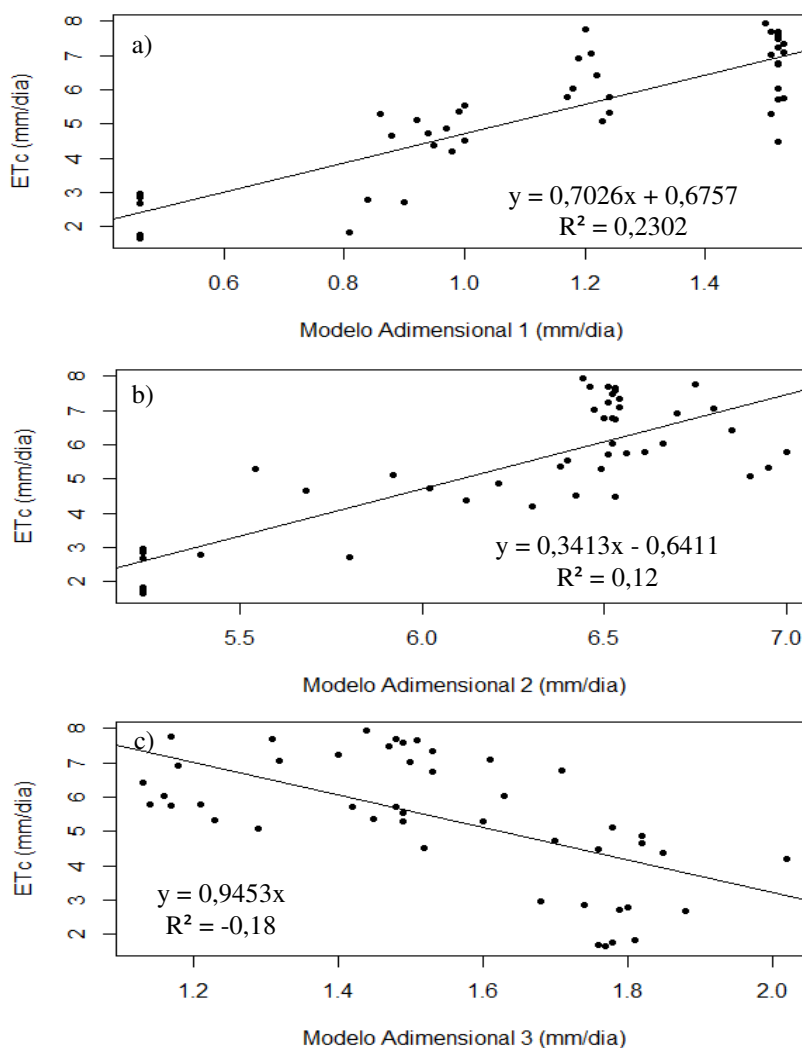


Figura 19 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 20%, para o ano de 2016 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

A partir da Figura 20 até a Figura 24 são apresentados os três modelos para cada tratamento, todos referentes ao segundo ciclo feito durante o período chuvoso. O modelo adimensional 1 (Figura 20a) foi o que apresentou melhor resultado de acordo com o r^2 dentre os três modelos, com aproximadamente 62% de ajuste. Já o modelo adimensional 2 (Figura 20b) obteve um desempenho mais baixo, com aproximadamente 42% da ETc observada em campo e o modelo adimensional 3 (Figura 20c) apresentou péssimo desempenho, com apenas valores negativos.

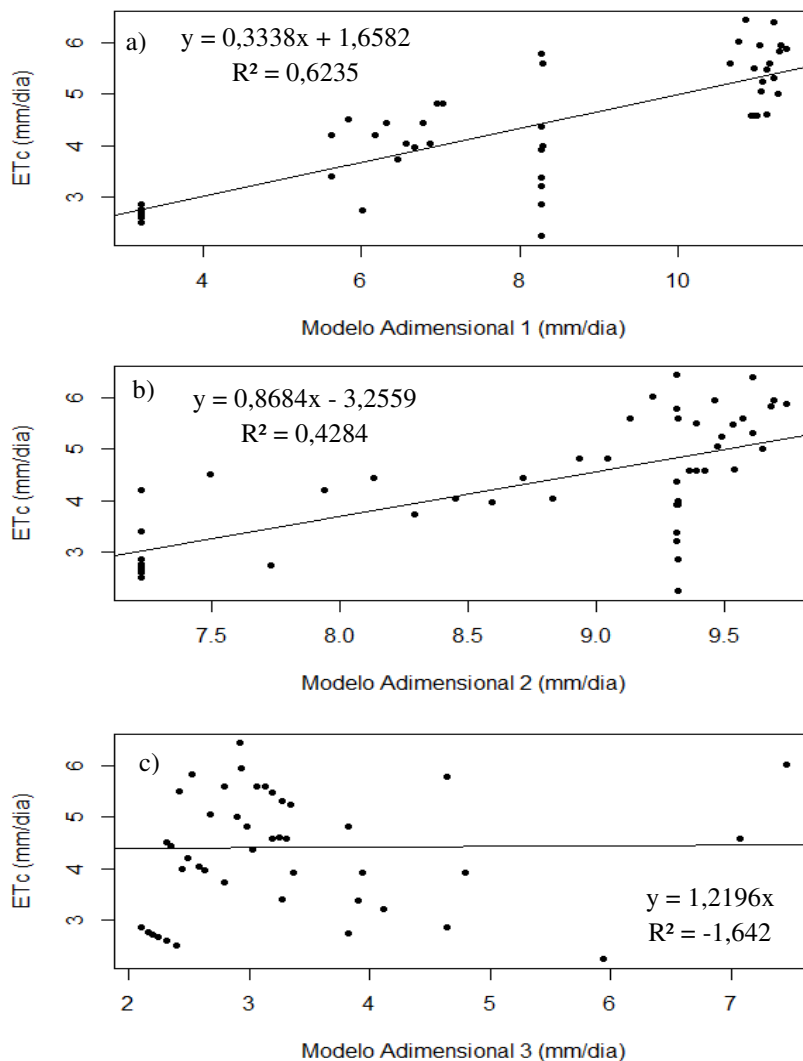


Figura 20 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 100%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

Comparando com os resultados do período seco, todos os modelos adimensionais do tratamento de 100% tiveram desempenho mais baixo no período chuvoso, devido a variabilidade das variáveis climáticas utilizadas nos modelos.

Na Figura 21 são apresentados os modelos para o tratamento de 60% no período chuvoso. O modelo adimensional 1 (Figura 21a) apresentou um valor de ajuste mais baixo com relação ao modelo adimensional 1 do tratamento de 100% (Figura 20a), com o ajuste de 57% e quando comparado com o modelo adimensional 1 do tratamento de 80% do período seco, que por sua vez apresentou 61%.

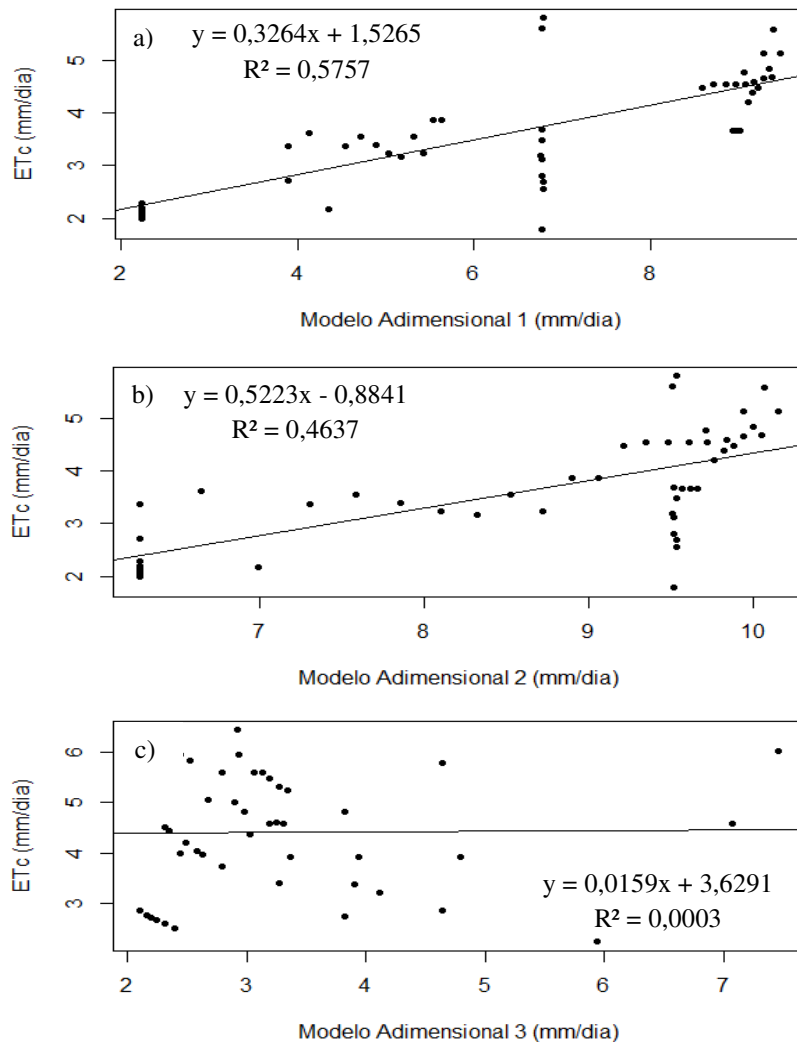


Figura 21 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 80%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

O modelo adimensional 2 (Figura 21b) apresenta o valor do r^2 maior que o modelo 2 de 100% (42,8%) e modelo 2 do período seco (39%), com o valor ajustado de aproximadamente 46%. O modelo adimensional 3 (Figura 21c) novamente apresenta péssimo desempenho, apesar de o resultado ter sido um pouco acima do definido na Figura 20c.

Na Figura 22, onde são apresentados os modelos para o tratamento de 60%, o modelo adimensional 1 (Figura 22a) continua apresentando o melhor desempenho com relação aos outros modelos, com um valor de 46% de coeficiente de determinação, porém no contexto geral, esse valor não satisfatório para uma boa representação.

