

Artigos

Análise da dinâmica da água em um solo não saturado sob condições de chuvas simuladas

Assessment of water dynamics in an unsaturated soil under simulated rainfall conditions

Willames de Albuquerque Soares¹✉

¹ Universidade de Pernambuco/Escola Politécnica de Pernambuco (UPE/POLI), Recife, PE

✉ was@poli.br

Palavras-chave:

Infiltração.
Semiárido.
Hydrus 1D.

Keywords

Infiltration.
Semi-arid.
Hydrus 1D.

Revisado por pares.

Recebido em: 01/03/2018.

Aprovado em: 23/05/2018.

Resumo

O semiárido brasileiro apresenta solos com pequena espessura e pouca permeabilidade, onde a água pluvial permanece na camada superficial do solo e rapidamente evapora. Embora essa condição acarrete um nível freático raso (pouco profundo), ele desempenha um papel fundamental nos períodos de estiagem, sobretudo para a vegetação nativa do semiárido (Caatinga). O objetivo principal deste trabalho é estimar o efeito da intensidade de precipitação na dinâmica da água no solo, em uma região semiárida do estado de Pernambuco, Brasil. Foi realizada a modelagem matemática unidimensional da dinâmica da água no solo usando o software 1D-Hydrus. Foram utilizadas quatro diferentes taxas de precipitação e tempos de duração dos eventos chuvosos, baseados em valores medidos in loco. A maior parte das chuvas precipitadas ficaram contidas nos primeiros 15 centímetros do solo. Os resultados indicaram que os eventos pluviométricos intensos e de menor duração determinam maiores valores na umidade superficial do solo. Eventos menos intensos e de maior duração acarretam em um aumento do teor de umidade do solo por um período de tempo mais prolongado, aproximadamente por 3 dias, independente da intensidade de precipitação. Os eventos pluviométricos aumentam a umidade volumétrica superficial do solo rapidamente, porém quando cessam, a umidade volumétrica retorna aos valores iniciais lentamente, cerca de 10 dias após os eventos chuvosos.

Abstract

The Brazilian semi-arid region presents soils with small thickness and low permeability, where the precipitated water remains in the superficial layer of the soil and quickly evaporates. Although this condition leads to a shallow water table, it plays a key role during drought periods, especially for the native vegetation of the semi-arid Caatinga. The main objective of this work is to estimate the effect of rainfall intensity on soil water dynamics in a semi - arid region of the state of Pernambuco, Brazil. One-dimensional mathematical modeling of soil water dynamics using 1D-Hydrus software was performed. Four different precipitation rates and duration times of rainfall events were used, based on values measured in loco. Most precipitous rains were contained in the first 15 centimeters of the soil. The results indicated that the intense rainfall events of shorter duration determine higher values in the soil surface moisture. Less intense and longer duration events lead to an increase in soil moisture content for a longer period of time, approximately for 3 days, regardless of precipitation intensity. Rainfall events increase soil surface volumetric moisture rapidly, but when they cease, volumetric moisture returns to baseline slowly, about 10 days after rainy events.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v32i2.29109>

1. INTRODUÇÃO

O nível freático desempenha um papel fundamental nos períodos de estiagem. Além da manutenção do ecossistema (Caatinga), ele atende às necessidades das famílias locais, que não dispõem de outras fontes de abastecimento, seja para o consumo humano e/ou animal, e, em poucos casos, para a produção de alimentos por meio da irrigação.

Cerca de dezenove por cento do território do semiárido brasileiro apresenta solos classificados como litólicos, com pequena espessura, frequente ocorrência de cascalhos e fragmentos de rocha no

seu perfil (EMBRAPA 2006). Por causa da baixa permeabilidade do solo (10^{-5} ms⁻¹ a 10^{-7} ms⁻¹), a água precipitada tem dificuldade de se infiltrar e percolar para maiores profundidades. A parcela de água que não se infiltra no solo evapora sobre a superfície do solo, devido a temperatura da região (SOARES 2018).

Zipper et al (2015) avaliaram os efeitos das águas subterrâneas e da textura do solo como fatores de variabilidade na produção de milho (em toneladas) em Wisconsin – EUA, utilizando modelos matemáticos e experimentos em campo. Eles observaram que as águas subterrâneas podem ser utilizadas durante os períodos de seca, embora isso também possa ocasionar impactos de rendimen-

tos negativos durante os anos chuvosos, devido ao excesso de umidade no solo. Eles sugerem que sistemas de drenagem e irrigação sejam projetados e geridos de forma a obter as condições ideais para o cultivo, levando em consideração a textura do solo, as condições climáticas e o nível freático. Para as condições atmosféricas de Wisconsin em solos franco e franco siltoso, o rendimento da cultura teve um aumento médio de aproximadamente 18%, para o nível freático entre 1 e 3 m de profundidade.

O conhecimento das curvas de retenção de água do solo e de condutividade hidráulica são indispensáveis para utilização de modelos matemáticos de previsão de fluxo de água (HOMAE et al., 2015; ZHUANG et al., 2017) e transporte de hidrocarbonetos (solutos) dentro e através da zona não saturada de solos (BODELÃO et al. 2017). Também deve-se considerar na avaliação da dinâmica da água no solo o uso e ocupação do solo, a existência de fissuras, o teor de umidade inicial (ZHANG et al. 2014) e a intensidade e duração das chuvas.

Nas últimas três décadas a utilização de modelos computacionais tornou-se uma das ferramentas indispensáveis para o gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente em áreas áridas/semi-áridas (Noilhan; Planton 1989; Boulet et al. 1997; Antonino et al 2004). Para uma modelagem apropriada dos processos hidrodinâmicos no solo, como a infiltração e o escoamento de água na zona não saturada, especialmente em regiões de climas áridos ou semi-áridos, com níveis freáticos profundos, faz-se necessário a correta compreensão das características hidrodinâmicas do solo das áreas de estudo (ZHAO et al., 2014).

