



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

KLEBER GOMES DE MACÊDO

SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PELA CULTURA DO MILHO
(*Zea mays L.*) UTILIZANDO MODELO HYDRUS-1D

FORTALEZA
2018

KLEBER GOMES DE MACÊDO

SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PELA CULTURA DO MILHO (*Zea
mays L.*) UTILIZANDO MODELO HYDRUS-1D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Dirceu Duarte Arraes.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M121s Macêdo, Kleber Gomes de.
Simulação da extração de água do solo pela cultura do milho (*Zea Mays L.*) utilizando modelo HYDRUS-1D / Kleber Gomes de Macêdo. – 2018.
65 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra.
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Dirceu Duarte Arraes.

1. Feddes. 2. Potencial matricial. 3. Umidade do solo. I. Título.

CDD 630

KLEBER GOMES DE MACÊDO

SIMULAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PELA CULTURA DO MILHO (*Zea mays L.*) UTILIZANDO MODELO HYDRUS-1D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: 20/07/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Dirceu Duarte Arraes (Coorientador)
Instituto Federal do Sertão Pernambucano *campus* Salgueiro (IFSertão/PE)

Dra. Antônia Leila Rocha Neves
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. João Valdenor Pereira Filho
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)

A Deus.

Aos meus pais, irmão e sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por tudo.

A minha Família pelo apoio.

A Yara Araújo por seu incentivo e cobrança.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Aos Profs. Dr. Marcus Bezerra e Dirceu Arraes, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Leila Neves e João Valdenor.

Aos amigos de casa, Juarez Junior, José Bandeira, Eldir Bandeira, Paulilo Palácio, Emanuel Gomes e Thayslan Renato, pelas conversas, discussões e momentos de lazer.

Aos colegas da turma de mestrado Thamiris Paiva, Thiago Aragão, Vinicius Bitencourt e Cleomar Bizoin, pelas reflexões e momentos de estudo.

Ao Instituto Federal do Ceará *campus* Iguatu por conceder o local do experimento.

Aos amigos que contribuíram para a realização do experimento, Yure Couras, Jonas da Silva, Willame Candido, Hugo Graciano e Wanderleia Vasconcelos.

E a todos que fizeram parte desta caminhada e que por ventura não foram citados.

A coisa boa que a Ciência tem é que é verdade
quer você acredite quer não.

Neil deGrasse Tyson

RESUMO

O entendimento do processo de extração de água pela planta pode auxiliar as práticas de manejo da irrigação e contribuir para uma melhor gestão dos recursos hídricos aplicados. Tal entendimento requer estudos práticos de campo, que demandam tempo e recursos financeiros elevados. Modelos matemáticos podem simular de forma satisfatória estes processos, podendo ser utilizados nas mais distintas condições ambientais. O objetivo deste estudo foi utilizar o modelo HYDRUS-1D para simular o conteúdo de água no solo, potencial mátrico e extração de água pelas raízes em um solo cultivado com milho sob diferentes regimes de irrigação. A área experimental utilizada pertence ao Instituto Federal do Ceará campus Iguatu. Foi cultivado milho híbrido AG-1051 e foi realizado o manejo de irrigação via clima, sendo os dados obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia, localizada próximo à área experimental. Os tratamentos foram divididos em cinco lâminas de irrigação, que diferiram em 50; 75; 100; 125 e 150% da evapotranspiração da cultura. O milho foi colhido em sua forma verde e analisados dados referentes a peso, comprimento e diâmetro da espiga, sendo comparadas os tratamentos através do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para comparação estatística entre simulado e medido foram instaladas baterias de tensiômetro nas profundidades de 10 e 30 cm em cada tratamento para obtenção de potencial mátrico. A simulação foi realizada através o modelo HYDRUS-1D, que utiliza o modelo macroscópico de Feddes na simulação da extração de água pelas raízes. Os resultados da simulação foram comparados aos dados medidos utilizando os parâmetros estatísticos índice de Willmott, coeficiente de eficiência, raiz quadrada do erro médio, erro médio e erro máximo absoluto. Os maiores dados de produção foram do tratamento com 150% da evapotranspiração da cultura. Os dados simulados que apresentaram melhor semelhança com os dados medidos foram os obtidos para a camada de 30 cm nos tratamentos com lâmina de irrigação superior a 100% da evapotranspiração da cultura. O modelo macroscópico de Feddes não simulou de forma adequada os parâmetros analisados, principalmente na camada de 10 cm, sendo esta de maior importância devido a maior densidade de raízes. Tais resultados apontam que seria inadequado utilizar dados simulados com este modelo para o manejo agrícola.

Palavras-chave: Feddes. Potencial matricial. Umidade do solo.

ABSTRACT

The understanding of the process of water extraction by the plant assists in irrigation management practices and contributes to a better management of applied water resources. Such understanding requires practical field studies, which require time and high financial resources. Mathematical models can simulate these processes satisfactorily and can be used in the most different environmental conditions. The objective of this study was to use the HYDRUS-1D model to simulate the soil water content, pressure head and water extraction by the roots in a soil cultivated with maize under different irrigation regimes. The experimental area used belongs to the Federal Institute of Ceará Iguatu campus. AG-1051 hybrid corn was cultivated and climate irrigation management was performed, and the data obtained from the automatic meteorological station of the National Meteorological Institute, located near the experimental area. The treatments were divided into five irrigation slides, which differed in 50, 75, 100, 125 and 150% of the crop evapotranspiration. The corn was harvested in its green form and analyzed data regarding weight, length and ear diameter, and the treatments were compared through the Tukey test at 5% probability. For statistical comparison between simulated and measured tensiometer batteries were installed at depths of 10 and 30 cm in each treatment to obtain matric potential and soil moisture. The simulation was performed using the HYDRUS-1D model, which uses the Feddes macroscopic model in the simulation of water extraction by the roots. The results of the simulation were compared to the measured data using the statistical parameters Willmott index, coefficient of efficiency, square root of the mean error, mean error and absolute maximum error. The highest production data were from the treatment with 150% of crop evapotranspiration. The simulated data that presented the best similarity with the data measured were those obtained for the 30 cm layer in the treatments with greater than 100% of the crop evapotranspiration. The Feddes macroscopic model did not adequately simulate the analyzed parameters, especially in the 10 cm layer, being this one of greater importance due to the higher density of roots. These results point out that it would be inappropriate to use simulated data with this model for agricultural management.

Keywords: Feddes. Pressure head. Soil water content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Função de redução da extração de água pelas raízes (α) em função do potencial matricial do solo para baixa e alta transpiração.....	20
Figura 2 -	Os processos hidrológicos acoplados no modelo HYDRUS-1D.....	21
Figura 3 -	Imagem aérea da área experimental onde foi desenvolvido o estudo nas dependências do IFCE campus Iguatu.....	23
Figura 4 -	Esquema do projeto de irrigação.....	25
Figura 5 -	Cilindro e esquema de coleta de raízes utilizados no experimento....	30
Figura 6 -	(a) Bateria de tensiômetro instalado nas profundidades 10 e 30 cm na área experimental cultivada com milho, (b) esquema de instalação.....	31
Figura 7 -	Condições climáticas do experimento durante o período simulado..	38
Figura 8 -	Variação da umidade volumétrica do solo ao longo dos 21 dias simulados nas profundidades de 10 e 30 cm para cada tratamento....	41
Figura 9 -	Regressão linear e coeficiente de determinação obtidos através da correlação entre os valores medidos de simulados da umidade do solo.....	45
Figura 10 -	Variação temporal do potencial matricial medido e simulado pelo modelo HYDRUS-1D para as profundidades de 10 e 30 cm em cada tratamento.....	47
Figura 11 -	Densidade de raízes nas profundidades de 5 a 40 cm em cada tratamento, para os 21 dias de simulação no ciclo da cultura.....	50
Figura 12 -	Variação temporal da função de redução α de Feddes (1978).....	52
Figura 13 -	Valores simulados de extração de água pela cultura do milho e valores estimados da transpiração potencial da cultura em cada tratamento.....	54
Figura 14 -	Extração total de água pela cultura do milho para cada semana simulada.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação textural e física do solo da área experimental utilizada..	24
Tabela 2 -	Análise química do solo da área experimental.....	24
Tabela 3-	Valor médio do coeficiente da cultura (kc) para milho irrigado em condições do semiárido brasileiro.....	27
Tabela 4 -	Propriedades físico-hídricas do solo.....	32
Tabela 5 -	Valores de h para obtenção da função de redução (α) de Feddes et al. (1978).....	34
Tabela 6 -	Valores médios de caracteres produtivos de milho-verde.....	39
Tabela 7 -	Coeficientes estatísticos da relação entre umidade do solo medida e a simulada pelo modelo HYDRUS-1D, na profundidade de 10 cm...	43
Tabela 8 -	Índices estatísticos da relação entre potencial matricial medido e simulado pelo modelo HYDRUS-1D nas profundidades de 10 e 30 de cada tratamento.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Cultura do milho	15
2.2	Manejo da agricultura irrigada	16
2.3	Extração de água pelas raízes das plantas	17
2.3	Escala macroscópica	18
2.4	Modelo HIDRUS-1D	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	Local, solo e clima	23
3.2	Caracterização do experimento	24
3.3	Produção	27
3.4	Índice de área foliar (IAF)	28
3.5	Densidade radicular	29
3.6	Potencial matricial do solo	30
3.7	Simulação do movimento de água no solo pelo HYDRUS 1D	31
3.7.1	<i>Propriedades hidráulicas do solo</i>	32
3.7.2	<i>Dados de entrada no modelo</i>	33
3.7.3	<i>Simulação da extração de água do solo</i>	33
3.8	Análise estatística dos dados simulados	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Condições climáticas	37
4.2	Produção	38
4.3	Simulação da umidade volumétrica do solo	40
4.4	Simulação do potencial mátrico do solo	46
4.5	Extração de água do solo	49
4.5.1	<i>Densidade de raízes</i>	49
4.5.2	<i>Simulação</i>	50
4.5.3	<i>Função de redução de Feddes (FRF)</i>	55
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – RECOMENDAÇÕES	67

1 INTRODUÇÃO

A água no solo é extraída pelas plantas pelo seu sistema radicular por fluxo de massa, com finalidade de absorver os nutrientes necessários para seu desenvolvimento, formando um vínculo contínuo entre o reservatório de água que na maioria dos casos é o solo e a demanda exercida pela atmosfera. Entender melhor esse processo pode otimizar o uso da água, em especial na agricultura, devendo ser considerados fatores como umidade do solo, potencial mátrico, condutividade hidráulica e extração de água pelas raízes.

A literatura registra trabalhos realizados com o intuito de descrever os processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera (ABBAS *et al.*, 2017; BERTI *et al.*, 2017; CUI *et al.*, 2018; JAT *et al.*, 2018; SARABIA *et al.*, 2018; SHAO *et al.*, 2018; UNKOVICH; FARQUHARSON, 2018). Sua realização requer tempo, alto investimento e mão de obra, sendo necessária a obtenção de equipamentos, coletas de campo frequentes e onerosa carga de trabalho para o pesquisador. Frente a esta dificuldade foi proposta a utilização de modelos matemáticos que simulem estes processos. Experimentos com simulação são vantajosos por permitirem que hipóteses sejam testadas através de uma ampla variedade de condições ambientais, como fertilidade do solo e clima, que variam no tempo e no espaço (PEAKE *et al.*, 2013).

A análise do processo de extração de água no solo pode ocorrer de duas formas: em escala microscópica ou macroscópica. Os modelos macroscópicos baseiam-se na hipótese que a extração de água no solo diminui à medida que ocorre redução do conteúdo de água no solo. Dentre outros, o modelo macroscópico de Feddes *et al.* (1978) vem sendo utilizado em grande escala, principalmente por sua simplicidade de aplicação e resultados satisfatórios.

Pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e produção da cultura do milho (*Zea mays L.*) se tornam cada vez mais frequentes, devido a sua potencialidade econômica e facilidade agricultável na maioria das condições climáticas. Entender o processo de desenvolvimento do milho em condições de estresse pode levar a um melhor entendimento das práticas de manejo agrícola, tais condições de estresse ficam mais evidentes em regiões de clima semiárido.

Atualmente no que se diz respeito a modelagem do movimento de água no solo, destacam-se os modelos SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant) (KROES *et al.*, 2003) e o HYDRUS, disponível em três versões relacionadas as dimensões de análise

(1D, 2D e 3D) (SIMUNEK *et al.*, 2005). Estes modelos se sobressaem aos outros por considerarem vários fatores relacionados aos processos que ocorrem no solo e por terem sido utilizados em larga escala em vários locais do mundo, sob diferentes condições e alcançando bons resultados.

Diante do que foi exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo HYDRUS-1D na simulação do conteúdo de água no solo, potencial mátrico e extração de água pela cultura do milho, em diferentes regimes de irrigação em região semiárida. Sendo os dados obtidos da simulação comparados estatisticamente com os dados medidos em campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cultura do milho

O milho é uma gramínea que pertence à família *Poaceae*, tribo *Maydeae*, gênero *Zea* e espécie *Zea mays L.* sendo descendente do *Teosinte* e *Tripsacum*, com origem na América pré-colombiana (SILVA, 2014). A cultura do milho é classificada como planta C4 com alta capacidade de adaptação em diferentes condições climáticas e ambientais, sendo a nível mundial direcionado cerca de 70% da produção desse cereal para a cadeia produtiva de suínos e aves, no Brasil esse valor fica em torno de 80% (SOUSA, 2016).

A produção de milho desempenha um importante papel no desenvolvimento econômico e socioeconômico de muitos países, principalmente devido a diversificação de seus usos, com destaque para a produção de alimento e biocombustível. O Brasil ocupa a terceira posição na produção mundial de milho, ficando atrás somente dos Estados Unidos e da China (VETTORAZI, 2016).

De acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) em 2016 a produção brasileira de Milho totalizou 89 milhões de toneladas em 11,25 milhões de hectares de área plantada. Concentrando seu cultivo principalmente nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, tanto na primeira como na segunda safra (SOUSA, 2016). No estado do Ceará a produção foi de 424,1 mil toneladas e a produtividade de 847 kg ha⁻¹, ocupando a quinta posição na região Nordeste (CONAB, 2016). Porém, com a segunda maior área plantada do Nordeste com 500,7 mil hectares, ocupa apenas a quinta posição em produtividade.

Segundo Dourado Neto (2000), a cultura do milho possui cinco etapas de ciclo produtivo, sendo elas: (i) germinação e emergência: que ocorre após a semeadura com o surgimento da plântula que pode levar de 4 a 12 dias, sendo função da temperatura e umidade do solo; (ii) crescimento vegetativo: tem início a partir da emissão da segunda folha se estendendo até o florescimento, que varia de acordo com o genótipo da semente e fatores climáticos; (iii) florescimento: situa-se entre o início da polinização e o início da frutificação; (iv) frutificação: compreendida entre a fecundação e completo enchimento dos grãos, podendo durar de 40 a 60 dias; (v) maturidade: período entre o final da frutificação e o aparecimento da camada escura, sendo considerado um período curto e representativo do final do ciclo de vida da planta.

Almeida (2016) afirma que a maior produtividade do milho ocorre quando a sua máxima área foliar coincidir com uma maior disponibilidade de radiação solar do meio, desde que não haja nenhum tipo de déficit no período, permitindo a máxima fotossíntese da cultura, porém, pode ocorrer aumento da necessidade hídrica pois o aumento do fluxo energético eleva a evapotranspiração.

Segundo Atayde (2013), a produtividade do milho depende da interceptação de radiação solar pelo dossel, eficiência metabólica e capacidade de dreno, sendo importante conhecer a época de plantio analisando todo o ciclo da cultura.

Para Arruda *et al.* (2013), a cultura do milho tem grande importância econômica e social, por ser um grão utilizado na alimentação humana e animal, sendo componente significativo da agricultura familiar e do agronegócio. Os autores ainda afirmam que para obtenção de rendimento elevado nesta cultura é necessário o uso de adubos minerais no solo, porém, aplicação de certos produtos agrícolas pode causar desequilíbrio no ecossistema, além de ser uma das práticas mais onerosas da agricultura.

2.2 Manejo da agricultura irrigada

A produção agrícola em todo o mundo sofre frequentemente com déficits hídricos, principalmente em regiões áridas e semiáridas, que em sua grande parte dependem da agricultura, com isso, estudos podem ser realizados a fim de se obter respostas quanto a tolerância das plantas ao déficit hídrico (VADEZ, 2014). O entendimento dos processos de extração de água pelas raízes assume grande importância, pois, o sistema radicular além de sustentar a planta no solo é responsável pela absorção de água e nutrientes do solo através do fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera.

