



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN EM
LABORATÓRIO E POR MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D**

FORTALEZA

2017

ÍCARO VASCONCELOS DO NASCIMENTO

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN EM
LABORATÓRIO E POR MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Agronomia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio
Anunciato Mota.

Coorientador: MS. Sc. Thiago Leite de Alencar

FORTALEZA

2017

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)

- N199e Nascimento, Ícaro Vasconcelos do.
Estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten em laboratório e por modelagem inversa com HYDRUS-1D / Ícaro Vasconcelos do Nascimento. – 2017.
47 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.
Coorientação: Prof. Me. Thiago Leite de Alencar.
1. Metodologia em solo. 2. Curva característica de água no solo. 3. Perfil instantâneo. I. Título.
CDD 630
-

ÍCARO VACONCELOS DO NASCIMENTO

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE VAN GENUCHTEN EM
LABORATÓRIO E POR MODELAGEM INVERSA COM HYDRUS-1D

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Agronomia da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carlos de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A todos que fazem parte da minha vida e tornam minha caminhada mais leve e prazerosa

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fôlego de vida e por me conceder a disposição de encarar a dura batalha diária.

Aos meus pais, Antônio Augusto do Nascimento e Maria Zenilda Ferreira Vasconcelos, pelo amor e esmero com minha educação.

À minha irmã, Carla Danielle Vasconcelos do Nascimento, pelo companheirismo e convivência diária.

À minha namorada, Paloma Eleutério Bezerra, pelo amor e constante apoio para que eu lute por meus objetivos.

Aos meus demais familiares por terem, cada um à sua maneira, feito parte da minha vida durante esta jornada.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação e amizade valorosa.

Ao Ms. Sc. Thiago Leite de Alencar, pela coorientação, amizade e apoio na execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Carlos de Araújo, pelo exemplo de profissional e por sua disponibilidade em participar da banca de avaliação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelo tempo a mim dispensado com suas colaborações e sugestões.

Ao amigo Dr. Alcione Guimarães Freire, pela presteza e auxílio na realização deste trabalho.

Ao amigo Dr. José Othon Dantas Lopes, pelo apoio nos momentos difíceis.

Aos amigos Victor Vasconcelos e Márcio Regys, pela parceria ao longo da jornada.

Aos colegas de curso, pela amizade e vivência durante toda esta etapa.

Aos mestres dos quais tive o privilégio de ser aluno, cujos ensinamentos me deram uma visão mais ampla do mundo e da profissão.

Aos funcionários da Universidade Federal do Ceará, especialmente os lotados na Coordenação do Curso de Agronomia e no Departamento de Ciências do Solo, pela presteza na realização dos afazeres diários.

Aos amigos do Departamento de Ciências do solo, pela amizade, convivência saudável e constante troca de saberes.

Aos demais que, de algum modo, tenham contribuído com este trabalho ou simplesmente me presenteado com sua presença amiga.

“Se tens que lidar com água, consulta primeiro a experiência e depois razão.”

Leonardo da Vinci.

RESUMO

O monitoramento do comportamento hidráulico do solo é fundamental no manejo da água na agricultura irrigada, influenciando a produtividade vegetal e a preservação do ambiente. Portanto, a curva característica de água no solo (CCAS) ganha importância, pois orienta quando e quanto irrigar, otimizando o uso da água. A CCAS pode ser obtida em campo ou laboratório, sendo comumente determinada em laboratório com extrator de placa porosa. Seu ajuste pode ser feito por diversos modelos, sendo o de van Genuchten (1980) um dos mais utilizados. A obtenção de parâmetros hidráulicos do solo, como a CCAS, é dificultada por questões como tempo e mão de obra. Assim, as funções de pedotransferência, que permitem obter parâmetros do solo indiretamente, ganham utilidade. Neste cenário está a modelagem inversa, que permite a obtenção de uma variável através de suas implicações, partindo do efeito para a causa. O modelo Hydrus-1D é um exemplo de modelo inverso que permite obter propriedades hidráulicas do solo. Diante do exposto, partiu-se da hipótese de que o modelo Hydrus-1D, por estar fundamentado em processos físicos, simula os parâmetros da equação de van Genuchten e, por consequência, a CCAS de um Argissolo de modo mais coerente com as condições de campo que aqueles obtidos em laboratório, além de reduzir o tempo e o labor do procedimento. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi obter, em Argissolo, os parâmetros da equação de van Genuchten por meio do modelo inverso com Hydrus-1D, como também em laboratório, e efetuar as respectivas comparações e inferências. Para tanto, obtiveram-se dados de potencial mátrico ao longo do tempo a partir de experimento tipo perfil instantâneo, realizado em Argissolo Amarelo em Fortaleza/CE. Foram instaladas no entorno do centro da parcela experimental seis baterias com três tensiômetros cada, nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. A profundidade alvo foi 0,35 m, onde se concentra as raízes da maioria das culturas, sendo os demais tensiômetros usados para obter o gradiente de potencial. Os dados de potencial mátrico foram utilizados para alimentar o Hydrus-1D e obter os parâmetros da equação de van Genuchten. As curvas de laboratório foram obtidas em extrator de placa porosa, com quatro repetições. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Jarque-Bera e a comparação das médias pelo teste t de Student, ambos a 5% de significância. Também foram construídos gráficos de umidade versus tempo e potencial mátrico versus tempo, visando verificar se os dados ajustados pelo modelo condizem com os de campo. Essa verificação foi feita pelo coeficiente de eficiência – E, e pela raiz quadrática do erro médio – RMSE. Concluiu-se que, em geral, o modelo Hydrus-1D estima os parâmetros da equação de van Genuchten e, por consequência, a CCAS de um Argissolo de modo mais coerente com as

condições de campo que aqueles obtidos em laboratório; e desde que abastecido com dados de campo, o Hydrus-1D simula bem o comportamento do potencial mátrico e da umidade no tempo, reduzindo o tempo e o labor da obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten em laboratório.

Palavras-chave: Metodologia em solo. Curva característica de água no solo. Perfil instantâneo.

ABSTRACT

The monitoring of soil hydraulic behavior is fundamental in irrigated agriculture, because it influences crop production and environmental preservation. Thus, the soil-water characteristic curve (SWCC) gains importance, since it guides when and how much to irrigate, optimizing the use of water. The SWCC can be obtained in the field or laboratory, being commonly determined in laboratory with pressure plate extractor. Its adjustment can be made by several models, but one of the most used is the van Genuchten (1980) equation. Obtaining of soil hydraulics parameters, such as SWCC, is often difficult due to issues such as time and labor. So, pedotransfer functions, which allows to obtain soil parameters indirectly, gain utility. In this scenario is the inverse modeling, which allows a variable to be obtained through its implications, thus, it starts from the effect and arrives at the cause. The Hydrus-1D model is an example of inverse approach that allows the achievement of soil hydraulic properties. Therefore, this study was based on the hypothesis that the Hydrus-1D model, because it is based on physical processes, correctly simulates the parameters of the van Genuchten equation and, consequently, the SWRC of an Argissolo, in a way more coherent with the field conditions than those obtained in the laboratory, besides reducing the time and the labor of the procedure. Therefore, the objective of this work was to obtain, in an Argissolo, the parameters of the van Genuchten equation with Hydrus-1D inverse approach, as well as in the laboratory, and to make the respective comparisons and inferences. To do so, data of matric potential over time from an instantaneous profile experiment were collected in an Argissolo Amarelo in Fortaleza/CE. Six batteries with three tensiometers each were installed around the center of the experimental plot, at depths of 0.20, 0.35 and 0.50 m. The target depth was 0.35 m, where the root system of most cultivated species is concentrated. The other tensiometers were used to obtain the potential gradient. The Hydrus-1D model was fed with matric potential data to obtain the parameters of the van Genuchten equation. The laboratory curves were obtained in a porous plate extractor, with four replicates. The normality of the data was verified by Jarque-Bera test and the comparison of means was made by Student's t-test, both at 5% of significance. Graphs of moisture versus time and matric potential versus time were also plotted, to verify if the adjusted data matched those of the field. This verification was performed using the coefficient of efficiency – E, and the root mean squared error- RMSE. It was concluded that, generally, the Hydrus-1D model estimates the parameters of the van Genuchten equation, and consequently, the SWCC of an Argissolo in a more coherent way than the ones obtained in laboratory; and if field data are supplied, Hydrus-1D simulates well

the behavior of matric potential and moisture in time, reducing the time and labor of obtaining the parameters of the van Genuchten equation in the laboratory.

Keywords: Soil methodology. Soil water characteristic curve. Instantaneous profile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Localização do experimento tipo perfil instantâneo	25
Figura 2	– Representação do esquema de instalação e utilização do tensiômetro empregado	26
Figura 3	– Divisão do perfil de solo em camadas e nós e alocação dos pontos de observação considerados no procedimento de modelagem inversa	28
Figura 4	– Potencial mátrico no tempo em campo e por modelagem inversa com Hydrus-1D	31
Figura 5	– Umidade no tempo por ϕ_m campo-curva de laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D	32
Figura 6	– Curvas características de água no solo obtidas em laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D no campo	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fração areia, silte e argila, classificação textural e densidade do solo	27
Tabela 2 – Médias dos parâmetros da equação de van Genuchten, obtidas em laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D no campo, comparadas pelo teste <i>t</i> de Student a 5% de significância	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 Água no solo	17
2.2 Curva característica de água no solo e a equação de van Genuchten (1980).....	19
2.3 Modelagem inversa: o modelo Hydrus-1D.....	21
2.4 Método do perfil instantâneo.....	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Trabalhos de campo e laboratório.....	25
3.2 Modelagem inversa com o Hydrus-1D	28
3.3 Análise dos dados.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5 CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXO A – Valor inicial, máximo e mínimo de parâmetros hidráulicos do solo para cada camada e repetição considerada no Hydrus-1D	45
ANEXO B – Valor inicial de potencial mátrico para cada camada e repetição considerada no Hydrus-1D.....	47

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades hidráulicas do solo é importante no manejo da água na agricultura, direcionando estratégias que aliem a preservação do ambiente ao máximo rendimento dos vegetais. Neste contexto, a curva característica de água no solo – CCAS, dada pela relação entre o conteúdo de água e o potencial mátrico com que a fase aquosa está retida no solo – permite acompanhar a umidade do solo e, assim, definir quando e quanto irrigar. Ademais, pode-se citar a utilização da CCAS como indicador da qualidade física do solo, permitindo interferir sobre sua funcionalidade no agroecossistema.

