

# Modelagem inversa de curvas de retenção de água em solos com diferentes usos e coberturas

*Inverse modeling of water retention curves in soils with different uses and coverings*

**Ana Flávia Cordeiro de Brito** <sup>1</sup>(ORCID 0009-0004-0534-8433), **Marcella Cardoso Teixeira** <sup>1</sup>(ORCID 0009-0008-9061-313X), **Lorene Alves de Oliveira** <sup>1</sup>(ORCID 0009-0003-4763-3905), **Adriana Magalhães Farias** <sup>1</sup>(ORCID 0009-0002-6747-0560), **Maria Ângela Cruz Macêdo dos Santos** <sup>2</sup>(ORCID 0000-0003-1418-7438), **Alisson Macendo Amaral** <sup>1</sup>(ORCID 0000-0003-3035-2763)

<sup>1</sup>Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Arinos, MG, Brasil. \*Autor para correspondência:  
alisson.amaral@ifnmg.edu.br

<sup>2</sup>Instituto Mineiro de Agropecuária, Buritis, MG, Brasil.

Submissão: 04 de Junho, 2024 | Aceite: 22 de Julho, 2024

## RESUMO

A curva de retenção de água no solo (CRAS) é uma propriedade hidráulica importante para entender a dinâmica da água no solo e relevante na gestão eficiente da irrigação. A modelagem inversa tem sido amplamente aceita para determinar a CRAS, devido a sua eficiência, especialmente em larga escala. O objetivo deste estudo foi determinar e comparar as curvas de retenção de água no solo por meio de modelagem inversa, em latossolo vermelho, fase cerrado, sob diferentes usos e coberturas de solos. Também foram avaliadas as acurácia das curvas por meio de indicadores estatísticos. Para isso, amostras preservadas e não preservadas foram coletadas nas áreas de estudo a fim de determinar as características estruturais dos solos, as propriedades físico-hídricas e as curvas de umidade e evaporação, necessárias para abastecer o modelo Hydrus-1D usado na modelagem computacional. Os indicadores estatísticos coeficiente de determinação, erro médio, raiz do erro quadrático médio, Critério de Informação de Akaike e o Critério de Informação Bayesiano demonstraram eficácia nas curvas de retenção de água modeladas. As áreas de cerrado degradado e cultivo convencional apresentaram curvas de retenção com taxas de retenção de água maiores, se comparadas com a área de cultivo orgânico, resultado das mudanças estruturais dos sistemas, como a distribuição e uniformidade de poros. Observou-se que maior teor de matéria orgânica associado à textura arenosa, na área de cultivo orgânico, resultou em menor retenção de água e que tensões baixas (~ 348,50 kPa) são suficientes para drenar o conteúdo de água nesse sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hydrus 1D. Propriedade do solo. Fluxo hidráulico.

## ABSTRACT

The soil water retention curve (CRAS) is an important hydraulic property for understanding soil water dynamics and relevant for efficient irrigation management. Inverse modeling has been widely accepted to determine CRAS due to its efficiency, especially on a large scale. The objective of this study was to determine and compare soil water retention curves through inverse modeling, in a red latosol, Cerrado phase, under different uses and soil covers. The accuracy of the curves was also evaluated using statistical indicators. For this, preserved and non-preserved samples were collected in the study areas in order to determine the structural characteristics of the soils, the physical-hydric properties and the humidity and evaporation curves, necessary to provide the Hydrus-1D model used in computational modeling. The statistical indicators coefficient of determination, mean error, root mean square error, Akaike Information Criterion and Bayesian Information Criterion demonstrated effectiveness in the modeled water retention curves. The areas of degraded Cerrado and conventional cultivation presented retention curves with higher water retention rates, compared to the organic cultivation area, result of structural changes in the systems, such as distribution and uniformity of pores. It was observed that a higher organic matter content associated with the sandy texture, in the organic cultivation area, resulted in lower water retention at low tensions (~ 348.50 kPa) sufficient to drain the water content in this system.

**KEYWORDS:** Hydrus 1D. Soil Properties. Hydraulic Flow.

**Publisher's Note:** UDESC stays neutral concerning jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).

## INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional acelerado e à diminuição da oferta de água, a agricultura irrigada causa, em muitas regiões do mundo, impactos negativos significativos e, qualquer aperfeiçoamento nas práticas atuais de irrigação pode contribuir para preservar os recursos hídricos limitados e promover uma agricultura sustentável (HIMANSHU et al. 2021). A agricultura irrigada é dependente das condições de absorção, movimentação e distribuição de água no solo, logo, suas propriedades físico-hídricas são de relevante interesse.

Determinar as propriedades hidráulicas que concernem à dinâmica da água no solo, considerando suas variações intrínsecas, são essenciais para definir parâmetros de irrigação e adotar melhores estratégias da gestão de água nos cultivos (KET et al. 2018, HUANG et al. 2018, KUMAR et al. 2022).

A curva de retenção de água no solo (CRAS) representa a relação entre o potencial matricial do solo ( $\Psi_m$ ) e o conteúdo volumétrico de água contida neste solo ( $\theta$ ), sendo considerada uma propriedade primordial para entender o comportamento hidráulico do solo e estimar a disponibilidade de água que pode ser utilizada pelas plantas (MORET-FERNANDEZ & LATORRE 2022).

