

PARÂMETROS FÍSICOS-HÍDRICOS PARA MODELAGEM DE INFILTRAÇÃO: ESTUDO DE CASO NO LATOSSOLO VERMELHO EM DISTRITO FEDERAL

Greison Santos Pereira¹; Conceição de Maria Albuquerque Alves² & Tairone Paiva Leão³;

RESUMO – Este estudo avaliou as propriedades hidráulicas de um Latossolo Vermelho no Distrito Federal, visando subsidiar modelagens de infiltração em áreas urbanas. Os autores analisaram ensaios de campo e laboratório para a condutividade hidráulica por dois métodos (mini-permeâmetro e anel duplo) e realizado o ajuste de van Genuchten através do software RETC. O ajuste estatístico dos parâmetros calculados apresentou excelente convergência ($R^2 = 0,999$), com destaque para o elevado valor de α ($661,10 \text{ m}^{-1}$), que indica baixo valor de entrada de ar para início da drenagem macroporosa, comportamento típico de solos com elevada porosidade total. O conteúdo de água residual (θ_r) de $0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ confirmou a bimodalidade porosa, onde a microporosidade garante uma retenção hídrica significativa em valores de tensão elevados. A integração entre a transmissividade e a sorptividade determinadas pelo ajuste da equação de Philip aos dados de infiltrabilidade permitiu validar a condutividade hidráulica e os parâmetros de retenção de água para utilização em simulações numéricas.

Palavras-Chave – Infiltrabilidade, Permeabilidade, Curva de Retenção.

ABSTRACT– This study evaluated the hydraulic properties of a Oxisol in the Federal District of Brazil, aiming to provide data for infiltration modeling in urban areas. The authors analyzed field and laboratory tests to determine hydraulic conductivity using two methods (mini-permeameter and double ring infiltrometer), and the van Genuchten parameters were fitted using the RETC software. The statistical adjustment of the calculated parameters showed excellent convergence ($R^2 = 0.999$), highlighting the high α ($661,10 \text{ m}^{-1}$), which indicates a low air-entry suction for the start of drainage in the macropores, a behavior typical of soils with high total porosity. The residual water content (θ_r) of $0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ confirmed a bimodal pore size distribution, where microporosity ensures significant hydraulic retention at high matric tensions. The integration between transmissivity and sorptivity,

1) Doutorando no Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos na Universidade de Brasília (PTARH/UnB); Anexo SG-12, Térreo – UnB – Asa Norte, Tel.: (61) 3107-0940, Brasília – DF. E-mail: greisonsantos.ufba@gmail.com

2) Docente no PTARH/UnB; E-mail: calves@unb.br

3) Docente na Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB; E-mail: tleao@unb.br

determined by fitted Philip's equation to the infiltrability data, allowed for the validation of hydraulic conductivity and soil water retention parameters for use in numerical simulations.

Key-words – Infiltrability, Permeability, Retention Curve.

INTRODUÇÃO

O processo de infiltração desempenha papel fundamental na recarga de aquíferos no ciclo hidrológico como um todo. Contudo, a determinação da condutividade em campo apresenta desafios devido à alta variabilidade espacial das propriedades hidráulicas e à complexidade estrutural do solo (Koide *et al.*, 2018), também sendo dependente de forças de sucção matricial e do gradiente de potencial gravitacional (Philip, 1969).

O entendimento do processo de infiltração é fundamental para o bom desempenho de dispositivos associados ao sistema de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) com abordagem de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) também denominadas de medidas de controle na fonte, técnicas compensatórias, *Best Management Practices* (BMP) e ainda dispositivos de baixo impacto para novos empreendimentos, *Low Impact Development* – LID (Navarro *et al.*, 2022; Hoepers *et al.*, 2022).

Pessoa e Libardi (2022) mencionam que microestrutura dos Latossolos brasileiros, governada por óxidos de ferro e alumínio, altera a distribuição do tamanho de poros, gerando uma bimodalidade porosa. Esse arranjo estrutural faz com que solos com elevados teores de argila apresentem taxas de condutividade hidráulica saturada elevadas, assemelhando-se ao comportamento hidrológico de matrizes arenosas sob fluxo saturado. Por isso, torna-se necessária a determinação precisa de parâmetros como os da Equação de Philip (1969) (1) por meio de ensaios de campo, uma vez que estimativas baseadas apenas na textura podem subestimar severamente a capacidade de infiltração vertical e o movimento da água na zona não saturada (Hillel, 1998; Chow *et al.*, 1988), além de parâmetros da curva de retenção pela Equação de van Genuchten (1980) (2) para descrever a relação entre o conteúdo de umidade e o potencial matricial.