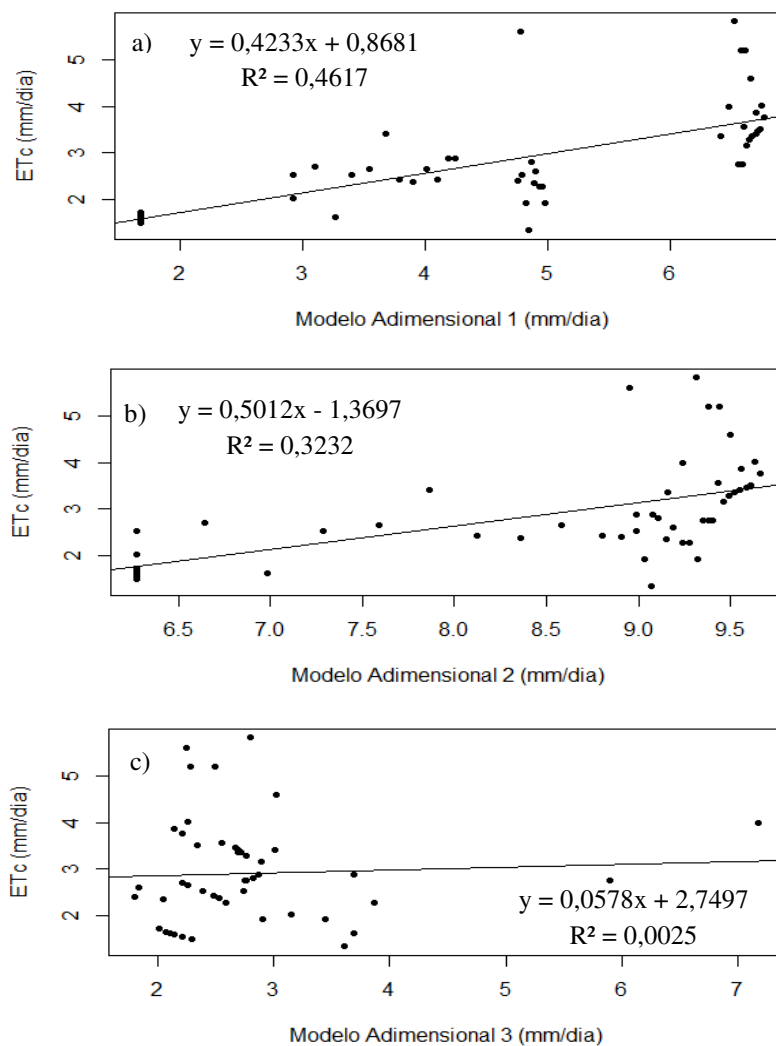


Figura 22 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 60%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

O modelo adimensional 2 (Figura 22b) apresentou uma diminuição do r^2 com relação ao tratamento de 80% e com relação ao modelo adimensional 2 do período seco. O modelo adimensional 3 se apresenta com péssimo desempenho, com o valor de r^2 oscilando para mais ou para menos nos tratamentos de 100, 80 e 60%, porém sempre com valores baixíssimos.

As Figuras 23 e 24 apresentam os modelos para os tratamentos de 40% e 20%, respectivamente. O modelo adimensional 1 (Figura 23a e 24a) manteve desempenho regular com relação aos tratamentos anteriores para o período chuvoso, com valores de aproximadamente 46% para ambos os tratamentos de 40 e 20%. Com relação ao período seco, o modelo adimensional 1 apresenta melhor desempenho no r^2 durante o período chuvoso.

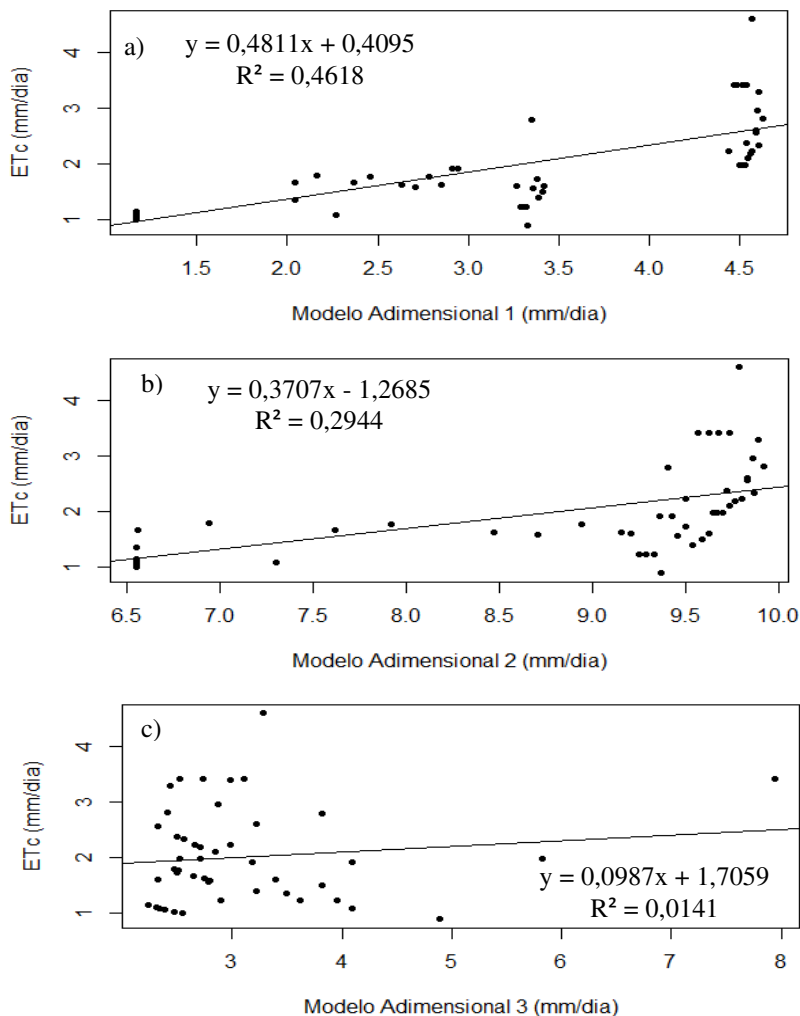


Figura 23 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 40%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

O modelo adimensional 2 do tratamento de 40% (Figura 23b) teve como resultado um valor mais baixo com relação aos tratamentos anteriores, porém o resultado de 29% de ajuste se apresentou melhor do que o modelo adimensional 2 do tratamento de 40% do período seco.

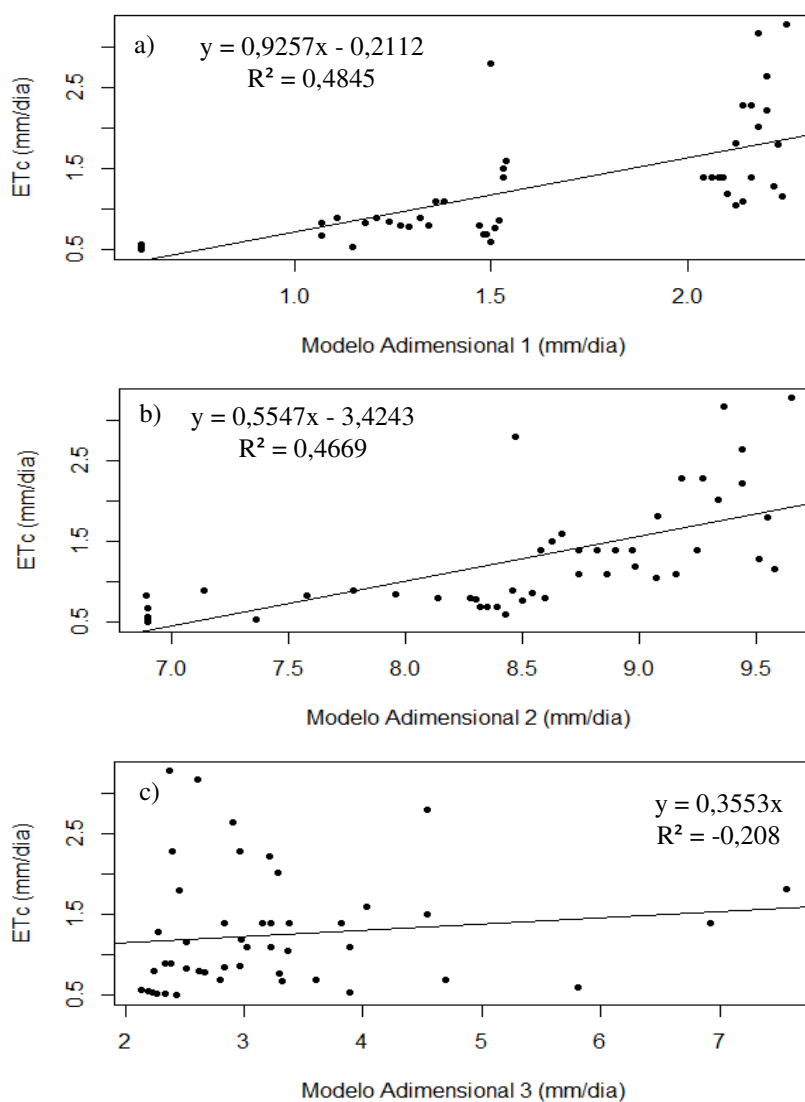


Figura 24 - Correlação entre evapotranspiração do cultivo do tomateiro para o tratamento T1 - 20%, para o ano de 2017 com (a) o modelo adimensional 1 ($\frac{\pi_3 \pi_6}{\pi_4}$), (b) o modelo adimensional 2 ($\pi_6 = \frac{H}{D}$) e (c) o modelo adimensional 3 ($\frac{\pi_2}{\pi_4}$).

Além disso, o modelo adimensional 2 do tratamento de 20%, apresentou o valor de ajuste de 46%, sendo este valor mais alto que do período seco, porém ainda assim, não suficiente. O modelo adimensional 3 continuou apresentando péssimo desempenho para estes dois últimos tratamentos de 40 e 20%, com valores do r^2 de 1 e -2%.

Contudo, é possível colocar que o modelo adimensional 2 se adaptou melhor em condições restritas de água durante o período chuvoso, mas os resultados não foram suficientes para uma boa simulação.