Mu et al. (2015), utilizando modelos matemáticos, analisaram a dinâmica do escoamento da chuva e o teor de umidade do solo em diferentes intensidades de precipitação e puderam concluir que o fluxo de água no perfil do solo e o escoamento superficial aumentaram com o incremento da intensidade e da inclinação da chuva, que a taxa de decremento de infiltração da água no solo é diretamente proporcional ao aumento da intensidade da precipitação pluviométrica, além de que o efeito da umidade inicial na taxa de infiltração do solo diminuiu gradualmente. Quando a intensidade da chuva é inferior a $1,12 \cdot 10^{-2} \text{ mms}^{-1}$, a umidade inicial afeta significativamente a taxa de infiltração do solo.

Farrick e Branfireun (2014), ao estudarem florestas tropicais áridas observaram valores de condutividades hidráulicas saturadas maiores que a intensidade de chuva para a região de estudo, em mais

de 75% dos eventos. Eles concluíram que o processo predominante na região (70%) é o escoamento sub superficial, que acontece nos 0,3 m iniciais do solo, sem apresentar excesso de infiltração nem escoamento superficial.

Há poucos estudos que avaliaram os efeitos da intensidade e duração das chuvas sob a taxa de infiltração e percolação de água no solo da região semiárida brasileira, sobretudo no estado de Pernambuco. Este trabalho teve como objetivo estimar o efeito da intensidade e duração da precipitação sob a dinâmica da água na zona não saturada do solo, em uma região semiárida do estado de Pernambuco, Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Local de estudo

A área de estudo está localizada na fazenda Santos e Silva, no município de São Bento do Una - PE, na mesorregião do Agreste Meridional do estado de Pernambuco, a 199 Km da Capital Recife (Figura 1). As coordenadas geográficas dessa área são $8^{\circ} 36' 37''$ de latitude Sul e $36^{\circ} 21' 45''$ de longitude Oeste e possui aproximadamente 621 m de altitude. O clima predominante é o semiárido, com verão quente e seco (64 mm), e período chuvoso entre os meses de abril a junho (160 mm). Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é classificado como BSh. A precipitação média anual não ultrapassa os 300 mm e a vegetação nativa é composta por Caatinga Hiperxerófila (EMBRAPA 2006). O período de estudo foi de setembro a outubro de 2017.

A parcela analisada consistia em 2,0 ha de solo com vegetação nativa (Caatinga). Nesta área, os arbustos mais comuns são a Jurema Preta (*Mimosa hostilis* Benth.), a Jurema Branca (*Mimosa hostilis*) e mais raramente encontra-se o Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*). Dentre os cactáceos encontrados, destacam-se o Rabo-de-raposa (*Harrisia adscendens*), o Facheiro (*Pilosocereus catingicola*), o Mandacaru (*Cereus jamacaru*) e o Xiquexique (*Pilosocereus gounellei*).

O solo da área em estudo é classificado como Neossolo Litólicos e o relevo é suavemente ondulado. A declividade medida (média) foi de 1,6%. O solo é compactado, raso, pedregoso, com fragmentos de rochas na superfície (Figura 2). Aos 0,40 m de profundidade a partir da superfície do terreno, torna-se inviável a escavação sem o uso de maquinário, devido à grande quantidade rochas.

Figura 1 - Mapa de localização da região de estudo

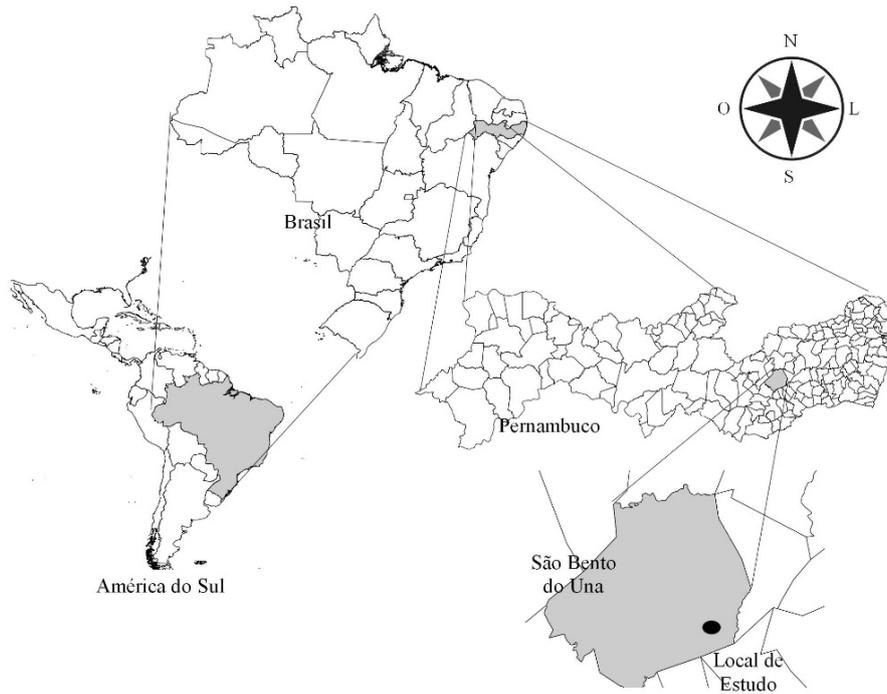
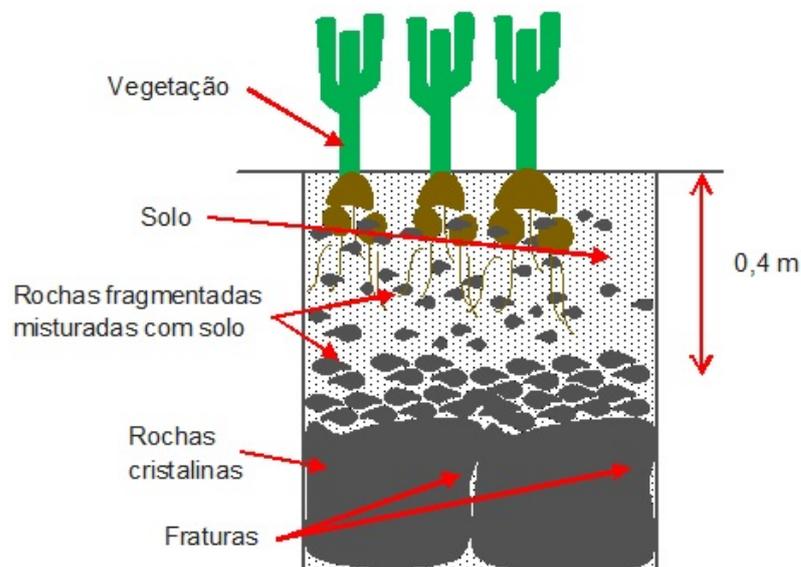


Figura 2 - Modelo conceitual do solo em estudo



2.2 Amostras de solo

Foram coletadas 40 amostras não deformadas de solo nas profundidades 0,0 a 0,4 m em áreas distintas, para a determinação da densidade aparente do solo, umidade volumétrica residual (θ_r) e saturada (θ_s). Além disso, foram coletadas 16 amostras deformadas de solo para análise granulométrica e determinação da sua textura, utilizando-se o método da NBR 7181 (ABNT 2016).