Uma das aplicações dessa curva é a gestão da irrigação, que visa à elevação de água no solo até potenciais desejáveis, como a capacidade de campo, por exemplo, que constitui na máxima umidade de água no solo sem prejudicar o sistema (BERNARDO et al. 2006) e, umidades menores a maiores tensões, como é o caso de déficits hídricos desejáveis em fruteiras, como no caso da cultura da manga para induzir floração (COELHO et al. 2002) e do café, para indução e uniformização da florada (MASARIRAMBI et al. 2009). Devido à sua importância, é desejável que a curva de retenção de água no solo seja determinada com acurácia e operacionalidade.

Dentre os métodos desenvolvidos para determinar a curva de retenção de água no solo, cita-se um dos mais usados, que é o da mesa de tensão. Esse método é classificado como método direto e também oneroso, tanto em necessidade de infraestrutura específica (laboratórios, mesa de tensão, insumos), quanto em conhecimento técnico-científico para operá-lo. Logo, devido a essas limitações, a abordagem indireta por meio de modelagem computacional, como o modelo inverso, têm sido amplamente utilizado e aceito por possuir configuração e processamento relativamente simples, especialmente em larga escala, além de fornecer resultados com estimativas eficientes (KUMAR et al. 2022, LI et al. 2018).

Devido ao algoritmo de otimização do tipo Marquardt-Levenberg, o modelo agro-hidrológico Hydrus-1D tornou-se uma ferramenta útil para estimar os parâmetros hidráulicos do solo a partir de dados observados, por meio da modelagem inversa (SIMUNEK et al. 2013). Este modelo resolve numericamente a Equação de Richards que concerne ao movimento de água no solo e simula esse movimento num meio poroso saturado/insaturado, sendo normalmente preferido devido à sua simplicidade, quando comparado a modelos parametrizados de base física (ER-RAKI et al. 2021, SANTOS et al. 2018), como o Simple Soil Plant Atmosphere (SiSPAT) (BRAUD et al. 1995) e o Interactions between Soil-Biosphere-Atmosphere (ISBA) (NOILHAN et al. 1996).

A estimativa das propriedades hidráulicas do solo por modelagem inversa foi

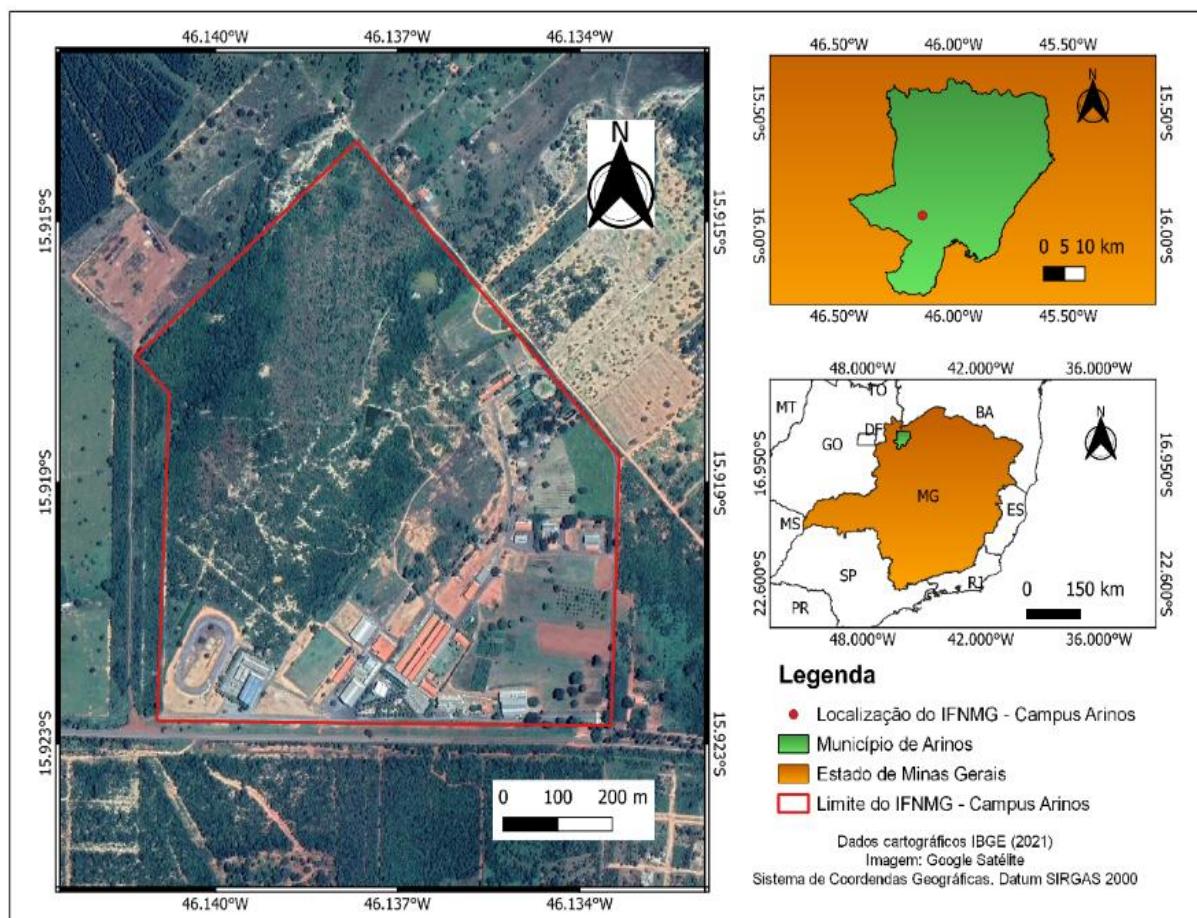
instrumento de pesquisa em diferentes condições experimentais, como as conduzidas por SIMUNEK et al. 2013, GONZALEZ et al. 2015, NASCIMENTO et al. 2018 e SILVA et al. 2020a. Estes estudos observaram que os parâmetros obtidos por modelagem inversa possuem acurácia e representatividade para expressar a dinâmica de água no solo. Vários fatores podem influenciar a dinâmica de água no solo, incluindo, as características do solo como textura, conteúdo de matéria orgânica e porosidade, bem como o tipo de uso e cobertura da terra (JIA et al. 2017).