A obtenção da CCAS pode ser realizada por diversos métodos, tanto em campo quanto em laboratório, entretanto, normalmente a sua determinação é feita em condições laboratoriais utilizando extrator de pressão de placa porosa, em que o conteúdo de água retido na amostra frente à pressão aplicada dá origem à curva. O formato da CCAS é comumente descrito por uma equação empírica, sendo o modelo de van Genuchten (1980), com cinco parâmetros, um dos mais utilizados neste intento.

A aquisição de parâmetros hidráulicos do solo, como a CCAS, seja em campo ou laboratório, muitas vezes é dispendiosa, tanto em tempo quanto em mão de obra, inviabilizando em alguns casos esse tipo de determinação. Dado esse fato, as funções de pedotransferência, que permitem obter parâmetros do solo de maneira indireta, tornam-se úteis. Nesse cenário insere-se a modelagem inversa, que nada mais é que a obtenção de determinada variável pela solução de um problema matemático inverso. Em outras palavras, parte-se do efeito e chega-se à causa, ao invés da análise da causa para se chegar ao efeito.

O modelo Hydrus-1D é bastante utilizado na obtenção de parâmetros hidráulicos do solo, como condutividade hidráulica e variáveis do modelo de van Genuchten, a partir de problemas inversos. Para tanto, o usuário insere como dados de entrada a evolução da umidade ou do potencial mátrico no tempo e, então, tem-se a base para a simulação.

Diante do exposto, partiu-se da hipótese de que o modelo Hydrus-1D, por estar fundamentado em processos físicos, simula os parâmetros da equação de van Genuchten e, por consequência, a CCAS de um Argissolo de modo mais coerente com as condições de campo que aqueles obtidos em laboratório, além de reduzir o tempo e o labor do procedimento. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi obter em Argissolo os parâmetros da equação de van Genuchten por meio do problema inverso com Hydrus-1D, como também em laboratório, e efetuar as respectivas comparações e inferências.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água no solo

Uma vez que, do ponto de vista agrônômico, o solo constitui um reservatório de água para as plantas, é de suma importância o conhecimento da relação solo-água, pois tal entendimento permite identificar as correlações entre práticas de manejo de água e produtividade das culturas (SILVA; LIBARDI, 2000). Durigon e van Lier (2011) ainda destacam que o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, tais como retenção e condução da água, é importante para a modelagem na hidrologia, meteorologia e produção vegetal.

Pode-se dizer que, basicamente, o solo é composto por duas partes: a sólida ou matriz e a não ocupada por sólidos, nomeada de espaço poroso do solo. O espaço poroso é preenchido por quantidades dinamicamente variáveis de uma solução aquosa denominada água do solo ou, ainda, solução do solo; bem como por uma solução gasosa ou ar do solo. Caso o solo tenha seus poros completamente preenchidos por água, o solo é dito saturado (LIBARDI, 2012).

Richards (1965) classificou os poros do solo em macroporos, aqueles com diâmetro maior ou igual a 50 μm ; e microporos, aqueles com diâmetro menor do que 50 μm . Os macroporos estão associados à movimentação da água no solo; já os microporos são responsáveis pela retenção de água (REICHARDT; TIMM, 2012).

A retenção de água no solo está associada a dois fenômenos: adsorção, em que a água é retida na superfície dos sólidos do solo devido a interações de natureza molecular; e capilaridade, em que a água é retida nos chamados poros capilares numa interface sólido-água-ar, sendo função da tensão superficial e ângulo de contato da água com os sólidos. Partindo da condição de saturação, em uma situação de drenagem livre, as forças capilares são dominantes e, à medida que o solo seca, a adsorção adquire efeito mais marcante (LIBARDI, 2010).

No que diz respeito à sua movimentação no solo, a água se desloca de pontos de maior energia para pontos de menor energia, para assim atingir um estado energético mínimo (DUARTE *et al.*, 2015). O estado energético em cada ponto é determinado pela energia potencial, expressa em diferença de potencial, e que pode ser definida como a quantidade de trabalho necessária para transferir, de forma reversível e isotérmica, uma quantidade infinitesimal de água do estado de referência para a fase líquida do solo em um ponto

considerado. Assume-se como estado de referência um depósito hipotético de água pura, livre, sob pressão atmosférica, mesma temperatura da água no solo e elevação de referência fixa (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008).

O potencial total (ϕ_t) da água no solo é soma dos componentes potencial gravitacional (ϕ_g), de pressão (ϕ_p), mátrico (ϕ_m) e osmótico (ϕ_{os}). O potencial gravitacional nada mais é do que a atração imposta pela gravidade sobre a água do solo, sendo sempre igual à distância do ponto em questão até o plano adotado como referência. O potencial de pressão, que somente ocorre em condição de solo saturado, consiste na diferença de pressão da solução do solo entre os pontos considerados. Já o potencial mátrico é relacionado com as forças de adsorção e capilaridade, consistindo na atração que a matriz (sólidos) do solo impõe à água; e, por fim, o potencial osmótico é resultante da diferença entre a concentração de solutos na água do solo e água pura (KLEIN, 2014).

Uma propriedade chave na dinâmica da água no solo é a condutividade hidráulica que, segundo Gonçalves e Libardi (2013), exprime a facilidade com que a água se movimenta por seu espaço poroso. Portanto, a importância desta variável é ressaltada pela sua influência sobre fatores relacionados com o movimento da água no solo, como a drenagem, a produção das culturas e a preservação do solo e do ambiente.

Henry Darcy foi o primeiro a estudar e estabelecer uma equação que quantifica o fluxo de água em meio poroso. Em 1856, ele usou colunas de areia saturada com água, conectadas com reservatórios de água mantidos em níveis constantes e estabeleceu que a quantidade de água que passa pelo meio poroso por unidade de tempo é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008). A constante de proporcionalidade foi denominada condutividade hidráulica (LIBARDI, 2012).

Buckingham (1907) estudou o movimento da água em meio poroso não saturado, chegando ao que hoje conhecemos como equação de Darcy-Buckingham. Dessa forma, fora estabelecida a relação entre condutividade hidráulica, teor de água no solo e potencial mátrico (LIU, 2017). Já Richards (1931), trabalhando com o princípio da conservação das massas, relacionou a equação da continuidade com a equação de Darcy-Buckingham e obteve a equação geral que descreve o movimento da água no solo não saturado, conhecida como equação de Richards, vista a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K \left(\frac{\partial \phi_t}{\partial x} \right) \right], \quad (1)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado ($L T^{-1}$), ϕ_t é o potencial total da água no solo (L), e x é a coordenada espacial (L).

Quando a determinação da condutividade hidráulica é feita em condição de solo saturado, obtém-se K_0 ou condutividade hidráulica do solo saturado. Já no solo não saturado, obtém-se a função $K(\theta)$, que relaciona a condutividade hidráulica com dependência da umidade do solo (CARVALHO, 2002).

De forma geral, os métodos de obtenção da constante condutividade hidráulica podem ser agrupados em diretos ou indiretos. Os métodos indiretos estabelecem relação entre a condutividade hidráulica e propriedades do solo tais como textura, densidade e porosidade (exemplo, modelagem matemática). Já nos métodos diretos, a variável é determinada experimentalmente em condições de laboratório ou campo – por exemplo, permeâmetro de carga constante em laboratório e método do perfil instantâneo no campo (MARQUES *et al.*, 2008).

2.2 Curva característica de água no solo e a equação de van Genuchten (1980)

A relação entre o potencial mátrico (ϕ_m) e o conteúdo volumétrico de água no solo (θ) é importante na descrição do seu comportamento hídrico (LUCAS *et al.*, 2011), sendo essencial para estudos das relações solo-água (SILVA *et al.*, 2006). Tal relação pode ser expressa matematicamente por $\theta = f(\phi_m)$ (ALMEIDA *et al.*, 2015). A representação gráfica dessas funções é denominada curva característica da água no solo - CCAS (REICHARDT; TIMM, 2012), e auxilia na determinação do teor de água disponível e atual no solo, além de outras variáveis básicas à execução do manejo adequado da irrigação (COSTA *et al.*, 2008), indicando práticas mais adequadas de produção agrícola (MACHADO *et al.*, 2008). Cita-se ainda que, segundo Dexter e Bird (2001), o ponto de inflexão da CCAS corresponde ao teor de água na capacidade de campo, condição de umidade em que o solo não perde mais água por gravidade.