$$I(t) = S \cdot t^{1/2} + A \cdot t \quad (1)$$

Onde,

I (t), é a Infiltração Acumulada (cm)

t, é o tempo (s)

S, é a Sorptividade (cm.s^{-0,5})

A, é a Transmissividade (cm.s⁻¹)

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

Onde,

$\theta(\psi)$, é o conteúdo de água no potencial ψ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

θ_r , é o conteúdo de água residual ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

θ_s , é o conteúdo de água do solo saturado ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)

α , relacionado ao inverso da pressão de entrada de ar (m^{-1})

ψ , pressão de sucção (cm)

n , relacionado à distribuição de poros

m , parâmetro de forma, obtido pela relação $m = 1 - 1/n$ (Mualen, 1976).

Esta pesquisa realizou a avaliação estatística da condutividade hidráulica saturada encontrada pelo método do mini-permeâmetro e pelo método do anel duplo e com ajuste utilizando a equação de Philip, bem como a determinação dos parâmetros para a curva de retenção pela equação de van Genuchten para um Latossolo Vermelho muito argiloso, que representa 50 % da área do Distrito Federal (ADASA, 2025), localizado na Fazenda Água Limpa (DF). Os resultados podem ser aplicados em modelagem numérica para a simulação do funcionamento em meios porosos não saturados de dispositivos de SbN que utilizam infiltração como processo hidrológico predominante, para posterior comparação com os ensaios de vazão de uma trincheira de infiltração a ser construída no local.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Fazenda Água Limpa (Figura 1) pertence à Universidade de Brasília para fins de pesquisa. Possui coordenadas UTM (L = 185151,45 m; E = 8234775,22 m), e em sua maior parte Cerrado preservado e diversos tipos de solo, incluindo o Latossolo Vermelho (LV).

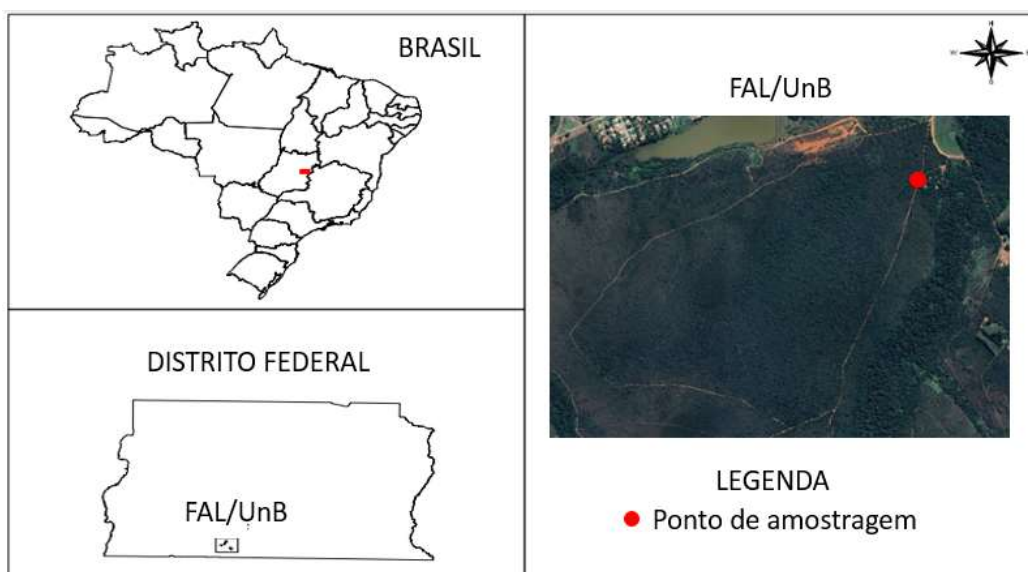


Figura 1 – Localização da FAL/UnB. Fonte: Autoria Própria.