Uma das variáveis chaves para compreensão dos processos hidrológicos na zona de aeração é a umidade do solo. Práticas como o manejo de irrigação dependem em grande parte de uma caracterização adequada e precisa da dinâmica da umidade do solo em escala temporal e espacial na zona das raízes, devido seu grande impacto na produção agrícola e no processo de salinização das lavouras (KUMAR *et al.*, 2013).

Segundo Rezaei *et al.* (2017), os solos são intrinsecamente heterogêneos, assim como as propriedades hidráulicas que controlam a capacidade do solo armazenar água e conduzir para as raízes da planta, e adicionalmente afirmam que condições de contorno (nível de água subterrânea como limite inferior e evapotranspiração como limite

superior) e topografia afetam consideravelmente a variabilidade do conteúdo de água no solo.

De acordo com Greaves e Wang (2017), os métodos de manejo de irrigação via solo tem como princípio o gerenciamento da água na zona de aeração e pode apresentar uma melhor aplicabilidade quando comparado a métodos combinados como solo-planta ou solo-clima, por ser de mais fácil aplicação tanto financeira quanto técnica. Este método consiste no monitoramento dos níveis de umidade do solo e geralmente aplica-se a irrigação quando tais níveis chegam em um limite predefinido.

Hao *et al.* (2015) em estudo realizado nas planícies do Texas, nos EUA, afirmam que a utilização da irrigação com déficit (aplicação de água abaixo do requisitado pela evapotranspiração da cultura) é uma alternativa viável quando busca-se um manejo adequado dos recursos hídricos, sem que haja grande impacto no rendimento dos grãos. Possibilitando aos agricultores diversificar sua produção utilizando a água poupada em outros campos de cultivo (MUSTAFA *et al.*, 2017).

A análise da extração de água pelas raízes demonstra um papel importante quando procura-se diminuir a quantidade de água desperdiçada, este monitoramento é altamente dependente da otimização das profundidades de aplicação de água, que conforme a estrutura do solo podem estabelecer níveis diferentes de esforço para planta extrair à água (GREAVES; WANG, 2017).

Para avaliar a necessidade de irrigação em telhados verdes Qin *et al.* (2016) avaliaram a eficiência do modelo HYDRUS em prever a umidade do solo em períodos de seca, os autores afirmam que o modelo teve sucesso no manejo do sistema de irrigação sob diferentes condições meteorológicas. Rezaei *et al.* (2017) também afirmam que o modelo HYDRUS em sua versão 3D, foi capaz de reproduzir padrões espaciais de estresse hídrico, armazenamento de água no solo e rendimento de culturas, dados que podem otimizar as estratégias de irrigação.

2.3 Extração de água pelas raízes das plantas

A extração de água pela raiz é um importante mecanismo que determina o transporte da água entre o solo e a atmosfera, influenciando diretamente a produtividade da planta, no entanto, os processos de extração de água pela raiz e suas interações com o solo ainda não são totalmente compreendidos (JAVAUX *et al.*, 2008, HILDEBRANDT *et al.*, 2016).

Os processos de transporte da água no interior das camadas de solo não saturado e na zona das raízes (rizosfera) são comandados pelas propriedades físicas do solo (hidráulicas), fisiologia da planta e fatores meteorológicos (SCHONSKY *et al.*, 2014). A taxa de extração de água pelas plantas e os fatores que a controlam são de interesse fundamental de áreas como a hidrologia, irrigação e meteorologia (ARRAES, 2014).

Segundo Albrieu *et al.* (2015) e Ferguson *et al.* (2016), a distribuição e eficiência da absorção de água pelas raízes está diretamente ligada a taxa de transpiração e sua resposta as mudanças de umidade no solo, tendo implicações nas águas superficiais e subterrâneas. O conhecimento detalhado da absorção de água pelas raízes além de oferecer dados sobre o movimento de água na rizosfera pode auxiliar em práticas agrícolas, como manejo de irrigação, gerando respostas rápidas sobre o comportamento das plantas principalmente em regiões áridas e semiáridas, que além de possuírem solos pobres enfrentam sérios problemas de escassez hídrica.

A modelagem da extração de água pelas raízes das plantas é uma importante ferramenta para a predição de taxas reais de transpiração, crescimento da cultura, movimento de água no solo e transporte de solutos, sendo necessário conhecimento detalhado da distribuição das raízes no perfil do solo, ou seja, densidade da raiz (JONG VAN LIER *et al.*, 2009, KLEMENT *et al.*, 2016). O tema da modelagem da extração de água pelas raízes das plantas tem sido tratado por vários autores (GARDNER, 1960, COWAN, 1965; LI, DE JONG; BOISVERT, 2001; JONG VAN LIER *et al.*, 2006; GONG *et al.*, 2006; JONG VAN LIER *et al.*, 2013, AGGARWAL *et al.*, 2017) utilizando duas escalas distintas, a escala microscópica e a macroscópica.

2.3 Escala macroscópica

Na escala macroscópica, a transpiração das plantas que ocorre através da extração de água pelas raízes é representada por um termo sumidouro (S) na equação de Richards (CHEN, 2016; PETERS *et al.*, 2017) (Equação 1).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(h) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(h) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(h) \frac{\partial H}{\partial z} \right] - S \quad (1)$$

Em que: θ representa a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), t é o tempo (dia), H é o potencial de total da água no solo (cm c a); $K(h)$ é a condutividade hidráulica não saturada (cm dia⁻¹), e S (dia⁻¹) é o termo sumidouro.

De acordo com Molz (1981), existem duas classes de funções macroscópicas. Uma classe tem origem em uma analogia da Lei de Ohm, em que os fluxos são diretamente proporcionais ao gradiente de potencial e inversamente proporcionais a resistência do meio (SANTOS, 2011). Nessa classe incluem os modelos propostos por Gardner (1964), Molz e Remson (1970). Estas funções necessitam do conhecimento detalhado da densidade radicular, potencial da água nas raízes das plantas, resistência hidráulica da raiz e do solo para o fluxo de água (LI *et al.*, 2001; LUO *et al.*, 2003). Sendo de difícil medição e muitas vezes são calibrados com o auxílio de dados de campo (LUO *et al.*, 2003).

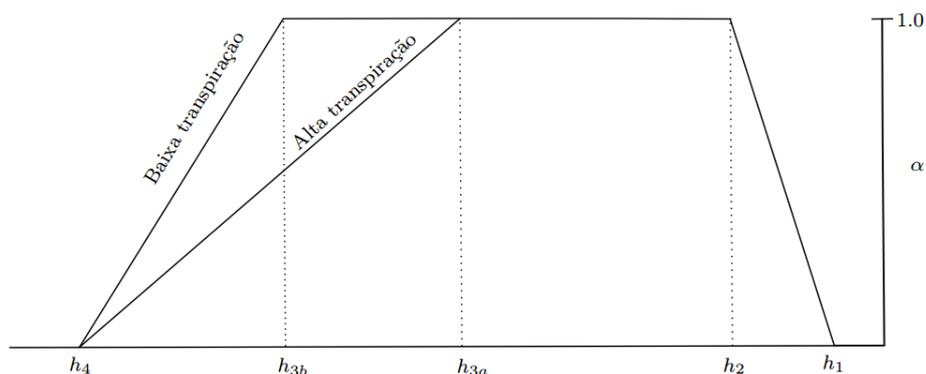
Outra abordagem macroscópica foi exposta inicialmente por Feddes *et al.* (1976), que consideraram a extração de água no solo (S) uma função do conteúdo de água no solo, sendo aprimorada posteriormente por Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) considerando-a função do potencial matricial, podendo ser representada por:

$$S_c(z) = \alpha(h)S_p(z) \quad (2)$$

Em que: $\alpha(h)$ é um coeficiente adimensional ($0 \leq \alpha(h) \leq 1$) denominado função de redução da transpiração ou da extração, sendo função do potencial matricial do solo (h); e S_p , a extração máxima ou potencial de água pelas raízes.

A função de redução da transpiração (α) proposta por Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) é mostrada na Figura 1. Se α for igual a zero, conseqüentemente a extração também será. Isto ocorre quando o potencial matricial for superior a h_1 (deficiência de oxigênio) ou inferior a h_4 (ponto de murcha permanente). Quando o potencial matricial estiver entre h_2 e h_3 , α será igual a um, ocorrendo transpiração/extração máxima. Para potenciais matriciais entre h_3 e h_4 , α (assim como a transpiração/extração) diminui. O parâmetro h_3 pode ser chamado de valor crítico ou limitante, representando o ponto a partir do qual as condições hidráulicas diminuem a extração de água pelas raízes (SANTOS, 2011).

Figura 1 - Função de redução da extração de água pelas raízes (α) em função do potencial matricial do solo para baixa e alta transpiração.



Fonte: Adaptado de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978).

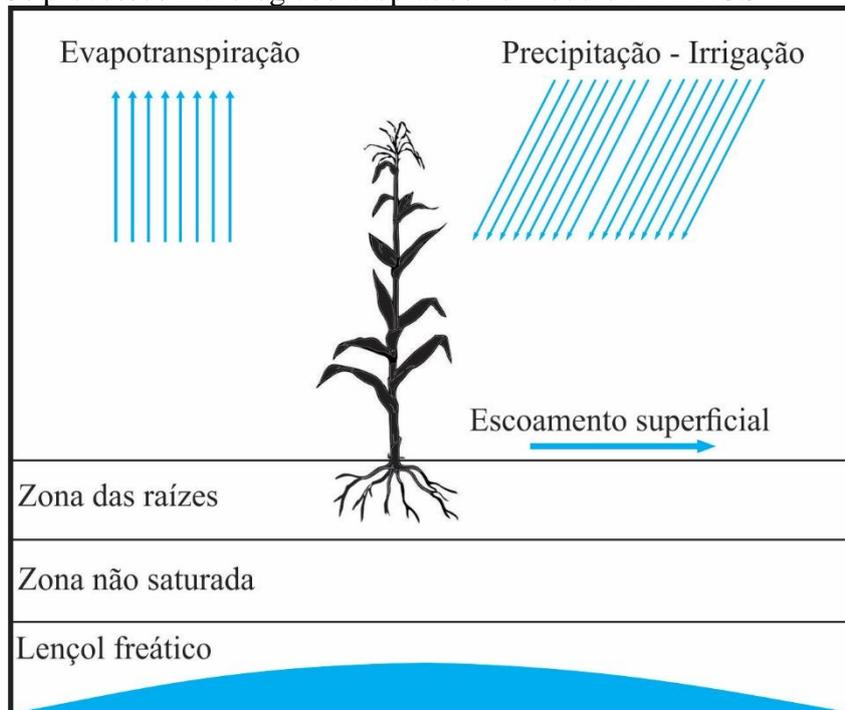
2.4 Modelo HIDRUS-1D

Ocorrem inúmeras interações no solo entre o fluxo de água, transporte de solutos, fluxo de calor e crescimento da planta. Segundo Van Dam *et al.* (2008), os fluxos de água afetam a taxa de salinização, enquanto que as concentrações de sais afetam a taxa real de absorção de água pela raiz. O estresse hídrico e salino pode afetar o desenvolvimento da cultura e a cobertura do solo, interferindo na evaporação do solo e transpiração da cultura. Para analisar estes tipos de interações o modelo HYDRUS-1D resolve simultaneamente as equações numéricas para o fluxo de água, transporte de solutos, fluxo de calor e crescimento da cultura (ZLOTNIK *et al.*, 2007; FAN *et al.*, 2012; TAFTEH; SEPASKHAH, 2012).

O modelo HYDRUS-1D, foi desenvolvido por Šimůnek, Van Genuchten e Sejna (2008), no Departamento de Ciências Ambientais da Universidade de Riverside na Califórnia, e é um software para simular o movimento de água, calor e soluto na zona vadosa em interação com o desenvolvimento da vegetação.

Este modelo foi utilizado em vários estudos-teste, porém, é recomendado que sua eficácia seja avaliada em testes de campo e laboratório para variadas condições. O mesmo utiliza a equação de Richards, incluindo a extração de água pelas raízes, para simular o movimento da água no solo em condições de saturação variável. Os processos hidrológicos acoplados no modelo são representados na Figura 2.

Figura 2 - Os processos hidrológicos acoplados no modelo HYDRUS-1D



Fonte: O autor.

De acordo com Shouse e Ayars (2011), o modelo HYDRUS-1D demonstrou bons resultados em simular a extração de água salina subterrânea pelas raízes da alfafa, em Parlier na Califórnia, e afirmam que a utilização de modelos de simulação pode ser útil para reduzir a dependência de pesquisa experimental principalmente em regiões semiáridas que enfrentam uma série de problemas na agricultura irrigada.

Fan *et al.* (2012) afirmam que o modelo HYDRUS-1D simulou adequadamente a dinâmica da água no solo, a temperatura do solo, evapotranspiração e a emissão de CO₂ em dois ecossistemas: uma pastagem de capim em Grenville e uma plantação de alfafa em North Logan, Utah, ambas nos EUA. Xi *et al.* (2016) avaliaram o modelo HYDRUS-1D na simulação da dinâmica da água no solo em uma plantação de *Populus Tomentosa* em condições de sequeiro no Condado de Gaotang, província de Shandong na China, os autores recomendam o uso deste modelo para avaliar os impactos da disponibilidade de água no solo de diferentes regimes de irrigação.

Em estudo realizado na China, Li *et al.* (2014) concluíram que o HYDRUS-1D foi capaz de analisar os processos mais importantes no desenvolvimento da cultura do arroz como infiltração, escoamento superficial, extração de água pelas raízes e lixiviação. Considerando-o uma ferramenta útil para estabelecer regimes de irrigação e para gerir de forma adequada os recursos hídricos.

Caiqiong e Jun (2016) afirmam que o monitoramento do teor de água no solo em nível de bacia hidrográfica apresenta elevada dificuldade, tanto pela sua variabilidade espaço temporal como por dispendiosas coletas de campo, além disso, o teor de umidade antecedente não é comumente medido, sendo esses dados necessários a modelos de escoamento e transporte de sedimentos. Os autores concluem no estudo que foi realizado na cidade de Yulin na China que o modelo HYDRUS-1D simulou de forma razoável o teor de umidade antecedente do solo, podendo ser usado para prever o escoamento e o transporte de sedimentos numa bacia hidrográfica.

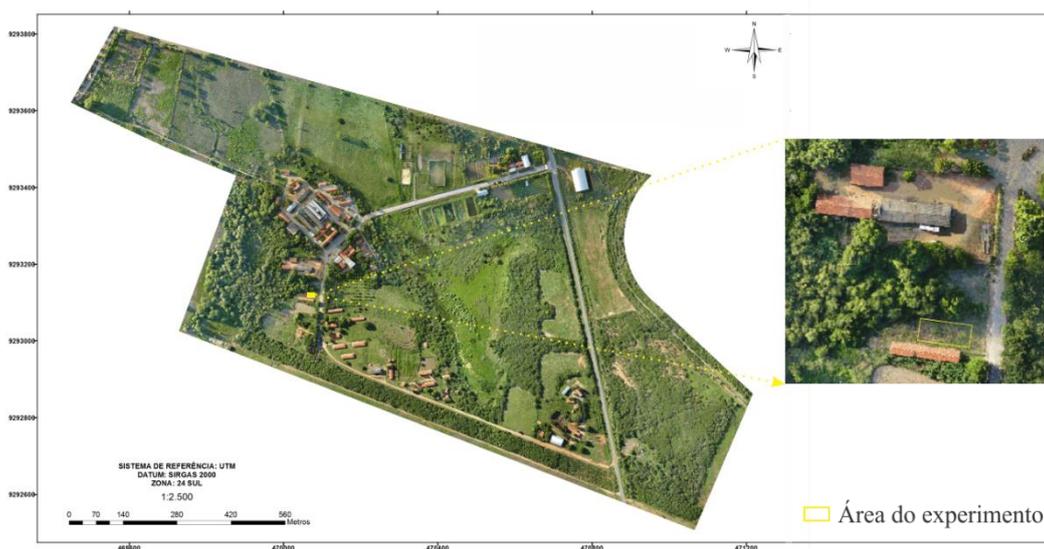
Bons resultados na simulação do teor de água no solo pelo modelo HYDRUS-1D também são descritos por Cai *et al.* (2017); Ahmad *et al.* (2018); Autovino *et al.* (2018); e Phogat *et al.* (2018), em estudos realizados em diversos locais do mundo e com diferentes tipos de solo e cultura. Chen *et al.* (2018) alertam que para a obtenção de bons resultados utilizando o modelo HYDRUS-1D é necessário que se alimente o modelo de forma correta, isto é, levando em consideração vários tipos de variáveis e condições de contorno, como infiltração e drenagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, solo e clima

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará campus Iguatu (IFCE), estado do Ceará (Figura 3). A cidade de Iguatu está localizada na Região Centro Sul do estado, a uma altitude de 218 metros acima do nível do mar, com coordenadas geográficas $06^{\circ} 24' 48''$ de Latitude Sul e $39^{\circ} 24' 42''$ de Longitude Oeste.