Considerando o exposto, objetiva-se com esse estudo, determinar e comparar as curvas de retenção de água no solo por meio de modelagem inversa, em latossolo vermelho, fase cerrado, sob diferentes usos e coberturas de solos.

## MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo e análises de solo

O estudo foi conduzido nas dependências do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais - Campus Arinos (Figura 1), cujo solo é caracterizado como Latossolo Vermelho Distroférrico.



**Figura 1.** Área experimental de coleta de amostras.

**Figure 1.** Experimental sample collection area.

Amostras não preservadas e preservadas de solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm em três áreas distintas, sendo duas antropizadas, correspondendo aos sistemas de produção convencional e orgânico; e a terceira, uma área de Cerrado degradado (área de preservação). Os solos foram coletados

objetivando estabelecer características e propriedades físico-hídricas de água no solo, como a granulometria (areia, silte, argila) e a densidade do solo cujos são parâmetros hidráulicos requeridos pelo modelo Hydrus-1D.

Em cada área de estudo foram coletadas amostras não preservadas com auxílio de um trado holandês, em pontos representativos, para compor uma amostra composta. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e devidamente identificadas (profundidade e área). As amostras preservadas foram coletadas com auxílio de cilindros volumétricos metálicos com volume de 83,81 cm<sup>3</sup> e 100,27 cm<sup>3</sup> (cilindros de Kopeck), perfazendo três repetições por área.

Para caracterização granulométrica dos solos (areia, silte e argila) as amostras não preservadas foram enviadas ao laboratório de análises agrícolas Nativa (Formosa-GO). As amostras preservadas foram encaminhadas para o Laboratório de solos do IFNMG - Campus Arinos para determinação das propriedades físicas: densidade global (Dg), densidade de partículas (Dp) e porosidade total (PT), segundo metodologia do Manual de Métodos de Análise do Solo (TEIXEIRA et al. 2017). Para isso, as amostras foram secas em estufa de ventilação forçada de ar a temperatura de 105-110 °C por um período de 48 horas. Após a secagem, a densidade global foi calculada pela Equação 1:

$$Dg = \frac{4Mss}{\pi d^2 h} \quad (1)$$

Em que: Dg - Densidade global do solo, em g cm<sup>-3</sup>; Mss - Massa seca do solo, em g; d - diâmetro do anel volumétrico, em cm; e h - altura do anel volumétrico, em cm.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico. Inicialmente, balões volumétricos de 50 mL foram previamente aferidos com água desionizada e desaerada, em seguida, 20 g de solo seco em estufa a 105 °C foram transferidos com auxílio de um funil. O volume foi completado com adição de álcool etílico até cobrir a amostra, seguida de agitação para eliminação de bolhas e repouso por 30 minutos. O volume da amostra foi obtido pela diferença entre o volume de álcool necessário para preencher o balão e o volume do líquido necessário para completar o volume do balão contendo a amostra seca. Após esse procedimento, a densidade de partículas foi determinada pela Equação 2.

$$Dp = \frac{m_a}{(V_T - V_u)} \quad (2)$$

Em que: Dp - densidade de partículas, em g cm<sup>-3</sup>; m<sub>a</sub> - massa da amostra seca a 105 °C, em g; V<sub>T</sub> - volume total aferido do balão, em mL e V<sub>u</sub> - volume utilizado para completar o balão com a amostra, em mL.

A porosidade total foi calculada pelo método indireto, perfazendo o uso da Equação 3.

$$PT = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) 100 \quad (3)$$

Em que: PT - porosidade total, em %; Dp - densidade de partículas do solo, em g cm<sup>-3</sup> e; Ds - densidade do solo, em g cm<sup>-3</sup>).

## 2.2 Modelagem inversa com Hydryus - 1D

Nessa etapa e para abastecer o modelo Hydrus-1D version 4.17.0140 (SIMUNEK et al. 2013) são necessárias as determinações das curvas de umidade volumétrica e da evaporação ao longo do tempo. Para isso, foi montado, em triplicata, um experimento de evaporação do solo em laboratório, similar aos estudos conduzidos por SILVA et al. (2020b) e ŠIMUNEK et al. (1998). Nessa etapa, blocos de solo foram recriados a partir de amostras não preservadas de cada área e a partir da determinação anterior das densidades globais de cada sistema de produção.

As amostras de solo não preservadas foram secas ao ar, peneiradas e acondicionadas conforme suas densidades estabelecidas anteriormente, em tubos de PVC (Cloreto de polivinila) com 70 mm de diâmetro e 150 mm de altura. Para evitar perda de solo e possibilitar movimentação livre de água na etapa de saturação, a parte inferior de cada tubo teve aparato feito com tela do tipo sombrite, conforme procedimentos adotados por MENDES et al. (2021) e SANTOS et al. (2022 b).