Esta pesquisa é dividida em três partes:

- A primeira consiste em analisar a consistência dos resultados obtidos por Pereira *et al.* (2024) usando valores da Média, Desvio Padrão Amostral e Coeficiente de Variação, equações (3), (4) e (5) respectivamente, para a condutividade hidráulica saturada determinada por meio do mini-permeâmetro (Koide, 1990) em laboratório para os seis ensaios para uma amostra para coletada a 10 cm de profundidade, obtida no ponto em que seria construído uma trincheira de infiltração posteriormente;

$$\overline{y_{real}} = \frac{\sum_N^i y_{real,i}}{N} \quad (3)$$

Onde,

$\overline{y_{real}}$, é a média das leituras

$y_{real,i}$, é a i-ésima leitura obtida em laboratório

N , é o número de leituras

$$s = \sqrt{\frac{\sum_N^i (y_{real,i} - \overline{y_{real}})^2}{N-1}} \quad (4)$$

Onde,

s , é o desvio padrão amostral

$$cv = \frac{s}{\overline{y_{real}}} \times 100 \quad (5)$$

Onde,

CV, é o coeficiente de variação em %

- A segunda consiste em analisar o ajuste do modelo de Philip por meio dos valores de R^2 (Coeficiente de Determinação), RMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio) e NRMSE (Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado), equações (6), (7) e (8) respectivamente, para a condutividade hidráulica saturada de campo obtida utilizando os infiltrômetros de anéis concêntricos em três pontos para 8 cm de profundidade;

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{real,i} - y_{predito,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{real,i} - \bar{y}_{real,i})^2} \quad (6)$$

Onde,

R^2 , é o coeficiente de determinação

$y_{predito,i}$, é a leitura calculada

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{real,i} - y_{predito,i})^2}{N}} \quad (7)$$

Onde,

RMSE, é a Raiz do Erro Quadrático Médio

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(y_{máx} - y_{mín})} \times 100 \quad (8)$$

Onde,

NRMSE, é a Raiz do Erro Quadrático Médio Normalizado

$y_{máx}$, é o valor máximo registrado

$y_{mín}$, é o valor mínimo registrado

- A terceira consiste na construção da curva de retenção através da utilização da Câmara de Richards com ajuste de van Genuchten no software RETC para amostras correspondentes à profundidade de 1 m;

RESULTADOS

Na tabela a seguir é mostrada a análise de consistência sobre as leituras de condutividade hidráulica saturada para uma amostra utilizando o mini-permeâmetro em laboratório com base nas equações (3), (4) e (5). O valor de CV apresenta-se baixo em função de tratar-se de repetições em uma única amostra, comparando o valor de 42 % encontrado por Espírito Santo e Silva (2011) para 54 amostras. A amostragem direto no local de construção da trincheira de infiltração serve obtenção de maior precisão quando comparação com os valores de referência da literatura dos LV uma vez que existe uma grande variabilidade estrutural em função do arranjo e distribuição dos poros (Pessoa e Libardi, 2022), alterada ao sofrerem alterações físicas ou compactação local, se quebrando e modificando completamente o seu comportamento hidrodinâmico (Figueiredo et al., 2010). Contudo o valor de condutividade hidráulica é condizente com a ordem de grandeza encontrada na Tabela 2 pelo método dos anéis concêntricos.

Tabela 1 – Análise de consistência para a Condutividade Hidráulica Saturada à 10 cm de profundidade.

N	$\overline{y_{real}}$ (m/s)	S	CV (%)
36	0,00762	0,00198	25,95

A Tabela 2 foi composta utilizando as equações (1), (6), (7) e (8) para a determinação da Sorptividade (S) e da Transmissividade (A), além da análise do ajuste das curvas para os ensaios de infiltrabilidade.

A sorptividade apresenta variação de 0,062 a 0,29 cm.s^{-0,5} partindo de um estado de solo mais seco para mais úmido ao longo dos ensaios, enquanto que a transmissividade variou de 0,009 a 0,019 cm/s indicando alta eficiência de recarga local, o que é corroborado pela elevada porosidade total no local de 0,62 cm³.cm⁻³ (Pereira *et al.*, 2024). O valor de condutividade hidráulica foi aproximado ao relacionar a Equação (9) e o fator de forma (M) ponderador igual a 0,667 como recomendado por Philip (1953) e Basset e Najm (2025), em função de o solo não saturar instantaneamente.

$$K = \frac{A}{M} \quad (9)$$

Onde,

K , é a condutividade hidráulica saturada (cm.s⁻¹)

A , é a Transmissividade (cm.s⁻¹)

M , é o fator de forma

Tabela 2 – Ajuste do modelo de Philip das curvas de infiltração e Cálculo de K à 8 cm de profundidade.