Figura 3 - Imagem aérea da área experimental onde foi desenvolvido o estudo nas dependências do IFCE campus Iguatu



Fonte: Foto de Efraim Martins Araújo (2016).

A área onde foi desenvolvido o estudo é classificada segundo a escala de Koeppen como do tipo BSw'h', clima quente e semiárido. Sendo caracterizado pela escassez de chuvas e altas temperaturas, que acarretam numa elevada evaporação, apresentando apenas duas estações climáticas durante o ano, chuvosa e seca, a última podendo durar de 7 a 8 meses (ARRAES *et al.*, 2009).

O solo da área experimental foi classificado como franco arenoso e suas características físico químicas são observadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Classificação textural e física do solo da área experimental utilizada

Classe textural	Areia	Silte	Argila	Densidade		Porosidade total
				Solo	Partícula	%
				kg dm ⁻³		
Franco Arenosa	796,5	167,3	36,2	1,33	2,58	48,2

Fonte: O autor

Tabela 2 - Análise química do solo da área experimental

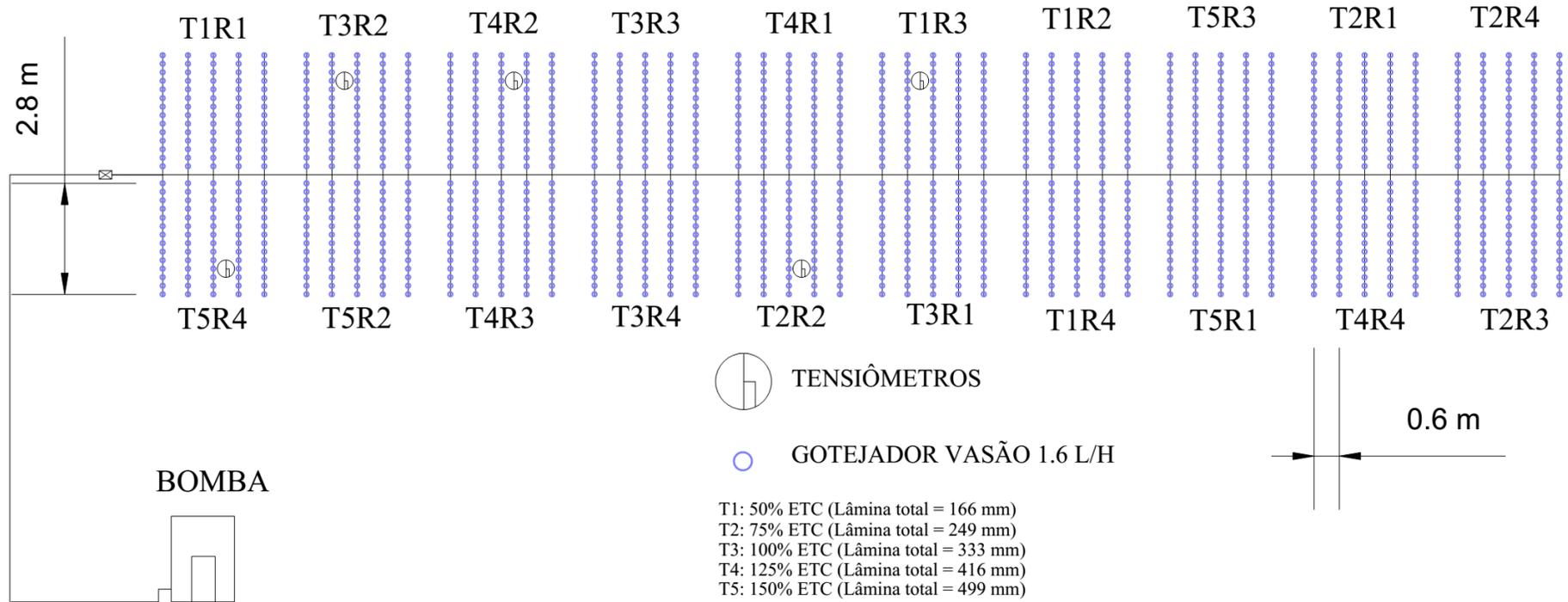
Classe textural	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al
		-----mg dm ⁻³ -----			-----mmol _c dm ⁻³ -----		
Franco Arenosa	5,8	29	213	22	20	18	0

Fonte: O autor

3.2 Caracterização do experimento

O experimento foi com o milho (Híbrido AG 1051). A semeadura foi realizada em 1 de agosto de 2017, no espaçamento de 0,2 m entre plantas e 0,6 m entre fileiras de plantas. Foi adotado delineamento em blocos ao acaso com 5 tratamentos e 4 repetições em parcelas de 2,4 x 3,0 metros (Figura 4). Sendo os tratamentos cinco lâminas de irrigação baseadas na evapotranspiração da cultura (ET_c).

Figura 4 - Esquema do experimento de campo. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

As lâminas de irrigação corresponderam à: T1, lâmina de irrigação referente a 50% da ETc; T2, lâmina de irrigação referente a 75% da ETc; T3, lâmina de irrigação referente a 100% da ETc; T4, lâmina de irrigação referente a 125% da ETc; e T5, lâmina de irrigação referente a 150% da ETc. O método de irrigação utilizado foi localizado, com gotejadores de vazão de 1,6 L h⁻¹ na pressão de serviço de 10 mca, trabalhando com 90% de eficiência segundo o coeficiente de uniformidade.

Foi realizado o manejo de irrigação via clima, sendo os dados climáticos obtidos a partir da estação automática e convencional pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada próximo ao experimento. A evapotranspiração de referência foi estimada utilizando o método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998) através da equação 3.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 \cdot u_2)} \quad (3)$$

em que, ETo - evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹; R_n - radiação líquida total, MJ m⁻² dia⁻¹; G - densidade do fluxo de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹; T_m - temperatura média diária do ar, °C; u₂ - velocidade do vento média diária a 2 m de altura, m s⁻¹; e_s - pressão de saturação de vapor, kPa; e_a - pressão parcial de vapor, kPa; e_s-e_a - déficit de saturação de vapor, kPa; Δ - declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T_m, kPa°C⁻¹; γ - coeficiente psicrométrico, kPa°C⁻¹.

A evapotranspiração da cultura foi estimada por meio da equação 4.

$$ETc = ETo \cdot kl \cdot kc \quad (4)$$

em que, ETc: Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ETo: Evapotranspiração de referência, (mm dia⁻¹); kl: coeficiente de ajuste para irrigação localizada, determinado em campo utilizando a equação proposta por Fereres (1981) (kl= 0,663); kc: coeficiente de ajuste de cultivo, sendo utilizado o recomendado por Souza *et al.* (2015) (Tabela 3).

Tabela 3 - Valor médio do coeficiente da cultura (kc) para milho irrigado em condições do semiárido brasileiro

Fase fenológica	Duração (dias)	kc
Vegetativo	40	0,86
Floração	13	1,23
Enchimento de grãos	20	0,97
Maturação	36	0,52

Fonte: O autor

Adaptado de Souza *et al.* (2015).

A lâmina de irrigação necessária foi calculada por meio da equação 5.

$$LI = \frac{\sum_{i=1}^{TR} ETc_i \cdot PAM}{Ea} \quad (5)$$

em que, LI: lâmina de irrigação, (mm); Ea: eficiência de irrigação foi obtida conforme metodologia descrita por Frizzone *et al.* (2012); PAM: porcentagem de área molhada também obtida conforme metodologia descrita por Frizzone *et al.* (2012) e TR: turno de rega (dias).

O tempo de irrigação foi calculado por meio da equação 6.

$$Ti = \frac{LI \cdot S1 \cdot S2 \cdot Ft}{N_{emissores} \cdot q} \quad (6)$$

em que, Ti: tempo de irrigação (h); S1 e S2: espaçamentos entre os emissores e entre linhas de irrigação, respectivamente, em m; Ft é o fator de aplicação da água em função do tratamento. Os valores de Ft utilizados serão 0,50; 0,75; 1,0; 1,25 e 1,50 para os tratamentos L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente; $N_{emissores}$: número de emissores por planta; q: vazão média dos emissores, em $L h^{-1}$.

3.3 Produção

Para a estimativa da produção de milho verde foi utilizada metodologia proposta por Albuquerque *et al.* (2008) que considera uma espiga comercial aquela com

comprimento superior a 17 cm, estando livre de danos de insetos, ou, caso estejam danificadas, seu comprimento livre de danos seja superior a 15 cm e diâmetro igual ou superior a 3,0 cm.

Foram obtidas as seguintes variáveis para a obtenção da produção de milho verde:

- (i) número de espigas totais (NTE) - determinado através de contagem de todas as espigas da área útil da parcela e posteriormente feito o cálculo para números de espigas por hectare;
- (ii) percentual de espigas comerciais (EC) - contado e transformado em porcentagem;
- (iii) massa total de espigas com palha (MTEP) - pesadas em balança digital, as espigas da área útil contendo a palhada e depois feita a relação para produtividade em $t\ ha^{-1}$;
- (iv) massa da espiga comercial com palha (MECCP) - pesadas em balança digital, as espigas da área útil contendo a palhada e depois feita a relação para produtividade em $t\ ha^{-1}$;
- (v) massa da espiga comercial despalhada (MECD) - pesadas em balança digital, as espigas despalhadas da área útil e depois obtida a relação para produtividade em $t\ ha^{-1}$;
- (vi) diâmetro de espigas comerciais com palhada (DECP) - medido em centímetros, com paquímetro digital, na parte central das espigas comerciais com palhada;
- (vii) diâmetro das espigas comerciais despalhadas (DECD) - medido em centímetros com paquímetro digital, na parte central da espiga despalhada;
- (viii) comprimento de espigas comerciais com palha (CECP) - medido em centímetros com fita métrica, da base ao ápice das espigas;
- (ix) comprimento de espigas comerciais despalhada (CECD) - medido em centímetros com fita métrica, da base ao ápice das espigas comerciais.

Os dados de produção foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foi utilizado o software estatístico Sisvar 5.3.

3.4 Índice de área foliar (IAF)

O índice de área foliar (IAF) foi determinado em três datas (01/09/2017, 08/09/2017 e 15/09/2017) correspondendo a uma análise para cada semana de dados simulados durante o ciclo da cultura.

Foi utilizado o comprimento médio das folhas, largura média das folhas, fator de correção, número de folhas e número de plantas por m⁻² como descrito por Parizi, (2007) (Equação 7).

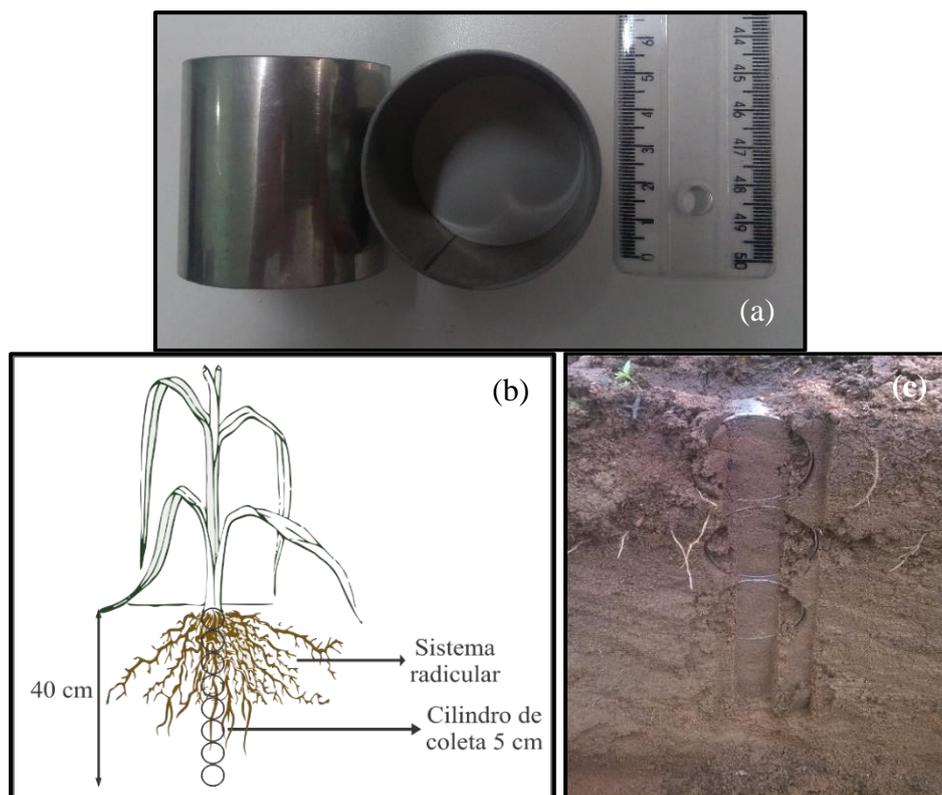
$$IAF = \frac{(comp.med \cdot larg.med) \cdot 0,75 \cdot n^{\circ} .folhas \cdot n^{\circ} plantas / m^2}{10000} \quad (7)$$

em que, comp.med: comprimento médio; larg.med: largura média; n^ofolhas: número de folhas; n^oplantas/m²: número de plantas por metro quadrado.

3.5 Densidade radicular

Foram realizadas três coletas de raízes, uma a cada sete dias, compreendidas entre 01 de setembro a 21 de setembro. Na coleta foram utilizados oito cilindros de 5 cm de diâmetro por 5 cm de altura (Figura 5a), inseridos verticalmente, centralizando-os com base no caule da planta, em uma trincheira cavada na lateral da planta (Figura 5b e 5c). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e devidamente identificados de acordo com o tratamento e a profundidade.

Figura 5 - Cilindro e esquema de coleta de raízes utilizados no experimento. Iguatu-CE, 2017



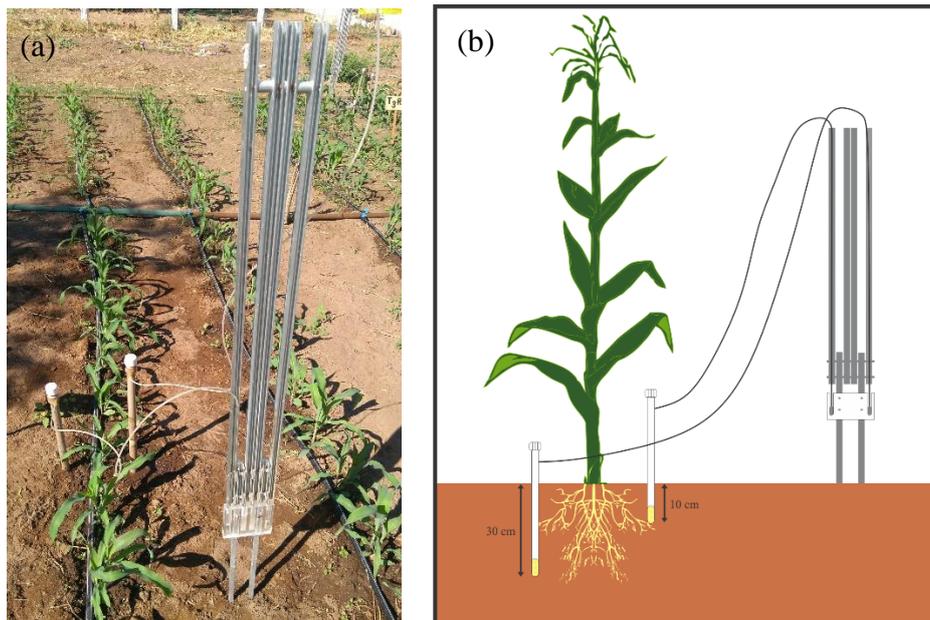
Fonte: O autor.

Após a coleta o conteúdo do cilindro foi lavado em peneira de 2 mm a fim de se separar as raízes do solo, logo após as raízes foram armazenadas em recipientes plásticos e devidamente identificadas. As raízes coletadas para o cálculo de densidade em cada profundidade, foram escaneadas, para que fosse aferido seu comprimento utilizando o software Safira[®] versão 1.1.