Ademais, permite calcular o índice S a partir da inclinação da reta tangente ao seu ponto de inflexão (DEXTER, 2004), possibilitando classificar o solo quanto à sua qualidade estrutural em muito bom ($S \geq 0,050$); bom ($0,050 > S \geq 0,035$); ruim ($0,035 > S \geq 0,02$) e muito ruim ($S < 0,02$) (DEXTER; CZYZ, 2007).

Diversos são os métodos de obtenção da CCAS, tanto em campo quanto em laboratório, relatados na literatura (COSTA *et al.*, 2008). Entretanto, o método mais empregado é o que utiliza o extrator de pressão de Richards (RICHARDS; FIREMAN, 1943). Nesse método, as amostras de solo, com estrutura preservada ou não, previamente saturadas, são postas em contato a uma placa porosa, também saturada, e acomodadas em uma câmara onde diferentes valores de pressão são aplicados; a extração da água se dá por diferença de potencial entre a placa e a amostra de solo (CARDUCCI *et al.*, 2011). A diferença entre a massa da amostra antes e depois do procedimento retorna o valor da umidade remanescente, em outras palavras, a quantidade de água, em unidades de massa, retida na amostra com uma energia maior do que a aplicada (PIRES, 2002).

Comumente, a CCAS é descrita por uma equação empírica, com obtenção dos parâmetros por ajuste não linear. Diversos modelos empíricos têm sido utilizados para o ajuste dos dados referentes à CCAS, como os propostos por Brooks e Corey (1964), van Genuchten, (1980) e Hutson e Cass (1987). O modelo de van Genuchten (1980) (Equação 2), com cinco parâmetros empíricos (θ_s , θ_r , α , m e n), é um dos mais utilizados, por se ajustar a dados advindos de uma ampla variedade de solos (XIANG-WEI *et al.*, 2010). Uma CCAS pode ser considerada igual a outro caso nenhum dos parâmetros da equação de van Genuchten difira (JORGE; CORÁ; BARBOSA, 2010).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\phi_m|^n)]^m}, \quad (2)$$

em que θ corresponde ao conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (m), α um escalonador do ϕ_m ($-1/\phi_m$), m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva.

Quanto aos parâmetros da equação de van Genuchten, o θ_s corresponde à umidade do solo na saturação, isto é, no potencial mátrico igual a zero. Sua determinação, segundo van Genuchten (1980), pode ocorrer experimentalmente, por exemplo, gravimetricamente, ou seja, pela determinação da quantidade de água presente na massa do solo saturado.

O parâmetro θ_r , que segundo Castro *et al.* (2002) não pode ser determinado experimentalmente, refere-se à situação em que a variação da umidade com a variação do potencial mátrico é igual a zero, portanto, quando se aproxima ao máximo da condição de

solo seco. Embora conceitualmente distintos, pode-se utilizar o valor da umidade do solo no potencial mátrico de -1500 kPa (considerado o ponto de murcha para a maioria das espécies cultivadas) para definir o valor da umidade residual θ_r (VAN GENUCHTEN, 1980).

Ainda segundo Castro *et al.* (2002), o parâmetro α está associado ao inverso do valor de potencial mátrico em que ocorre a entrada de ar no maior poro do solo. Os demais parâmetros (m e n) não têm significado físico aparente; entretanto, para van Genuchten (1980), o parâmetro n é um índice da distribuição dos poros por tamanho, portanto, relacionado com a inclinação da curva característica de água no solo.

2.3 Modelagem inversa: o modelo Hydrus-1D

A determinação de parâmetros hidráulicos do solo em campo muitas vezes não é viável devido à sua variabilidade espacial, além do fato de que as limitações instrumentais tornam a medição e as análises demoradas e dispendiosas (SINGH; REN; KANG, 2010). Dessa forma, é frequente a estimativa de parâmetros hidráulicos do solo de maneira indireta, por meio das funções de pedotransferência. Nesse contexto se insere a modelagem inversa, que pode ser implementada quando se dispõe de dados medidos, como por exemplo, do conteúdo de água, a partir dos quais ajustam-se outras características hidráulicas do solo (SCARPARE *et al.*, 2011).

Como o próprio nome sugere, a resolução de um problema inverso parte da observação ou mensuração dos seus efeitos, para então chegar às suas causas. Em outras palavras, um fenômeno complexo pode ser avaliado partindo das suas implicações, ao contrário do que seria uma modelagem direta, em que se parte da análise do fenômeno propriamente dito (ENGL; HANKE; NEUBAUER, 1996).

Dane e Hruska (1983) foram os pioneiros na utilização do conceito de problema inverso a partir de dados de campo, em experimento de drenagem livre, enquanto van Dam *et al.* (1992) foram os primeiros a utilizarem essa técnica a partir de dados obtidos em laboratório, considerando amostras de solo com estrutura preservada. Em ambos os casos os autores partiram da relação entre umidade, potencial mátrico e condutividade hidráulica, obtendo parâmetros hidráulicos do solo por meio da solução da equação de Richards (1931), que descreve o movimento da água no solo não saturado.

O modelo Hydrus-1D (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013) tem seu uso amplamente difundido na obtenção de parâmetros hidráulicos do solo a partir de problemas inversos (FREIRE, 2016), explorando ainda variáveis como transferência de calor e transporte de

solutos (PINHO; MIRANDA, 2014). Este método inverso demanda a parametrização das propriedades hidráulicas do solo não saturado (SILVA JÚNIOR, 2015), em que se pode optar, por exemplo, pelo modelo de van Genuchten (1980) para descrever a curva característica de água no solo.

No que diz respeito ao seu funcionamento, o usuário do Hydrus-1D insere, por meio de uma interface gráfica, valores medidos (como de potencial mátrico ou umidade ao longo do tempo) e, como resultado do processamento, obtém a solução inversa referente à variável desejada, como condutividade hidráulica do solo e parâmetros empíricos da equação de van Genuchten (1980). Na obtenção de tais parâmetros, o Hydrus-1D lança mão do método da minimização da soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e simulados (HOPMANS *et al.*, 2002).

Na rotina de modelagem inversa de parâmetros hidráulicos do solo, o Hydrus-1D (v. 4.17) considera uma forma modificada da equação de Richards, para fluxo uniforme e unidimensional, assumindo como insignificante o efeito da fase gasosa e do gradiente térmico sobre o fluxo (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013), como visto a seguir:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[K \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S, \quad (3)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado ($L T^{-1}$), ϕ_m é o potencial mátrico (L), x é a coordenada espacial (L), α é o ângulo entre o fluxo e o eixo vertical ($\alpha = 0^\circ$ para fluxo vertical) e S é o termo sumidouro ($L^3 L^{-3} T^{-1}$).

O termo condutividade hidráulica do solo não saturado advém da equação

$$K(\phi_m, x) = K_s(x) K_r(\phi_m, x), \quad (4)$$

em que K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$) e K_r é a condutividade hidráulica relativa do solo não saturado (-).

Quanto ao modelo de van Genuchten (1980), o Hydrus-1D baseia-se na sua combinação com o modelo estatístico de distribuição de poros por tamanho (MUALEM, 1976), em que a predição de seus parâmetros se dá por meio da expressão da condutividade hidráulica do solo não saturado em função de parâmetros hidráulicos do solo (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013). Nas equações 3 e 4 tem-se, respectivamente, a expressão dos modelos de van Genuchten (1980) e Mualem (1976) tais como são implementados no Hydrus-1D:

$$\theta(\phi_m) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha \phi_m|^n]^m} & \phi_m < 0 \\ \theta_s & \phi_p > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$K(\phi_m) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2, \quad (6)$$

considerando que

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1, \quad (7)$$

em que $\theta(\phi_m)$ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$) em função do potencial mátrico (L), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($L^3 L^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (L), α um escalonador do ϕ_m (L^{-1}), m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva, $K(\phi_m)$ é a condutividade hidráulica do solo não saturado como função do potencial mátrico ($L T^{-1}$), K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado ($L T^{-1}$), S_e é a saturação efetiva, e l é o parâmetro de conexão de poros (em média 0,5 para uma gama de solos).

Para Feltrin, Paiva e Paiva (2014), apesar da sua eficiência comprovada em diversas situações relatadas na literatura, o modelo Hydrus-1D ainda carece de avaliações refinadas do seu desempenho considerando condições específicas de campo e laboratório. Silva Júnior *et al.* (2013) também salientam a necessidade de avaliações da eficiência do modelo, embora tenham chegado a estimativas coerentes de parâmetros hidráulicos do solo em um Latossolo Vermelho, em Minas Gerais, considerando as camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,6 m.

Silva Júnior (2015), utilizando o Hydrus-2D para descrever o fluxo unidirecional de água no solo e considerando o modelo de van Genuchten, comparou curvas características de água no solo obtidas utilizando extrator de placa porosa de Richards e pelo problema inverso (alimentado por dados de infiltração acumulada), em quatro solos tropicais, encontrando concordância entre as curvas laboratório e modeladas. Pinho e Miranda (2014), estudando o movimento de água e solutos em colunas preenchidas com solos tropicais, coletados em Piracicaba, concluíram que o Hydrus-1D é uma ferramenta útil para a descrição do comportamento hídrico desses solos.

2.4 Método do perfil instantâneo

Segundo Hurtado, Cichota e van Lier (2005), o método do perfil instantâneo, baseado em experimento de drenagem interna, é um dos mais bem-sucedidos na medição da condutividade hidráulica (K), comumente expressando a variável em função da umidade volumétrica – $K(\theta)$ – ou ainda em função do potencial mátrico – $K(\phi_m)$.