Em laboratório, as triplicatas dos conjuntos “cilindro + solo” foram saturadas por capilaridade durante um período de 72 horas, a fim de eliminar qualquer fração de ar nas amostras. Após este procedimento, determinou-se a massa do conjunto em condições de saturação. Então, as amostras foram submetidas a drenagem gravitacional até que as mesmas atingissem a capacidade de campo (momento em que cessou a drenagem gravitacional).

Posteriormente, os conjuntos foram submetidos à secagem forçada em estufa nas temperaturas de 30, 50, 70, 90 e 105 °C em período de 12 dias. Medições de massa sucessivas foram feitas a fim de construir a curva de umidade volumétrica versus tempo. As variações de massa foram mensuradas por balança de precisão (0,001 g). Por diferença entre os valores de umidades e a relação com a área de evaporação dos tubos foram estabelecidos os totais evaporados em mm.

Os valores das umidades volumétricas ( $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e evaporação (mm) são os dados de entrada do modelo com Hydrus-1D para as simulações, portanto, as umidades foram estabelecidas com base na massa (umidade gravimétrica - U,  $\text{g g}^{-1}$ ) (Equação 4) e posteriormente convertidas na base de volume (umidade volumétrica -  $\theta$ ,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) (Equação 5).

$$U = \frac{(Ms - MSS)}{MSS} \quad (4)$$

Em que: U - Umidade do solo ( $\text{g g}^{-1}$ ); Ms - massa de solo úmido (g) e MSS - massa do solo seco (g).

$$\theta = U \frac{\rho}{\rho_a} \quad (5)$$

Em que:  $\theta$  - umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); U - Umidade do solo ( $\text{g g}^{-1}$ );  $\rho$  - densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e  $\rho_a$  - densidade da água ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Para a modelagem inversa, as condições de contorno estabelecidas foram: limite superior sob condições de contorno atmosférico (dados de evaporação), fluxo zero no limite inferior (zero drenagem) e profundidade da camada (15 cm - correspondente a altura do solo no tubo) dividida em nós (intervalos) de 1 cm (o programa realiza a

simulação a cada 1 cm do total do volume de solo).

O modelo Hydrus-1D possui associado a ele o módulo Rosetta (Neural Network Prediction) com o qual foram estabelecidos os parâmetros hidráulicos do solo, tendo como base os dados de densidade global ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e granulometria (areia, silte e argila em %). Os parâmetros hidráulicos obtidos com o módulo Rosetta representam uma condição inicial hidráulica dos solos para iniciar a modelagem.

Nas simulações, o modelo de Mualem-Van Genuchten (MUALEM 1976 & VAN GENUCHTEN 1980) foi utilizado para estabelecer a curva de retenção de água no solo (Equação 6) e a curva de condutividade de água no solo (Equação 7).

$$\theta = \theta_{res} + (\theta_{sat} - \theta_{res})(1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad (6)$$

Em que:  $\theta$  - teor de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_{res}$  - teor de umidade residual do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_{sat}$  - umidade do solo saturado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  - fatores empíricos, sendo  $m$  dependente de  $n$  pela relação (Equação 7):

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

Conforme a teoria da condutividade hidráulica não saturada de VAN GENUCHTEN (1980), fazendo uso da relação  $\theta(h)$ , a função  $K(\theta)$  é definida como (Equação 8):

$$K = K_{sat} S_e^\lambda \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

Em que:  $K_{sat}$  - é a condutividade saturada ( $\text{cm d}^{-1}$ );  $S_e$  - grau de saturação relativo;  $\lambda$  - é um parâmetro de forma (-) dependendo da tortuosidade do caminho do fluxo. E  $S_e$  definido como (Equação 9):

$$S_e = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \quad (9)$$

A Equação de RICHARDS (1931) foi utilizada para estimar o fluxo de água no solo (Equação 10).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S(h) \quad (10)$$

Em que:  $\theta$  - conteúdo volumétrico de água;  $t$  - é o tempo (d);  $K(h)$  - condutividade hidráulica ( $\text{cm d}^{-1}$ );  $h$  - potencial de pressão da água no solo (cm);  $z$  - posição vertical calculada positivamente para cima (cm);  $S(h)$  - taxa de extração de água do solo pelas raízes ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ).

O modelo Hydrus-1D, por meio das simulações no espaço-tempo, realiza a minimização das diferenças dos valores das umidades volumétricas ( $\theta$ ) obtidas e aquelas por ele simuladas, de modo a determinar os parâmetros hidráulicos do solo ( $\alpha$ ,  $n$ ,  $\lambda$  e  $K_s$ ). As diferenças entre os valores de  $\theta$  obtidos e simulados são expressas através de uma função objetiva  $\Phi$  (Equação 11).

$$\phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} [\theta_{OBT,j}(z_i, t_i) - \theta_{SML,j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (11)$$

Em que:  $m$  - número de diferentes locais de medidas de  $\Theta$ ;  $n$  - número de medidas realizadas em um  $m$ .