3.6 Potencial matricial do solo

Em cada tratamento foi instalada uma bateria de tensiômetro de mercúrio no solo (Figuras 6a e 6b), um na profundidade de 10 cm e outro na profundidade de 30 cm, para o monitoramento do potencial matricial do solo e para se obter o valor da umidade do solo a partir da curva de retenção, de modo a relacioná-lo com a lâmina de irrigação aplicada e a extração de água pelas raízes do milho que será obtido pela simulação do modelo HYDRUS-1D.

Figura 6 - (a) Bateria de tensiômetros instalados nas profundidades 10 e 30 cm na área experimental cultivada com milho, (b) esquema de instalação. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

3.7 Simulação do movimento de água no solo pelo HYDRUS 1D

O modelo HYDRUS 1D (versão 4.16) (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013) simula o fluxo de água, o movimento de calor e o transporte de soluto em uma dimensão (1D) em meio poroso com saturação variável. A equação que governa o fluxo de água unidimensional é a equação de Richards (Equação 8). E assumindo que o efeito da fase do ar e dos gradientes térmicos são insignificantes no processo de fluxo de água, a mesma pode ser expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (8)$$

em que, θ : umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); h : potencial de pressão ou matricial (cm c a); t : tempo em (horas); z : coordenada vertical (cm); $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, (cm h^{-1}); α : ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical, ou seja, $\alpha = 0^\circ$ para o fluxo vertical, 90° para fluxo horizontal e $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ para fluxo inclinado, sendo considerado o fluxo como vertical.

3.7.1 Propriedades hidráulicas do solo

As funções hidráulicas do solo são descritas pelas equações de Van Genuchten e Van Genuchten-Mualem para a retenção de água no solo e condutividade hidráulica, respectivamente. A equação de Van Genuchten (1980) é a seguinte: (Equação 9)

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha|h|)^n} \right]^m \quad (9)$$

em que, S_e : saturação efetiva; θ_s : umidade de saturação; θ_r : umidade residual do solo; α : parâmetro com dimensão igual ao inverso do potencial mátrico (cm^{-1}), n : parâmetro da curva, adimensional; m : parâmetro da curva (geralmente) definido como $m = 1 - \frac{1}{n}$

Os parâmetros θ_s , θ_r , α e n foram obtidos pelo ajuste entre os dados obtidos na curva de retenção (Tabela 4), realizada pelo método da centrifuga de alta velocidade, para as tensões: 60; 100; 600; 1000 e 15000 kPa. Sendo realizado no laboratório de análise de solo, água e planta da EMBRAPA em Petrolina-PE.

Tabela 4 - Propriedades físico-hídricas do solo. Iguatu-CE, 2017

Parâmetros						
θ_s	θ_R	α	n	m	Ko	ℓ
($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	(cm^{-1})			(cm dia^{-1})	
0.4826	0.0485	0.1533	1.8231	0.4515	792	0.5

Fonte: O autor

A equação de Van Genuchten (1980) pode ser utilizada em conjunto com a equação de Mualem (1976) formando a seguinte função (Equação 10), que pode ser utilizada para descrever a condutividade hidráulica do solo em saturação variável, sendo conhecida como equação de Van Genuchten-Mualem:

$$K = K_o S_e^\ell \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (10)$$

em que, K: condutividade hidráulica (cm dia^{-1}); K_0 : condutividade hidráulica do solo saturado (cm dia^{-1}); S_e : saturação efetiva; ℓ : parâmetro empírico, sendo tradicionalmente definido como 0,5; m: definido anteriormente.

3.7.2 Dados de entrada no modelo

Para a simulação da extração de água pelas raízes é necessário além dos dados de potencial mátrico e a densidade de raízes, que se calcule a transpiração potencial e evaporação da superfície do solo através da estimativa da evapotranspiração da cultura (Equação 4). A evaporação da água na superfície do solo foi obtida pela equação proposta por Belmans *et al.* (1983) (Equação 11).

$$E_v = e^{-0,6IAF} ETC \quad (11)$$

em que, E_v : evaporação do solo (mm dia^{-1}); IAF: índice área foliar.

A transpiração potencial foi calculada da seguinte forma (Equação 12):

$$T_{pot} = ETC - E_v \quad (12)$$

em que, T_{pot} : Transpiração potencial da cultura (mm dia^{-1}).

3.7.3 Simulação da extração de água do solo

A versão utilizada do modelo HYDRUS-1D oferece duas alternativas para o cálculo da extração de água: o modelo macroscópico de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) e o modelo de Van Genuchten (1987). Para a simulação da extração de água pelas raízes foi utilizado o modelo de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) que pode ser considerado um modelo clássico, podendo ser reescrito da seguinte forma (Equação 13):

$$S_p = \frac{T_{Pot}}{Z_r} \quad (13)$$

em que, S_P : extração potencial; T_{Pot} : transpiração potencial (mm dia^{-1}); Z_r : profundidade máxima do sistema radicular (cm).

A extração potencial é transformada em extração corrigida multiplicando-a ao fator de redução α (Equação 14).

$$S_C = S_P \cdot \alpha \quad (14)$$

O fator α é função de h (potencial mátrico) e de cinco parâmetros empíricos específicos para cada cultura (Tabela 5). Este fator varia de 0 a 1 e pode ser obtido de acordo com a Equação 15.

Tabela 5 - Valores de h para obtenção da função de redução (α) de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978)

Potencial de água no solo (cm)*	
h_1	-0.1
h_2	-1.0
h_{3l}	-400
h_{3h}	-1200
h_4	-8500

Fonte: O autor

*Valores utilizados por Ma *et al.* (2015) para cultura do milho.

$$\alpha = \begin{cases} 0 & h \geq h_1 \\ \frac{h_1 - h}{h_1 - h_2} & h_1 > h \geq h_2 \\ 1 & h_2 > h \geq h_3 \\ \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & h_3 > h \geq h_4 \\ 0 & h_4 \geq h \end{cases} \quad (15)$$

Os valores de h_2 e h_3 representam os limites entre os quais a absorção de água pela planta é assumida como máxima, enquanto h_1 e h_4 representam respectivamente, o limite de deficiência de oxigênio devido à saturação do solo e o conteúdo mínimo de água no solo observado no sistema radicular (geralmente próximo ao ponto de murcha permanente). Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) sugerem dois valores de h_3 (h_{3l} e h_{3h}) que depende da taxa de transpiração. Sendo h_{3l} para baixa transpiração e h_{3h} para alta transpiração, sendo utilizado o valor para alta transpiração. Por conveniência a função de

redução de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) será citada apenas como função de redução de Feddes.

3.8 Análise estatística dos dados simulados

O desempenho do modelo de extração de água do solo foi avaliado indiretamente comparando-se o potencial matricial do solo preditos pelo modelo HYDRUS-1D com os respectivos valores observados para cada tratamento.

Para as comparações entre os dados observados e simulados foram utilizados os seguintes índices estatísticos, conforme sugerido por Legates e McCabe (1999): índice de concordância de Willmott (*id*); o coeficiente de eficiência (*E*), a raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio (EM) e o erro máximo absoluto (EMAX). Esses índices são definidos como:

3.8.1 Índice de Willmott (*id*)

Willmott (1981) buscando superar a insensibilidade de medidas baseadas na relação entre diferenças de dados medidos e simulados por modelos, desenvolveu o índice de acordo “*id*”, que varia de 0 a 1, sendo que os maiores valores indicam uma melhor concordância entre modelo e observações, podendo ser usado independente das unidades de medida das variáveis (Equação 16).

$$id = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad (16)$$

em que, O_i : dados padrão, obtidos nos ensaios experimentais; P_i : dados simulados pelo modelo; N : número de observações e O : média dos valores observados.

3.8.2 Coeficiente de eficiência (*E*)

Este coeficiente vem sendo amplamente utilizado para avaliar o desempenho de diversos tipos de modelos. Nash e Sutcliffe (1970) definiram o coeficiente de eficiência que varia de menos infinito até 1, com os maiores valores indicando a melhor concordância. É uma medida

sensível as diferenças nos padrões observados, simulados e suas variâncias, sendo excessivamente sensível a valores extremos (Equação 17).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (17)$$

3.8.3 Raiz quadrada do erro médio (RMSE)

De acordo com Willmott (1985) a raiz quadrada do erro médio (RMSE) complementa a informação dada pelo índice de concordância “id”. É usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar valores de erro nas mesmas dimensões da variável analisada (HALLAK E PEREIRA FILHO, 2011) (Equação 18).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (18)$$

3.8.4 Erro médio (EM)

Medida simples, conhecida também como viés e mede a tendência do modelo superestimar ou subestimar os dados em relação ao observado, sendo definida da seguinte forma (Equação 19).

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (19)$$

3.8.5 Erro máximo absoluto (EMAX)

$$EMAX = \max[(P_i - O_i)]_{i=1}^N \quad (20).$$

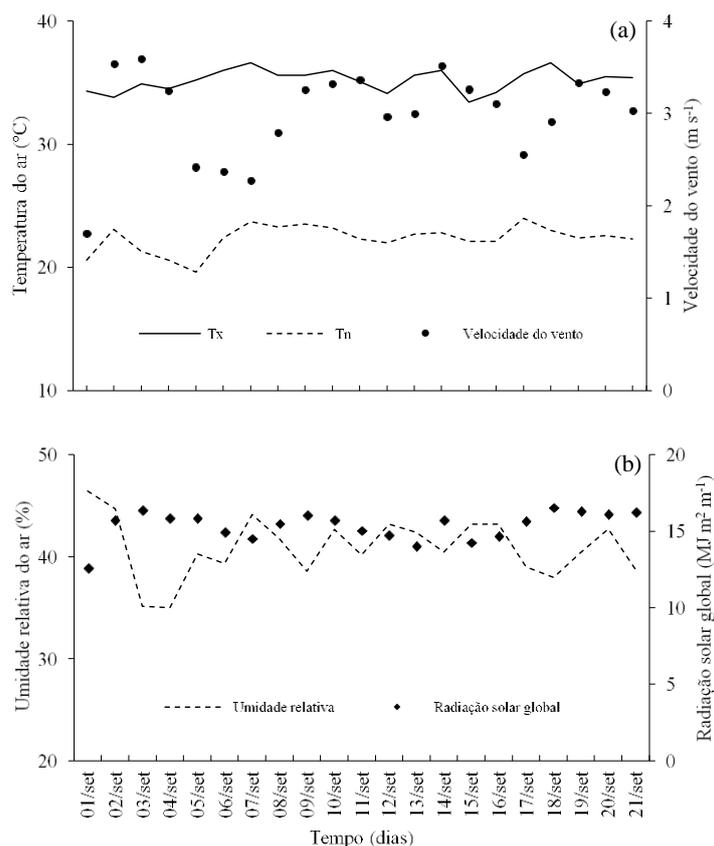
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições climáticas

Foi simulado o período de 21 dias, compreendido entre o período de maior demanda hídrica da cultura do milho, os dias simulados situam-se de 1 a 21 de setembro de 2017. Segundo Allen (2006) a demanda hídrica do milho se divide em quatro fases distintas, tendo a primeira fase uma duração de 30 dias após a emergência (DAE). Já a segunda fase está compreendida no período que corresponde dos 30 a 60 DAE. A terceira fase corresponde ao final da segunda fase aos 60 DAE até os 90 DAE. Por fim a quarta fase vai dos 90 DAE até os 110 DAE. Ainda de acordo com o referido autor a fase de maior demanda hídrica da cultura do milho é a segunda, conhecida como pendoamento e floração.

Na Figura 7a no que se diz respeito aos dias simulados, a temperatura do ar mínima variou entre 19,6 a 24,0 °C e a temperatura máxima entre 33,4 a 36,6 °C. Segundo Domínguez *et al.* (2012) para um crescimento adequado, o milho requer temperaturas relativamente altas, com valores ótimos situando-se entre 25 e 30°C durante o estágio de desenvolvimento, alta radiação solar, que no período estudado variou entre 12,6 a 16,6 MJ m² dia⁻¹ (Figura 7b) e ambiente seco, tornando-se nessas condições, adequado para cultivo na maioria dos tipos de solo. Os valores de velocidade do vento variaram de 1,7 a 3,6 m s⁻¹, segundo Allen (2006), o processo de remoção de vapor é altamente dependente do vento que transfere grandes quantidades de ar para a superfície de evaporação. Já a umidade relativa do ar variou entre 35 a 46%, valores baixos que contribuem para altos valores de evapotranspiração da cultura.

Figura 7 - Condições climáticas do experimento durante o período simulado. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

4.2 Produção

A lâmina de irrigação não apresentou diferença significativa a 5% de probabilidade para a maioria dos parâmetros analisados (Tabela 6). Os valores do coeficiente de variação (CV) variaram de 28,91 a 59,74%, valores considerados muito altos, segundo classificação feita para a cultura do milho por autores como Scapim, Carvalho e Cruz (1998) e Cargnelutti Filho e Storck (2007). Quanto maior o valor deste coeficiente menor a precisão do experimento. Nestes casos recomenda-se por vezes até o descarte do experimento, porém, pelos objetivos principais do presente estudo isso não será necessário, em vista que os dados de maior importância estão relacionados a umidade do solo e desenvolvimento de raízes.

É possível notar que quanto maior foi a quantidade de água aplicada maior foram os dados relativos a produção de milho verde. O tratamento T5 com lâmina de irrigação com acréscimo de 50% apresentou os maiores valores na produção, tendo sido

esta a única fonte de variação utilizada, pode-se afirmar que quanto maior a quantidade de água aplicada maior a produção de milho verde.

Tabela 6 - Valores médios de caracteres produtivos de milho-verde

Trat.	NTE	EC (%)	MTE (t há ⁻¹)	MECCP (t há ⁻¹)	MECD (t há ⁻¹)	DECP (cm)	DECD (cm)	CECP (cm)	CECD (cm)
T1	23148a	0,0a	1,25a	0,0a	0,0a	1,85a	1,68a	10,55a	6,80a
T2	61343ab	33,8ab	7,00ab	3,75ab	2,5ab	3,00a	2,63a	17,43a	11,60a
T3	71181b	34,3ab	9,75b	5,00ab	3,25ab	4,05a	3,53a	22,67a	15,68a
T4	75810b	44,1b	10,50b	5,75ab	4,25ab	4,07a	3,62a	23,00a	15,83a
T5	82755b	67,4b	13,0b	9,5b	6,75b	4,15a	3,70a	23,35a	17,55a
CV (%)	28,91	48,91	35,56	59,69	59,74	42,49	42,91	42,25	40,41
DMS	18,11	39,61	6,65	6,27	4,50	3,28	2,90	18,45	11,97

Fonte: O autor

*Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; NTE: número total de espigas (unidades ha⁻¹); EC: espigas comerciais ; MTE: massa total de espigas com palha; MECCP: massa de espigas comerciais com palha; MECD: massa de espigas comerciais despalhadas; DECP: diâmetro de espigas comerciais com palha; DECD: diâmetro de espigas comerciais despalhadas; CECP: comprimento das espigas comerciais com palha; CECD: comprimento de espigas comerciais despalhadas

O tratamento em que houve maior número de espigas comerciais (EC) foi o T5, com 67,4% do total de espigas produzidas, este valor foi baixo em comparação com outros trabalhos realizados. De Carvalho *et al.* (2016) obtiveram melhores resultados com uma percentagem de EC que variou de 55,6 a 85,8%. Os referidos autores constataram ainda um MECCP que variou de 7,03 a 12,62 t ha⁻¹ e um MECD que variou de 5,95 a 7,72 t ha⁻¹, valores superiores aos encontrados no presente trabalho, o que pode evidenciar que apesar das diferenças encontradas nos tratamentos, a variação do teor de água aplicada não foi suficiente para se obter uma produção elevada de milho verde nas condições semiáridas e de solo do experimento.

O número total de espigas está ligado diretamente a produtividade, tanto de grãos como de espigas verdes, quanto maior a quantidade de espigas maior será a rentabilidade financeira. Neste estudo o maior número de espigas produzidas foi no tratamento T5 com 82.755 espigas por hectare (Tabela 6). Em condições semelhantes de espaçamento entre plantas e utilizando a mesma cultivar, Couto *et al.* (2017) obtiveram apenas 45088 espigas por hectare, no presente estudo na condição de maior semelhança de lâmina aplicada o tratamento T3, o valor deste dado foi de 71181 espigas por hectare.