O método do perfil instantâneo permite a obtenção da função $K(\theta)$, em campo, a partir do acompanhamento da variação temporal da umidade e, por conseguinte, do potencial mátrico durante o processo de drenagem de uma parcela previamente saturada, em que o fluxo na superfície do solo é zero (GHIBERTO; MORAES, 2011), baseando-se na equação de Richards (1931).

A grande vantagem do método é a obtenção de medidas diretas no campo, cujos valores de condutividade hidráulica são mais condizentes com a realidade do que aqueles obtidos em laboratório (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Para van Lier (2002), outras vantagens seriam não ter de aguardar o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico, bem como o fato de o método permitir a análise em um grande intervalo de umidades. Ainda segundo o autor, como desvantagens do método pode ser citada a morosidade, uma vez que a implementação e acompanhamento de um experimento desta natureza demanda tempo e mão de obra consideráveis.

O desenvolvimento do método do perfil instantâneo é creditado a Watson (1966), em experimento com colunas de solo de textura arenosa. O autor discorre que, através do procedimento, é possível realizar a determinação da velocidade de escoamento ou densidade de fluxo, gradiente de potencial e conteúdo de água em qualquer instante depois do início do processo de drenagem, permitindo obter o respectivo valor de condutividade hidráulica.

Mais tarde, Hillel *et al.* (1972) propuseram um passo a passo para obtenção da função $K(\theta)$ em campo a partir de parcela de solo previamente saturada. Os autores descrevem a utilização de regressões de umidade versus tempo e potencial versus tempo para obter as variáveis densidade de fluxo e gradiente de potencial da equação de Richards (1931) e, posteriormente, a condutividade hidráulica..

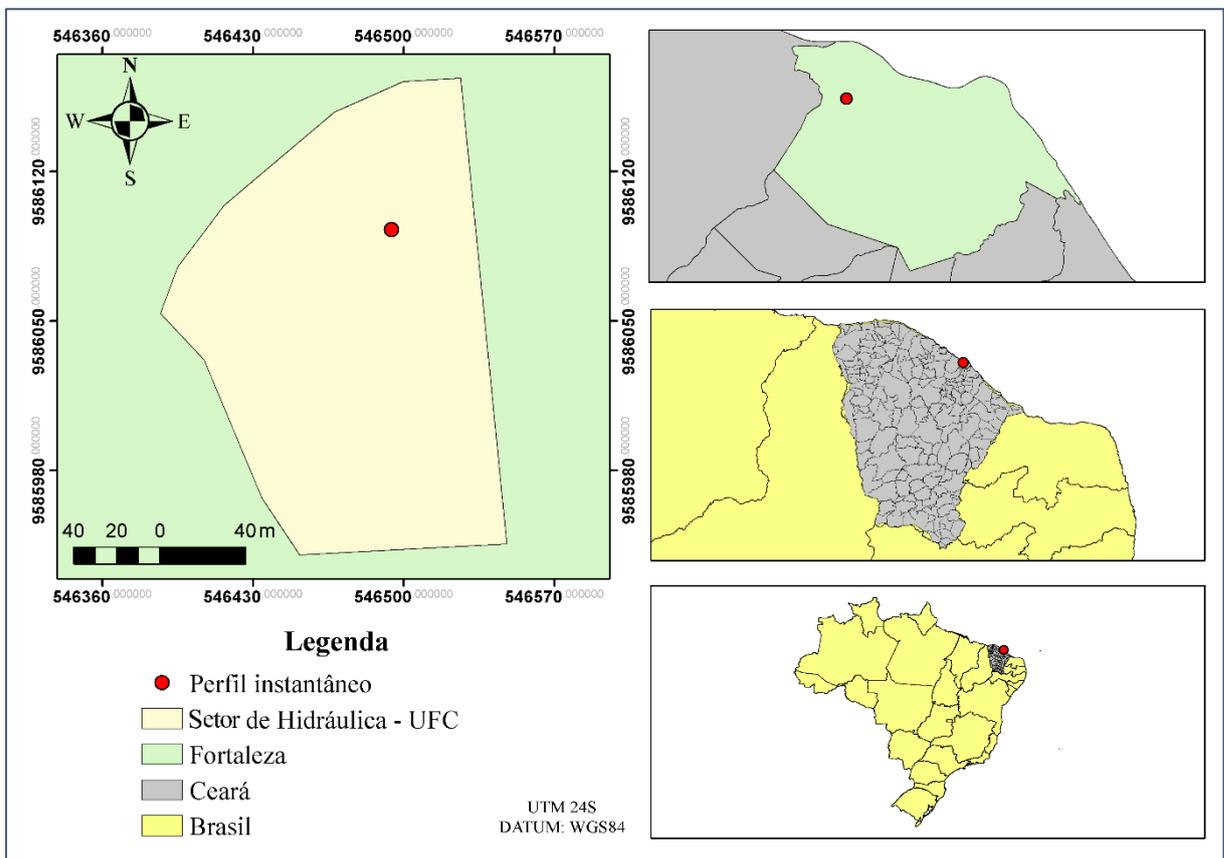
Libardi *et al.* (1980) abordaram a simplificação do método do perfil instantâneo considerando o gradiente de potencial unitário, o que implica maior praticidade, já que, nessa situação, o monitoramento da umidade ou potencial mátrico se dá apenas na profundidade onde se quer medir a condutividade hidráulica, sem a necessidade de monitorar outras profundidades para a obtenção do gradiente de potencial.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Trabalhos de campo e laboratório

Para os trabalhos de campo, considerou-se um Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2013) localizado no Setor de Hidráulica, no Campus do Pici Professor Prisco Bezerra, uma das unidades físicas da Universidade Federal do Ceará, na cidade de Fortaleza – Ceará. No local foi instalado o experimento tipo perfil instantâneo, especificamente nas coordenadas UTM de 9586090 N e 546494 L (Figura 1).

Figura 1 – Localização do experimento tipo perfil instantâneo



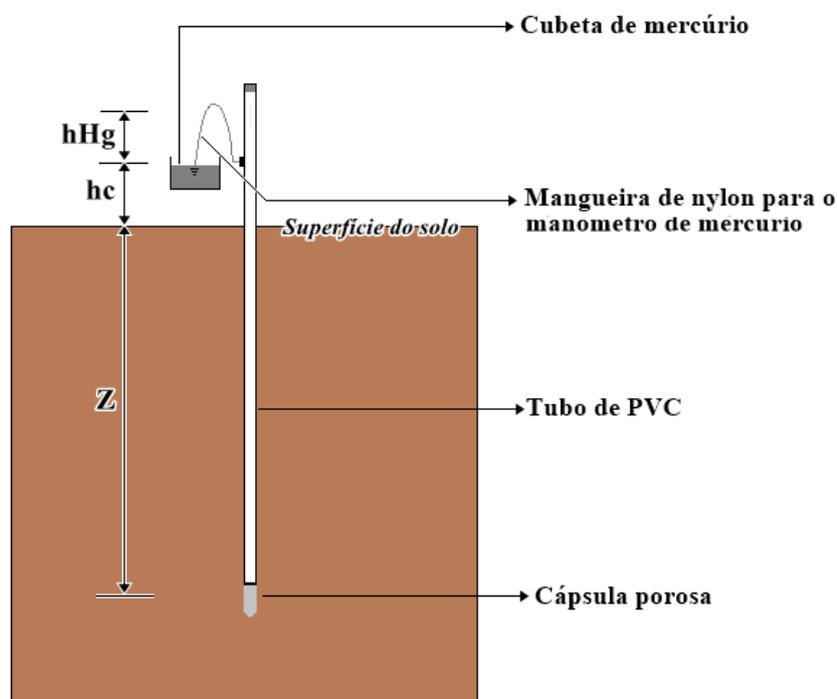
A opção pelo experimento tipo perfil instantâneo se deu pelo fato de que este ensaio permite acompanhar a variação do potencial mátrico da água no solo durante o processo de drenagem, parâmetro que serviu de base para a modelagem inversa com o modelo Hydrus-1D, descrita posteriormente.

O experimento tipo perfil instantâneo seguiu a metodologia proposta por Hillel *et al.* (1972), e se deu em uma parcela circular com diâmetro de 3 m e profundidade de 0,6 m. A parcela experimental foi delimitada por lona plástica, para assim garantir o fluxo unidirecional da água.

Foram instaladas e distribuídas no entorno do centro da parcela experimental seis baterias com três tensiômetros cada, nas profundidades de 0,20, 0,35 e 0,50 m. A profundidade alvo deste estudo foi a de 0,35 m, profundidade efetiva do sistema radicular da maioria das espécies cultivadas, sendo os demais tensiômetros necessários para a aquisição de dados referentes ao gradiente de potencial para resolução da equação de Richards (1931).

Os tensiômetros utilizados (Figura 2) foram de tubo PVC rígido, com cápsulas porosas de cerâmica e uma tubulação de *nylon*, com diâmetro interno de 0,002 m, utilizada para confecção do manômetro de mercúrio. A opção por tensiômetros com manômetros de mercúrio se deu por sua maior sensibilidade frente às variações de conteúdo de água no solo.

Figura 2 – Representação do esquema de instalação e utilização do tensiômetro empregado



Legenda: vide equação (8)

Após o procedimento de instalação dos tensiômetros a parcela foi umedecida para garantir a saturação do solo e, posteriormente, foi coberta com uma lona plástica para evitar qualquer fluxo de água pela superfície, seja por evaporação ou infiltração. O tempo zero ($t = 0$) de redistribuição de água no perfil foi considerado como sendo o instante em que a lâmina

de água drenou da superfície do solo. Após as leituras dos tensiômetros em $t = 0$, durante as primeiras 24 horas, as leituras foram feitas a cada duas horas. A partir de então, as leituras foram realizadas a cada 24 horas, até quando a drenagem praticamente cessou.