2.3 Simulação numérica computacional

As simulações foram realizadas usando a versão 4.14 do modelo

computacional HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK, et al., 2013), o qual resolve

numericamente a equação de escoamento unidimensional de água em meios porosos com saturação variável (Equação 1).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S_x \quad (1)$$

Sendo h o potencial mátrico, t o tempo, z a profundidade, S_x a extração de água pelo sistema radicular da cultura, e K a condutividade hidráulica do solo.

Na simulação foi utilizado o modelo hidráulico proposto por van Genuchten (1980), onde as curvas de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica são expressas por (Equações 2 e 3):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1 - \frac{1}{n}}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Sendo θ_r e θ_s a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente, α e n parâmetros de forma. Os valores de θ_r , θ_s foram determinados em laboratório e os valores de α e n foram ajustados utilizando a metodologia proposta por Arya e Heitman (2015), que já foi bem avaliada para diversos solos brasileiros, inclusive para o solo do atual estudo (SOARES; HAMMECKER, 2017).

A determinação da condutividade hidráulica saturada foi realizada por meio da metodologia proposta por Haverkamp et al. (1994), que vem sendo utilizado por diversos autores (LASSABARÈRE, et al., 2006; SOUZA et al., 2016; OLIVEIRA; SOARES 2017).

Condições de contorno atmosféricas foram utilizadas, incluindo os fenômenos de evapotranspiração potencial e de precipitação. A evapotranspiração potencial foi considerada constante para todos os dias, com um valor de 5,0 mmd⁻¹, valor médio determinado anteriormente por Soares et al. (2017), na região, utilizando as equações de Priestley e Taylor. Para a precipitação, quatro simulações foram avaliadas. Na primeira simulação tem-se uma precipitação com uma taxa pluviométrica (i) equivalente a um quarto do valor da

condutividade hidráulica saturada do solo (ks) e com um tempo (t) de duração de 4 horas. Na segunda simulação a $i = ks$ e a duração do evento limita-se a 1 hora. Na terceira simulação a i volta a ser de um quarto do valor da ks , mas a duração é de apenas uma hora. Na quarta e última simulação o valor de i é igual ao valor de ks , mas a duração do evento é de apenas 0,25 horas (15 minutos). Um resumo das simulações pode ser visto na Tabela 1.

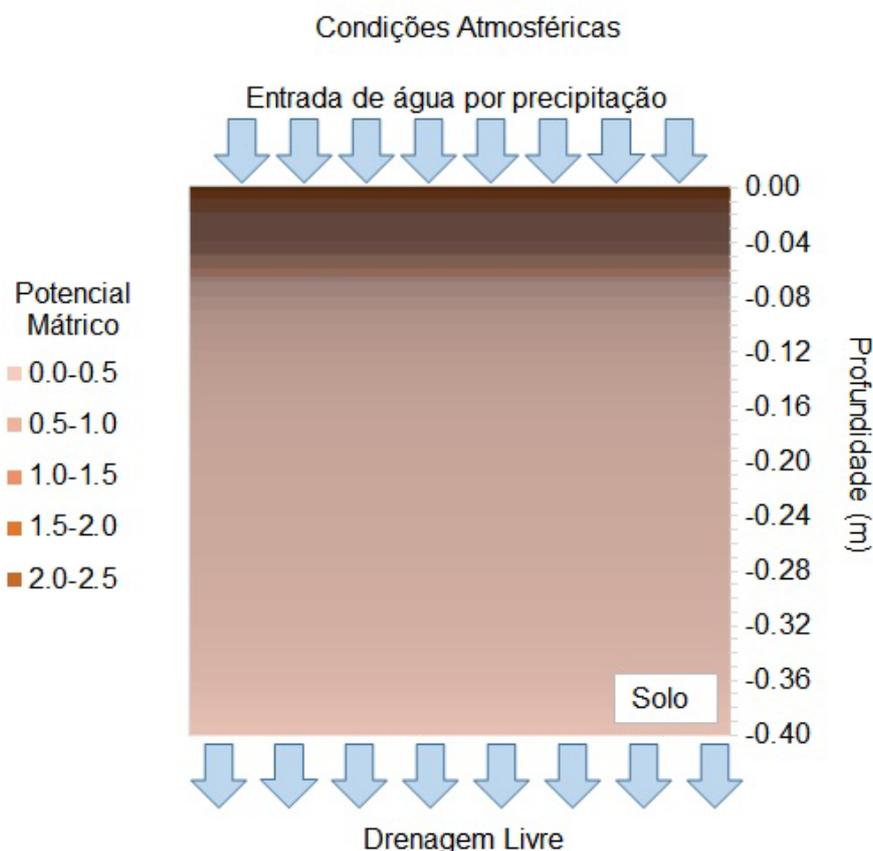
Tabela 1 - Taxas e duração pluviométricas simuladas

Simulação	Taxa pluviométrica (mm/h)	Duração (h)
1	$i = 1/4 ks$	$t = 4$
2	$i = ks$	$t = 1$
3	$i = 1/4 ks$	$t = 1$
4	$i = ks$	$t = 0,25$

Sendo i a taxa pluviométrica, t o tempo e ks a condutividade hidráulica saturada

Como condição de fronteira inferior foi considerada a drenagem por gravidade, uma vez que o nível freático se encontrava a mais de 4 m. A umidade volumétrica do solo foi monitorada utilizando sensores (time-domain-reflectometry-TDR, CS 615, Campbell scientific, USA) nas profundidades de 0,05 m, 0,15 m, 0,25 m e 0,40 m, o que permitiu interpolar linearmente os valores para todas as profundidades do perfil. De posse desses valores, foi determinado o perfil de potencial matricial do solo, utilizando a equação 2. O perfil de potencial matricial do solo serviu como condição inicial. A representatividade deste é de fundamental importância para o real entendimento do processo de infiltração da chuva no solo (ZHANG et al. 2014, MU et al. 2015). Na Figura 3 está representado um resumo das condições de contorno utilizados neste trabalho.