A partir da análise de regressão feita acima, foram estabelecidos os coeficientes para ajuste de cada modelo, os quais estão contidos nas equações das imagens anteriores. Baseado nisso, foram calculados os modelos e seus respectivos coeficientes de determinações e comparados com a ETc calculada em campo.

As Figuras 25 e 26 ilustram a comparação dos modelos adimensionais com a ETc calculada em campo durante o período seco em 2016, onde a Figura 25 mostra as comparações para o tratamento hídrico de 100% e a Figura 26 para o tratamento de 80%. Pode-se observar os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c) e destacar o modelo adimensional 1 que obteve melhor aproximação da ETc calculada em campo, para ambos os tratamentos (100% e 80%).

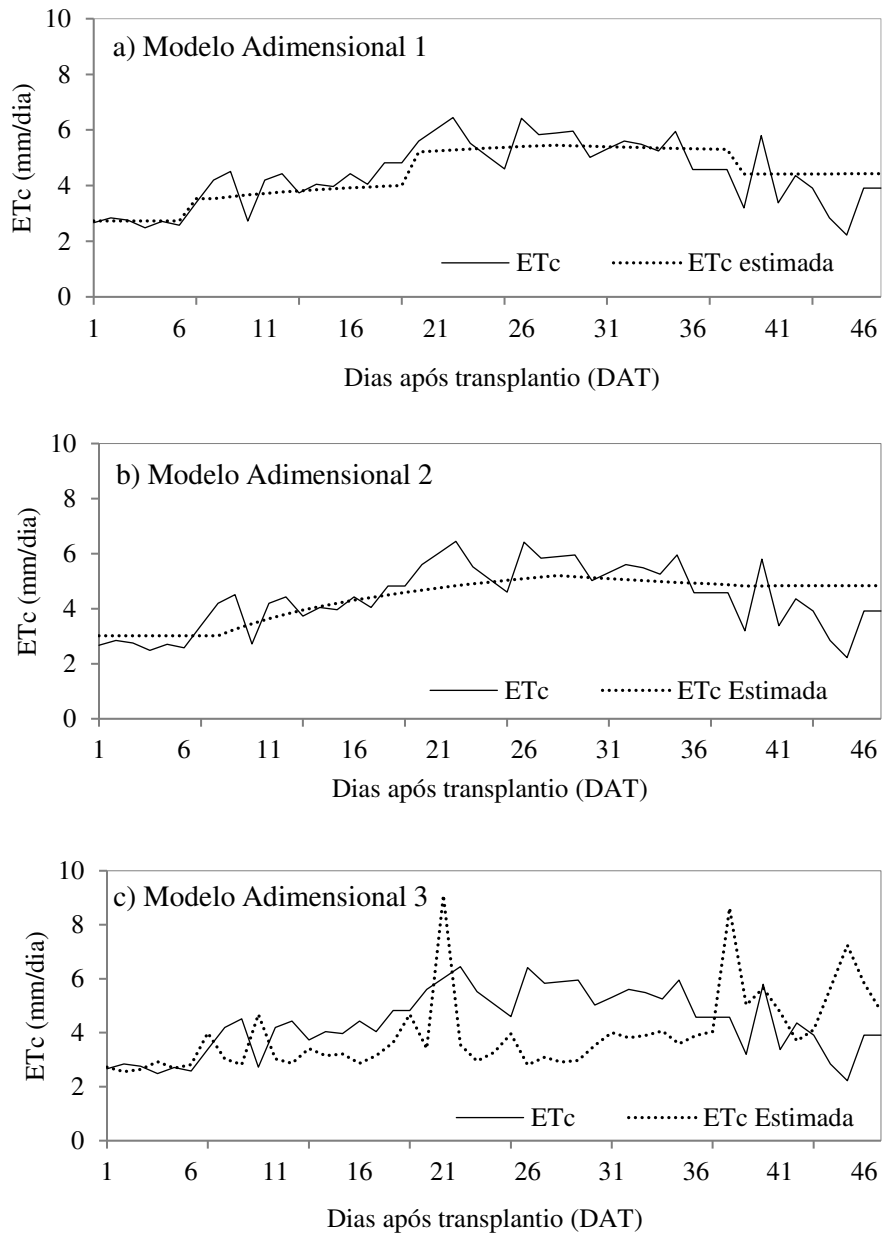


Figura 25 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 100% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

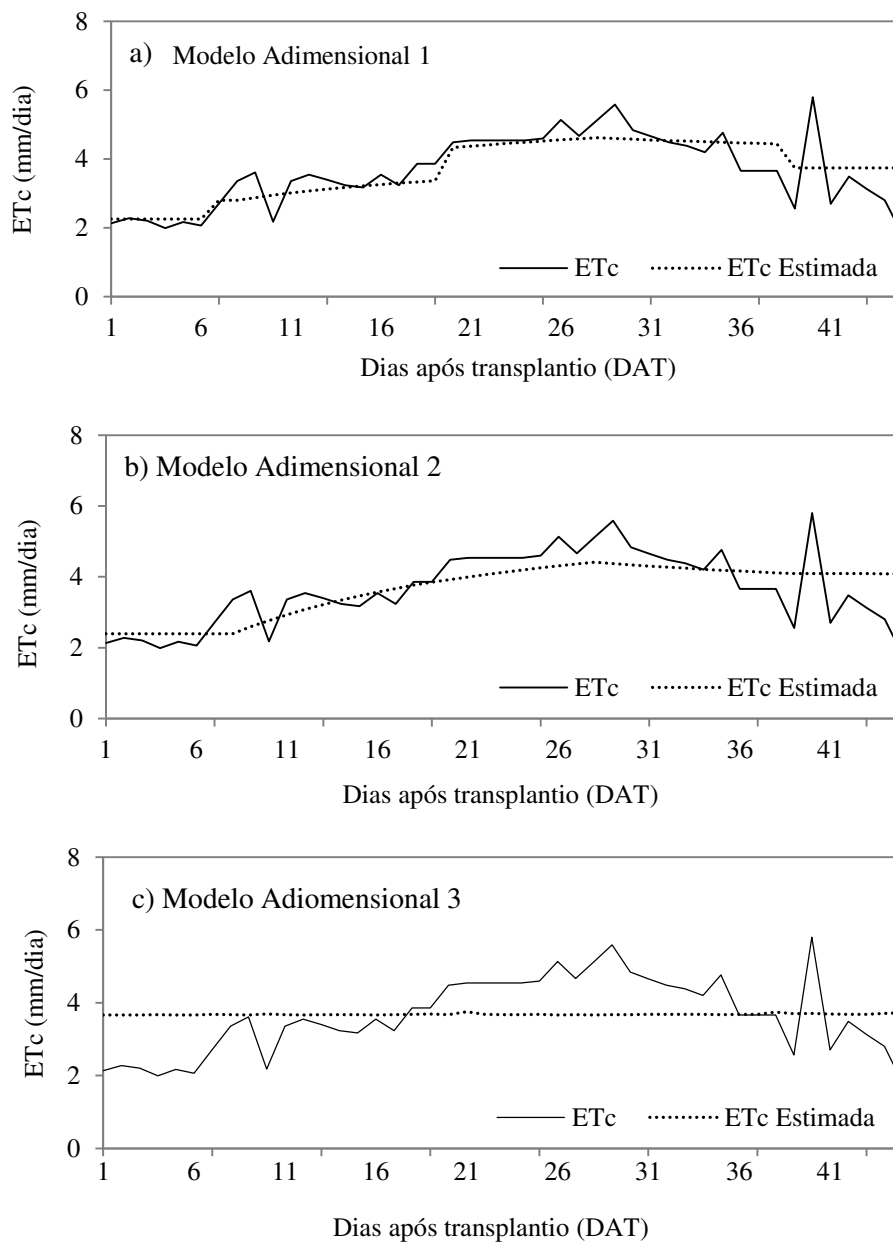


Figura 26 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 80% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

O modelo adimensional 2 (Figura 25b e 26b) também apresentou uma boa aproximação, apesar de serem utilizadas apenas duas variáveis fenométricas (altura e diâmetro) nos dois tratamentos, com exceção do final do ciclo, onde o modelo superestimou os valores da ETc em ambos os tratamentos, além disso, o modelo adimensional 2 subestima alguns valores extremos da ETc.

O modelo adimensional 3 apresentou uma boa aproximação da ETc para a fase inicial da planta no tratamento de 100% (Figura 25c), mas durante a fase reprodutiva e de senescência da planta, os valores foram superestimados no dia 21 e subestimados até o dia 36 e logo em seguida voltou a ser superestimado. Para o tratamento de 80% (Figura 26c) a simulação normalizou todas as variações da ETc calculada em campo, visto que o modelo adimensional 3 é composto apenas pela razão entre umidade do solo e ET_0 , estas no período seco têm valores baixos e pouco oscilatórios, não correspondendo com a ETc estimada em campo.

Na Figura 27 e 28 são apresentados analogamente os modelos adimensionais para os tratamentos de 60 e 40%, respectivamente. Pode-se observar que, assim como nos tratamentos de 100 e 80%, o modelo adimensional 1 apresenta uma boa aproximação para o tratamento de 60% (Figura 27a) e 40% (Figura 28a). O modelo adimensional 2 (Figura 27b e 28b) mantém uma aproximação razoável, mas novamente subestima os valores da ETc em ambos os tratamentos de irrigação, não correspondendo bem o ciclo todo.

O modelo adimensional 3 (Figura 27c e 28c) não acompanha a variação de ETc durante o desenvolvimento da planta e novamente normaliza todos os dados, onde superestimou os valores de ETc nas fases iniciais dos dois tratamentos subestimou os valores de ETc durante a fase vegetativa da planta, para ambos os tratamentos, voltando a superestimar os valores nas fases de senescência.

Na Figura 29 são apresentados os modelos adimensionais para o tratamento de 20%. E assim como em todos os tratamentos acima, o modelo adimensional 1 obteve uma boa aproximação (Figura 29a), o modelo adimensional 2 (Figura 29b) também subestimou os valores da ETc em vários pontos e o modelo adimensional 3 (Figura 29c) teve uma boa aproximação, apesar de ter superestimado os valores de ETc na fase inicial da planta e subestimado os valores durante a fase reprodutiva.