As leituras dos tensiômetros foram convertidas em potencial mátrico (ϕ_m , m) para assim acompanhar a sua variação no tempo, por meio da equação (8):

$$\phi_m = -12,6h_{Hg} + h_c + z, \quad (8)$$

em que h_{Hg} é a altura da coluna de Hg (m), h_c a altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo (m), z a profundidade de instalação do centro da cápsula porosa do tensiômetro (m).

Também foram coletadas amostras com estrutura não preservada para caracterização do solo em questão quanto à sua composição granulométrica (Tabela 1), com argila mensurada pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986), e quanto à densidade de partículas (BLAKE; HARTGE, 1986a).

Tabela 1 – Fração areia, silte e argila, classificação textural e densidade do solo nas camadas do perfil.

Camadas (m)	Areia ----- g kg ⁻¹	Silte ----- g kg ⁻¹	Argila ----- g kg ⁻¹	Classe textural	Densidade do solo (kg m ³)
0 – 0,275	873	40	87	Areia	1730
0,275 – 0,425	843	75	82	Areia-franca	1703
0,425 – 0,600	585	75	340	Franco-argilo-arenosa	1581

Fonte: Adaptado de Freire (2016).

Coletaram-se, em adição, amostras com estrutura preservada para a construção da curva característica de água no solo – CCAS (KLUTE, 1986) e determinação da densidade do solo (BLAKE e HARTGE, 1986b).

As curvas características de água no solo foram determinadas em um total de quatro repetições. No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo, obtida pela equação 9:

$$\alpha = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}, \quad (9)$$

sendo α a porosidade do solo (m³ m⁻³) e ρ_s e ρ_p a densidade do solo e de partículas (kg m⁻³), respectivamente

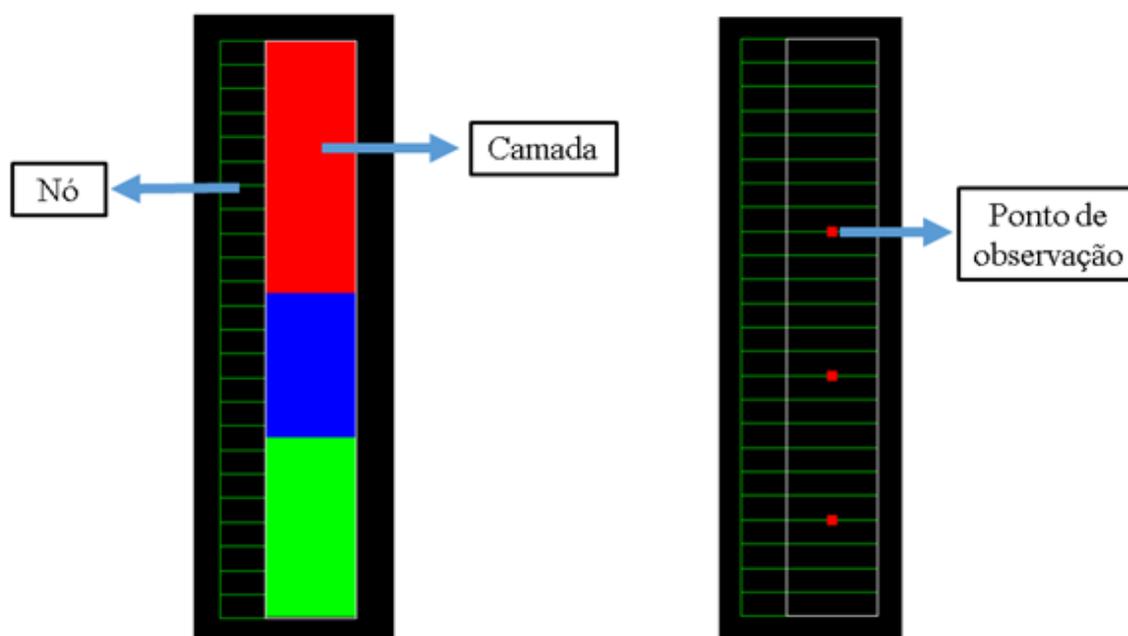
Nos pontos de baixa tensões da CCAS (0,20;0,40; 0,60; 0,80 e 1 m), o funil de Haines foi utilizado para estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo; para os demais pontos (3,3; 10; 70 e 150 m), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). O ajuste dos dados se deu de acordo com o modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) (Equação 2). Os dados foram ajustados pelo software Table Curve 2D, versão trial 5.01 (SYSTAT, 2014). Foi utilizado o método iterativo de Newton-Raphson para o ajuste dos parâmetros empíricos, com dependência do parâmetro m com o n .

Obteve-se a curva de umidade no campo a partir dos potenciais mátricos lidos com os tensiômetros no campo e da curva característica de água construída em laboratório (ϕ_m campo-curva de laboratório)

3.2 Modelagem inversa com o Hydrus-1D

Utilizando a versão 4.17 do Hydrus 1-D (ŠIMŮNEK *et al.*, 2013), o perfil do solo foi dividido em três camadas (0-0,275 m; 0,275-0,425 m e 0,425-0,6 m) com 25 nós e três pontos de observações correspondentes às profundidades de instalação dos tensiômetros (0,20 m; 0,35 m e 0,50 m) (Figura 2). Para realização das iterações foram inseridos os dados de variação do potencial mátrico no tempo, desde 0 a 330 h.

Figura 3 – Divisão do perfil de solo em camadas e nós e alocação dos pontos de observação considerados no procedimento de modelagem inversa



Além disso, o software demanda a inserção do valor inicial, máximo e mínimo de parâmetros hidráulicos do solo para cada camada (Anexo A), referências a partir das quais toda a modelagem se baseia. Ademais, também se considerou como condições de contorno fluxo nulo na superfície do solo e drenagem livre na profundidade de 0,6 m. Também se configurou o potencial mátrico inicial da estimativa, para cada profundidade e repetição (Anexo B), com valores o mais próximo possível de zero, em que se tem o solo saturado.

Na profundidade de 0,35 m, alvo deste estudo, foram otimizados os parâmetros θ_r , θ_s , α e n do modelo de van Genuchten (1980), com o parâmetro m obtido, posteriormente, em função de n ($m = 1 - 1/n$).

3.3 Análise dos dados

Para efeito de comparação entre os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) para a profundidade de 0,35 m, consideraram-se as curvas características de água no solo obtidas em laboratório, no total de quatro repetições, contrastadas com as seis curvas obtidas pelo processo de modelagem inversa a partir dos dados de potencial mátrico no tempo. A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Jarque-Bera e a comparação entre as médias se deu pelo teste t de Student para duas amostras independentes, ambos a 5% de significância. Também foram construídos gráficos com as curvas médias de laboratório e a simulada pelo Hydrus-1D.

Em adição, foram construídas as curvas ajustadas de potencial mátrico versus tempo e de umidade versus tempo a fim de contrastar as de campo com as simuladas pelo Hydrus-1D. A performance do Hydrus-1D foi verificada considerando os índices coeficiente de eficiência – E (NASH; SUTCLIFFE, 1970), equação 10, e raiz quadrática do erro médio – RMSE, equação 11.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}, \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n - 1}}, \quad (11)$$

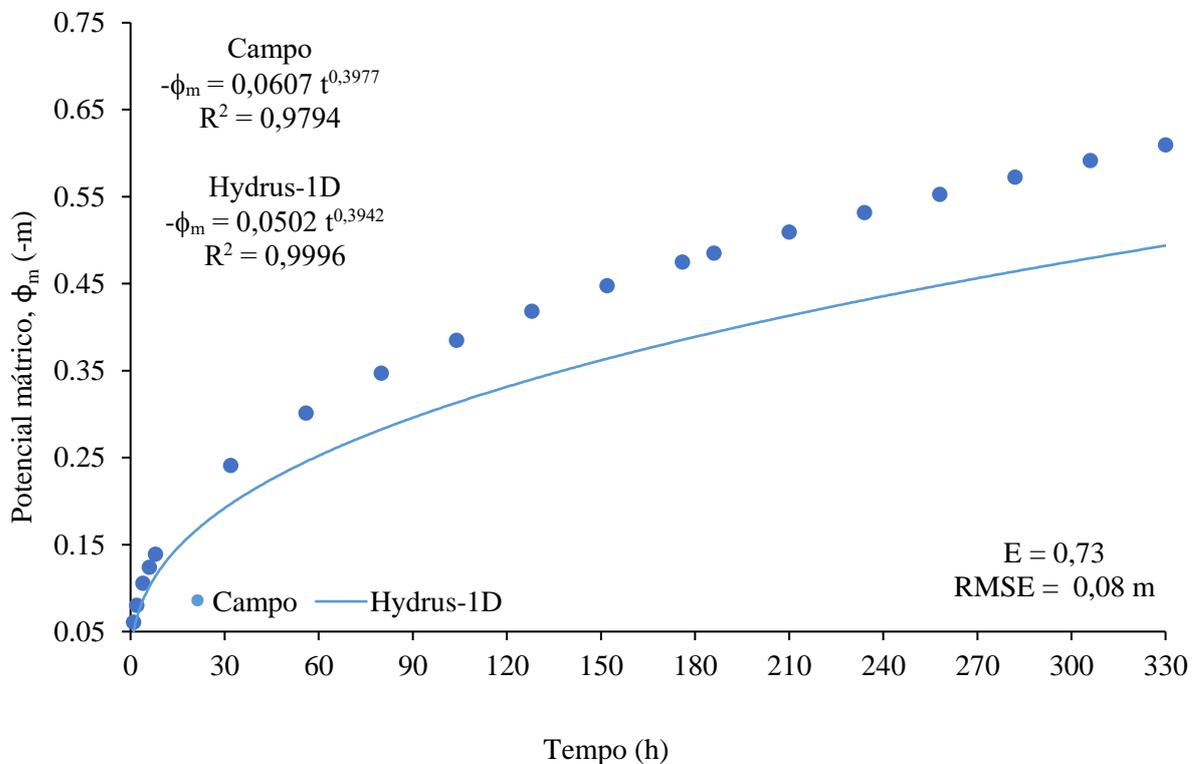
em que O_i corresponde aos dados de potencial mátrico obtidos em campo pelo método do perfil instantâneo e P_i aos dados de potencial mátrico obtidos por modelagem; n é o número de observações e \bar{O} a média dos valores obtidos em campo. Igual procedimento foi adotado para comparar as curvas de umidade no tempo por ϕ_{mcampo} -curva de laboratório e por modelagem inversa.