A igualdade representa o resíduo entre os valores do conteúdo de água simulados ( $\theta_{SML}$ ) utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em  $\beta$  (ou seja,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $a$ ,  $n$ ,  $K_s$  e  $\lambda$ ) e os obtidos ( $\theta_{OBT}$ ) no tempo  $t_i$  para  $j$ -ésima medidas em  $z_i$ . A minimização da função objetiva  $\Phi$  é realizada pelo método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt (SIMUNEK et al. 2013).

Para avaliação da qualidade dos ajustes, os indicadores estatísticos raiz do erro quadrado médio (RMSE) (Equação 12), erro médio (EM) (Equação 13), e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 14) foram utilizados como critério de desempenho, semelhante a GONZALEZ et al. 2015, REZAEI et al. 2016, WANG et al. 2016.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\theta_{obs} - \theta_{est})^2} \quad (12)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\theta_{obs} - \theta_{est}) \quad (13)$$

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \quad (14)$$

Em que: RMSE - raiz do erro quadrado médio; ME - erro médio; N - é o número total de observações;  $\theta_{obs}$  e  $\theta_{est}$  são os valores observados e simulados para o conteúdo de água no solo;  $R^2$  - coeficiente de determinação; SQR - soma de quadrados da regressão e SQT - soma de quadrados total.

Além destes, foram adotados os critérios de informação de Akaike (AIC) (Equação 15) e o Bayesiano de Schwartz (BIC) (Equação 16).

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2k \quad (15)$$

$$BIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + k \log n \quad (16)$$

Em que:  $L(\hat{\theta})$  é a função de verossimilhança maximizada;  $k$  é o número de parâmetros livres no modelo;  $n$  é o número de observações da amostra. O termo  $2k$  é o termo de penalidade e atua como uma compensação pelo viés na falta de ajuste quando os estimadores de máxima verossimilhança são usados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização granulométrica e as propriedades físicas do solo para as áreas de estudo estão apresentadas na Tabela 1. A Classe de textura foi estabelecida através do Triângulo Textural, segundo SANTOS et al. (2005) e PHOGAT et al. (2016).

**Tabela 1.** Caracterização granulométrica e propriedades físicas das amostras de solo para as áreas de estudo.

*Table 1. Granulometric characterization and physical properties of soil samples for the study areas.*

Área	Areia	Silte	Argila	Classe textural	Dg	Dp	PT
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		g cm <sup>-3</sup>	%	
CD	440	240	320	Franco-argilosa	1,44	2,02	28,67
CC	404	215	381	Argila	1,43	2,16	33,78
CO	455	142	403	Argilo-arenosa	1,45	2,38	39,01

CD: Cerrado degradado; CC: Cultivo convencional; CO: Cultivo orgânico; Dg: Densidade global; Dp: Densidade de partículas; PT: Porosidade total.

*CD: Degraded Cerrado; CC: Conventional cultivation; CO: Organic cultivation; Dg: Global density; Dp: Particle density; PT: Total porosity.*

A Tabela 2 apresenta os parâmetros hidráulicos para cada área de estudo e os indicadores estatísticos coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio (EM), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC) que expressam a qualidade dos ajustes alcançados ao comparar os teores de água no solo medidos e simulados. Os indicadores estatísticos são parâmetros matemáticos usados para avaliar a exatidão e a precisão das previsões do modelo e ajudam a entender o quanto bem o modelo está descrevendo o comportamento do sistema em estudo (PHOGAT et al. 2016).

**Tabela 2.** Propriedades hidráulicas do solo e indicadores estatísticos para as áreas de estudo.

*Table 2. Soil hydraulic properties and statistical indicators for the study areas.*

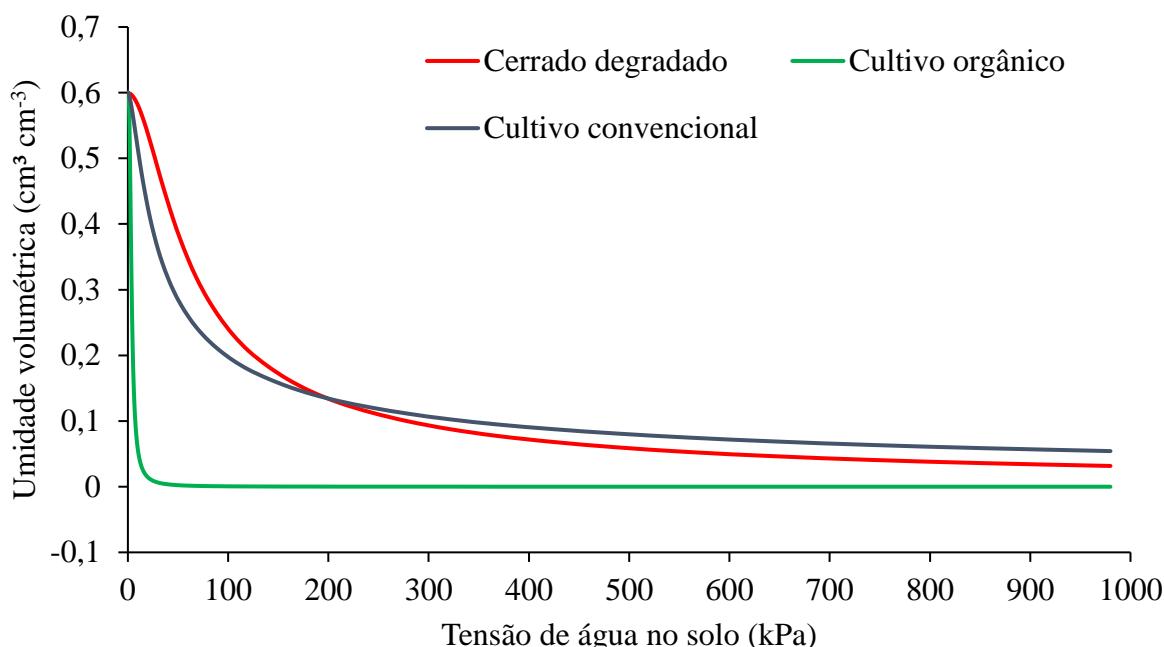
Área	θr	θs	α	n	Ks	λ	RMSE	EM	R <sup>2</sup>	AIC	BIC
	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	-	-	cm h <sup>-1</sup>	-	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	-	-	-	-
CD	0,078	0,429	0,016	1,373	0,465	0,5	0,077	0,026	0,85	-0,206	-0,198
CC	0,097	0,458	0,024	1,222	0,657	0,5	0,084	0,017	0,82	-0,189	-0,181
CO	0,086	0,440	0,021	1,283	0,617	0,5	0,083	0,015	0,84	-0,199	-0,191