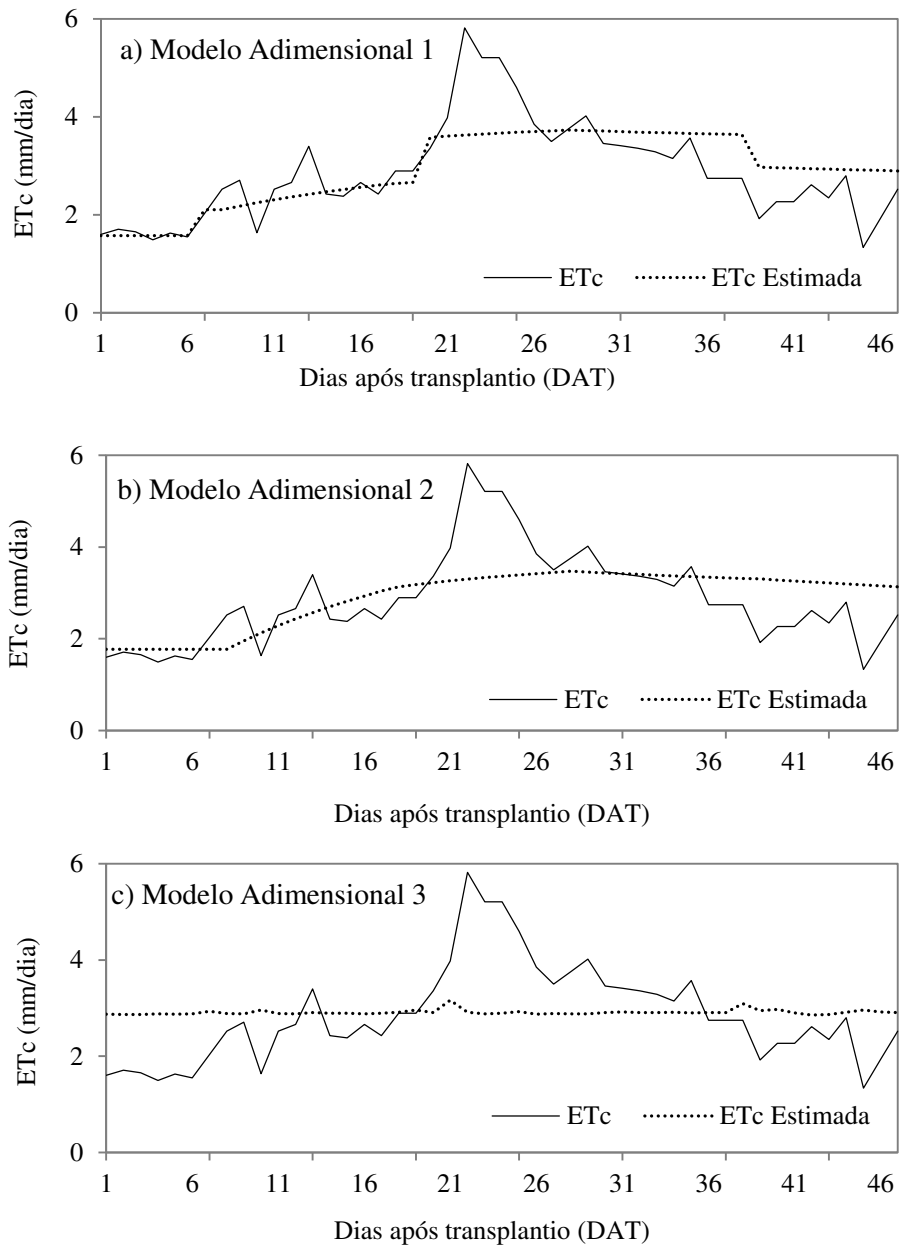


Figura 27 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 60% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

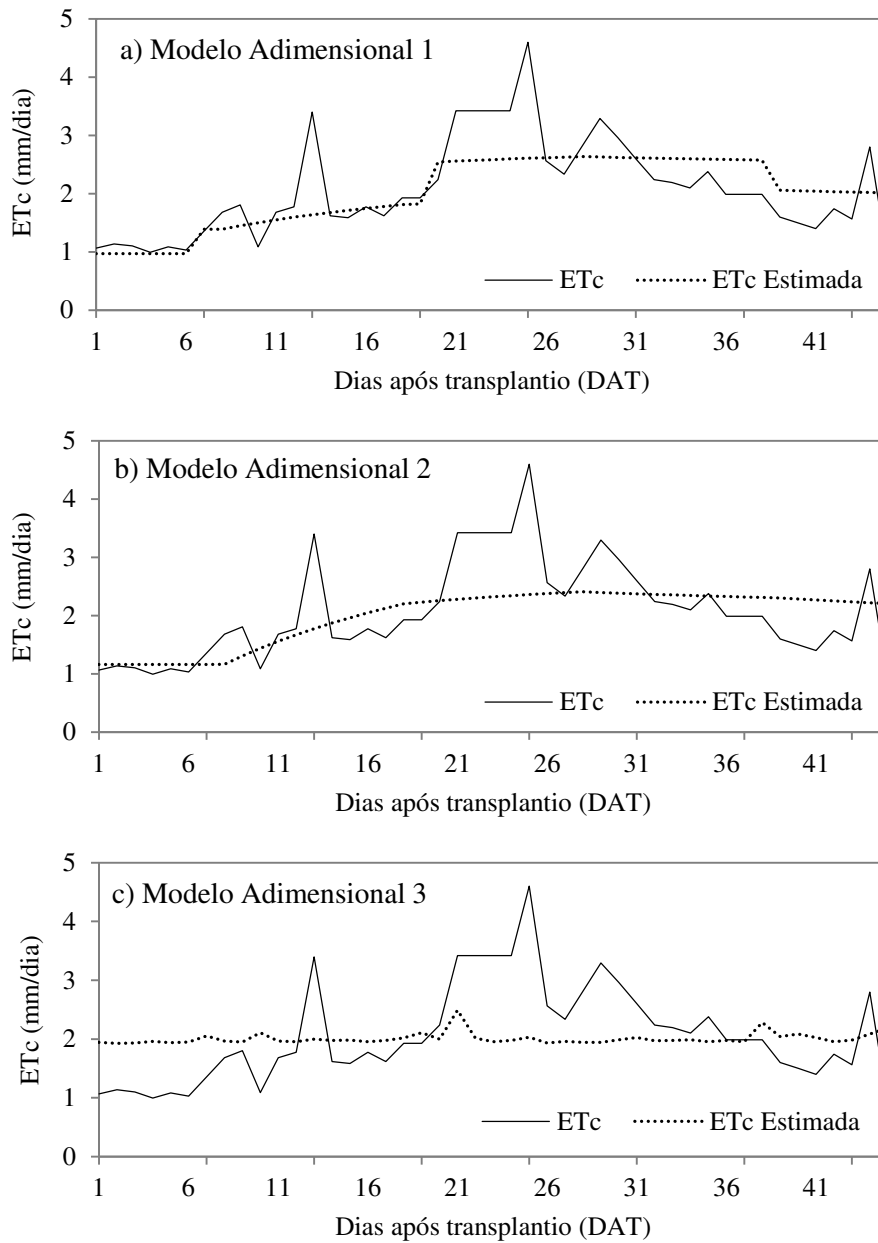


Figura 28 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 40% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

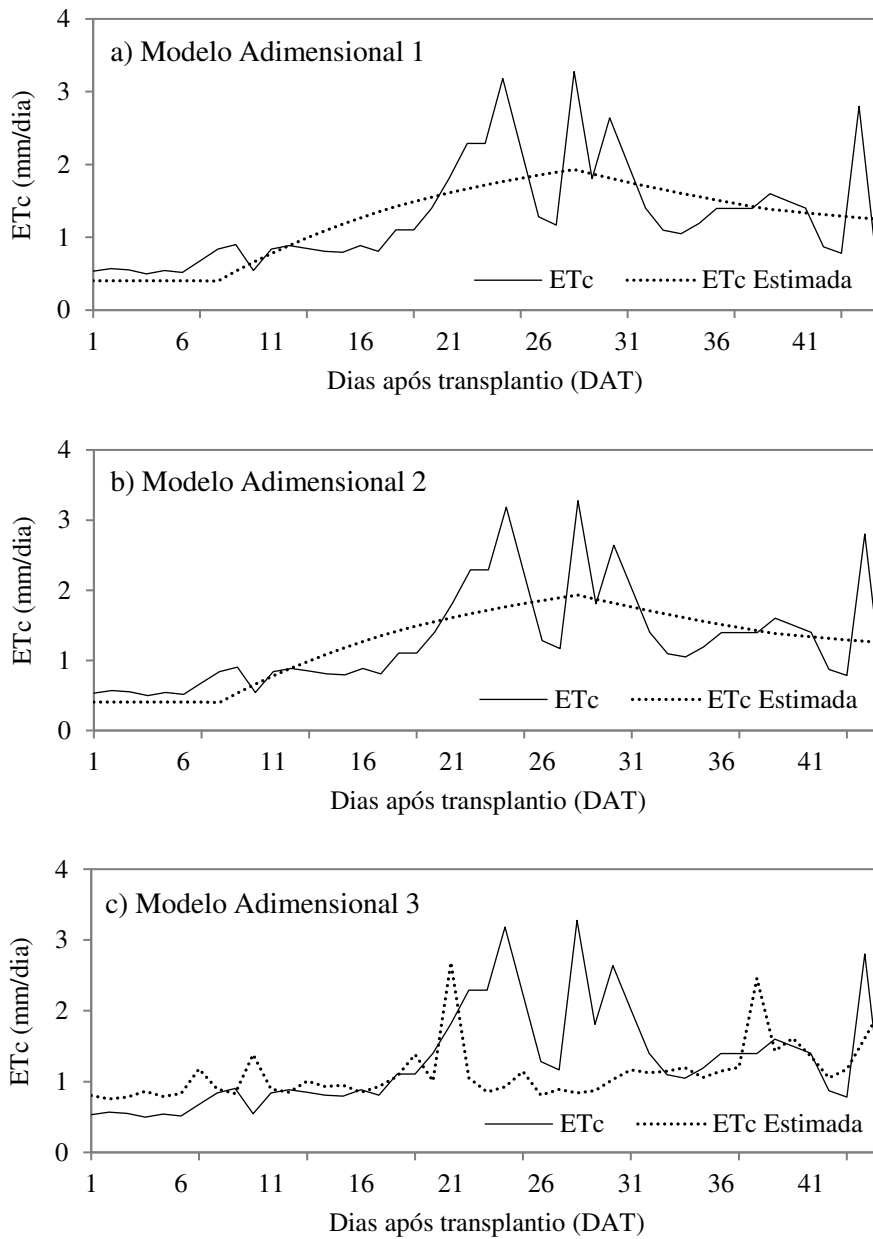


Figura 29 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2016 (período seco), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 20% com os modelos adimensionais 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

As Figuras 30 e 31 apresentam a comparação dos modelos adimensionais com a ETc calculada em campo durante o período chuvoso em 2017. A Figura 30 mostra as comparações para o tratamento hídrico de 100% e a Figura 31 para o tratamento de 80%. Pode-se observar que, assim como no período seco, o modelo adimensional 1 (Figura 30a e 31a) obteve melhor aproximação da ETc calculada em campo, para ambos os tratamentos (100% e 80%).