Para Machado *et al.* (2003) o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (E) é um dos mais eficientes para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. Este índice pode variar desde o infinito negativo até 1, sendo a unidade o indicativo da maior similaridade entre os conjuntos de dados (ASCE, 1993). Já o RMSE é utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, apresentando os valores do erro na mesma unidade da medida da variável analisada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do potencial mátrico no tempo obtida em campo e simulada por modelagem inversa está apresentada na Figura 4. Verificou-se que a modelagem inversa apresentou desempenho satisfatório na predição do potencial mátrico da água no solo ao longo do tempo, dado o baixo RMSE e valor de E próximo da unidade, evidenciando boa concordância entre dados medidos e simulados.

Figura 4 - Potencial mátrico no tempo em campo e por modelagem inversa com Hydrus-1D.

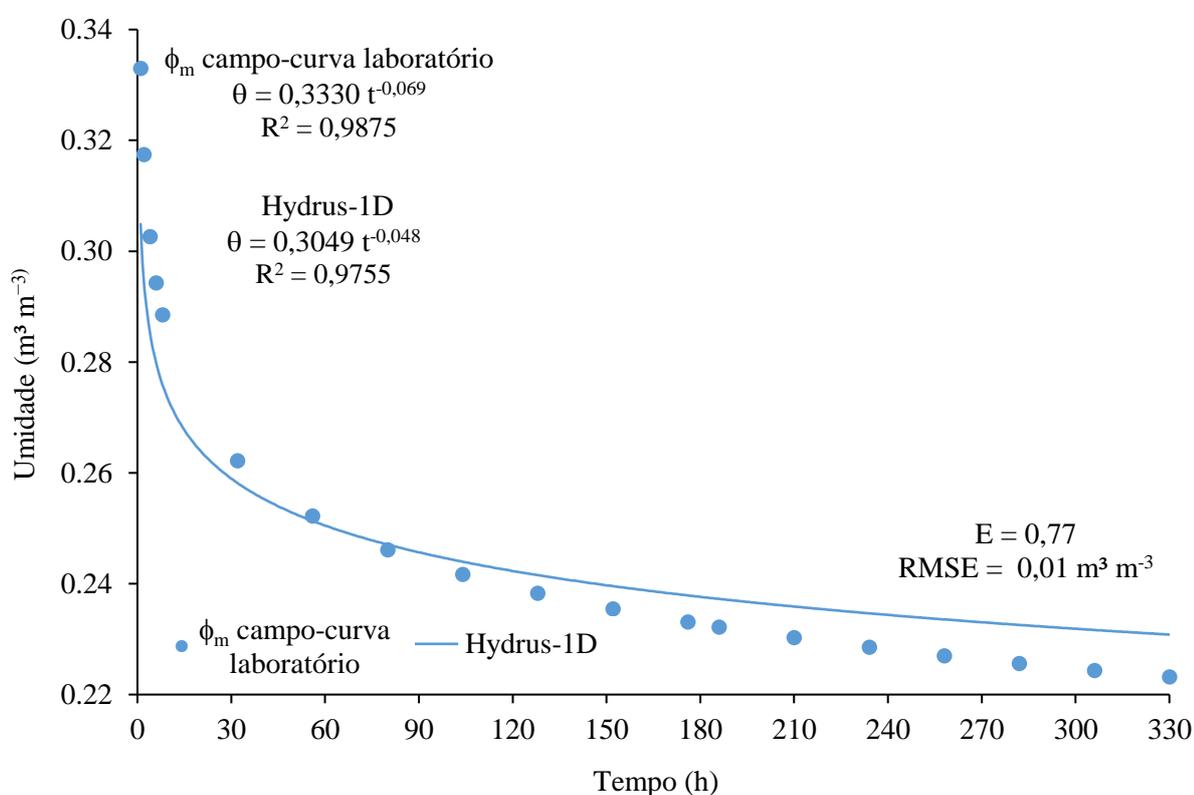


O valor da raiz quadrada do erro médio (RMSE) próximo de zero evidencia erro pequeno entre os dados simulados pelo Hydrus-1D e os observados em campo (MEIRA, 2010; PETERS *et al.*, 2014). No experimento em análise, o Hydrus-1D superestimou o potencial mátrico no tempo e foi tanto melhor quanto mais próximo da saturação do solo. Mesmo com aumento do erro à medida que ocorreu a redistribuição de água no solo até a situação de capacidade de campo, o erro médio nessa faixa de observação foi baixo, indicando a robustez da modelagem inversa na predição da energia da água no solo em sua faixa mais úmida. Com relação ao coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (E), um dos critérios estatísticos importantes para avaliar o poder preditivo dos modelos hidrológicos (MACHADO

et al., 2003), o valor encontrado, 0,73, demonstra a boa similaridade entre dados medidos em campos e ajustados pelo modelo inverso.

Na Figura 5 tem-se a umidade no tempo, obtida em campo e simulada por modelagem inversa. A exemplo da simulação da evolução do potencial mátrico ao longo do tempo, a resolução por modelagem inversa se deu com bom desempenho, uma vez que o índice de concordância de Nash-Sutcliffe (E) foi igual a 0,77. Quanto ao RMSE, o valor observado foi muito baixo, $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando que o Hydrus-1D foi eficiente na estimativa da umidade do solo no tempo experimental.

Figura 5 - Umidade no tempo por ϕ_m campo-curva de laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D.



Apesar das diferenças serem pequenas, a umidade foi estimada com menor valor nas primeiras 70 horas de redistribuição de água no solo, e com maior valor deste tempo até o final do experimento, quando se utilizou o protocolo da modelagem inversa. Como será discutido posteriormente, dadas as condições de contorno, é normal que a saturação da amostra de solo seja conseguida em laboratório – o que dificilmente é verificado no campo, como será discutido posteriormente – daí o porquê da maior diferença entre ambos os protocolos na estimativa da porosidade total do solo quando se combina o potencial mátrico de campo com a curva característica de água obtida em laboratório.

Constatou-se que, embora a curva característica de água no solo construída em laboratório tenha diferido significativamente da obtida pelo Hydrus-1D a partir de dados de campo, como será visto adiante, houve compensação pela diferença dos potenciais mátricos por ambos os procedimentos (Figura 4), de modo que as curvas de umidade no tempo se tornaram muito semelhantes por ambos os procedimentos. No entanto, a modelagem inversa se torna muito mais vantajosa pelo fato de eliminar o procedimento das coletas de solo e a construção da curva característica de água no solo a partir delas em laboratório – um procedimento que demanda muito mais tempo que o experimento tipo perfil instantâneo em campo.

Consta na Tabela 2 a comparação das médias dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) pelo teste *t* de Student a 5% de significância, considerando a obtenção das curvas características de água no solo em laboratório e por modelagem inversa no campo com Hydrus-1D. Observou-se que os cinco parâmetros do modelo diferiram significativamente considerando os dois métodos de obtenção da CCAS.

Tabela 2 - Médias dos parâmetros da equação de van Genuchten, obtidas em laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D em campo, comparadas pelo teste *t* de Student a 5% de significância.

θ_s (m ³ m ⁻³)		θ_r (m ³ m ⁻³)		α (m ⁻¹)		<i>n</i>		<i>m</i>	
Lab	Hydrus	Lab	Hydrus	Lab	Hydrus	Lab	Hydrus	Lab	Hydrus
0,357	0,305	0,079	0,150	11,398	5,062	1,338	1,827	0,252	0,435
14,008*		9,913*		7,164*		2,627*		3,240*	

Lab – Laboratório; Hydrus: Hydrus-1D; * diferença significativa pelo teste *t* de Student a 5% de significância; *t* tabelado a 5% de significância = 2,306.

É importante ressaltar que estatisticamente duas curvas podem ser iguais mesmo que os seus parâmetros difiram. Sob o aspecto matemático, Jorge, Corá e Barbosa (2010), relatam que duas curvas características de água no solo podem ser consideradas iguais quando os seus parâmetros não diferem, o que não foi verificado no caso em apreço. Portanto, pode-se afirmar que as curvas obtidas em laboratório são distintas das obtida por modelagem inversa com o Hydrus-1D. Essa afirmação é importante do ponto de vista prático, visto que ambas as curvas, por serem ferramentas importantes no manejo de irrigação, orientariam de modo distinto a tomada de decisão no tocante ao manejo de água no solo.