	Ponto 1			Ponto 2			Ponto 3			Kméd (cm.s ⁻¹)
	S	A	K (cm.s ⁻¹)	S	A	K (cm.s ⁻¹)	S	A	K (cm.s ⁻¹)	
	0,062	0,019	0,029	0,24	0,009	0,013	0,29	0,01	0,017	0,019
N	9			9			9			
R ²	0,999			0,999			0,999			
RMSE	0,357			1,217			1,043			
NRMSE	1,489			5,069			4,346			

Os valores de R² mostram excelente ajuste ao modelo de Philip para a variabilidade dos dados observados em campo (o que pode ser observado na Figura 2), enquanto de a variação de NRMSE se manteve abaixo dos 5 %, garantindo um ajuste de qualidade excelente para modelos hidrológicos (NRMSE) (Helsel e Hirsch, 2002; Moriasi *et al.*, 2007).

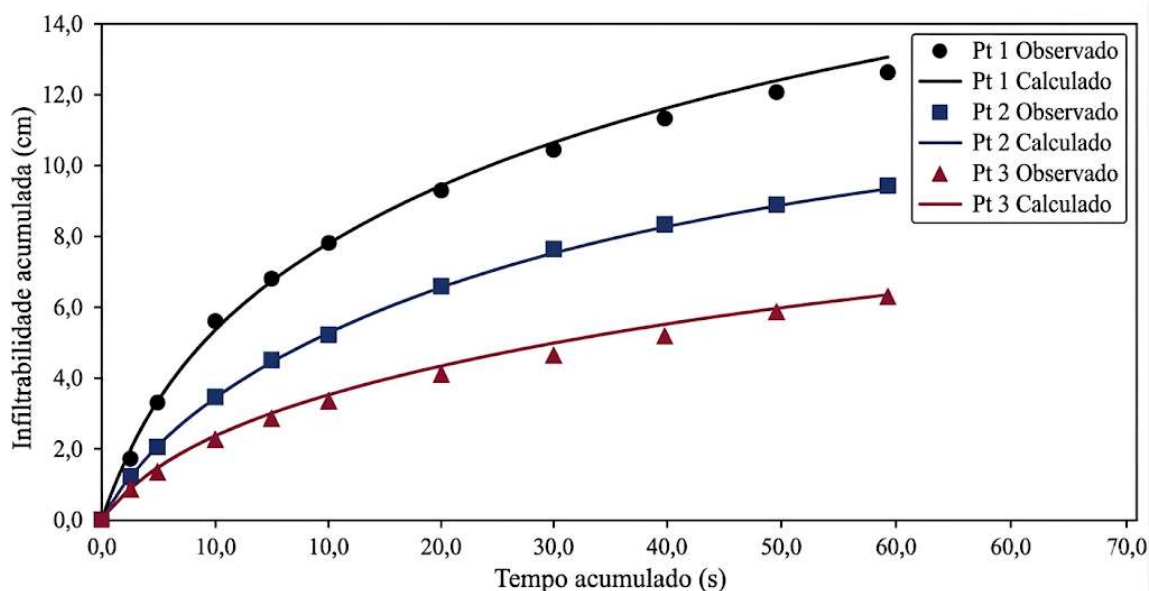


Figura 2 – Ensaio de Infiltrabilidade. Fonte: Autoria Própria.

Para a terceira etapa da pesquisa, foram coletadas amostras à profundidade de 1 m para que após o procedimento da Câmara de Richards, os dados de umidade volumétrica e a porosidade total (fixada e numericamente igual ao θ_s) sejam inseridos no software RETC (VAN GENUCHTEN *et*

al., 1991) para ajuste da equação (2) (Figura 3). No ajuste de van Genuchten mostrado na Tabela 3, o valor elevado de R^2 descreve bem o ajuste para os parâmetros, destacando-se o valor de α que mostrou-se significativo ($661,10 \text{ m}^{-1}$), podendo ser explicado pela estrutura macroporosa gerado de um elevado valor K, enquanto que θ_r mostra-se adequado ao Latossolo Vermelho, o que garante a estrutura bimodal característica.