O modelo adimensional 2 (Figuras 30b e 31b) para o período chuvoso se apresenta de forma análoga ao modelo adimensional 2 do período seco (Figuras 25b e 26b), com desempenho médio, com exceção do final do ciclo, onde o modelo superestimou os valores da ETc em ambos os tratamentos, além disso, o modelo adimensional 2 subestima alguns valores extremos da ETc.

O modelo adimensional 3 apresenta uma boa aproximação da ETc para a fase inicial da planta no tratamento de 100% (Figura 30c), mas durante a fase reprodutiva e de senescência da planta, os valores foram superestimados no dia 21 e subestimados até o dia 36 e logo em seguida voltou a ser superestimado. Para o tratamento de 80% (Figura 31c) a simulação normalizou todas as variações da ETc calculada em campo.

Na Figura 32 e 33 são apresentados os modelos adimensionais para os tratamentos de 60 e 40%, respectivamente. Pode-se observar que o modelo adimensional 1 apresenta uma boa aproximação para o tratamento de 60% (Figura 32a) e 40% (Figura 33a).

O modelo adimensional 2 (Figura 32b e 33b) mantém uma aproximação razoável, mas novamente subestima os valores da ETc em ambos os tratamentos de irrigação, não correspondendo bem o ciclo todo. O modelo adimensional 3 (Figura 32c e 33c) não acompanha a variação de ETc durante o desenvolvimento da planta e novamente normaliza todos os dados, onde superestimou os valores de ETc nas fases iniciais dos dois tratamentos subestimou os valores de ETc durante a fase vegetativa da planta, para ambos os tratamentos, voltando a superestimar os valores nas fases de senescência.

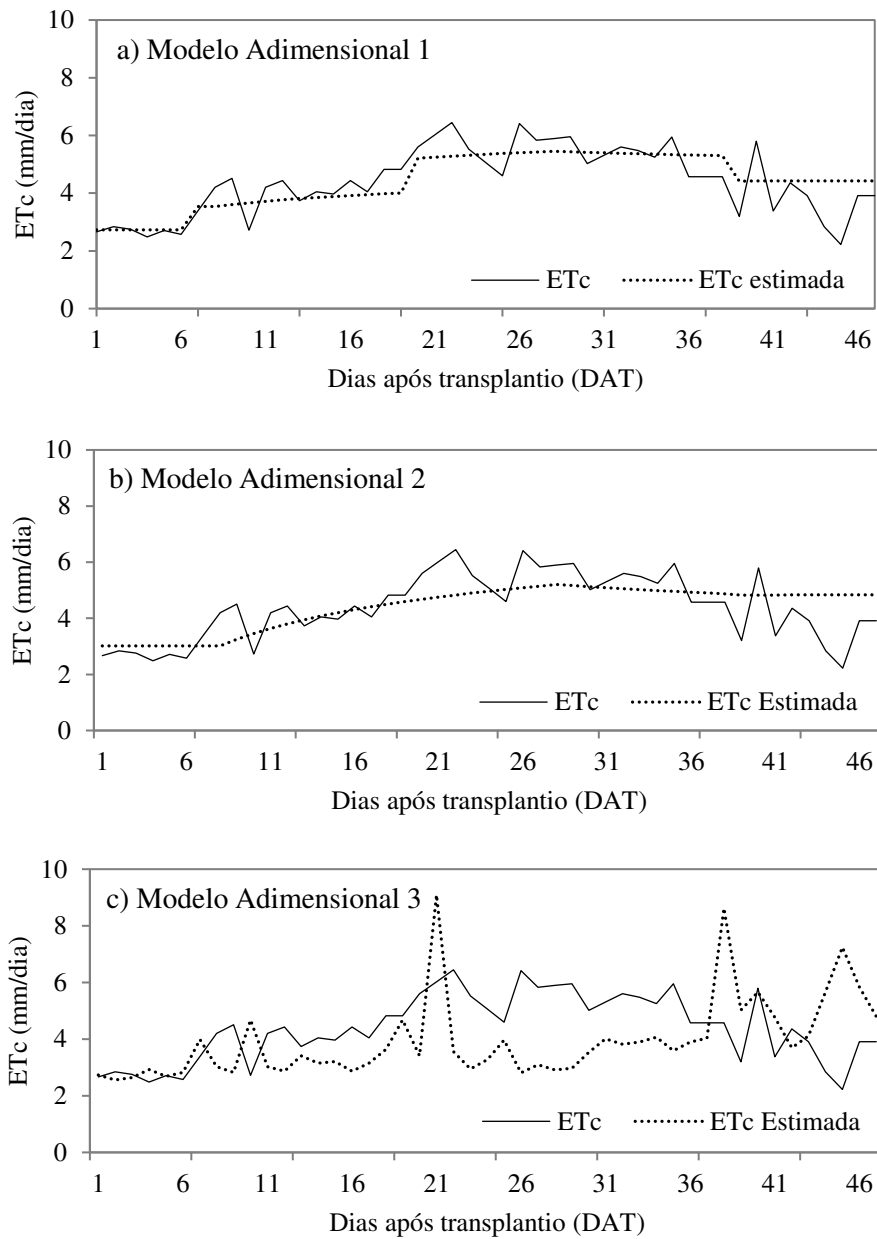


Figura 30 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 100% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

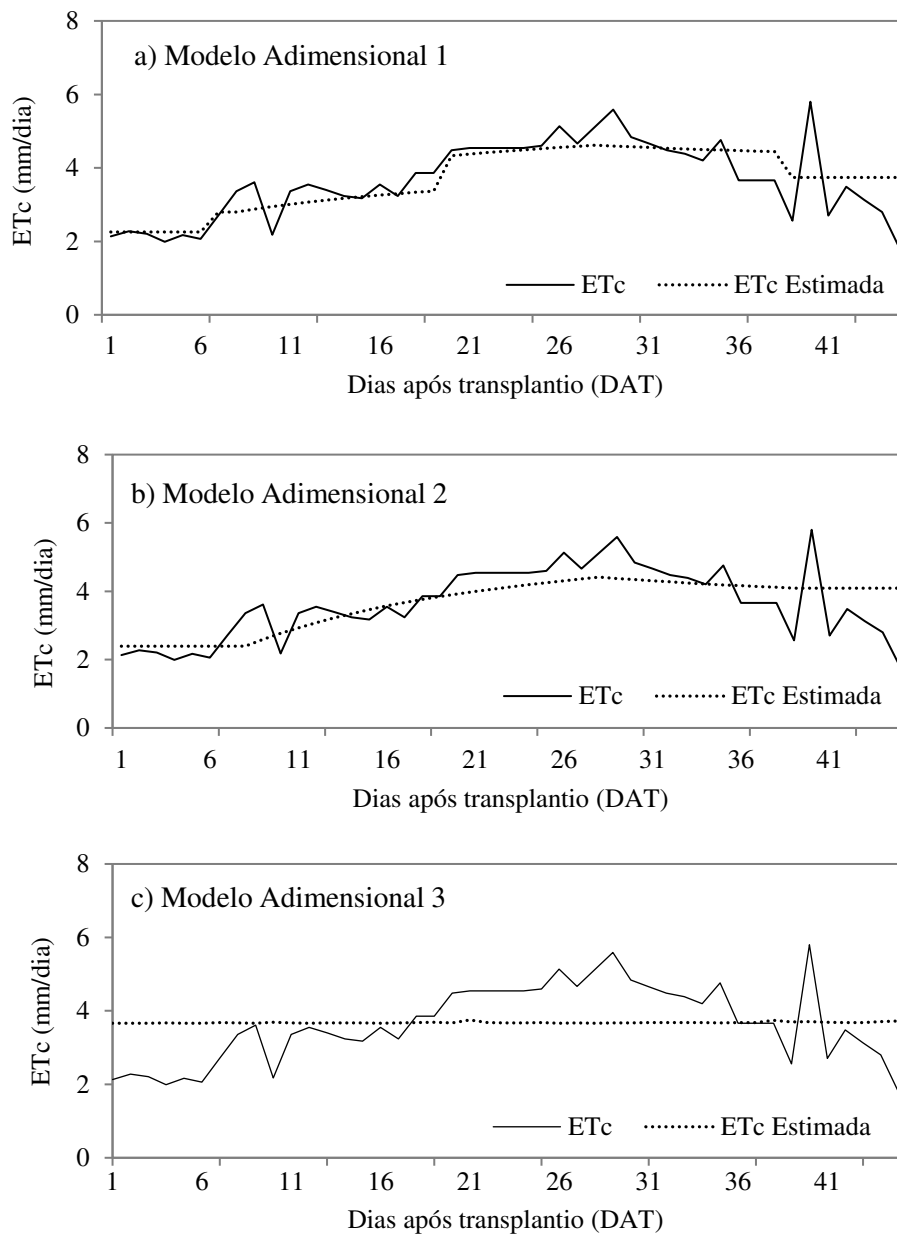


Figura 31 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 80% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