CD: Cerrado degradado; CC: Cultivo convencional; CO: Cultivo orgânico; θr: conteúdo de água residual; θs: conteúdo de água saturada; α, n, λ: parâmetros empíricos de ajuste; Ks: condutividade hidráulica saturada; RMSE: erro quadrático médio da raiz EM: erro médio; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; AIC: Critério de Informação de Akaike; BIC: Critério de Informação Bayesiano.

*CD: Degraded Cerrado; CC: Conventional cultivation; CO: Organic cultivation; θr: wastewater content; θs: saturated water content; α, n, λ: empirical adjustment parameters; Ks: saturated hydraulic conductivity; RMSE: root mean square error EM: mean error; R<sup>2</sup>: coefficient of determination; AIC: Akaike Information Criterion; BIC: Bayesian Information Criterion.*

Os valores encontrados para o  $R^2$  são semelhantes aos reportados por ER-RAKI et al. (2021) e AIRES et al. (2022), que também observaram valores similares para o RMSE em experimentos conduzidos utilizando o modelo Hydrus. Em estudo anterior, os autores MOHAMMED et al. (2021) observaram uma boa concordância entre os valores previstos e medidos para as propriedades hidráulicas do solo, com  $R^2$  variando de 0,78 a 0,99 e os valores do RMSE variando de 0,000012 até 0,146. Percebe-se, para este estudo, que os valores do  $R^2$  e RMSE estão dentro da faixa citada na literatura, o que mostra a confiabilidade dos ajustes das modelagens aqui mostradas.

A área de Cerrado Degradado e Cultivo Convencional apresentaram curvas características com taxa de retenção de água mais elevada, em comparação com a área de Cultivo Orgânico, onde baixas tensões são necessárias para retirar todo o conteúdo de água do solo (Figura 2). Pela modelagem, a tensão a qual o conteúdo volumétrico de água no solo no Cultivo Orgânico é zero, equivale a 368,50 kPa, ou seja, uma tensão baixa se comparada aos outros sistemas (convencional e degradado).



**Figura 2.** Curvas de retenção de água no solo modeladas para a área de cerrado degradado (A), cultivo convencional (B) e cultivo orgânico (C), na profundidade de 0-20 cm.

**Figure 2.** Soil water retention curves modeled for area the degraded cerrado (A), conventional cultivation (B) and organic cultivation (C), at a depth of 0-20 cm.

A curva de retenção de água depende de características intrínsecas de cada solo, sendo influenciada pela interação de fatores como textura (EASTON & BOCK 2016), porosidade, uso do solo (DLAPA et al. 2020) e matéria orgânica (LAL et al. 2020). Infere-se que a área de cultivo orgânico, mesmo retendo grande volume inicial de água em função de uma maior quantidade de poros (Tabela 1), têm água retida a baixas tensões, sendo facilmente evaporada (Figura 2), pois, poros maiores, quando preenchidos com água são esvaziados mais facilmente em potenciais próximos de zero (SANTOS et al. 2022 a) devido a uma maior condutividade hidráulica inerente de maiores umidades.

A alteração na porosidade ocasiona modificações no comportamento da curva de retenção de água no solo, onde testes experimentais em solo de composição areno-argiloso, com diferentes porosidades, mostram que a sucção varia significativamente com as mudanças na porosidade, diminuindo à medida que a porosidade aumenta, consequentemente, a redução do conteúdo volumétrico de água no solo torna-se mais rápida (LIU et al. 2020).

A maior porosidade na área de cultivo orgânico (Tabela 1), em relação às demais áreas, pode ser atribuída ao tipo de uso do solo e a quantidade de matéria orgânica

presente, por ser uma área caracterizada por agricultura orgânica e com adoção de práticas de cultivo conservacionistas. Áreas com conteúdo de matéria orgânica elevada interferem positivamente na melhoria das propriedades hidráulicas básicas do solo, incluindo a composição do tamanho das partículas, a densidade aparente, a porosidade e a capacidade de retenção (DLAPA et al. 2020). Nesse sentido, ocorrem reduções na densidade aparente do solo e na resistência à tração, aumento da porosidade, aumento na proporção de agregação do solo, em principal os estáveis em água, a melhoria da taxa de infiltração e o aumento da condutividade hidráulica saturada (CANQUI 2017, KLEIN & KLEIN 2015). Todavia, estes autores citam que em solos de textura mais arenosa, a retenção é mais sensível à quantidade de matéria orgânica do que quando comparado a solos mais argilosos, que possuem textura mais fina.