Figura 3 - Condições iniciais e de contorno adotadas no modelo Hydrus-1D para uma coluna de solo



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias das frações granulométricas do solo e suas características hidrodinâmicas estão apresentadas na Tabela 2. O solo apresenta uma porcentagem de areia bem superior aos valores encontrados para o silte e para a argila. Os valores da porcentagem de areia ficaram entre 68,1% e 80,4%, com uma média de 73,2%. O maior valor encontrado para a porcentagem de silte foi de 18,4%, já o valor mínimo foi de 11,8%. O valor médio foi de 15,8%. A porcentagem de argila encontrara-se dentro da faixa de valores entre 8,5% e 15,1% com média de 11%. Estes valores estão de acordo com os encontrados por Maciel Neto et al. (2015), para o município de Garanhuns, Agreste de Pernambuco, a cerca de 40 km de distância.

Tabela 2 – Frações granulométricas e propriedades físicas dos solos

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	θ_r (m^3m^{-3})	θ_s (m^3m^{-3})	α (m^{-1})	n –	k_s ($10^{-4}mms^{-1}$)
73,2	15,8	11,0	0,028	0,301	7,149	2,640	8,960

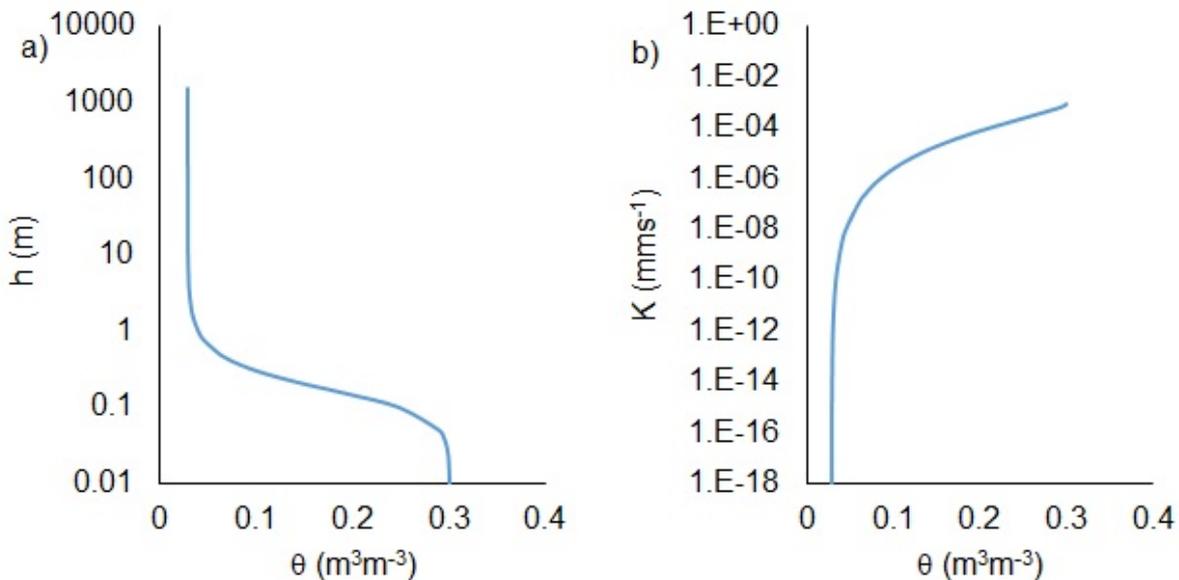
Sendo, θ_r e θ_s , respectivamente, a unidade volumétrica residual e saturada do solo, α e n parâmetros de ajuste e k_s a condutividade hidráulica saturada do solo.

O modelo foi calibrado durante um período de sete dias (15 a 21 de março de 2017), utilizando medidas micrometeorológicas e hidrológicas. Neste período, os dois primeiros e o último dia não apresentaram chuvas e a umidade média do solo apresentou valores entre

As curvas de retenção de água no solo e de condutividade hidráulica para a localidade apresentam comportamentos típicos de um solo arenoso (Figura 4). Os valores encontrados para as umidades volumétricas residual (θ_r) e saturada (θ_s) foram de 0,028 m^3m^{-3} e 0,301 m^3m^{-3} , respectivamente. Os parâmetros α e n apresentaram valores de 7,15 m^{-1} e de 2,64, respectivamente. A condutividade hidráulica saturada (k_s) foi de aproximadamente 8,9 $10^{-7} ms^{-1}$. Os valores encontrados para todos os parâmetros relativos ao solo ficaram dentro dos intervalos encontrados por Oliveira Júnior et al. (2014), em um Neossolo Regolítico sob a Caatinga, em uma localidade próxima, cerca de 27 km.

0,15 e 0,27 cm^3cm^{-3} . Foram calibrados os parâmetros que define o albedo em função da umidade do solo e os parâmetros de extração de água pelas raízes. A comparação entre os valores medidos e preditos para a evaporação acumulada durante a fase de calibração obteve um ótimo desempenho, com uma pequena subestimativa ao final do período. O valor da evaporação acumulada medido foi de 29,88mm e o valor estimado foi de 30,22 mm.