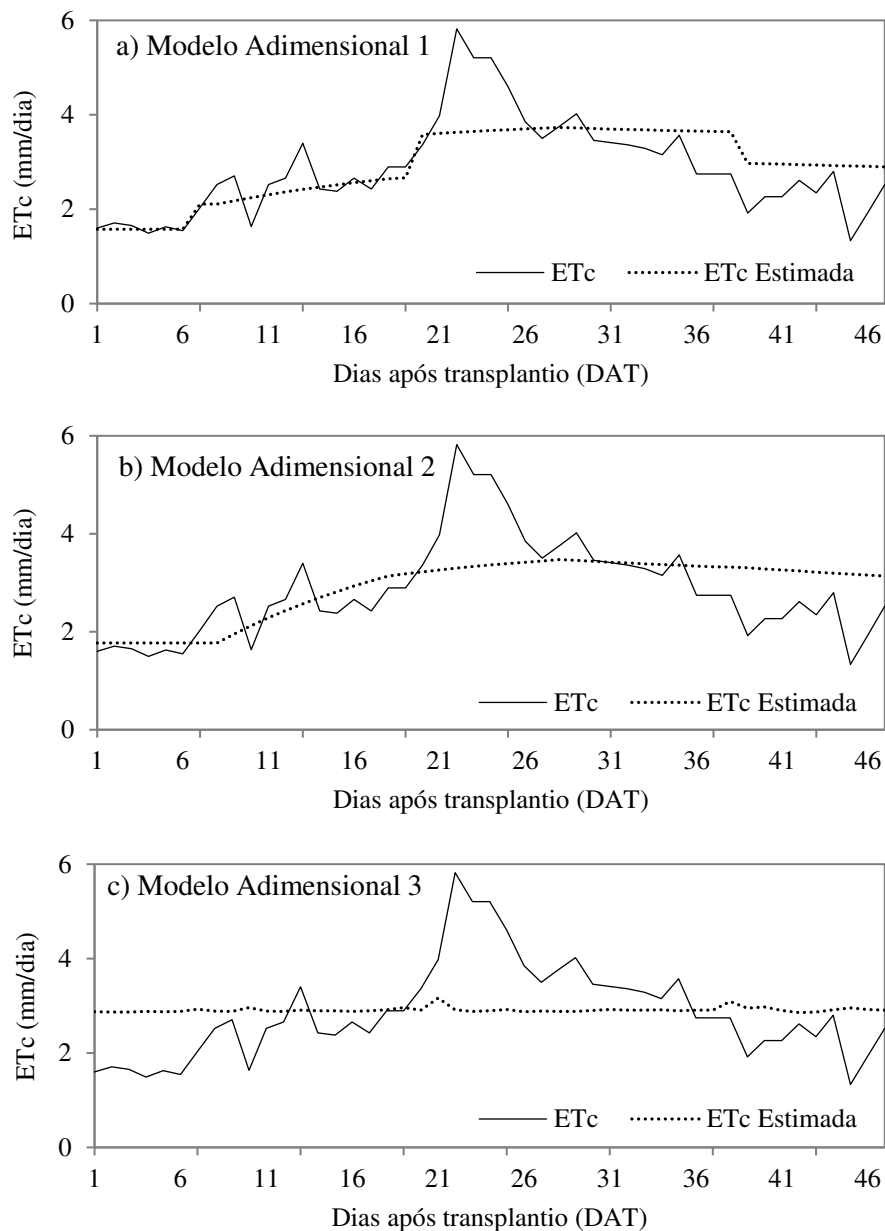


Figura 32 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 60% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

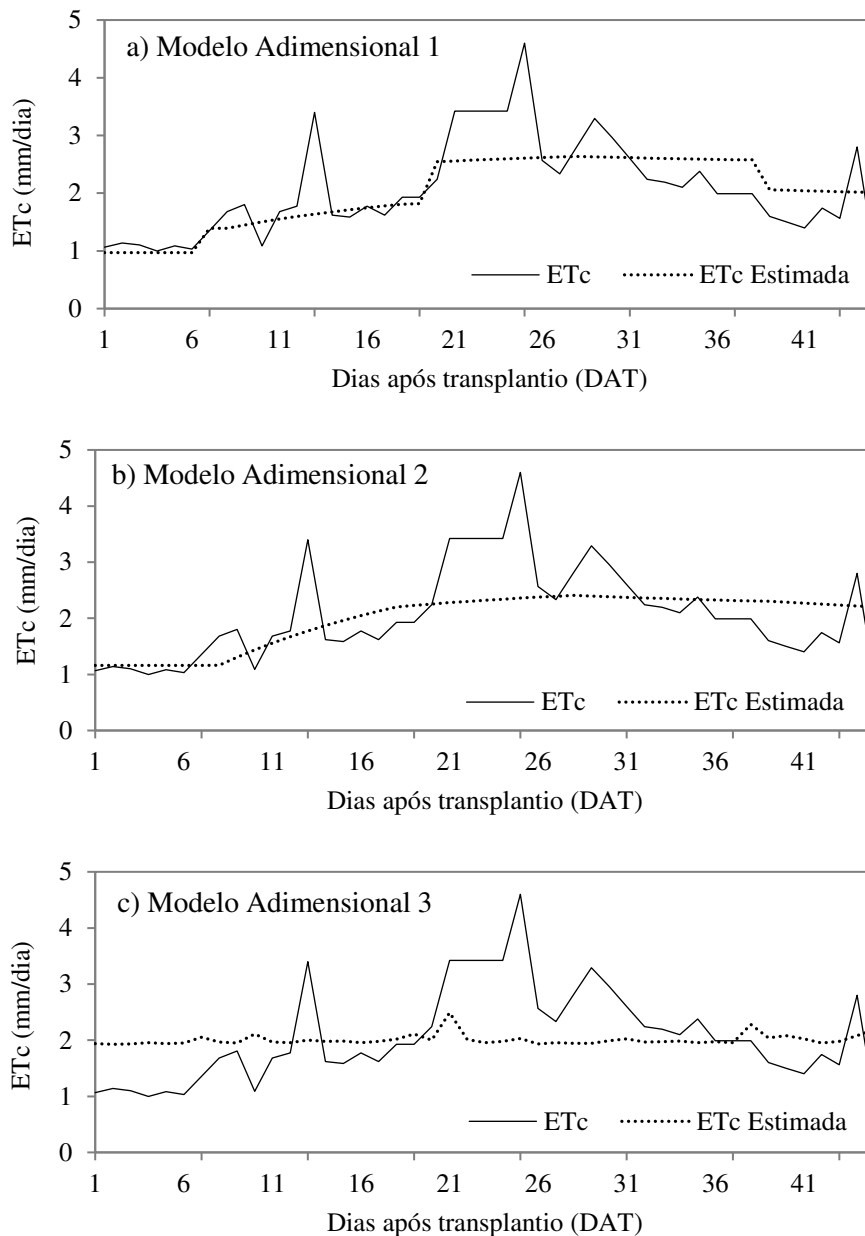


Figura 33 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 40% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

Na Figura 34 são apresentados os modelos adimensionais para o tratamento de 20%. E apesar de não simular os valores extremos de ETc, o modelo adimensional 1 apresentou uma boa aproximação, o modelo adimensional 2 (Figura 34b) também subestimou os valores da ETc e o modelo adimensional 3 (Figura 34c) teve uma boa

aproximação, apesar de ter superestimado os valores de ETc na fase inicial da planta e subestimado os valores durante a fase reprodutiva.

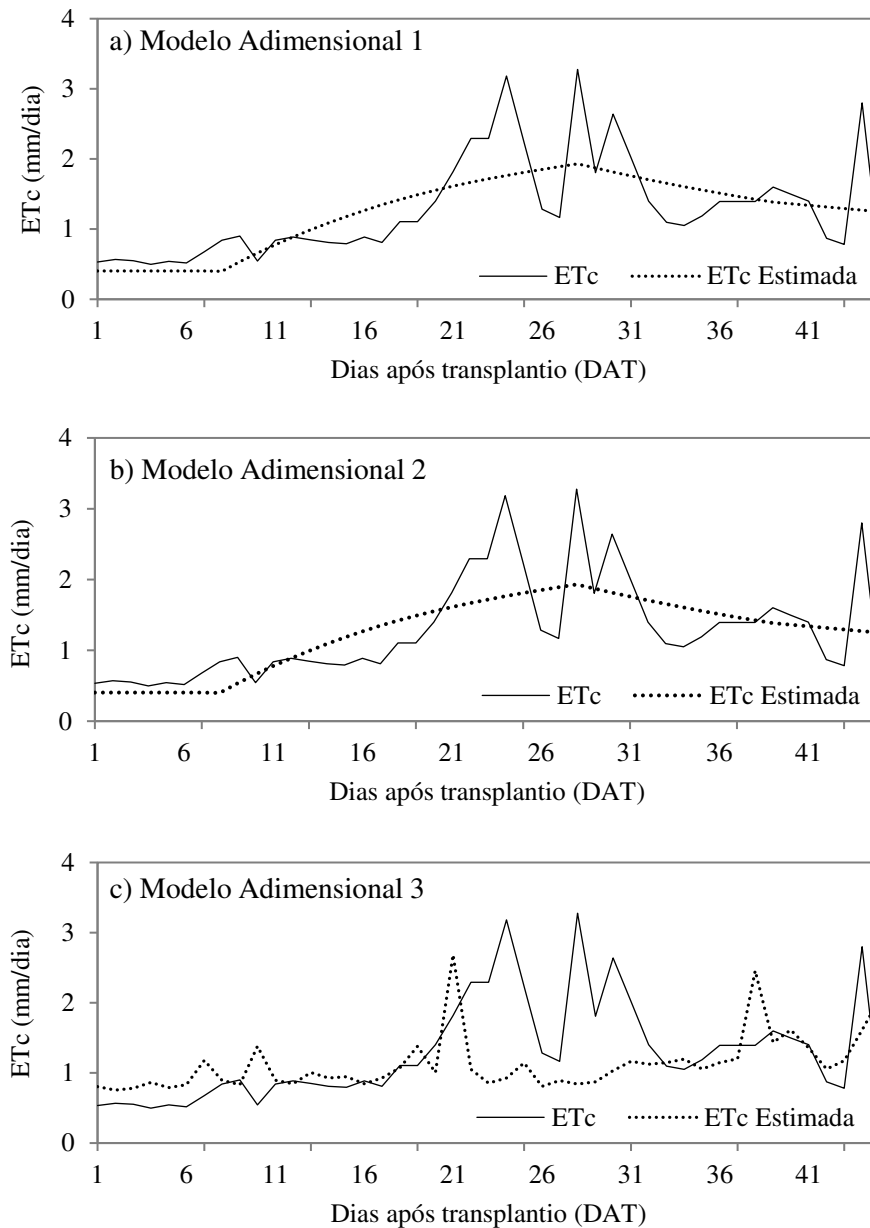


Figura 34 – Comparação entre os valores de evapotranspiração calculados em campo no ano de 2017 (período chuvoso), através do balanço hídrico do solo, e os valores estimados pelos modelos adimensionais com os coeficientes de regressão, para o tratamento de irrigação de 20% com os modelos adimensionais 1(a), 2(b) e 3 (c).