No que diz respeito ao parâmetro θ_s , que para o caso de laboratório correspondeu à porosidade total do solo, nota-se que o valor médio encontrado é maior que o obtido pela solução inversa. Isso acontece porque as amostras com estrutura preservada, utilizadas no

procedimento analítico laboratorial, em geral, são saturadas – situação dificilmente alcançada em campo, daí o porquê de na modelagem inversa o valor ser inferior.

A assertiva é corroborada por Ghiberto (1999), que encontrou valores de umidade de saturação em campo variando de 70 a 90% da porosidade total calculada. Portanto, era esperado que este parâmetro otimizado a partir de dados de campo apresentasse menor valor – porém o mais fiel à real situação de máxima umidade obtida no campo. Assim, segundo a modelagem inversa com o Hydrus-1D, houve a saturação de apenas 85% dos poros do solo, o correspondente à umidade de $0,305 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

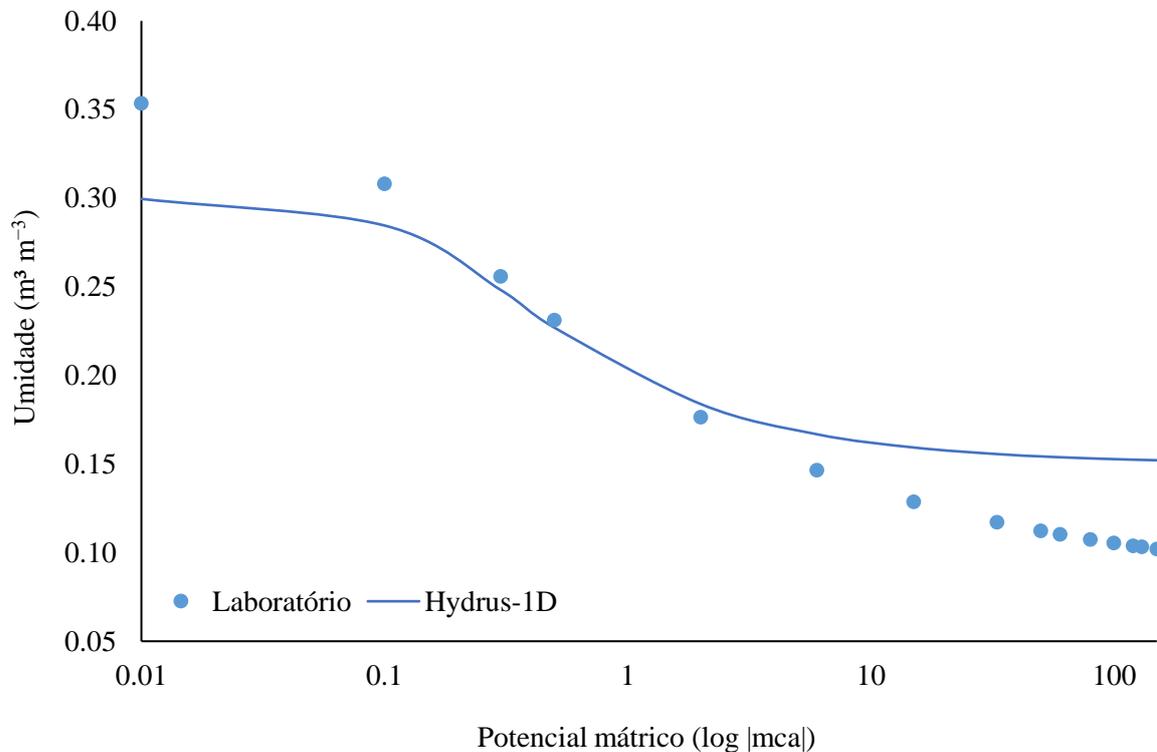
Ainda a respeito da diferença nos valores de saturação, Basile *et al.* (2003) relatam que no laboratório, os atributos hidráulicos do solo são obtidos em amostras de solo impondo um estado estacionário ou condições transitórias que diferem essencialmente das condições de contorno dos experimentos em campo. Embora as medições em laboratório sejam mais diretas e geralmente mais fáceis que as de campo, a sua validade deve ser relacionada ao tamanho da amostra de solo, que tem que representar adequadamente a heterogeneidade do meio estudado. Neste caso, a escolha do tamanho apropriado da amostra deve assumir, na perspectiva de uma comparação entre métodos de campo e laboratório, a praticidade sem perder o foco na representatividade da amostra em relação à situação de campo.

A média do parâmetro θ_r obtida pelo Hydrus-1D foi superestimada em relação à obtida em laboratório. Aqui cabe salientar que o modelo foi alimentado com dados adquiridos durante um período de 330 h de drenagem, até que o solo atingisse a condição de capacidade de campo ($\partial\theta/\partial t$ insignificante). Assim, supõe-se que, dada a inserção de dados advindos de solo úmido, o modelo teve dificuldades em estimar o comportamento hidráulico do solo seco, o que é evidenciado pelo elevado valor de umidade residual. Portanto, cabem a estudos futuros, inclusive com outros instrumentos, utilizarem dados coletados em maior amplitude de tempo, visando verificar como o Hydrus-1D se comporta em relação ao parâmetro θ_r .

O parâmetro empírico α , que representa o inverso do potencial mátrico em que o poro de maior tamanho no solo cavita, teve menor média quando obtido pelo Hydrus-1D em comparação à obtenção em laboratório. Assim, pode-se inferir que o modelo prevê que no solo esse fenômeno se dá em potencial mátrico menor do que explícito pelo α de laboratório. Já os parâmetros empíricos n e m , relacionados com o formato da curva – uma vez que estão relacionados à distribuição dos poros por tamanho –, também diferem por ambos os métodos, tornando evidente a divergência entre curvas características de água no solo obtidas em laboratório e por modelagem inversa com o Hydrus-1D.

Na Figura 6 estão apresentadas as curvas características de água no solo, tanto obtidas em laboratório quanto por modelagem inversa com o Hydrus-1D. Assim como explanado anteriormente, nota-se menor valor de umidade na saturação na curva média obtida pelo problema inverso, reforçando a afirmação de que a saturação dos poros não é alcançada em condições de campo. Portanto, é razoável que a curva simulada pelo Hydrus-1D, particularmente desde a saturação à capacidade de campo, seja a que de fato representa o solo no campo, e não aquela construída em laboratório com condição de contorno completamente distinta da situação de campo.

Figura 6 - Curvas características de água no solo obtidas em laboratório e por modelagem inversa com Hydrus-1D no campo.



Em experimento para verificar diferenças em atributos hidráulicos em curva característica de água no solo e em laboratório, Basile *et al.* (2003) constataram que para todos casos que estudaram houve discrepância entre os valores de conteúdo de água em $\phi_m = 0$ obtidos em campo e laboratório, sendo os valores de retenção de água sempre maiores para as curvas de laboratório no intervalo entre $\phi_m = 0$ e $\phi_m = 1$ m. Para os autores, os valores mais elevados de água em $\phi_m = 0$ para amostras de solo em cilindros devem ser atribuídos à facilidade de deslocamento do ar pela amostra em condição de laboratório.

Pela Figura 6, as diferenças entre as curvas não se restringem à parte mais úmida; a parte mais seca também é visivelmente divergente, especialmente pela tendência que o modelo inverso possui, como dito anteriormente, em superestimar os valores de umidade em relação ao laboratório. Neste caso, considerando a classe textural areia-franca, em que a umidade residual deve ser baixa, ficou claro que o Hydrus-1D não foi eficiente em simular a umidade nos menores potenciais mátricos, provavelmente por os dados de entrada terem sido limitados à parte úmida do solo.

Considerando-se os resultados observados nesta pesquisa, vale destacar a percepção de pesquisadores sobre métodos de campo e de laboratório para a estimativa de atributos hidráulicos do solo. É verdade que muitos artigos no passado foram dedicados à discussão sobre a validade das propriedades hidráulicas do solo obtidas do laboratório para a inferência do comportamento hidrológico em campo e, com isso, técnicas mais baratas e menos demoradas foram pesquisadas (BASILE *et al.*, 2003). No entanto, é importante ressaltar que nem sempre há a segurança de que muitos desses protocolos reproduzam com fidelidade o que ocorre no campo, daí o porquê do incentivo de outros vieses – por exemplo, o da modelagem inversa - na tentativa da melhor percepção dos verdadeiros atributos hidráulicos do solo.

5 CONCLUSÕES

Em geral, o modelo Hydrus-1D estima os parâmetros da equação de van Genuchten e, por consequência, a curva característica de água no solo de um Argissolo de modo mais coerente com as condições de campo que aqueles obtidos em laboratório.

Desde que abastecido com dados de campo, o Hydrus-1D simula bem o comportamento do potencial mátrico e da umidade no tempo, reduzindo o tempo e o labor da obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management, Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 119, p. 429-442, 1993.

ALMEIDA, E.L.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, F.C.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; LEÃO, R.A.O. Filter paper method for the determination of the soil water retention curve. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1344-1352, 2015.

AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. **Física do Solo: Conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária – Universidade Federal do Ceará. 2008. 290 p.

BASILE, A.; CIOLLARO, G.; COPPOLA, A. Hysteresis in soil water characteristics as a key to interpreting comparisons of laboratory and field measured hydraulic properties. **Water Resources Research**, v. 39, p. 13.1-13.12, 2003.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. cap. 14, p. 377-382.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. cap. 13, p. 363–375.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media: Hydrology papers**. Fort Collins: Colorado State University, 1964. 37 p.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. Washington: USDA, 1907. 61 p.

CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; ZEVIANI, W.M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 77-86, 2011.