O maior diâmetro de espiga comercial despalhada (DECD) foi em média 3,7 cm e o maior comprimento de espiga comercial despalhada (CECD) foi em média 17,55 cm (T5) (Tabela 6). Resultado semelhante foi descrito por Soares *et al.* (2017), com

DECD de 4,1 cm e CECD de 15 cm, os autores analisaram os efeitos do espaçamento entre plantas e entre fileiras dos cultivares transgênicos Yeld Gard e Feroz Víptera.

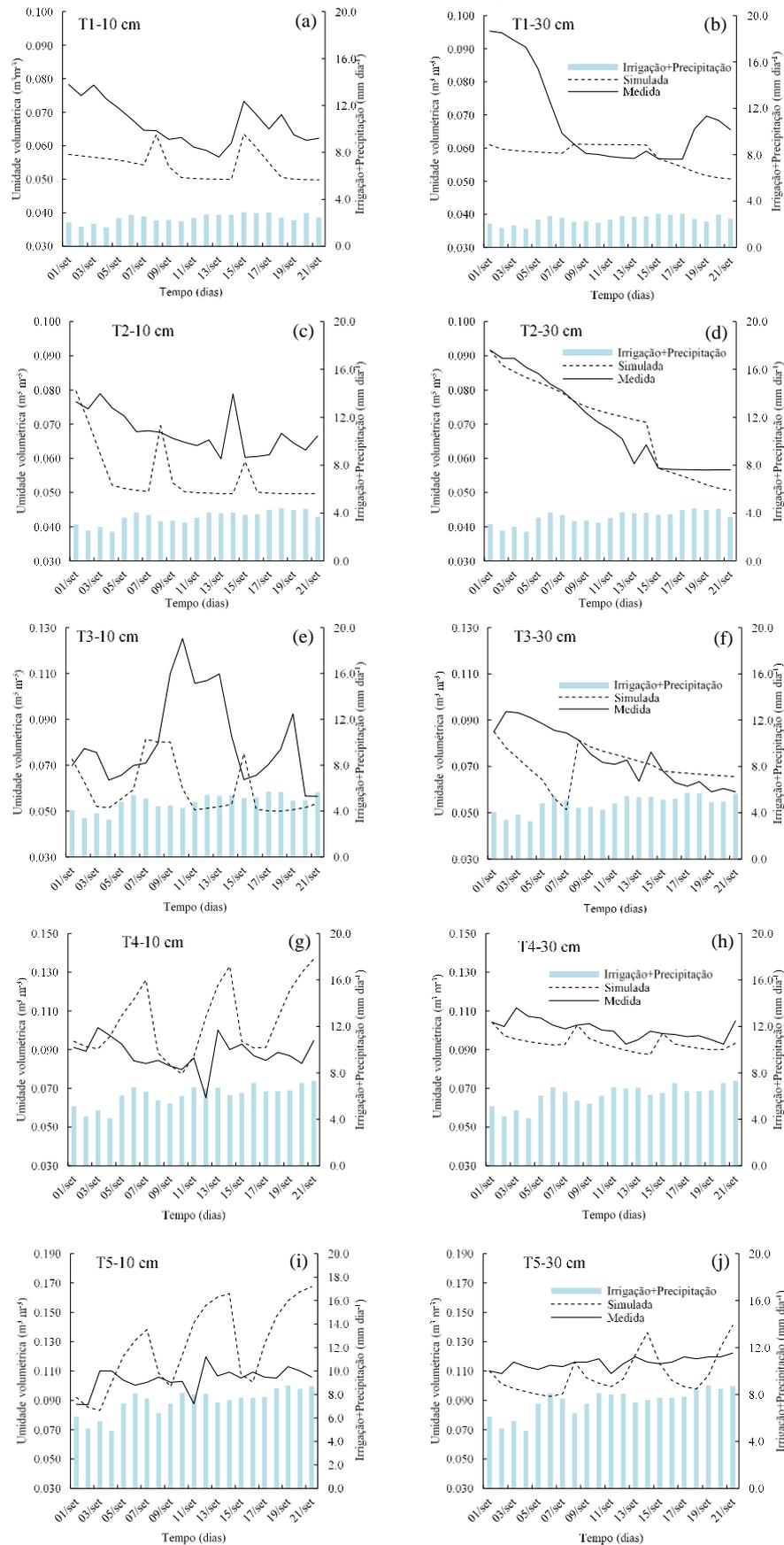
Houve crescimento razoável das espigas nos tratamentos com lâminas superiores a 100% da ETc, tanto em comprimento como em diâmetro (Tabela 6), porém, possivelmente pela não aplicação de nutrientes durante o ciclo da cultura, estes dados não refletiram no enchimento dos grãos, tendo contribuído para os baixos valores de massa produzidos.

Nos tratamentos em que foram aplicadas lâminas abaixo do requerido pela cultura não foram obtidos dados de produção de milho verde satisfatórios, podendo ser considerada esta prática inviável nas condições do presente estudo, tais valores levam a crer que não haveria compensação no que foi economizado com água, para com a renda que seria obtida na comercialização. Podendo levar a uma reflexão sobre as práticas de cultivo de sequeiro, muito comum na região.

4.3 Simulação da umidade volumétrica do solo

Os valores simulados de umidade do solo foram comparados graficamente com os valores de umidade do solo obtidos indiretamente através do tensiômetro (Figura 8). Nota-se que não houve concordância entre os dados simulados e os dados medidos na maioria dos tratamentos. As exceções em que houve certo acordo entre os dados simulados e medidos ocorreu a profundidade de 30 cm, nos tratamentos T2, parte do T3, T4 e T5. Isso pode ter ocorrido pela menor densidade de raízes nessa profundidade, o que possibilitou ao modelo uma simulação mais precisa, pois os teores de umidade são perdidos apenas por drenagem, a presença de raízes implicaria que a quantidade de água no solo sofreria alterações devido a extração de água pela planta.

Figura 8 - Variação da umidade volumétrica do solo ao longo dos 21 dias simulados nas profundidades de 10 e 30 cm para cada tratamento. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

Qi *et al.* (2018) avaliando o modelo HYDRUS-2D na simulação da umidade de um solo cultivado com milho na China, obtiveram melhores resultados, tanto para a profundidade de 10 cm como para 30 cm, tal desempenho superior na simulação pode ter ocorrido devido a textura do solo ser argilosa, com uma condutividade hidráulica do solo saturado que variou de 6,76 a 11,56 cm dia⁻¹, bem diferente dos valores desse parâmetro no presente estudo em que a textura é arenosa com condutividade hidráulica do solo de 792 cm dia⁻¹. Phogat *et al.* (2018) em estudo realizado em Adelaide na Austrália, confirmam a boa adaptabilidade do modelo HYDRUS em simular a umidade do solo em textura argilosa, com valores bem próximos entre simulado e medido, os autores ainda afirmam que diferenças entre medido e simulado podem ser causados por diversos fatores, sendo eles: características de distribuição de raízes, heterogeneidade do solo, medições de campo e erros estruturais dos modelos.

Deve-se perceber que os teores de umidade do solo nos tratamentos com déficit de irrigação (T1 e T2) diminuiu no decorrer dos dias, mostrando que o início do período de maior demanda hídrica da cultura como o aumento na densidade de raízes interferiu diretamente no teor de umidade do solo (Figura 9). Tal dinâmica da água no solo não foi constatado pelo modelo, podendo ser a explicação dos resultados desfavoráveis da simulação, principalmente na camada de 10 cm em que a extração de água pelas raízes é mais acentuada devido a maior densidade de raízes nessa camada.

A análise estatística dos valores de umidade do solo simulados podem ser observados na Tabela 7. Para a profundidade de 10 cm, o RMSE variou entre 0,013 a 0,034 cm³ cm⁻³ nos tratamentos analisados, superior ao obtido por Santos (2011) com RMSE 0,035 cm³ cm⁻³ para a profundidade de 15 cm, o referido autor constatou para o EMAX, 0,028 cm³ cm⁻³, no presente estudo este índice variou de 0 a 0,062 cm³ cm⁻³, sendo pertinente ressaltar que para esse índice à medida que aumentavam os níveis de irrigação, também aumentavam os valores de erro do EMAX, mostrando que o aumento da quantidade de água no solo contribuiu para um maior erro do modelo. Tal comportamento também foi descrito por Dokoohaki *et al.* (2017) em estudo realizado no Irã, simulando a umidade do solo em condições de irrigação deficitária. Não obstante, Liao *et al.* (2017) afirmam que a precisão da simulação depende em parte da profundidade, pois, provavelmente a maior variação do conteúdo de água no solo na

profundidade de 10 cm do que na profundidade de 30 cm, pode contribuir para o aumento dos erros na simulação nesta camada.

Tabela 7 - Coeficientes estatísticos da relação entre umidade do solo medida e a simulada pelo modelo HYDRUS-1D, na profundidade de 10 e 30 cm. Iguatu-CE, 2017.

Tratamento	10 cm				
	Id	RMSE	EM cm ³ cm ⁻³	EMAX	E
T1	0,489	0,013	-0,012	0,000	-3,483
T2	0,438	0,015	-0,013	0,003	-5,678
T3	0,428	0,031	-0,021	0,011	-1,561
T4	0,287	0,025	0,017	0,047	-9,337
T5	0,308	0,034	0,023	0,062	-17,149
30 cm					
T1	0,423	0,018	-0,011	0,004	-0,651
T2	0,969	0,004	0,000	0,013	0,877
T3	0,490	0,014	-0,005	0,009	-0,405
T4	0,540	0,008	-0,007	0,000	-2,052
T5	0,408	0,014	-0,008	0,020	-13,334

Fonte: O autor

*Id: índice de Wilmontt; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; EMAX: erro máximo absoluto; E: coeficiente de eficiência.

De acordo com Santos (2011), o coeficiente de eficiência E , conhecido como coeficiente de Nash e Sutcliffe (equação 16), representa a razão entre o erro quadrado médio da estimativa e a variância dos dados observados, diminuído da unidade, e varia de $-\infty$ a 1, valores de E menores ou iguais a zero indicam que a média dos dados observados é uma estimativa tão boa quanto os valores simulados pelo modelo.

Na Tabela 7, observa-se que nenhum dos valores do coeficiente E na camada de 10 cm alcançou valor maior que 0, evidenciando que a média dos valores medidos é uma estimativa melhor que os valores simulados. Apesar dos valores negativos, no tratamento T3 o coeficiente E foi -1,561, valor próximo de zero, o maior valor de E foi do tratamento T5, corroborando com que foi dito anteriormente que a quantidade maior de água aplicada interfere na precisão do modelo. Melhor resultado foi descrito por Phogat *et al.* (2018) simulando o teor de água em um solo argiloso, em Adelaide na Austrália, com um índice E 0,78 e RMSE que variou de 0,016 a 0,038 cm³ cm⁻³.

Para a camada de 30 cm, de acordo com o índice E , o melhor resultado foi na simulação do tratamento T2, com valor atípico de 0,877, principalmente se comparado com os outros resultados. O desempenho superior nesse tratamento também é evidenciado

através dos outros índices estatísticos, com valor de Id 0,969, $RMSE$ $0,004 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Em condição semelhante de irrigação com déficit e utilizando a cultura do milho, Gonzalez *et al.* (2015) obtiveram resultados semelhantes com índice E de 0,907 e um maior $RMSE$ ($0,020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). O ótimo resultado da simulação para o tratamento T2 na profundidade de 30 cm, pode ter ocorrido por vários fatores, podendo destacar uma possível homogeneidade do solo, ou ao desenvolvimento ordenado das raízes nessa profundidade. Através deste resultado, recomenda-se realização de novos experimentos a fim de se sancionar a dúvida relacionada ao desempenho da simulação do modelo a esta profundidade, sendo necessárias repetições do experimento, para que se possa afirmar ou não a adaptabilidade do modelo as condições de 75% de irrigação e profundidade de 30 cm.

Legates e McCabe, (1999) realizaram um estudo em que analisaram a eficiência dos índices estatísticos mais utilizados em comparações entre simulado e medido, e, segundo eles, os resultados oferecidos pelos índices devem ser utilizados com cautela, pois, são altamente sensíveis a valores extremos.

O índice de Willmot (Id) variou de 0,287 a 0,489 para a camada de 10 cm, valores considerados baixos para esse índice que pode variar de 0 a 1. Utilizando a mesma metodologia na simulação do teor de umidade do solo, através do modelo SWAP, Ponciano (2016) afirma que houve aderência entre os dados simulados e medidos e obteve melhores resultados com Id de 0,947. O autor relata ainda que esse resultado satisfatório pode ser atribuído a discretização físico-hídrica do perfil do solo por camada, realizando a parametrização do sistema de equações de Van Genuchten-Mualem, procedimento não realizado no presente estudo.

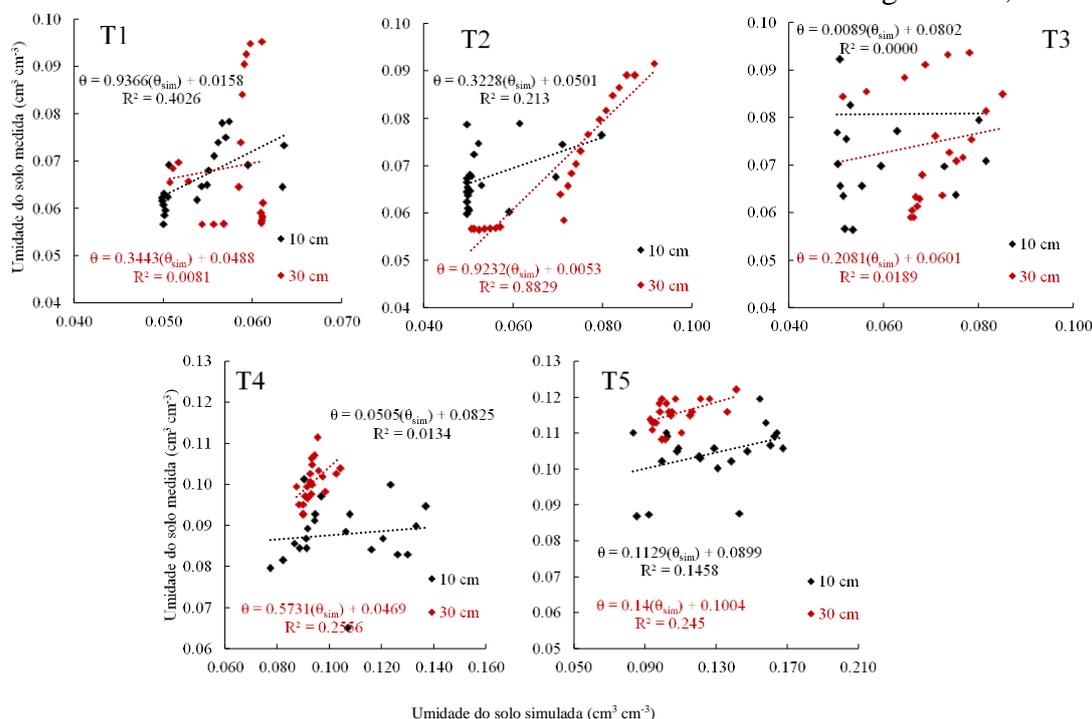
Tan *et al.* (2014), Wang *et al.* (2016) e Wallor *et al.* (2018) também afirmam que a parametrização físico-hídrica contribui na simulação do conteúdo de água no solo, diminuindo as incertezas relacionadas a estabilidade destes parâmetros no perfil do solo.

Na Tabela 7 pode-se observar ainda os valores de erro médio (EM), que mostram se houve subestimativa (valores negativos) ou superestimativa (valores positivos) do modelo em relação aos dados medidos. Na profundidade de 10 cm, os tratamentos com subestimativa foram T1, T2 e T3, tratamentos com déficit (T1 e T2) e tratamento com irrigação total (T3), o modelo pode ter considerado que houve uma maior extração nessas camadas pela maior densidade de raízes, diminuindo assim a umidade do solo. E no caso dos tratamentos com acréscimo de água (T4 e T5) o modelo pode ter julgado que certo teor de água estaria disponível na camada de 10 cm, podendo este ter

sendo perdido mais facilmente por percolação, o que explica a maioria dos valores de EM em subestimativa da camada de 30 cm.

Na Figura 9 pode ser observada a reta de regressão entre os valores medidos e simulados, assim como o coeficiente de determinação (R^2) para as camadas de 10 e 30 cm em cada tratamento. De uma forma geral, a simulação não apresentou resultado satisfatório segundo o R^2 , a exceção foi o tratamento T2 na profundidade de 30 cm, com 0,883, resultado semelhante ao encontrado por Qi *et al.* (2018), com R^2 que variou de 0,84 a 0,92, em estudo realizado na China. Os altos valores do coeficiente linear na equação dos gráficos, mostra que houve uma subestimativa dos dados simulados na maioria dos tratamentos, corroborando com o dito anteriormente através da discussão do índice estatístico erro médio (EM).