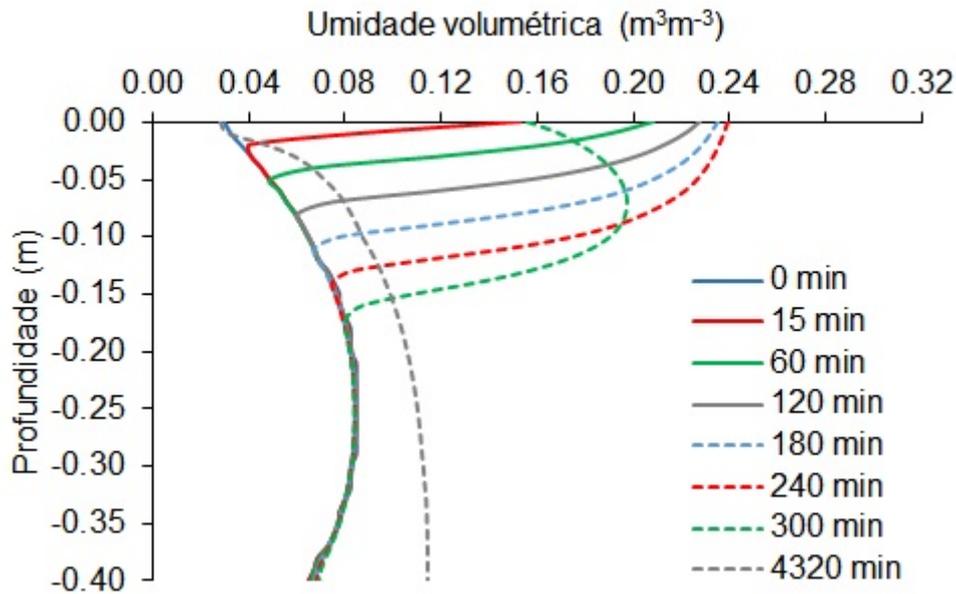
Figura 4 – Curvas de a) retenção de água no solo e b) condutividade hidráulica



Na Figura 5 temos o resultado para a primeira simulação. Inicialmente o solo estava seco ($\theta = 0,03 m^3m^{-3}$), a capacidade de infiltração era alta e toda a água precipitada penetrou no perfil do solo durante o evento chuvoso, corroborando com as análises da teoria da infiltração realizadas por Zhang et al. (2014). Observa-se que o teor de água na superfície aumentou gradativamente durante o evento chuvoso (240 minutos), apresentando uma variação de 0,20 m^3m^{-3} (máxima), entre o início e o término do evento chuvoso. A

frente de umedecimento avançou em todo o perfil simulado. O maior umedecimento ocorreu nos 0,15 m iniciais. Como nessa simulação a intensidade de chuvas foi inferior à condutividade hidráulica saturada do solo, a capacidade de infiltração do perfil do solo não foi ultrapassada e não ocorreu escoamento superficial. Nesta simulação, ao final do evento pluviométrico, o estoque de água no perfil do solo passou de 28,4 mm para 47,3 mm, atingindo o seu máximo.

Figura 5 – Modelagem da dinâmica da distribuição da água no perfil do solo, para o simulação 1 ($i = \frac{ks}{4}$; $t = 4h$).



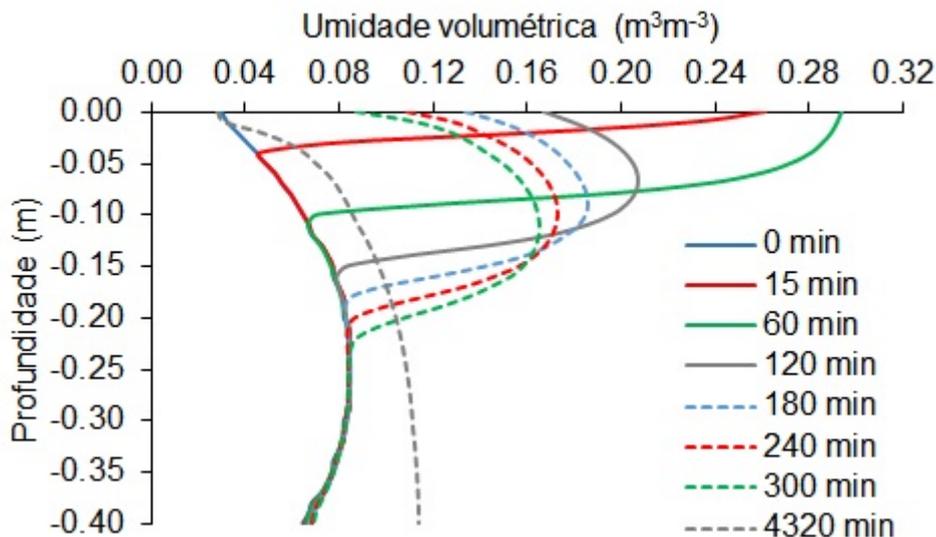
Ao final do evento pluviométrico, a umidade do solo atingiu os 0,24 m³m⁻³, aumentando assim a condutividade hidráulica do solo o que incrementa a infiltração. Como não há mais o fornecimento de água, o interior do solo apresenta umidades superiores a umidade da superfície. Esse comportamento é bem exemplificado pelas curvas correspondentes aos tempos de 300 e 4320 minutos.

Na Figura 6 temos o resultado para a segunda simulação. Semelhantemente a simulação anterior, toda a água infiltrou-se no perfil do solo durante o evento chuvoso, não apresentando escoamento superficial. Nesta simulação, o teor de água próximo a superfície aumentou mais rapidamente, em relação a simulação anterior, atingindo um valor máximo de 0,29 m³m⁻³ em 60 minutos. A frente de

umedecimento também avançou em todo o perfil simulado, no entanto o maior umedecimento ocorreu nos 0,15 m iniciais do solo. Nesta simulação, o estoque de água no perfil do solo atingiu o seu máximo (47,6 mm) ao final do evento pluviométrico.

Quando comparamos as simulações 1 e 2 podemos observar que o avanço da umidade superficial é mais lento na simulação 1, principalmente a partir dos 120 minutos. A partir dos 0,25 m de profundidade não houve diferenças significativas entre as simulações 1 e 2, apresentando valores de 0,08 m³m⁻³ na maioria dos tempos, e de 0,11 m³m⁻³ após 4350 minutos. Em ambas as simulações, foram necessários mais de dez mil minutos para que o estoque de água no solo voltasse ao seu valor inicial, de 26,90 mm.