4.5. Validação dos modelos

A validação dos três modelos adimensionais foi feita através de indicadores estatísticos conhecidos e foi definida a partir da comparação entre dados de evapotranspiração calculados em campo com o balanço hídrico do solo e a evapotranspiração estimada por cada modelo.

4.5.1. Validação para o período seco

Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos pelos indicadores estatísticos com os dados do tratamento de 100% do consumo hídrico da planta do primeiro ciclo, no ano de 2016. O modelo que obteve melhor desempenho dentre os três apresentados foi o modelo adimensional 1, já que todas as estatísticas apresentaram bom desempenho. Com o segundo modelo obteve-se desempenho regular com relação ao NRMSE que está com o valor classificado em simulação justa e d próximo de 1. Já o modelo 3 não apresentou bons resultados de acordo com todos os indicadores estatísticos.

Tabela 4 – Validação dos modelos para o tratamento de 100% do ciclo cultivado no ano de 2016.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	1,0	1,3	1,7
NRMSE (%)	18	25	31
EF	0,7	0,5	0,1
d	0,9	0,8	0,4

A Tabela 5 apresenta a validação feita apenas para o tratamento de 80% do consumo hídrico da cultura e novamente o modelo que obteve melhor simulação foi o modelo adimensional 1, apesar de apresentar o valor de NRMSE um pouco mais alto e o de EF um décimo mais baixo, quando comparado com a validação do tratamento de 100% acima. Os modelos adimensionais 2 e 3 apresentaram simulações ruins, principalmente o modelo adimensional 3, em que os valores de EF e d estão classificados como péssimos.

Tabela 5 – Validação dos modelos para o tratamento de 80% do ciclo cultivado no ano de 2016.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	1,0	1,2	1,5
NRMSE (%)	22	28	35
EF	0,6	0,4	0,0
d	0,9	0,7	0,2

A validação dos modelos para o tratamento de 60% do consumo hídrico da planta, apresentada na Tabela 6, apresentou valores de simulação tão bons quanto do tratamento de 100% para o modelo adimensional 1. Os modelos adimensionais 2 e 3 apresentaram os melhores resultados, quando comparado com os tratamentos de 100 e 80%, principalmente no indicador NRMSE, mas ainda assim o modelo com melhor simulação permanece sendo o modelo adimensional 1.

Tabela 6 – Validação dos modelos para o tratamento de 60% do ciclo cultivado no ano de 2016.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,6	0,7	1,0
NRMSE (%)	15	19	27
EF	0,7	0,6	0,1
d	0,9	0,9	0,4

A validação dos modelos com tratamento de 40% da necessidade hídrica da planta (Tabelas 7) apresenta resultados ruins para todos os modelos, em que o modelo adimensional 3 tem a pior simulação dentre os outros. A validação para este tratamento mostrou que a simulação dele foi a que obteve os piores resultados, comparado com os demais tratamentos de necessidade hídrica.

Tabela 7 – Validação dos modelos para o tratamento de 40% do ciclo cultivado no ano de 2016.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	1,0	1,1	1,0
NRMSE (%)	36	40	36
EF	0,2	0,0	0,2
d	0,5	0,1	0,5

Os indicadores estatísticos mostram a validação dos modelos para o tratamento de 20% de necessidade hídrica, e apesar de os valores se apresentarem um pouco melhores que os da validação do tratamento de 40%, todos os modelos ainda apresentaram resultados ruins, mesmo com o valor de d para o modelo 1 ter sido ótimo (Tabela 8).

Tabela 8 – Validação dos modelos para o tratamento de 20% do ciclo cultivado no ano de 2016.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,5	0,5	0,6
NRMSE (%)	31	32	39
EF	0,2	0,2	-0,2
d	1	0,5	0,3

4.5.2. Validação para o período chuvoso

Na Tabela 9 são apresentados os valores obtidos pelos indicadores estatísticos com os dados do tratamento de 100% do consumo hídrico da planta do primeiro ciclo, no ano de 2017. Em comparação com o período seco, os modelos adimensionais 1 e 2 apresentaram resultados melhores, com o modelo adimensional 1 obtendo excelente ajuste. Porém, o modelo adimensional 3 apresentou resultados ruins em todos os indicadores e piores do que os resultados para o tratamento de 100% de necessidade hídrica do período seco.

Tabela 9 – Validação dos modelos para o tratamento de 100% do ciclo cultivado no ano de 2017.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,7	0,9	1,9
NRMSE (%)	16	20	43
EF	0,6	0,4	-1,6
d	0,9	0,8	0,4

Para o tratamento de 80% de necessidade hídrica da planta, a validação dos 3 modelos (Tabela 10) apresentou novamente resultados melhores do que a validação do período seco, com exceção dos indicadores EF e d no modelo adimensional 3, os quais alcançaram valores péssimos para o período chuvoso.

Tabela 10 – Validação dos modelos para o tratamento de 80% do ciclo cultivado no ano de 2017.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,6	0,7	1,0
NRMSE (%)	17	20	28
EF	0,6	0,5	0,0
d	0,9	0,8	0,0

Diferente da validação do tratamento de 60% de necessidade hídrica do período seco, a validação do tratamento de 60% do período chuvoso não apresentou resultados tão bons quanto dos tratamentos de 100 e 80%. Contudo, os indicadores estatísticos do modelo adimensional 1 apresentaram valores regulares para a simulação, mostrando um desempenho regular do modelo 1. O modelo adimensional 2 para este tratamento também apresentou resultados regulares, com exceção do indicador EF que apresentou valor muito baixo. Novamente, o modelo adimensional 3 apresentou resultados péssimos, e neste caso, piores do que a simulação para o período seco.

Tabela 11 – Validação dos modelos para o tratamento de 60% do ciclo cultivado no ano de 2017.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,7	0,8	1,0
NRMSE (%)	24	28	35
EF	0,5	0,4	0,0
d	0,8	0,7	0,1

A validação dos modelos para o tratamento de 40% de necessidade hídrica no período chuvoso (Tabela 12) apresentou resultados regulares para o modelo adimensional 1 e 2 e resultados ruins para o modelo adimensional 3. Comparando o tratamento de 40% com os outros tratamentos do período chuvoso discutidos anteriormente, é possível perceber que há uma tendência de os modelos apresentarem resultados menos satisfatórios conforme é diminuída a reposição de água da planta. Quando esta validação é comparada com a validação do período seco, há uma diferença em que os resultados da Tabela 12 foram melhores do que da Tabela 7.

Tabela 12 – Validação dos modelos para o tratamento de 40% do ciclo cultivado no ano de 2017.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,6	0,7	0,8
NRMSE (%)	29	33	40
EF	0,5	0,3	0,0
d	0,8	0,7	0,2

Na Tabela 13 é apresentada a validação dos modelos para o tratamento de 20% de necessidade hídrica no ciclo cultivado durante o período chuvoso. Da mesma maneira que foi colocado na discussão da Tabela 12, é possível perceber a tendência de resultados menos satisfatórios. Por outro lado, com a Tabela 13 percebem-se as piores simulações de todos os modelos, quando comparada com as simulações dos tratamentos de 100,80, 60 e 40%.

Tabela 13 – Validação dos modelos para o tratamento de 20% do ciclo cultivado no ano de 2017.

Indicadores estatísticos	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
RMSE	0,5	0,5	0,8
NRMSE (%)	40	40	61
EF	0,5	0,5	-0,2
d	0,8	0,8	0,4

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho permitem concluir o seguinte:

a) A ferramenta da análise dimensional utilizada foi satisfatória para a estimativa da evapotranspiração de culturas quando cultivada sem restrição hídrica;

b) O modelo com melhor desempenho foi o modelo adimensional 1 que utilizou as variáveis de irrigação, altura, diâmetro e ET_o , e obteve resultados adequados para todas as análises estatísticas, com ênfase no ciclo feito no período seco e para o tratamento de 100%;

c) O modelo com desempenho mais fraco foi o modelo adimensional 3, que utiliza as variáveis de umidade do solo e ET_o apenas. Essas variáveis não foram suficientes para descrever o comportamento da ET_c estimada em campo, principalmente em períodos de seca, onde os dados de umidade do solo são baixos;

d) Apesar dos resultados do r^2 apresentarem um melhor desempenho para o período seco em todos os tratamentos, a validação dos modelos mostrou que eles se adaptam melhor ao período chuvoso, o que indica que o uso dos modelos adimensionais é mais adequado em plantações com irrigação controlada;