Figura 9 - Regressão linear e coeficiente de determinação obtidos através da correlação entre os valores medidos e simulados da umidade do solo. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

O teor de água no solo é um parâmetro de extrema importância em várias áreas, com destaque para a agricultura. A utilização de modelos que simulem a umidade do solo de forma correta contribuiria na agilidade de utilização deste dado e diminuiria custos com medidas diretas e obtenção de equipamentos. No presente estudo a simulação não mostrou desempenho satisfatório quando comparado com dados medidos, podendo

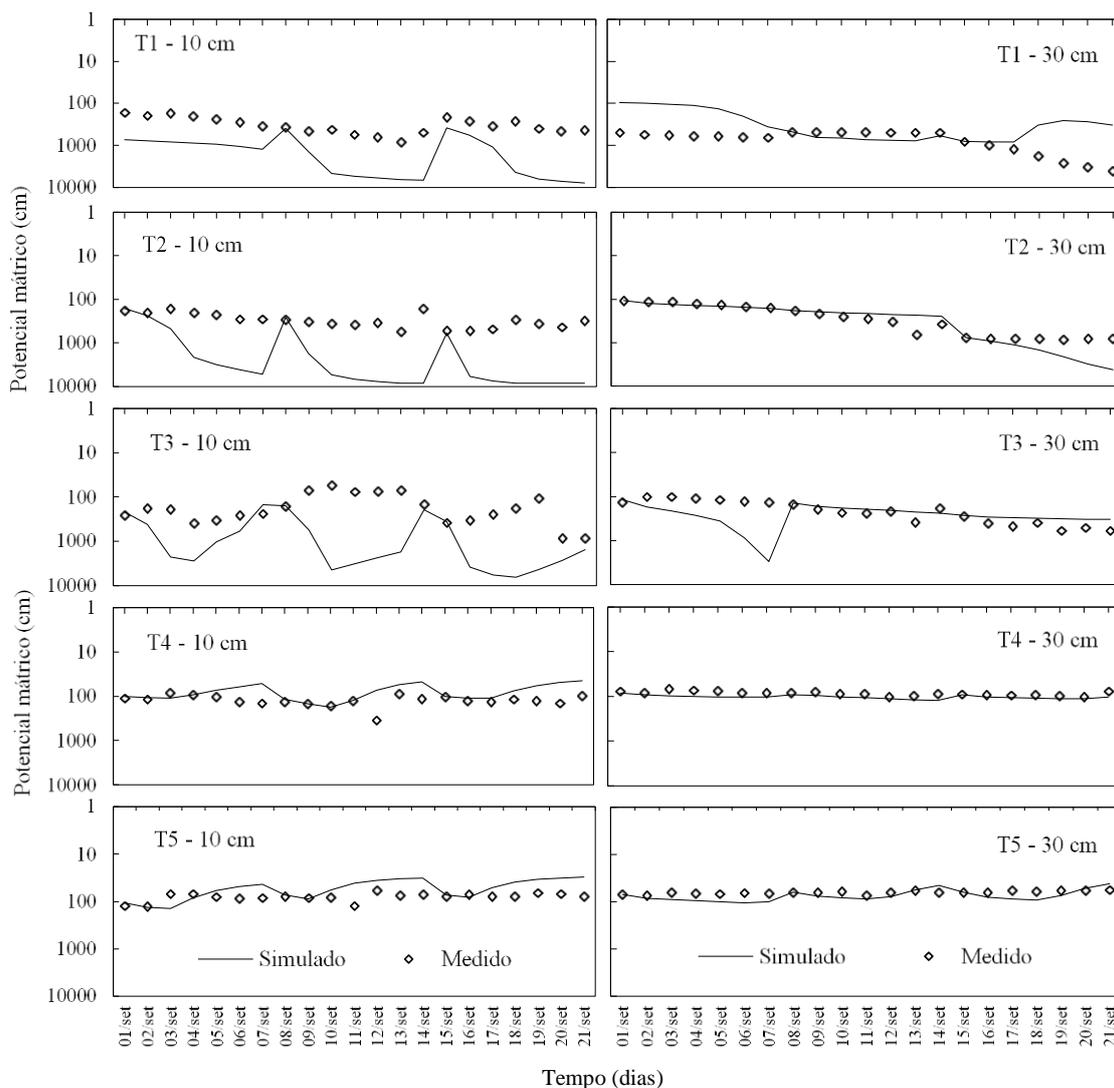
inviabilizar seu uso no manejo agrícola. Resultado que diferiu do que foi descrito por Qin *et al.* (2016), os autores afirmam que o modelo HYDRUS-1D foi eficiente no gerenciamento de irrigação de telhados verdes, sob diferentes condições meteorológicas. Deve-se destacar que no trabalho citado ocorria apenas irrigação complementar, o que pode de alguma forma favorecer o desempenho do modelo, por manter o solo em condição de menor variação do conteúdo de água. Os autores recomendam ainda que estes resultados são específicos para o local, podendo diferir em locais com condições climáticas diferentes.

Deve-se ressaltar que apesar dos resultados insatisfatórios da simulação, não se pode afirmar com certeza que isto inviabilizaria seu uso no manejo de irrigação por exemplo, devido os incontáveis processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera, devendo ser realizados estudos mais aprofundados e com experimentos de campo que venham provar esta teoria.

4.4 Simulação do potencial mátrico do solo

Através da Figura 10 pode-se observar que a simulação realizada utilizando o modelo HYDRUS-1D do potencial mátrico do solo em cada tratamento mostrou comportamento semelhante aos valores medidos, principalmente na profundidade de 30 cm e nos tratamentos com irrigação em excesso. Nota-se ainda que apesar de valores simulados e medidos semelhantes, na profundidade de 10 cm, o comportamento da curva dos dois valores foi inverso, sendo resultado possivelmente de algum erro do modelo.

Figura 10 - Variação temporal do potencial matricial medido e simulado pelo modelo HYDRUS-1D para as profundidades de 10 e 30 cm em cada tratamento. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

Nos tratamentos com déficit (T1 e T2) na profundidade de 10 cm ocorreu subestimativa dos valores simulados, isso pode ter ocorrido pelo fato do modelo ter considerado que a umidade do solo se alterava rapidamente tanto pela ação de extração pelas raízes como por redistribuição, fazendo com que houvesse rápida redução do potencial mátrico do solo.

O desempenho da simulação foi analisado através dos índices estatísticos comparando-se os valores simulados do potencial mátrico com os medidos em campo pelos tensiômetros nas profundidades de 10 e 30 cm (Tabela 8). Com base nesses valores pode-se afirmar que a simulação do potencial mátrico do solo apresentou melhor desempenho na profundidade de 30 cm e nos tratamentos com excesso de irrigação. Tal

resultado também foi descrito por Santos (2011), que afirma melhor desempenho da simulação do potencial mátrico na profundidade de 30 cm, com valores 230; 210 e 105 cm para os índices RMSE, EM e EMAX, respectivamente. No presente estudo estes índices variaram entre 19,1 a 1262,2 cm para o RMSE, um EM de subestimativa que variou 14,5 a 617,5 cm e EMAX que foi de 0 a 302,6 cm.

Tabela 8 - Índices estatísticos da relação entre potencial matricial medido e simulado pelo modelo HYDRUS-1D nas profundidades de 10 e 30 de cada tratamento. Iguatu-CE, 2017

Tratamento	10 cm					
	Id	R ²	RMSE	EM	EMAX	E
cm						
T1	0,092	0,522	3799,526	-2763,913	0,000	-538,348
T2	0,034	0,157	5572,948	-4558,431	32,886	-2307,818
T3	0,070	0,004	2668,218	-1874,314	89,481	-157,282
T4	0,364	0,002	73,134	40,735	269,223	-1,006
T5	0,519	0,150	35,545	19,043	80,316	-2,965
30 cm						
T1	0,074	0,036	1262,190	-617,515	302,664	-20,488
T2	0,517	0,542	949,535	-344,784	412,924	-9,008
T3	0,060	0,026	654,053	-134,718	284,758	-15,104
T4	0,528	0,323	19,101	-16,571	0,000	-3,022
T5	0,322	0,216	21,818	-14,514	17,132	-22,338

Fonte: O autor

*Id: índice de Wilmontt; RMSE: raiz quadrada do erro médio; EM: erro médio; EMAX: erro máximo absoluto; E: coeficiente de eficiência.

De acordo com o índice *E* todos os valores simulados não apresentaram resultado satisfatório, valores negativos deste índice indicam que uma média dos valores medidos representaria melhor os dados, do que a própria simulação. Melhor resultado foi descrito por Tan *et al.* (2014) em análise conjunta das profundidades 18; 33 e 72 cm, obtiveram um valor do índice *E* de 0,8, em estudo realizado na China com a cultura do arroz. Os autores afirmam ainda que com uma maior quantidade de água aplicada as variações do potencial mátrico diminuem, o que pode contribuir para uma melhor estimativa do modelo, corroborando com o constatado no presente estudo.

O presente trabalho assume a medição do potencial mátrico do solo pelo tensiômetro de mercúrio como padrão comparativo, porém, não devendo ser descartado a possibilidade de erro de leitura do mesmo. Tendo em vista que foram descartados vários dias de medição pelo fato da ocorrência de “quebra da coluna” principalmente nos tratamentos com déficit hídrico, nesses casos ocorria a rápida diminuição da umidade do

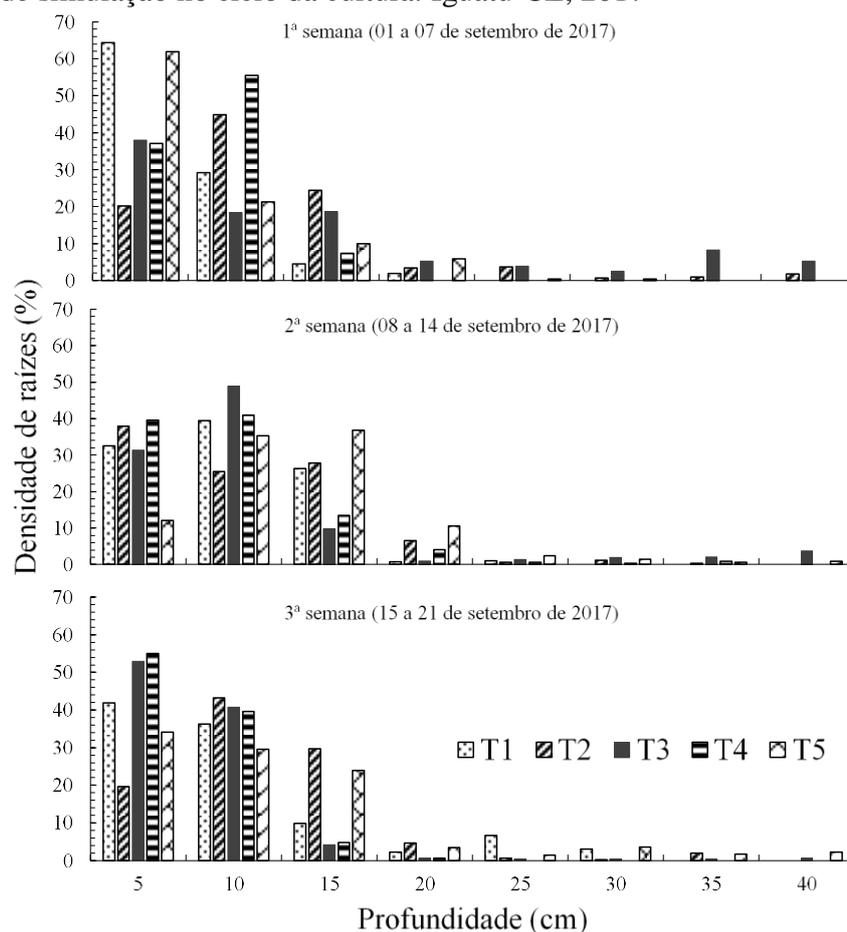
solo, elevando o potencial mátrico a valores tão negativos que não foi possível ao tensiômetro mensura-los, ocorrendo a sucção de toda a água do tensiômetro e por vezes até do próprio mercúrio, o que impossibilita a leitura do mesmo.

4.5 Extração de água do solo

4.5.1 Densidade de raízes

Parte fundamental no processo de simulação, os dados de desenvolvimento de raízes em cada profundidade podem ser observados na Figura 11. Foram realizadas três coletas, sendo uma por semana, totalizando os 21 dias de simulação avaliados no estudo. É possível notar a distribuição de raízes ao longo da profundidade de uma semana para outra, na primeira semana tratamentos como T1, T3 e T5 (50, 100 e 150% da ETc) tiveram suas raízes concentradas em sua maioria na profundidade de 5 cm do solo. Já os tratamentos T2 e T4 (75 e 125 % da ETc) tiveram suas raízes concentradas na profundidade de 10 cm. Com o decorrer do tempo, na terceira semana, é possível notar que tratamentos com pouca água disponível como o T1, apresentou raízes até a camada de 30, podendo ter ocorrido por uma possível busca da planta em aproveitar ao máximo a água presente no solo que por ventura estivesse disponível nessa profundidade.

Figura 11 - Densidade de raízes nas profundidades de 5 a 40 cm em cada tratamento, para os 21 dias de simulação no ciclo da cultura. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

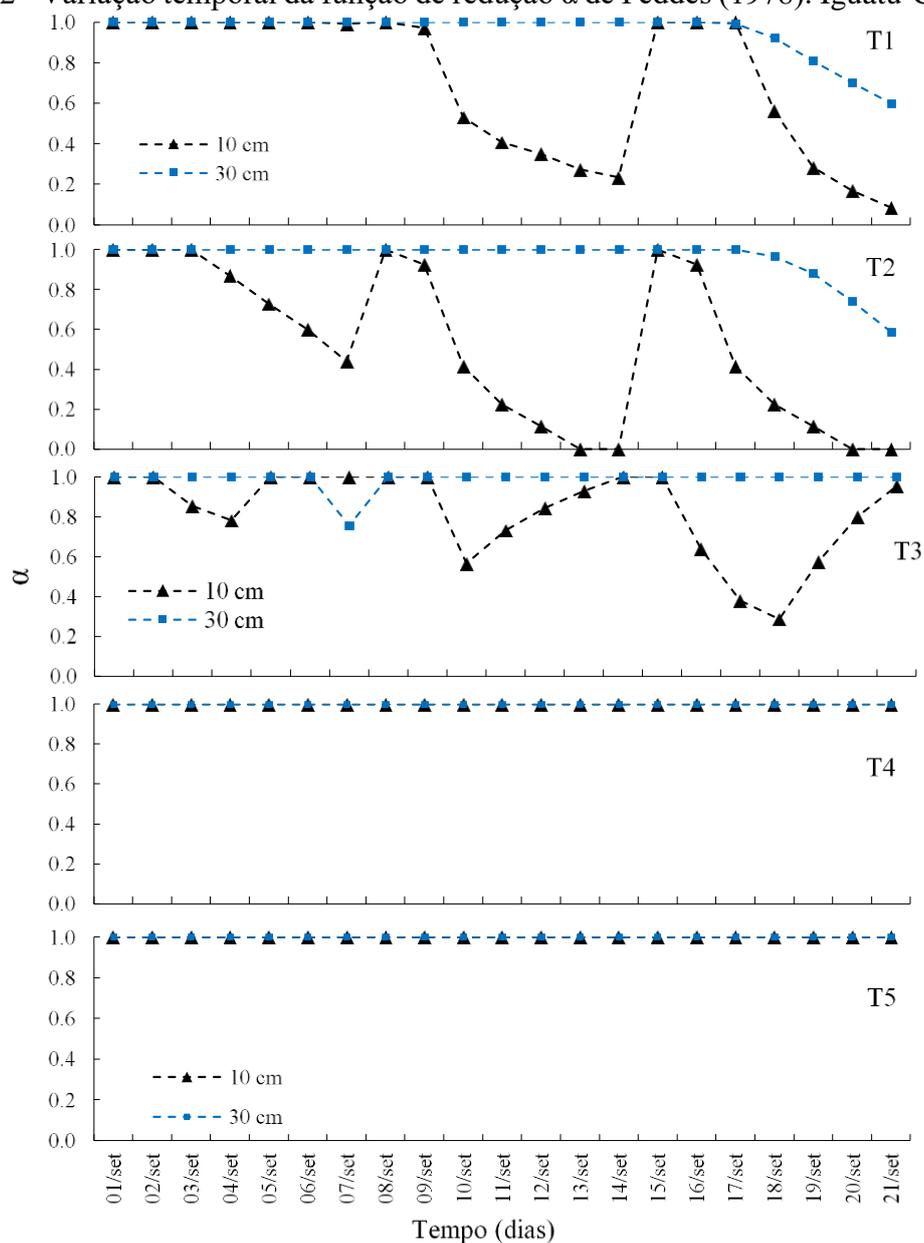
*T1: 50% da ETc; T2: 75% da ETc; T3: 100% da ETc; T4: 125% da ETc; T5: 150% da ETc.