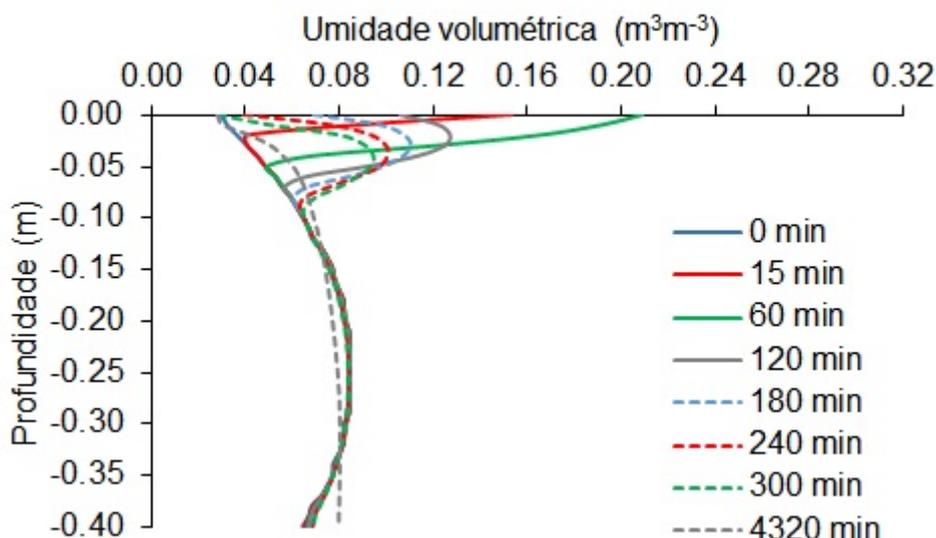
Figura 6 – Modelagem da dinâmica da distribuição da água no perfil do solo, para a simulação 2 ($i = ks$; $t = 1h$)



Na Figura 7 temos os resultados para a terceira simulação. A umidade na superfície do solo apresentou um rápido crescimento, atingindo seu pico ao final do período da ocorrência de chuvas e decaiu

gradualmente, atingindo o valor inicial de 0,03 m³m⁻³ aos 240 minutos de ensaio, ou seja, quatro horas após o final do evento chuvoso.

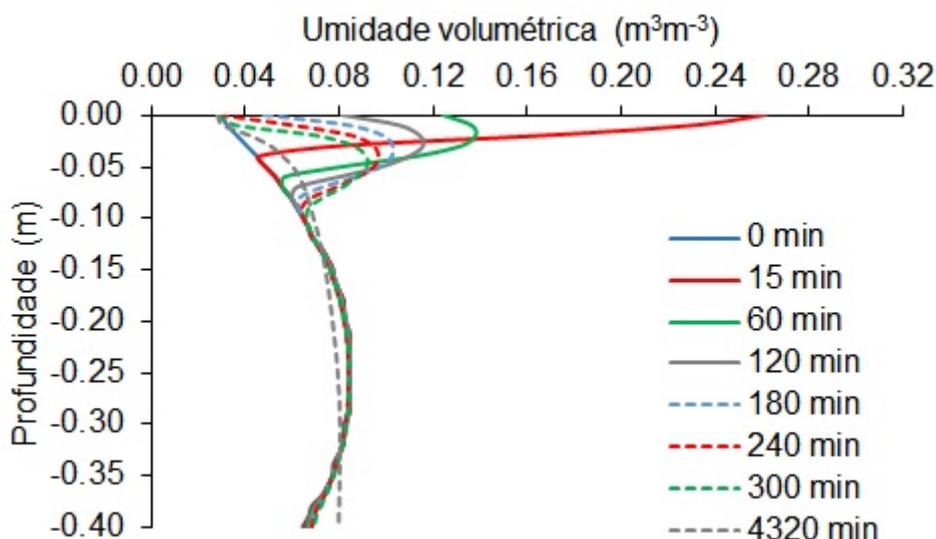
Figura 7 – Modelagem da dinâmica da distribuição da água no perfil do solo, para a simulação 3 ($i = \frac{ks}{4}$; $t = 1h$)



Inicialmente, o teor de umidade no solo (θ_0) era de $0,03 m^3m^{-3}$, o que corresponde a uma condutividade hidráulica ($K(\theta_0)$) de $7,9 \cdot 10^{-12} ms^{-1}$. Como a $K(\theta_0) < i < k_s$, a água infiltra mais rápido do que deixa a camada dos 0,05 m iniciais do solo, aumentando o seu conteúdo de água. O aumento progressivo do conteúdo de água no solo, aumenta a condutividade hidráulica. Aos 15 minutos, a umidade inicial era de $0,15 m^3m^{-3}$, o que corresponde a uma condutividade hidráulica de $2,1 \cdot 10^{-5} ms^{-1}$. Conseqüentemente, aumentando também fluxo de saída de água. Esse aumento continua até que infiltração de água seja igual à saída e não haja mais alteração do conteúdo de água no solo.

Na Figura 8 temos o resultado para a quarta simulação. A umidade na superfície do solo cresceu rapidamente, atingindo os $0,26 m^3m^{-3}$ aos 15 minutos, a condutividade hidráulica atingiu o valor de $3,0 \cdot 10^{-4} ms^{-1}$. Desde momento em diante, cessou o fornecimento de água pela superfície e a água existente nos primeiros centímetros infiltrou-se para o interior do solo. Os valores da umidade na superfície decresceram gradativamente, assim como na terceira simulação.

Figura 8 – Modelagem da dinâmica da distribuição da água no perfil do solo, para a simulação 4 ($i = ks$; $t = 0,25h$)



Nas simulações 3 e 4, os efeitos da precipitação recaíram principalmente sobre os 10 primeiros centímetros de solo alterando a sua umidade volumétrica. Inicialmente, em ambas as simulações, o estoque de água no perfil do solo era de 28,37 mm e atingiu o valor máximo de 33,2 mm aos 60 minutos, para a simulação 3, e, aos 15 minutos, na quarta simulação.