Quanto à textura, podem-se observar teores elevados de areia na área de cultivo orgânico (Tabela 1), o que também contribui para uma menor retenção de água no solo. Um menor conteúdo de água foi observado em horizontes com predomínio da fração areia, em trabalho realizado por SILVA et al. (2020 a). Em solos argilosos, como o do cultivo convencional (Tabela 1), os poros estão distribuídos mais uniformemente, isso significa que ao aumentar a tensão, o decréscimo do teor de água é mais gradativo (Figura 2).

Vários estudos observaram diferenças na retenção de água entre os tipos de solo, profundidades do perfil e composições granulométricas, onde, destacam que solos de textura mais fina e com maior teor de argila, como os latossolos, apresentam uma capacidade de retenção de água superior, em comparação com solos de textura mais grossa e arenosa (KIEHL 1979, BRADY 1989, NÓBREGA et al. 2022), o que explica o comportamento observado na curva de retenção de água para a área de cultivo convencional (Figura 2). Nota-se comportamento similar para a área de cerrado degradado, porém com menor volume de água retido, possivelmente devido à mudança na textura do solo que interfere na movimentação/fluxo de água (Tabela 1).

Solos argilosos podem apresentar maior porosidade total devido à maior microporosidade proporcionada pelo maior teor de argila, resultando em maior retenção de água (MIOTTI et al. 2013). Segundo REICHARDT (1987) os solos com textura argilosa possuem distribuição e uniformidade de microporos maior, favorecendo a absorção de uma quantidade superior de água e um decréscimo gradual da umidade do solo. Além disso, em função da sua elevada área superficial específica carregada negativamente, a fração argila adsorve grande quantidade de moléculas de água à superfície do solo, contribuindo para um maior volume de água retido em solos com maior quantidade de argila (SILVA et al. 2018).

## **CONCLUSÃO**

Os indicadores estatísticos coeficiente de determinação, erro médio, raiz do erro quadrático médio, Critério de Informação de Akaike e o Critério de Informação Bayesiano demonstraram eficácia nas curvas de retenção de água modeladas.

A porosidade, textura e presença de matéria orgânica desempenham um papel crucial na dinâmica da água no solo, influenciando na curva de retenção.

A área de cultivo orgânico apresentou uma curva de retenção de água no solo com menor taxa de retenção em função de uma maior porosidade, possivelmente, devido a uma maior quantidade de matéria orgânica presente.

A maior distribuição e uniformidade de poros, nas áreas de cultivos convencional e cerrado degradado, foram responsáveis por uma maior retenção de água nas tensões mais elevadas.

### **CONTRIBUIÇÕES DO AUTOR**

Conceitualização, metodologia e análise formal, BRITO, A. F. C, SANTOS, M. Â. C.M e AMARAL, A. M.; validação, SANTOS, M. Â. C. M e AMARAL, A. M.; investigação, BRITO, A. F. C, TEIXEIRA, M. C., OLIVEIRA, L. A. e FARIA, A. M.; curadoria de dados, SANTOS, M. Â. C. M e AMARAL, A. M.; redação - preparação do rascunho original, BRITO, A. F. C; redação - revisão e edição, BRITO, A. F. C, SANTOS, M. Â. C. M e AMARAL, A. M.; supervisão SANTOS, M. Â. C. M e AMARAL, A. M.; administração do projeto, AMARAL, A. M.; obtenção de financiamento, AMARAL, A. M.. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

### **FINANCIAMENTO**

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio de bolsas de iniciação científica concedidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pelo Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG). Não houve aporte financeiro por meio de editais de fomento específicos; entretanto, as atividades do projeto foram viabilizadas com recursos institucionais próprios, disponibilizados pela instituição de origem (IFNMG).

### **DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS**

Os dados podem ser disponibilizados mediante solicitação.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores expressam agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), os quais forneceram bolsas de iniciação científica e a infraestrutura necessária para a condução da pesquisa.

### **CONFLITOS DE INTERESSE**

Os autores declaram não haver conflitos de interesse relacionados a esta pesquisa.

### **REFERÊNCIAS**

- AIRES et al. 2022. Umidade do solo e estresse hídrico simulado com Hydrus-1D em área com sorgo forrageiro irrigado. *Agrometeoros* 30: 1-7.
- BERNARDO et al. 2006. Manual de Irrigação. 8.ed. Viçosa: Editora UFV.
- BRADY NC. 1989. Natureza e propriedade dos solos. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos.
- BRAUD et al. 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *Journal of Hydrology* 166: 213-250.