Ademais, para os fins da simulação, a maior parte das raízes se concentrou na profundidade que vai até os 10 cm, o que interfere diretamente no processo de simulação de parâmetros como potencial mátrico, umidade do solo e extração de água do solo. Já a camada de 30 cm apresentou poucas raízes, o que pode contribuir para uma melhor simulação do modelo HYDRUS-1D, pela pouca variação de umidade nessa profundidade.

4.5.2 Simulação

A simulação da extração de água do solo pelo modelo HYDRUS-1D depende em grande parte do potencial mátrico do solo, que, por meio da função de redução de Feddes (α) pode reduzir ou igualar a extração de água a transpiração potencial da planta. A função de redução de Feddes (α) varia de 0 a 1, esta variação depende do valor de potencial mátrico do solo naquele dia, como descrito no item 3.7.3.

A variação do valor do fator α para cada dia simulado pode ser observado na Figura 12. Nota-se que na profundidade de 10 cm, nos tratamentos T1, T2 e T3 não houve extração máxima em alguns dias, tendo esta sido limitada por condições hidráulicas do solo, que secou além do possível da planta extrair, isto segundo os dados de entrada do parâmetro “h” do modelo HYDRUS-1D (Tabela 5). Resultado que diferiu do obtido por Gonzalez *et al.* (2015) na simulação da extração de água da cultura do milho em condições semelhantes de déficit hídrico, os referidos autores afirmam que apesar da menor aplicação de água, não houve redução na transpiração, tendo os valores de potencial mátrico oscilado entre os limites h_2 e h_3 .

Figura 12 - Variação temporal da função de redução α de Feddes (1978). Iguatu-CE, 2017

Fonte: O autor

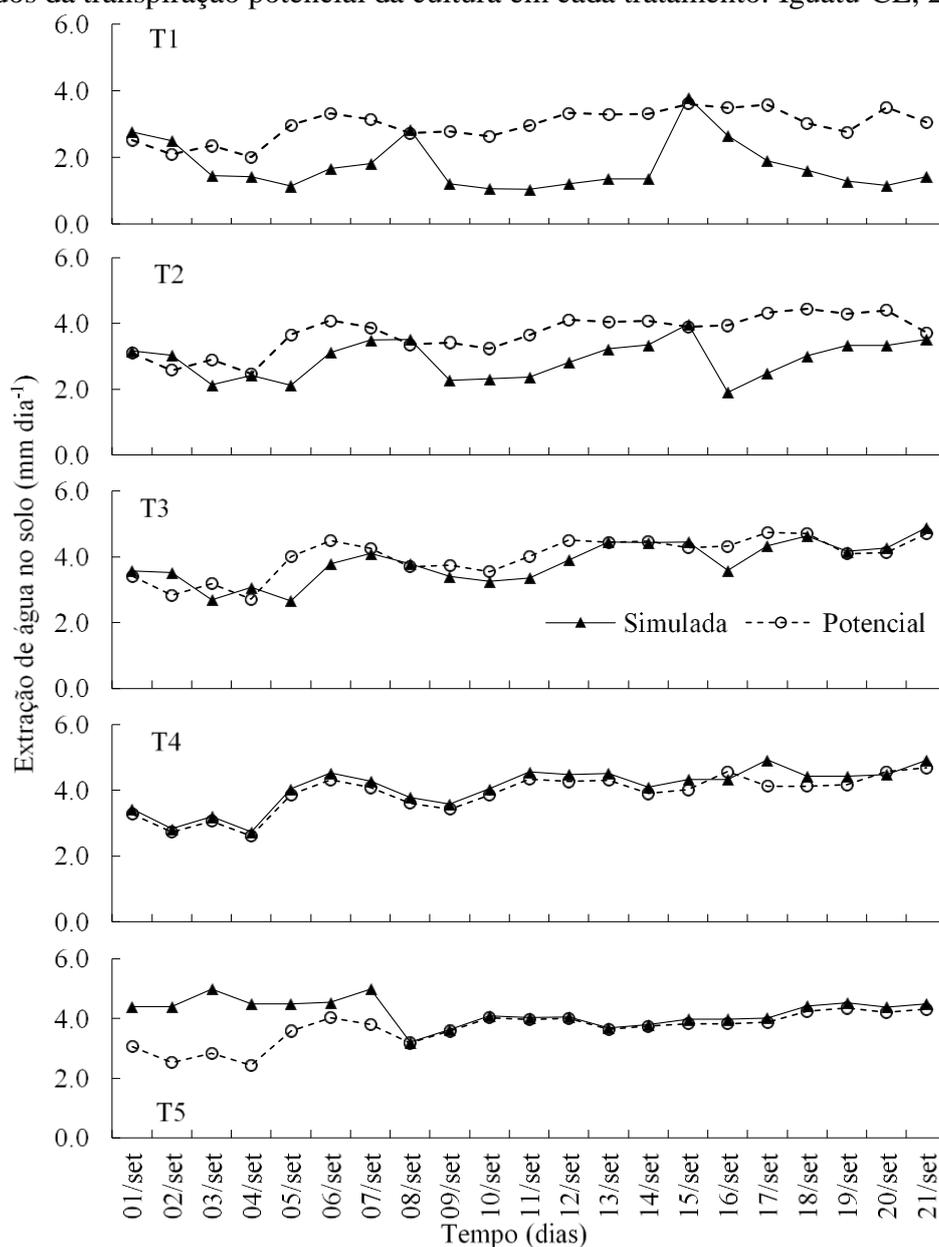
Com exceção de alguns dias, na profundidade de 30 cm de acordo com a simulação, a planta teria capacidade de extração total de água no solo, porém, pela baixa concentração de raízes nessa camada, esta umidade presente não foi aproveitada pela planta, o que fica evidente com o fraco desenvolvimento da cultura nos tratamentos com déficit. Deve-se ressaltar que esta hipótese se baseia apenas no que foi visto no presente trabalho, podendo ser provada em um estudo mais elaborado sobre extração de água pelas raízes que leve em consideração o mecanismo de compensação do estresse hídrico, que supõe que a planta aumenta a extração em áreas mais úmidas a fim de compensar a redução em áreas mais secas. Nota-se ainda que nos tratamentos T1 e T2 a partir do dia

17 de setembro ocorreu diminuição do fator α na camada de 30 cm, supostamente pelo aumento da extração de água nas camadas superiores do solo devido à maior demanda hídrica da cultura no período, o que diminuiu a redistribuição da água até a profundidade de 30 cm, aumentando assim o potencial matricial do solo.

Não houve estresse por falta de oxigênio de acordo com o cálculo do fator α , apesar de tratamentos com aplicação de água em excesso, o que pode ser explicado pela textura arenosa do solo, que contribui para uma rápida infiltração, e devido a evaporação nas camadas superficiais, facilitada por altos valores de radiação solar e temperatura do ar.

A variação da extração de água no solo pela cultura do milho para os dias simulados em cada tratamento pode ser observada na Figura 13. A menor extração nos tratamentos com irrigação deficitária foi evidenciada pela simulação, que mostra que a extração de água pela planta foi menor do que a extração potencial. Para um melhor entendimento a extração de água deve ser observada semanalmente, que mostra que a menor extração foi como esperado do tratamento T1, que variou de 10,1 a 13,8 mm de água transpirado (Figura 14). Com exceção do tratamento T5, em que ocorreu a maior extração de água na primeira semana, os demais apontam que a maior quantidade de água extraída pela planta foi na semana três, mostrando que o aumento da demanda hídrica da cultura, que compreende os dias simulados foi mais evidente nos sete últimos dias de simulação, comportamento semelhante de aumento da extração na fase de maior demanda foi descrito por Ponciano (2016).

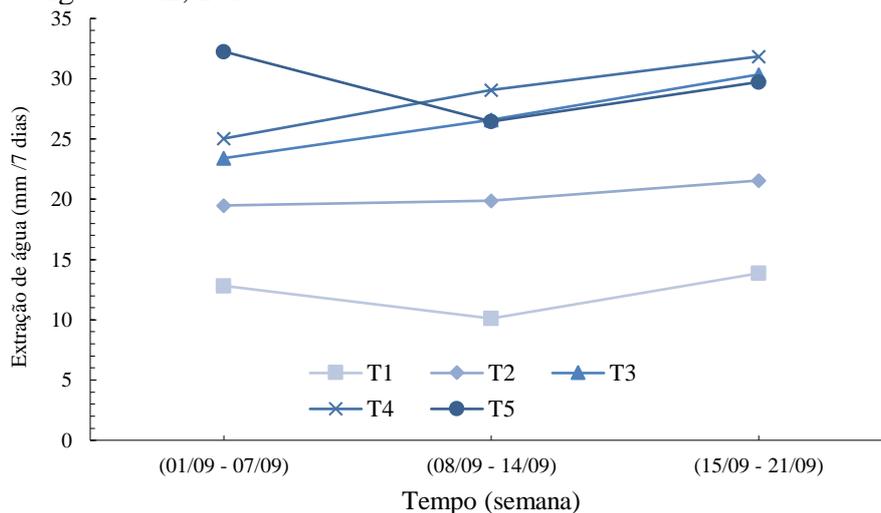
Figura 13 - Valores simulados de extração de água pela cultura do milho e valores estimados da transpiração potencial da cultura em cada tratamento. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

**T1: déficit de 50%; T2: déficit de 25%; T3: irrigação total; T4: excesso de 25%; T5: excesso de 50%.

Figura 14 - Extração total de água pela cultura do milho para cada semana simulada. Iguatu-CE, 2017



Fonte: O autor

**T1: déficit de 50%; T2: déficit de 25%; T3: irrigação total; T4: excesso de 25%; T5: excesso de 50%.

É possível notar que quanto maior a quantidade de água aplicada, maior foi a extração pela planta (Figura 14), mostrando que a disponibilidade de água para a planta nas condições de irrigação total (T3), não foi suficiente para suprir sua demanda, possivelmente por condições climáticas e textura do solo que limitam o tempo de disponibilidade da água na zona vadosa da planta. Para tanto, através desse comportamento podem ser tomadas medidas que condicionem um melhor ambiente para planta, como a partição de irrigação, que divide a aplicação de água em cada dia, o que a mantém disponível nas camadas superiores do solo por mais tempo, facilitando a extração da planta, por ser onde se concentram a maioria das raízes.

O tratamento em que houve total similaridade entre extração simulada e potencial foi o T4 (Figura 13), no tratamento T5, houve certo desacordo entre simulada e potencial na primeira semana, indo contra o ocorrido no tratamento T4, e podendo ter ocorrido devido alguma falha do modelo, pois, nas semanas seguintes foi observado comportamento semelhante ao tratamento T4.

4.5.3 Função de redução de Feddes (FRF)

Os resultados apresentados até aqui mostram a deficiência da FRF, que nas condições do presente trabalho não obteve bons resultados, principalmente quando testado em condições de estresse hídrico. Esta função que supõe que a extração de água no solo depende do conteúdo de água no solo e do potencial mátrico, previu de forma

satisfatória certos parâmetros apenas em condição de água aplicada em excesso, algo de ocorrência improvável nas condições atuais de disponibilidade hídrica. Jong van Lier *et al.* (2008) afirmam que sob condições não limitantes a taxa de transpiração independe do teor de água no solo e depende unicamente da pressão atmosférica e características da planta, sendo este estágio de captação e transpiração chamado de fase de taxa constante. Quando ocorre o esgotamento da água no solo as condições hidráulicas mudam de não limitantes para limitantes.

Segundo Jong van Lier *et al.* (2006), nem o conteúdo de água no solo nem o potencial mátrico são bons indicadores de condições hidráulicas limitantes a extração, sendo que essas variáveis dependem do tipo de solo. Em seu estudo revelam que simulações numéricas mostraram que as condições limitantes de extração de água no solo dependem do fluxo matricial, independentemente do tipo de solo, sendo função da transpiração potencial e densidade radicular.

Os erros relativos a simulação ora em superestimativa, ora em subestimativa podem estar associados à não consideração da função de redução de Feddes do sistema compensatório das raízes, que supostamente leva água das zonas de maior para menor concentração, fazendo com que o modelo previsse de forma equivocada o teor de água para cada profundidade, podendo ser observado na Figura 8, que em alguns dias na camada de 30 cm o modelo superestimou o teor de água, já na camada de 10 cm houve subestimativa. O que pode evidenciar a ação do mecanismo de compensação de extração de água pelas raízes. Comportamento semelhante também foi descrito por Santos (2011).

De acordo com Albasha *et al.* (2015), o sistema compensatório das raízes reduziu a diferença entre os dados medidos e simulados de transpiração da planta em cerca de 13% quando comparado a função não compensatória de Feddes em condição semelhante de estresse hídrico, e afirmam que estes resultados não foram sensíveis a distribuição espacial da densidade de raízes, pois, esta diminui linearmente ou exponencialmente com a profundidade. No mesmo estudo os autores reiteram que em condições de irrigação por superfície na simulação do fluxo de drenagem abaixo da zona das raízes ($z = 120$ cm) a diferença entre sistema com e sem compensação foi insignificante.

Simulando o processo de extração de água pelas raízes em condição semelhante de textura de solo e testando o modelo compensatório de Jarvis (2011) (baseado no modelo de Jong van Lier *et al.* (2008)), Peters (2016) conclui que este modelo depende não somente da densidade das raízes mas também da textura do solo e

afirma que o desempenho do modelo é limitado em condições de solo de textura fina e distribuição de raízes homogênea. O referido autor modificou o modelo de Jarvis diante desta limitação, substituindo a transpiração potencial utilizada no modelo Jarvis pela transpiração máxima, e afirma que esta modificação superou as limitações sem aumentar a complexidade matemática nem exigir parâmetros extras e recomenda ainda que o parâmetro " ω_c " do modelo Jarvis, pode ser calibrado e interpretado de acordo com a textura do solo (>textura fina e <textura grossa).

Pode-se notar que a adoção de um modelo que considere a compensação de extração não garantiria um resultado mais satisfatório que o encontrado no presente estudo, principalmente pelo tipo de textura de solo. Segundo Jarvis (2011) modelos que consideram apenas a base física da compensação também tem suas limitações, pois, as respostas biológicas ao estresse hídrico e padrões espaciais de crescimento de raízes não podem ser facilmente descritos apenas pela matemática, devendo considerar explicitamente tanto a base física da absorção de água quanto as respostas da planta ligadas as condições de solo e clima locais.

5 CONCLUSÃO

A maior produção de milho verde foi do tratamento T5, com a maior lâmina aplicada, porém, não foi obtido o ponto máximo na produção, possivelmente devido a forma de manejo e o tipo de solo.

A simulação mostrou resultados satisfatórios apenas nos tratamentos com água aplicada em excesso e na profundidade de 30 cm.

A maior densidade de raízes foi encontrada na camada de 10 cm, sendo esta a mais importante no que diz respeito a simulação de extração de água pela planta.

Tais resultados mostram que o modelo macroscópico de Feddes não é adequado para simular tais processos nas condições do atual experimento.

A fim de se obter melhores resultados recomenda-se a utilização de modelos que considerem o sistema de compensação das raízes na extração de água do solo.

REFERÊNCIAS

ABBAS, G.; AHMAD, S.; AHMAD, A.; *et al.* Quantification the impacts of climate change and crop management on phenology of maize-based cropping system in Punjab , Pakistan. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S. l.], v. 247, n. July, p. 42–55, 2017.

AGGARWAL, P., *et al.* Modelling soil water balance and root water uptake in cotton grown under different soil conservation practices in the Indo-Gangetic Plain. **Agriculture , Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 240, p. 287–299, 2017.

AHMAD, M.; CHAKRABORTY, D.; AGGARWAL, P.; BHATTACHARYYA, R. Geoderma Modelling soil water dynamics and crop water use in a soybean-wheat rotation under chisel tillage in a sandy clay loam soil. **Geoderma**, [S. l.], v. 327, n. May 2017, p. 13–24, 2018.