O comportamento hidrodinâmico das simulações 1 e 3 equiparam-se, tanto na dinâmica do aumento dos valores da umidade superfi-

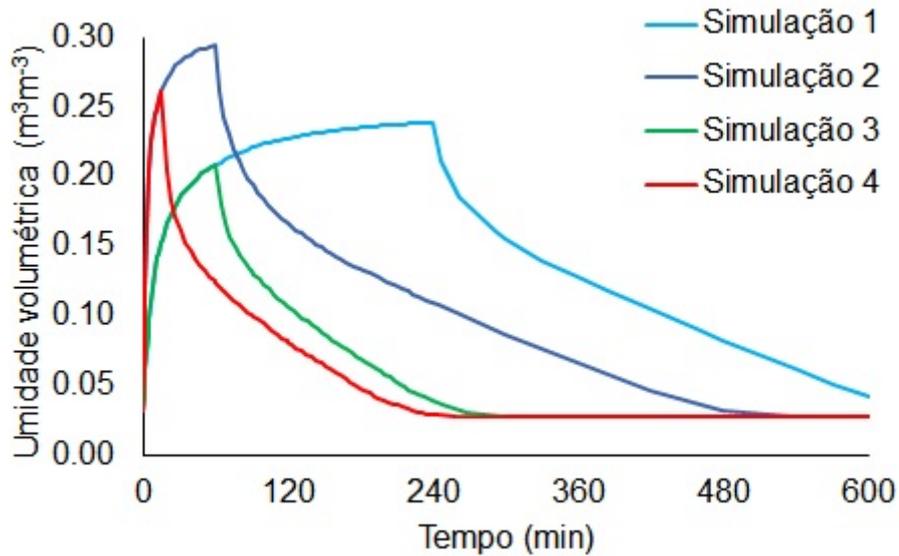
cial como no crescimento da frente de umedecimento, salvo apenas no volume de água, que é menor na terceira simulação. O mesmo pode ser dito sobre as simulações 2 e 4.

Na Figura 9 observamos a dinâmica da água na superfície do solo das quatro simulações propostos. Nas quatro simulações, como esperado, a umidade na superfície do solo cresceu rapidamente durante o período em que ocorreu chuva e decresceu gradativamente

assim que a mesma cessou, corroborando com os resultados encontrados por Mu et al (2015). Em nenhuma das simulações a umidade superficial do solo chegou a saturação ($0,301 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$), consequentemente não houve escoamento superficial (ASSOULINE 2013). Como esperado, o maior valor de umidade na superfície do

solo foi determinado na simulação 2, com um valor de $0,29 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O segundo maior valor foi determinado na simulação 4, com um valor de $0,26 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. O terceiro e quarto valores foram determinados para as simulações 1 e 3, respectivamente.

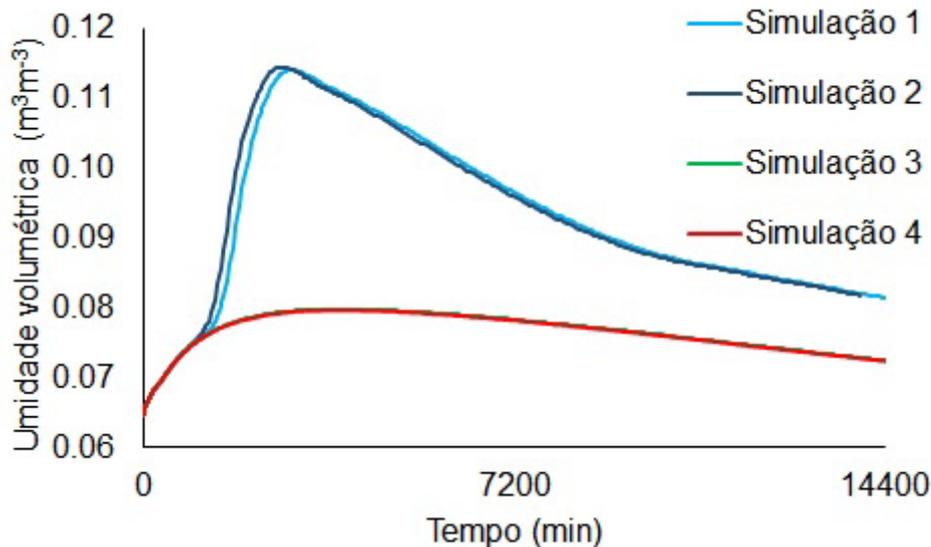
Figura 9 - Evolução da umidade volumétrica na superfície do solo para as simulações 1, 2, 3 e 4



Na Figura 10 observamos a dinâmica da água do solo a 0,40 m de profundidade, para as quatro simulações propostas. Na primeira e na segunda simulação a precipitação totalizou aproximadamente 19,4 mm, água suficiente para interferir em todo o perfil do solo simulado. Entretanto vale ressaltar que aos 0,40 m de profundidade, a umidade do solo apresentou uma variação de apenas 0,049

m^3m^{-3} , onde se encontrava inicialmente com $0,065 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ e após os 4320 minutos (três dias), atingiu seu valor máximo de umidade, com apenas $0,114 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. Na terceira e na quarta simulação o volume total de chuva precipitado foi de aproximadamente 4,8 mm, água suficiente para interferir em todo o perfil de solo. Ressalta-se que a variação de umidade a 0,40m foi apenas 1,5%.

Figura 10 - Evolução da umidade volumétrica do solo a 0,40m de profundidade, para as simulações 1, 2, 3 e 4



4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisada a dinâmica da infiltração da água no solo usando simulação computacional. A entrada de água na forma de precipitação foi variada considerando diferentes intensidades e tempo de durações. As intensidades de precipitações nas simulações são constantes e não variáveis no tempo. Foram listadas as seguintes conclusões:

1 - Nos eventos pluviométricos de mesmo volume, mas com maior intensidade e menor duração, os valores da umidade na superfície do solo apresentam um pico mais elevado quando comparados a eventos menos intensos e mais duradouros. Entretanto, nos eventos com menor intensidade e maior duração acarretam em um aumento do umedecimento do solo por um período maior.

2 - A maior parte das chuvas ficaram contidas nos primeiros centímetros do solo. Para um volume de 19,4 mm a maior quantidade das chuvas ficaram contidas nos primeiros 0,15 m e para um volume precipitado de 4,8 mm a maior quantidade das chuvas ficaram contidas nos primeiros nos 0,05 m.

3 - As características hidrodinâmicas do solo em estudo fizeram com que os primeiros centímetros do solo retivessem a maior parte da água precipitada. Isso justifica a presença de quase a totalidade das raízes da vegetação nativa estarem presentes nos 0,40 m do solo.