e) A ferramenta de análise adimensional como estimativa de evapotranspiração de culturas é ideal para situações de campo as quais não tenham disponibilidade de equipamentos sofisticados de medição, já que as variáveis envolvidas nos modelos são relativamente fáceis de serem obtidas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albiero, D. Avaliação do preparo de solo empregando o sistema de cultivo conservacionista em faixas com “paraplow” rotativo usando análise dimensional. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2006.
- Allamraju, K. V.; Srikanth, K. Dimensional analysis of PZT-5H transducers. *Materials Today: Proceedings*. Índia, v. 4, p. 2384-2389, 2017.
- Allen, R. G; Pereira, L. S.; Raes, D; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper, 56. Rome: FAO, 1998.
- Alvarenga, M.A.R. Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia. Lavras:UFLA, 2004. 400p.
- Alvarenga, M. A. R. Tomate: produção em campo, casa de vegetação e hidroponia. 2ª edição, Editora Universitária de Lavras, Lavras-MG, p. 455, 2013.
- Battilani, A.; Prieto, M. H.; Argerich, C.; Campillo, C.; Cantore, V. Herbaceous Crops- Tomato. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. In: Crop yield response to water. FAO irrigation and Drainage Paper 66, Roma, Itália, Cap. 3 (3.4), p. 192-199, 2012.
- Buckingham, E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, v. 4, n. 4, p. 345-376, 1914.
- Cahn, M.; Hanson, B.; Hartz, T.; Herrero, E. Optimizing fruit quality and yield grown under drip irrigation. *The California Tomato Grower*, Stockton, v.45, n. 2, p. 7-9, 2002.
- Campagnol, R.; Abrahão, C.; Mello, S. C.; Oviedo, V. R. S.; Minami, K. Impactos do nível de irrigação e da cobertura do solo na cultura do tomateiro. *Irriga, Botucatu*, v. 19, n.3, p. 345-357, julho-setembro, 2014.
- Campeche, L. F. De S. M.; Franca, R. J. Da F.; Leitão, M. De M. V. B. R.; Silva, J. S. Da; Paz, V. P. Da S. Microclima e evapotranspiração de tomate em dois sistemas de produção no Vale do São Francisco. *Agrometeoros, Passo Fundo*, v. 25, n. 1, p. 133-142, 2017.
- Carvalho, L. G.; Rios G. F. A.; Miranda, W. L.; Neto, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesq Agropec. Trop.*, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set. 2011.

- Cavalcanti, E. P. Dinâmica dos Fluidos. Curso de Meteorologia. Novembro de 2009. Notas de Aula. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciência e Tecnologia, Departamento de Ciências Atmosféricas, Campina Grande.
- Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações. Tradução 1ª ed., São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- Churata-Masca, M.G.C.; Andre, R.G.B. Water requirement and crop coefficient for processing tomatoes. *Acta horticulturae*, Wageningen, v;301, p.165-189, 1992.
- Ciulla, G.; D'Amico, A.; Brano, V. L. Evaluation of building heating loads with dimensional analysis: Application of the Buckingham π theorem. *Energy and Buildings*, v. 154, p. 479-490, 2017.
- Craufurd, P. Q.; Qi, A.; Ellis, R. H.; Summerfield, R. J.; Roberts, E. H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) II. Effect of temperature and saturation deficit on time to flowering in photoperiod insensitive genotypes. *Experimental Agriculture*, London, v. 32, n. 1, p. 13-28, 1996b.
- Dantas, L. G.; Guedes, R. V. S.; Cabral, D. E. C.; Vilar, R. A. A.; Sousa, F. A. S. Sistemas atmosféricos responsáveis pela magnitude da precipitação do dia 17 de julho de 2011 em campina grande – PB. In: IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CLIMATOLOGIA, 2011, João Pessoa.
- Dusi, A. N; Lopes, C. A.; Oliveira, C. A. S.; Moreira, H. M.; Miranda, J. E. C. De; Charchar, J. M.; Silva, J. L. De O.; Magalhaes, J. R.; Castelo Branco, M.; Reis, N. V. B.; Makishima, N.; Fontes, R. R.; Pereira, W.; Horino, Y. A Cultura do tomateiro (para mesa). Coleção Plantar: Série Verde Hortaliças, Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças – CNPH, 1993.
- Ellis, R. H.; Lawer, R. J.; Summerfield, R. J.; Roberts, E. H.; Chay, P. M.; Brouwer, J. B.; Rose, J. L.; Yeates, S. J. Towards the reliable prediction on time to flowering in six annual crops. III. Cowpea (*Vigna unguiculata*). *Experimental Agriculture*, v.30, p.17-29, 1994.
- Fengler, F. H. Aplicação da análise dimensional em indicadores ambientais de áreas degradadas pela exploração de cassiterita. 2018. 104 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Campus Experimental de Sorocaba, UNESP - Univ Estadual Paulista, Sorocaba, 2018.
- Filgueira, F. A. R. Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2000. 421p.

- Freitas, J. C. Calibração do modelo aquacrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais. 2018. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2018.
- Hadley, P.; Roberts, E. H.; Summerfield, R. J. A quantitative model of reproductive development in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in relation to photoperiod and temperature, and implications for screening germplasm. *Annals of Botany*, London, v. 51, n. 4, p. 531-543, 1983.
- Hassani, S.; Saidur, R.; Mekhilef, S.; Hepbasli, A. A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids using dimensional analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 90, p. 121-130, 2015.
- IBGE. Cidades, 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pb/campina-grande/panorama>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
- IBGE. Levantamento Sistemático da produção Agrícola. Instituto Brasileiro de Estatística e Geografia - IBGE, Rio de Janeiro, v.30, n.9, p.1-83, 2017.
- Indraningtyas, L.; Ushadab, M.; Suryandono A. Scale up of panel assembly for moss rooftop greening material (*sphagnum* sp.) Using dimensional analysis. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Indonesia, v. 3, p. 114-120, 2015.
- Jamdar, I. M.; Vakharia, D. P. A novel approach integrating dimensional analysis and neural networks for the detection of localized faults in roller bearings. *Measurement Journal*, v. 94, p. 177-185, 2016.
- Koetz, M.; Churata-Masca, M. G. C.; Carneiro, L. C.; Ragagnin, V. A.; Sena Junior, D. G.; Gomes Filho, R. R. Industrial sob irrigação por gotejamento no sudoeste de Goiás. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.4, n.1, p.14–22, 2010.
- Luz, J. M. Q.; Shinzato, A. V.; Silva, M. A. D. Comparação dos sistemas de produção de tomate convencional e orgânico em cultivo protegido. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 23, n. 2, p. 7-15, 2007.
- Ma, J.; Zhou, P.; Cheng, W.; Song, Y.; Shi, P. Dimensional analysis and experimental study of gas penetration depth model for submerged side-blown equipment. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 75, p. 220-227, 2016.
- Marouelli W. A.; Silva H. R.; Oliveira C. A. S. Produção de tomate industrial sob diferentes regimes de umidade no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 26: 1531-1537. 1991.

- Marouelli, W. A.; Silva, W. L. C. Tensões – limite de água no solo para o cultivo do tomateiro para processamento irrigado por gotejamento. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2008. 17 p.; (Embrapa Hortaliças. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 37).
- Melo, P.C.T.; Vilela, N.J. Desafios e perspectivas para a cadeia brasileira do tomate para processamento industrial. Horticultura Brasileira, Brasília, v.23, n.1, p.154-157, jan.-mar. 2005.
- Miragliotta, G. The power of dimensional analysis in production systems design. Int. J. Production Economics, v. 131, p. 175-182, 2011.
- Munson, B.R.; Young, D.F.; Okiishi, T.H. Fundamentos da mecânica dos fluidos. Tradução da 4ª ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2004.
- Priestley, C.H.B.; Taylor, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, Washington, v.100, n.1, p.81-92, 1972.
- Prieto, M. H. Deficit irrigation treatments in processing tomato under surface irrigation In: International Conference on the Processing Tomato, 1. Proceedings... Alexandria: ASHS/IPA. p. 48-53. 1997.
- Puig-Bargués, J.; Barragán, J.; Cartagena, F. R. Development of Equations for calculating the Head Loss in Effluent Filtration in Microirrigation Systems using Dimensional Analysis. Biosystems Engineering, v. 92, n. 3, p. 383-390, 2005.
- Roberts, E. H.; Summerfield, R. J.; Minchin, F. R.; Stewart, K. A.; Ndunguru, B. J. Effects of air temperature on seed growth and maturation in cowpea (*Vigna unguiculata*). Annals of Applied Biology, Cambridge, v. 90, n. 3, p. 437-446, 1978.
- Sanchez, F.; Budinger, M.; Hazyuk, I. Dimensional analysis and surrogate models for the thermal modeling of multiphysics systems. Applied Thermal Engineering, v. 110, p. 758-771, 2017.
- Santana, M. J.; Vieira, T. A.; Barreto, A. C.; Cruz, O. C. Resposta do tomateiro irrigado a níveis de reposição de água no solo. Irriga Botucatu, v. 15, n. 4, p. 443-454, outubro-dezembro 2010.
- Santana, M. J.; Pereira, U. C.; Beirigo, J.D. C.; Souza, S. S.; Campos, T. M.; Vieira, T. A. Coeficientes de cultura para o tomateiro irrigado. Irriga, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 11-20, janeiro-março, 2011.

- Sharp, J. J.; Deb, A.; Deb, M. K. Applications of matrix manipulation in dimensional analysis involving large numbers of variables. *Marine Structures Journal*, England, v. 5, p. 333-348, 1992.
- Shu, Z.; Ma, R.; He, M. Dimensional analysis of the slotted bolted connections against impulsive earthquake ground motions. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 125, p. 128-141, 2016.
- Silva, E.L. et al. Manejo de irrigação das principais culturas. UFLA: FAEPE, 2000. 85p.
- Sonin, A.A. *The Physical Basis of Dimensional Analysis*, 2nd edition, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge, MA, 2017.
- Steenefeld, G. J.; Van De Wiel, B. J. H.; Holtslag A. A. M. Diagnostic equations for the stable boundary layer height: evaluation and dimensional analysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v.46, p. 212-225. 2007.
- Thornthwaite, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, Centerton, v.38, n.1, p.55-94, 1948.
- WWAP. *United Nations World Water Development Report 4: managing water under uncertainty and risk*. Paris: UNESCO Publishing/World Water Assessment Programme (WWAP); London: Earthscan, 2012.
- Zong, Q.; Zheng, T.; Liu, H.; Li, C. Development of head loss equations for selfcleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis. *Biosystems engineering*, v. 133, p. 116-127, 2015.