ALBASHA, R.; MAILHOL, J.; CHEVIRON, B. Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models – Experimental and numerical analysis. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 155, p. 22–39, 2015.

ALBUQUERQUE, Carlos Juliano Brant *et al.* Desempenho de híbridos experimentais e comerciais de milho para produção de milho verde. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p. 768-775, 2008.

ALBRIEU, J. L. B.; REGINATO, J. C.; TARZIA, D. A. Modeling water uptake by a root system growing in a fixed soil volume. **Applied Mathematical Modelling**, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 3434–3447, 2015.

ALLEN, Richard G. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Food & Agriculture Org., 2006.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, **Rome**, [S. l.], p. 300, 1998.

ALMEIDA, B. M. **Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (Zea mays L.) em ambiente protegido**. 2016. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

ARRAES, F. D. D. **Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solo não saturado**. 2014. 86 f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

ARRAES, F. D. D., ANDRADE, E. M., PALÁCIO, H. A. Q., JUNIOR, J. I. F., SANTOS, J. C. N. Identificação dos íons determinantes na condutividade elétrica das águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 346-355, 2009.

ARRUDA, L.; BENEDUZI, A.; MARTINS, A.; *et al.* Screening of rhizobacteria isolated from maize (*Zea mays L.*) in Rio Grande do Sul State (South Brazil) and

analysis of their potential to improve plant growth. **Applied Soil Ecology**, [S. l.], v. 63, p. 15–22, 2013.

ATAYDE, D. D. Sistemas de rotação de culturas e infecção de grãos de milho por *Fusarium verticillioides* em regiões produtoras no estado de São Paulo. 2013. São Paulo: Universidade de São Paulo.

AUTOVINO, D.; RALLO, G.; PROVENZANO, G. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D : Model performance and scenario analysis. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 203, n. November 2017, p. 225–235, 2018.

BELMANS, C., WESSELING, J. G., & FEDDES, R. A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 63, n. 3-4, p. 271-286, 1983.

BERTI, M. *et al.* Industrial Crops & Products Integrating winter camelina into maize and soybean cropping systems. **Industrial Crops & Products**, [S. l.], v. 107, n. January, p. 595–601, 2017.

CAI, Y.; WU, P.; ZHANG, L.; *et al.* Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 192, p. 244–256, 2017.

CAIQIONG, Y.; JUN, F. Catena Application of HYDRUS-1D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau. **Catena**, [S. l.], v. 139, p. 1–8, 2016.

CARGNELUTTI FILHO, A., & STORCK, L. Estatísticas de avaliação da precisão experimental em ensaios de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 17-24, 2007.

CARVALHO, I. D. E. *et al.* Análise produtiva de genótipos de milho consorciados com feijão para a produção de milho verde. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, 2016.

CHEN, B.; LIU, E.; MEI, X.; YAN, C.; GARRÉ, S. Modelling soil water dynamic in rain-fed spring maize field with plastic mulching. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 198, p. 19–27, 2018.

CHEN, K. P. Hydraulic resistance of a plant root to water-uptake : A slender-body theory. **Journal of Theoretical Biology**, [S. l.], v. 396, p. 63–74, 2016.

COWAN, I. R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. **Journal of Applied Ecology**, [S. l.], p. 221-239, 1965.

COUTO, C. A., SILVA, É. M., SILVA, A. G., OLIVEIRA, M. T. P., VASCONCELOS, J. C., SILVA, A. R., SOBREIRA, E. A. & MOURA, J. B. Desempenho de Cultivares de Milho Destinados para Produção de Milho Verde e Silagem **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**,

[S. l.], v. 6, n. 1, p. 232-251, 2017.

CUI, J.; YAN, P.; WANG, X.; *et al.* Integrated assessment of economic and environmental consequences of shifting cropping system from wheat-maize to monocropped maize in the North China Plain. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 193, p. 524–532, 2018.

DOKOOHAKI, H.; GHEYSARI, M.; MOUSAVI, S. Ecohydrology & Hydrobiology Effects of different irrigation regimes on soil moisture availability evaluated by CSM-CERES-Maize model under semi-arid condition. **Integrative Medicine Research**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 207–216, 2017.

DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R. S.; JUAN, J. A. DE; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J. M. Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 107, p. 42–53, 2012.

DOURADO NETO, D., FANCELLI, A. L. Produção de feijão. **Guaíba: agropecuária**, v. 2, p. 19-20, 2000.

FAN, J., JONES, S. B., QI, L. B., WANG, Q. J., & HUANG, M. B. Effects of precipitation pulses on water and carbon dioxide fluxes in two semiarid ecosystems: measurement and modeling. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 67, n. 8, p. 2315-2324, 2012.

FERGUSON, I. M.; JEFFERSON, J. L.; MAXWELL, R. M.; KOLLET, S. J.; JEFFERSON, J. L. Effects of root water uptake formulation on simulated water and energy budgets at local and basin scales. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 75, n. 4, p. 1–15, 2016. Springer Berlin Heidelberg.

FEDDES, R. A., KOWALIK, P., KOLINSKA-MALINKA, K., & ZARADNY, H. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 31, n. 1-2, p. 13-26, 1976.

FEDDES, R., KOWALIK, P., ZARADNY, H., 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield, Simulation Monograph Series. **Pudoc**, Wageningen, The Netherlands.

FERERES, C. E. Papel de la fisiología vegetal en la microirrigación. Recomendaciones para el manejo mejorado. (Role of plant physiology in micro-irrigation. Recommendations for improved management). **Seminario Latinoamericano de Riego por Goteo y Riego Localizado**, 4, Barquisimeto (Venezuela)., 21-27, 1981.

FRIZZONE, J. A., FREITAS, P. D., REZENDE, R., FARIA, M. D. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012.

GARDNER, W. R. Dynamic aspects of water availability to plants. **Soil science**, [S. l.], v. 89, n. 2, p. 63-73, 1960.

GARDNER, W. R. Relation of Root Distribution to Water Uptake and Availability 1. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 56, n. 1, p. 41-45, 1964.

GONG, D.; KANG, S.; ZHANG, L.; DU, T.; YAO, L. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 119-129, 2006.

GONZALEZ, M. G.; RAMOS, T. B.; CARLESSO, R.; *et al.* Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. **biosystems engineering**, [S. l.], v. 132, p. 1–18, 2015.

GREAVES, G. E.; WANG, Y.-M. Effect of regulated deficit irrigation scheduling on water use of corn in southern Taiwan tropical environment. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 188, p. 115–125, 2017.

HALLAK, R., PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], 26, 591–608, 2011.

HAO, B.; XUE, Q.; MAREK, T. H.; *et al.* Soil water extraction , water use , and grain yield by drought-tolerant maize on the Texas High Plains. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 155, p. 11–21, 2015.

HILDEBRANDT, A.; KLEIDON, A.; BECHMANN, M. A thermodynamic formulation of root water uptake. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 20, n. 8, p. 3441–3454, 2016.

JARVIS, N. J. Simple physics-based models of compensatory plant water uptake: Concepts and eco-hydrological consequences. **Hydrology and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 11, p. 3431, 2011.

JAT, R. D., JAT, H. S., NANWAL, R. K., YADAV, A. K., BANA, A., CHOUDHARY, K. M., ... & JAT, M. L. Conservation agriculture and precision nutrient management practices in maize-wheat system : Effects on crop and water productivity and economic pro fi tability. **Field Crops Research** , [S. l.], v. 222, n. July 2017, p. 111–120, 2018.

JAVAUX, M., SCHRÖDER, T., VANDERBORGHT, J., & VEREECKEN, H. Use of a three-dimensional detailed modeling approach for predicting root water uptake. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1079-1088, 2008.

JONG VAN LIER, Q. DAM, J. C. VAN; METSELAAR, K.; JONG, R. DE; DUIJNISVELD, W. H. M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1065–1078, 2008.

JONG VAN LIER, Q. VAN DAM, J. C., DURIGON, A., DOS SANTOS, M. A., & METSELAAR, K. Modeling water potentials and flows in the soil–plant system comparing hydraulic resistances and transpiration reduction functions. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 12, n. 3, 2013.

JONG VAN LIER, Q.; METSELAAR, K.; DAM, J. C. VAN. Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 1264–1277, 2006.

KLEMENT, A.; FÉR, M.; NOVOTNÁ, Š.; NIKODEM, A.; KODEŠOVÁ, R. Root distributions in a laboratory box evaluated using two different techniques (gravimetric and image processing) and their impact on root water uptake simulated with HYDRUS. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, [S. l.], v. 64, n. 2, p. 196-208, 2016.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C. **Reference Manual SWAP: version 3.0. 3**. Alterra, 2003.

KUMAR, R.; JAT, M. K.; SHANKAR, V. Evaluation of modeling of water ecohydrologic dynamics in soil – root system. **Ecological Modelling**, [S. l.], v. 269, p. 51–60, 2013.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro climatic model validation. **Water Resources Research**, [S. l.], Boulder, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LI, K. Y.; DE JONG, R.; BOISVERT, J. B. An exponential root-water-uptake model with water stress compensation. **Journal of hydrology**, [S. l.], v. 252, n. 1-4, p. 189-204, 2001.

LIAO, K.; LAI, X.; ZHOU, Z.; ZHU, Q. Combining the ensemble mean and bias correction approaches to reduce the uncertainty in hillslope-scale soil moisture simulation. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 191, p. 29–36, 2017.

LUO, Y. *et al.* Evaluation of macroscopic root water uptake models using lysimeter data. **Transactions of the ASAE**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 625, 2003.

MA, Y., FENG, S., SONG, X. Evaluation of optimal irrigation scheduling and groundwater recharge at representative sites in the North China Plain with SWAP model and field experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 116, p. 125-136, 2015.

MOLZ, F. J.; REMSON, I. Extraction term models of soil moisture use by transpiring plants. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 1346-1356, 1970.

MOLZ, F. J. Models of water transport in the soil-plant system: A review. **Water resources research**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 1245-1260, 1981.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

MUSTAFA, S. M. T., VANUYTRECHT, E., & HUYSMANS, M. Combined deficit irrigation and soil fertility management on different soil textures to improve wheat yield in drought-prone Bangladesh. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 191, p. 124-137, 2017

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

PARIZI, A. R. C. **Efeito de diferentes estratégias de irrigação sob as culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e milho (*Zea mays* L.) na região de Santiago, RS.** 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PEAKE, A. S.; HUTH, N. I.; KELLY, A. M.; BELL, K. L. Field Crops Research Variation in water extraction with maize plant density and its impact on model application. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 146, p. 31–37, 2013. Elsevier B.V.

PETERS, A. Modified conceptual model for compensated root water uptake – A simulation study. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 534, p. 1–10, 2016.

PETERS, A.; DURNER, W.; IDEN, S. C. Modified Feddes type stress reduction function for modeling root water uptake : Accounting for limited aeration and low water potential. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 185, p. 126–136, 2017.

PHOGAT, V.; PITT, T.; COX, J. W.; Š, J.; SKEWES, M. A. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 201, p. 70-82, 2018.

PONCIANO, I. M. **Simulação da extração da solução do solo pela cultura do milho utilizando modelo SWAP.** 2016. 103 f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

QI, Z., *et al.* Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district , northwest China. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 201, p. 219–231, 2018.

QIN, H., *et al* HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer. **Ecological Engineering**, [S. l.], v. 95, p. 399–408, 2016.

REZAEI, M., *et al.* Environmental Modelling & Software Quasi 3D modelling of vadose zone soil-water flow for optimizing irrigation strategies : Challenges , uncertainties and efficiencies. **Environmental Modelling and Software**, [S. l.], v. 93, p. 59–77, 2017.

SANTOS, M. A. **Extração de água do solo por plantas de soja: modelagem hidrofísica e empírica.** 2011. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Universidade de São Paulo , Piracicaba, 2011.

SARABIA, M.; CAZARES, S.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, A.; MORA, F. Rhizosphere Plant growth promotion traits of rhizosphere yeasts and their response to soil characteristics and crop cycle in maize agroecosystems. **Rhizosphere**, [S. l.], v. 6, n. April, p. 67–73, 2018.

- SCAPIM, C. A., DE CARVALHO, C. G. P., & CRUZ, C. D. Uma proposta de classificação dos coeficientes de variação para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 5, p. 683-686, 1995.
- SCHONSKY, H.; PETERS, A.; WESSOLEK, G. Effect of soil water repellency on energy partitioning between soil and atmosphere: A conceptual approach. **Pedosphere**, [S. l.], v. 24, n. 4, p. 498-507, 2014.
- SHAO, W.; COENDERS-GERRITS, M.; JUDGE, J.; ZENG, Y.; SU, Y. The impact of non-isothermal soil moisture transport on evaporation fluxes in a maize cropland. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 561, p. 833-847, 2018.
- SHOUSE, P. J., AYARS, J. E., & ŠIMŮNEK, J. Simulating root water uptake from a shallow saline groundwater resource. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 98, n. 5, p. 784-790, 2011.
- SILVA, Tallyta Nayara. **Caracterização agronômica e morfológica de populações de milho**. 2014. 38 f Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2014
- SIMUNEK, J.; GENUCHTEN, M. T. VAN; SEJNA, M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. **University of California-Riverside Research Reports**, [S. l.], v. 3, p. 1-240, 2005.
- SOARES, R. J. D. S., PINTO, A. A., CAMARA, F. T. D., & SANTANA, L. D. Produtividade de massa verde de milho transgênico em função do arranjo populacional na região do Cariri, CE. **Interações** (Campo Grande), v. 18, n. 2, p. 117-127, 2017.
- SOUSA, S. F. G. **Profundidades de semeadura e espaçamentos entre plantas na cultura do milho**. 2016. 72 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016
- SOUZA, L. S. B., MOURA, M. S. B., SEDIYAMA, G. C., & DA SILVA, T. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caupi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 151-160, 2015.
- TAFTEH, A., SEPASKHAH, A. R. Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 113, p. 19-29, 2012.
- TAN, X.; SHAO, D.; LIU, H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 132, p. 69-78, 2014.
- UNKOVICH, M.; FARQUHARSON, R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia – A review. , v. 205, n. April, p. 72-80, 2018.

- VADEZ, V. Field Crops Research Root hydraulics : The forgotten side of roots in drought adaptation. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 165, p. 15–24, 2014.
- VAN DAM, J. C., GROENENDIJK, P., HENDRIKS, R. F., KROES, J. G. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. **Vadose Zone Journal**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 640-653, 2008.
- VAN GENUCHTEN, M., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. [S. l.], V. 44, n. 5, p. 892–898.
- VAN GENUCHTEN, M., T. **A numerical model for water and solute movement in and below the root zone**. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service US Salinity Laboratory, 1987.
- VETTORAZI, J. C. F. **Seleção recorrente recíproca em milho (Zea Mays L.) monitorada por marcadores SSR–EST's associados a produtividade**. 2016. 90 f Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, Campos dos Goytacazes, 2016.
- WALLOR, E.; ROSSKOPF, N.; ZEITZ, J. Geoderma Hydraulic properties of drained and cultivated fen soils part I - Horizon- based evaluation of van Genuchten parameters considering the state of moorsh-forming process. **Geoderma**, [S. l.], v. 313, n. March 2017, p. 69–81, 2018.
- WANG, Q.; HUO, Z.; ZHANG, L.; WANG, J.; ZHAO, Y. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 163, p. 125–138, 2016. Elsevier.
- WILLMOT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S. l.], v. 63, p. 1309-1313, 1982.
- XI, B.; BLOOMBERG, M.; WATT, M. S.; WANG, Y.; JIA, L. Modeling growth response to soil water availability simulated by HYDRUS for a mature triploid *Populus tomentosa* plantation located on the North China Plain. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 176, p. 243–254, 2016.
- ZLOTNIK, V. A., WANG, T., NIEBER, J. L., ŠIMUNEK, J. VERIFICATION of numerical solutions of the Richards equation using a traveling wave solution. **Advances in Water Resources**, [S. l.], v. 30, n. 9, p. 1973-1980, 2007.

APÊNDICE A – RECOMENDAÇÕES

Para a obtenção de resultados possivelmente mais satisfatórios na simulação do movimento de água no solo utilizando o modelo HYDRUS em trabalhos futuros, recomenda-se.

- Utilizar local com solo de textura argilosa;
- Utilizar instrumento de boa precisão na medição da umidade do solo e potencial mátrico;
- Utilizar modelos macroscópicos com sistema de compensação da extração;
- Analisar de forma mais abrangente o desenvolvimento das raízes.