4 - Faz-se necessário que as chuvas precipitadas na localidade sejam menos intensas e mais duradouras para que o ecossistema (Caatinga) possa resistir aos períodos de estiagem de forma satisfatória, utilizando as águas subterrâneas disponíveis.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE, pelo apoio financeiro realizado por meio de auxílio a pesquisa (APQ 0582-01/15).

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *ABNT NBR – 7181*. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 16p.

ANTONINO, A. C. D., SOARES, W. A. SILVA, E. B., LIMA, J. R. S., MARCIEL NETTO, A., LIMA, C. A. B. O. Utilização do Método Inverso para a Caracterização Hidrodinâmica de um Neossolo Flúvico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 9, n. 3, p. 81-87, 2004. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v9n3.p81-87>

ARYA, L. M., HEITMAN, J. L. A non-empirical method for computing pore radii and soil water characteristics from particle-size distribution. *Soil Science Society of American Journal*, v. 79, n. 6, p. 1537-1544, 2015. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2015.04.0145>

ASSOULINE, S. Infiltration into soils: Conceptual approaches and solutions. *Water Resources Research*, v. 49, p.1755-1772, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20155>

BABAEIAN, E., M. HOMAEI, H. VERECKEN, C. MONTZKA, A. A. NOROUZI, AND M. TH. VAN GENUCHTEN. A Comparative Study of Multiple Approaches for Predicting the Soil-Water Retention Curve: Hyperspectral Information vs. Basic Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 79, p. 1043-1058, 2015. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.09.0355>

BODELÃO, T. G., OLIVEIRA, E., FREITAS, J. G., SOTO, M. A., FURQUIM, S. A. Importância dos horizontes do solo na distribuição de gasolina com etanol na zona não saturada em solo tropical. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n. 4, p. 413-422, 2017. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v31i4.28924>

BOULET, G., BRAUD, I., VAUCLIN, M. Study of the mechanisms of evaporation under arid conditions using a detailed model of the soil-atmosphere continuum. *Journal of Hydrology*, v. 193, p. 114-141, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03148-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03148-4)

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro (RJ): Embrapa/Centro nacional de Pesquisa de Solos, 2006. Acúmulo de biomassa e crescimento radicular da Palma forrageira em diferentes épocas de colheita.

FARRICK, K. K. AND BRANFIREUN, B. A. Infiltration and soil water dynamics in a tropical dry forest: it may be dry but definitely not arid. *Hydrological Processes*, v. 28, p. 4377-4387, 2014. <https://doi.org/10.1002/hyp.10177>

HAVERKAMP, R.; ROSS, P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, v.30, p. 2931-2935, 1994. <http://doi.org/10.1029/94WR01788>

MACIEL NETO, J. A.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; SOARES, W. A.; ALVES, E. M.; ALMEIDA, C. A. B.; SILVA NETO, J. A. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, n. 1, p. 167-178, 2015.

MU W, YU F, LI C, XIE Y, TIAN J, LIU J, ZHAO N. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Soil Moisture Content on Different Growing Stages of Spring Maize. *Water*, v. 7, n. 6, p. 2990-3008, 2015. <https://doi.org/10.3390/w7062990>

NOILHAN, J. AND PLANTON, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117: 536-549, 1989. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)

OLIVEIRA JUNIOR, J.A.S.; SOUZA, E. S.; CORREA, M. M.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, R. M. S. SILVA FILHO, L. A. S. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e Caatinga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 6, p. 631-639, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000600010>

OLIVEIRA, D. B.C., SOARES, W.A. DESEMPENHO DE MODELOS DE INFILTRAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE ÁGUA NO SOLO. *Revista Diálogos*, v. 18, p. 519-544, 2017. <http://doi.org/10.13115/2236-1499v2n18p519>

ŠIMŮNEK, J., ŠEJNA, M., SAITO, H., SAKAI, M., VAN GENUCHTEN, M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. *RIVERSIDE, CALIFORNIA*, 373 p., 2013.

SOARES, W. A. Impact of spineless cactus cultivation (*O. Ficus-indica*) on the thermal characteristics of soil. *Revista Ambiente e Água*, v.13, n.1, 2018. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2148>

SOARES, W. A., ANTONINO, A. C. D., LIMA, J. R.S., HAMMECKER, C. Modelagem da evapotranspiração e do fluxo de água em um solo cultivado com feijão caupi. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 2, 115-124, 2017. <http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.2.2017.115-124>

SOARES, W. A., HAMMECKER, C. Comparison of Mathematical Models for the layout of Granulometric Curves of Brazilian Soils. *Revista de Geografia*, v. 34, n. 1, p. 251-267, 2017.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; NETTO, A. M.; SOUZA, R. M. S.; GONDIM, M. V. S.; LIMA, V. F.; LIMA, J. R. S.; ALVES, E. M.; COUTINHO, A. P.; SOARES, W. A. Hydrodynamic behavior of soils in recession agriculture in semiarid of

Pernambuco State (Brazil). *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 1, n. 1, p. 52-60, 2016.

<https://doi.org/10.24221/jeap.1.1.2016.984.52-60>

van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

ZHAO N, YU F, LI C, WANG H, LIU J, MU W. Investigation of Rainfall-Runoff Processes and Soil Moisture Dynamics in Grassland Plots under Simulated Rainfall Conditions. *Water*, v. 6, n. 9, p. 2671-2689, 2014.

<https://doi.org/10.3390/w6092671>

ZIPPER, S. C., M. E. SOYLU, E. G. BOOTH, S. P. LOHEIDE II. Untangling the effects of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfieldscale yield variability, *Water Resources Research*, v. 51, p. 6338-6358, 2015.

<https://doi.org/10.1002/2015WR017522>

ZHUANG, L., C.R. BEZERRA COELHO, S.M. HASSANIZADEH, AND M.TH. VAN GENUCHTEN. Analysis of the hysteretic hydraulic properties of unsaturated soil. *Vadose Zone Journal*, v. 16, n. 5, 2017.

<https://doi.org/10.2136/vzj2016.11.0115>

ZHANG, G. R., QIAN, Y. J., WANG, Z. C., ZHAO, B. Analysis of Rainfall Infiltration Law in Unsaturated Soil Slope. *The Scientific World Journal*, v. 2014, Article ID 567250, 7 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/567250>