CARVALHO, L.A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – solos e

nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade Estadual de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CASTRO, L.G; MAIA, A.H.N.; VAN LIER, Q.J. Erros na estimativa de umidades pelo modelo de van Genuchten. *In: Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água*, 14, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: Agrisus, 2002. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/15090/1/2002AA002.PDF>>. Acesso em 09 mar. 2017.

COSTA, W.A.; OLIVEIRA, C.A.D.S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva característica de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 515-523, 2008.

DANE, J.H.; HRUSKA, S. In-Situ Determination of Soil Hydraulic Properties during Drainage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 4, p. 619, 1983.

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004.

DEXTER, A.R.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 203-212, 2001.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Wiley Interscience**, 2007.

DUARTE, S.N.; SILVA, Ê.F.F.; MIRANDA, J.H.; MEDEIROS, J.F.; COSTA, R.N.T.; GHEYI, H.R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2015. 356 p.

DURIGON, A.; VAN LIER, Q.J. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1271-1276, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2013. 353 p.

ENGL, H.W.; HANKE, M.; NEUBAUER, A. **Regularization of inverse problems: mathematics and its applications**. Dordrecht: Springer, 1996, 322 p.

FELTRIN, R.M.; PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo HYDRUS-1D e medida a campo para as condições climáticas do Sul do Brasil. *In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa*, 11, Maputo, 2013. **Anais...** Maputo: APRH, 2013. v. 1. p. 1-12.

FREIRE, A.G. **Estimativa de parâmetros hidráulicos do solo utilizando tensiometria com alguns sistemas de leitura**. 2016. 52 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. *In: KLUTE, A., ed. Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 15, p. 383-411.

GHIBERTO, P.J. **Metodologias para a obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo**. 1999. 79Fp. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GHIBERTO, P.J.; MORAES, S.O. Comparação de métodos de determinação da condutividade hidráulica em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1177-1188, 2011.

GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37 p. 1174-1184, 2013.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.K.; STILIANOV, Y. Procedure a test an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, New Brunswick, v. 114, p. 395-400, 1972.

HOPMANS, J.W.; ŠIMŮNEK, J.; ROMANO, N.; DURNER, W. Inverse modeling of transient water flow. *In: DANE, J. H.; TOPP, G., ed. Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods*. 3. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 2002. Cap 3.6.2, p. 963-1008.

HURTADO, A.L.B.; CICHOTA, R.; VAN LIER, Q.J. Parametrização do método do perfil instantâneo para a determinação da condutividade hidráulica do solo em experimentos com evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 301-307, 2005.

HUTSON, J.L.; CASS, A. A retentivity function for use in soil-water simulation models. **European Journal of Soil Science**, Cranfield, v. 38, p. 105-113. 1987.

JORGE, R.F.; CORÁ, J.E.; BARBOSA, J.C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1831-1840, 2010.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3.ed. Passo Fundo: EDIUPF. 2014. 263 p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: KLUTE, A., ed. **Methods of Soil Analysis: Part 1 - Physical and Mineralogical Methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. cap. 26, p. 635-662.

LIBARDI, P.L. Água no solo. *In*: VAN LIER, Q.J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. cap. 3. p.103-152.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. São Paulo: EDUSP, 2012. 352 p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 3, 1980.

LIU, H.H. **Fluid flow in the subsurface: history, generalization and applications of physical laws**. 28. ed. Gewerbestrasse: Springer, 2017. 230 p.

LUCAS, J.F.R.; TAVARES, M.H.F.; CARDOSO, D.L.; CÁSSARO, F.A.M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1957-1973, 2011.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva característica de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MACHADO, R.E.; VETORAZZI, C.A. XAVIER, A.C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 727-33, 2003.

MARQUES, J.D.O.; TEIXEIRA, W.G.; REIS, A.M.; CRUZ JUNIOR, O.F.; MARTINS, J.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 38, n. 2, 2008, p. 193-206.

MEIRA, D.N.O. **Avaliação de previsões de tempo do modelo ETA para subsidiar pesquisas agrícolas no Brasil**. Universidade Estadual de Campos, 2010. 11 p.

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

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

PETERS, P.H.C.R.; SILVA, B.M.; OLIVEIRA, G.C.; SILVA JUNIOR, J.J.; SILVA, E.A.; BARBOSA, S.M. Construction and performance of a simplified tension table for the determination of soil physicohydraulic attributes. **Revista de Ciências Agrárias**, Recife, v. 57, p. 95-100, 2014.

PINHO, R.E.C.; MIRANDA, J.H. Avaliação do modelo HYDRUS-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 5, 2014.

PIRES, L.F. Atenuação de raios gama como técnica auxiliar para a determinação da curva de retenção da água no solo. 2002. 146 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

REICHARDT, K; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole. 2012, 524 p.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 1, p. 318– 333, 1931.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. *In*: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. **Methods of soil analysis: Part 1 - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. 1. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1965. cap. 8, p.128-152.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 56, p. 395-404, 1943.

SCARPARE, F.V.; VAN LIER, Q.J.; VAN DAM, J.C.; BARROS, A.H.C. Otimização dos parâmetros hidráulicos do solo por meio de modelagem inversa utilizando o programa "PEST". *In*: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 33, Uberlândia. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. Disponível em: < <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/39764/1/1613-1-1.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2017.

SILVA, E.B.; LIBARDI, P.L. Propriedades hidráulicas de um solo não saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.3, p.525-529, 2000.

SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F.W.; AZEVEDO, J.A.; RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 2, p. 323-330, 2006.

SILVA JÚNIOR, J.J. **Aplicação do método inverso pelo modelo HYDRUS-2D para obtenção de propriedades hídricas de solos tropicais**. 2015. Tese (Doutorado em Recursos hídricos em sistemas agrícolas – Engenharia de água e solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA JÚNIOR, J.J.; COLOMBO, A.; SILVA, E.L. SCALCO, M.S. Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software HYDRUS-1D. **Agro@ambiente**, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 242-251, 2013.

SINGH, U.K.; REN, L.; KANG, S. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 97, n. 8, p. 1210-1220.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. **HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and**

multiple solutes in variably-saturated media, Version 4.17, Riverside: University of California Riverside, 2013.

SYSTAT SOFTWARE INC. **Table Curve 2D (Trial Version 5.01)**, 2014. Disponível em: <<http://www.sigmaplot.co.uk/downloads/trial/tablecurve2d-trial.php>>. Acesso em 25 de Abril de 2017.

VAN DAM, J.C.; STRICKER, J.N.M.; DROOGERS, P. Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions from One-Step Outflow Experiments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1042, 1992.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-897, 1980.

VAN LIER, Q.J. Análise de sensibilidade no processamento de dados de experimentos de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 869-883, 2002

XIANG-WEI, H.; MING-NA, S.; HORTON, R. Estimating van Genuchten model parameters of undisturbed soils using an integral method. **Soil Science Society of China**, Nanjing, n. 20, 2010, p. 55-62.

WATSON, K.K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, p. 709-715, 1966.

ANEXO A – Valor inicial, máximo e mínimo de parâmetros hidráulicos do solo para cada camada e repetição considerada no Hydrus-1D

Repetição	Camada (m)	Valores de referência	Dados de entrada					
			θ_r ($m^3 m^{-3}$)	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	α (m^{-1})	n	Ko ($m h^{-1}$)	l
1	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,35	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,31	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,31	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
2	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,35	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,45	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,36	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,45	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00
3	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,33	6,00	1,40	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,30	0,00	0,00
		Máximo	0,16	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,33	6,00	1,40	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,30	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,31	6,00	1,40	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,30	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,33	15,00	3,00	2,00	1,00
4	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00

Continuação

Repetição	Camada (m)	Valores de referência	Dados de entrada					
			θ_r ($m^3 m^{-3}$)	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	α (m^{-1})	n	Ko ($m h^{-1}$)	l
5	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,35	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,14	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,36	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,45	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,36	15,00	3,00	2,00	1,00
6	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,35	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,36	15,00	3,00	1,30	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,36	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,31	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,37	15,00	3,00	1,30	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,33	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,35	15,00	3,00	2,00	1,00
Curva média	0 a 0,275	Inicial	0,11	0,35	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,20	0,45	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,275 – 0,425	Inicial	0,09	0,36	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,05	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,15	0,45	15,00	3,00	2,00	1,00
	0,425 – 0,600	Inicial	0,12	0,40	6,00	1,30	0,01	0,50
		Mínimo	0,07	0,30	5,00	1,25	0,00	0,00
		Máximo	0,20	0,50	15,00	3,00	2,00	1,00

ANEXO B – Valor inicial de potencial mátrico para cada camada e repetição considerada no Hydrus-1D.

Repetição	Camada (m)	Potencial mátrico inicial (m)
1	0 a 0,275	-0,001
	0,275 a 0,425	-0,001
	0,425 a 0,600	-0,001
2	0 a 0,275	-0,010
	0,275 a 0,425	-0,010
	0,425 a 0,600	-0,010
3	0 a 0,275	-0,001
	0,275 a 0,425	-0,001
	0,425 a 0,600	-0,001
4	0 a 0,275	-0,001
	0,275 a 0,425	-0,001
	0,425 a 0,600	-0,001
5	0 a 0,275	-0,010
	0,275 a 0,425	-0,010
	0,425 a 0,600	-0,010
6	0 a 0,275	-0,001
	0,275 a 0,425	-0,001
	0,425 a 0,600	-0,001
Curva média	0 a 0,275	-0,010
	0,275 a 0,425	-0,010
	0,425 a 0,600	-0,010