- CANQUI HB. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal* 81: 687-711.
- COELHO et al. 2002. A cultura da mangueira. Brasília: Embrapa. p. 167-189.
- DLAPA et al. 2020. The impact of land-use on the hierarchical pore size distribution and water retention properties in Loamy soils. *Water* 339: 1-13.
- EASTON ZM & BOCK E. 2016. Soil and Soil Water Relationships. Virginia: Virginia Cooperative Extension. Disponível em: [https://ext.vt.edu/content/dam/ext\\_vt\\_edu/topics/agriculture/water/documents/Soil-and-Soil-Water-Relationships.pdf](https://ext.vt.edu/content/dam/ext_vt_edu/topics/agriculture/water/documents/Soil-and-Soil-Water-Relationships.pdf). Acesso em: 15/04/2024 às 16:30 hs.
- ER-RAKI et al. 2021. Performance of the HYDRUS-1D model for water balance components assessment of irrigated winter wheat under different water managements in semi-arid region of Morocco. *Agricultural Water Management* 244: 1-13.
- GONZALEZ et al. 2015. Modelling soil water dynamics of full and deficit drip irrigated maize cultivated under a rain shelter. *Biosystems Engineering* 132: 1-18.
- HIMANSHU et al. 2021. Simulated efficient growth-stage-based deficit irrigation strategies for maximizing cotton yield, crop water productivity and net returns. *Agricultural Water Management* 250: 1-12.
- HUANG et al. 2018. Soil water extraction monitored per plot across a field experiment using repeated electromagnetic induction surveys. *Soil Systems* 11: 1-17.
- JIA et al. 2017. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology* 546: 113-22.
- KET et al. 2018. Estimating soil water retention curve by inverse modelling from combination of in situ dynamic soil water content and soil potential data. *Soil Systems* 55: 1-23.
- KIEHL ED. 1979. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Editora Agronômica Ceres.
- KLEIN C & KLEIN VA. 2015. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. *REGET* 19: 21-29.
- KUMAR et al. 2022. Site-specific irrigation scheduling using one-layer soil hydraulic properties and inverse modeling. *Agricultural Water Management* 273: 2-13.
- LAL R. 2020. Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal* 112: 3265-3277.
- LI et al. 2018. Inverse modeling of soil hydraulic parameters based on a hybrid of vector-evaluated genetic algorithm and particle swarm optimization. *Water* 10: 1-23.
- LIU et al. 2020. Effect of porosity on soil-water retention curves: Theoretical and experimental aspects. *Geofluids Special edition*: 1-8.
- MASARIRAMBI et al. 2009. The effect of irrigation on synchronization of coffee (*Coffea arabica* L.) flowering and berry ripening at Chipinge, Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth* 34: 786-789.
- MENDES et al. 2021. Calibração de sonda de baixo custo para monitorar umidade em substrato comercial. *Meio Ambiente Brasil (MABRA)* 3: 89-95.
- MIOTTI et al. 2013. Profundidade e atributos físicos do solo e seus impactos nas raízes de bananeiras. *Revista Brasileira de Fruticultura* 35: 536-545.

- MOHAMMED et al. 2021. Using inverse modeling by Hydrus-1D to predict some soil hydraulic parameters from soil water evaporation. *Colombia Forestal* 25: 21-35.
- MORET-FERNANDEZ & LATORRE. 2022. A novel double disc method to determine soil hydraulic properties from drainage experiments with tension gradients. *Journal of Hydrology* 615: 1-14.
- MUALEM Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12: 513-522.
- NASCIMENTO et al. 2018. Estimation of van Genuchten equation parameters in laboratory and through inverse modeling with Hydrus-1D. *Journal of Agricultural Science* 10: 102-110.
- NÓBREGA et al. 2022. Funções de pedotransferência para estimar a retenção e a disponibilidade de água em Planossolo Háplico sob sistemas integrados de produção agropecuária no Agreste da Paraíba. *Scientia Plena* 8: 1-19.
- NOILHAN et al. 1996. The ISBA land surface parametrisation scheme. *Global and Planetary Change* 13: 145-159.
- PHOGAT et al. 2016. Statistical Assessment of a numerical model simulating agro hydrochemical processes in soil under drip fertigated mandarin tree. *Irrigation and Drainage Systems Engineering* 5: 1-9.
- REICHARDT K. 1987. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole.
- REZAEI et al. 2016. The relevance of in-situ and laboratory characterization of sandy soil hydraulic properties for soil water simulations. *Journal of Hydrology* 534: 251-265.
- RICHARDS LA. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1: 318-333.
- SANTOS et al. 2022a. Water retention and availability in tropical soils of different textures amended with biochar. *Catena* 219: 1-8.
- SANTOS et al. 2022b. Evaluation of low-cost electronic sensors for monitoring soil moisture in an experimental area in the brazilian semiarid. *Sensor Review* 42: 648-656.
- SANTOS et al. 2005. Manual de descrição e coleta de solos no campo. 5.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo (SBCS).
- SANTOS et al. 2018. Conteúdo volumétrico da água no solo via modelos de competição interespecífica. *Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza* 2 (ed. especial): 30-39.
- SILVA et al. 2018. Soil water retention curve as affected by sample height. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 42: 1-13.
- SILVA et al. 2020a. Caracterização físico-hídrica de solos arenosos através da curva de retenção de água, índice S e distribuição de poros por tamanho. *Agrarian* 13: 478-492.
- SILVA et al. 2020b. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. *Irrigation Science* 38: 223-234.
- SIMUNEK et al. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. California: Riverside.

- ŠIMŮNEK et al. 1998. The hydrus-1d software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media: Tutorial. Australia: CSIRO Land and Water.
- TEIXEIRA et al. 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3·ed. Brasília: Editora Embrapa.
- VAN GENUCHTEN MT. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44: 892-898.
- WANG et al. 2016. Feasibility analysis of using inverse modeling for estimating natural groundwater recharge from a large-scale soil moisture monitoring network. Journal of Hydrology 533: 250-265.