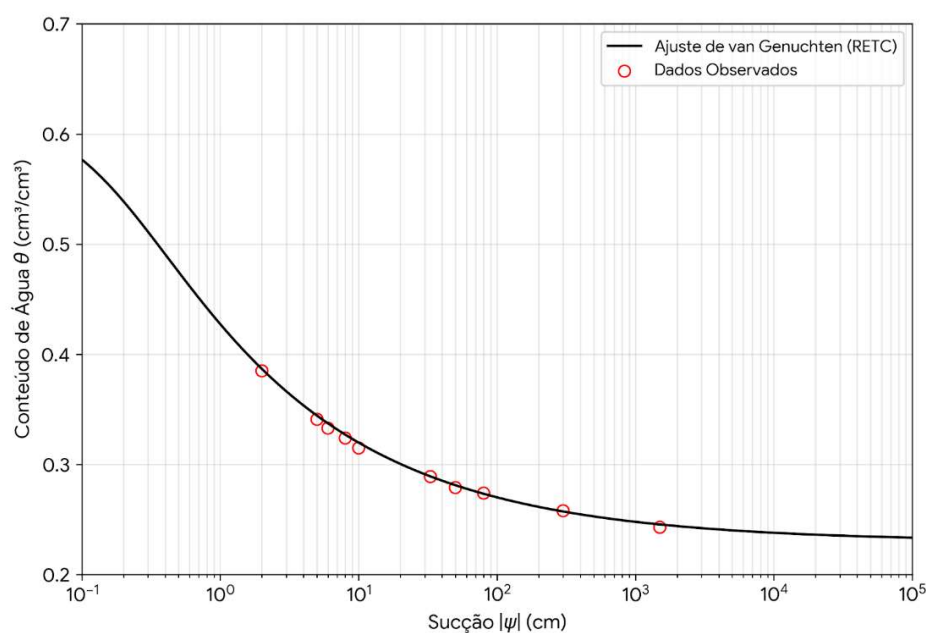


Figura 3 – Curva de retenção ajustada por van Genuchten. Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3 – Parâmetros de Ajuste de van Genuchten

Parâmetros Iniciais			Parâmetros Ajustados – RETC			R^2
$\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)}$	N	$\theta_r \text{ (cm}^3\text{.cm}^{-3}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)}$	N	$\theta_r \text{ (cm}^3\text{.cm}^{-3}\text{)}$	
7,16	1,13	0,29	661,10	1,35	0,23	0,999

CONCLUSÃO

A análise estatística dos parâmetros para a condutividade hidráulica saturada pelos métodos do mini-permeâmetro e infiltração de anel duplo com ajuste pela equação de Philip, bem como a curva de retenção ajustada por van Genuchten demonstram que os dados analisados são adequados ao Latossolo Vermelho estudado. A elevada qualidade de ajuste aos modelos teóricos ($R^2 = 0,999$) proporciona confiabilidade necessária para a aplicação desses parâmetros em modelos numéricos. Tais resultados devem ser úteis na simulação precisa de condições reais de fluxo de água no solo e do funcionamento de dispositivos de SbN e DMAPU em meios porosos não saturados.

REFERÊNCIAS

- ADASA – Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal, 329p, 2025.
- BASSET, C.; NAJM, A. M. The problem of too many infiltration models: Balancing infiltration model selection and physical meaning of soil hydraulic parameters. *Soil & Tillage Research* 252 (2025) 106622, 2025.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- ESPÍRITO SANTO, A. F.; SILVA, C. L. Condutividade hidráulica saturada de um Latossolo Vermelho sob Cerrado na Fazenda Água Limpa - DF. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2011, Natal - RN. Anais... Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.
- FIGUEIREDO, C. C. de; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Matéria orgânica particulada e agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo e vegetação natural de Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 621-630, 2010.
- HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. *Statistical methods in water resources*. Reston: U.S. Geological Survey, 2002.
- HOEPERS, A.; SOUZA, V.; SANTOS, L. Evaluation of Low Impact Development (LID) practices for runoff control in urban areas. *Water Resources Management*, 2022.
- KOIDE, S. et al. Hydrological processes and water resources management in the Brazilian Cerrado. *Hydrological Processes*, 2018.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- NAVARRO, A.; LUCENA, R.; BARROS, R.; GOMES, M. Low Impact Development (LID) as a strategy for sustainable urban drainage: A review. *Journal of Environmental Management*, 2022
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.
- PEREIRA, S. P.; A. A. C. M.; Leão, T. P. Performance of infiltration trenches in different soils in native vegetation and urban area of the Federal District of Brazil. *Rev. Ambient. Água* vol. 19, e3009, 2024.
- PESSOA, T. N.; LIBARDI, P. L. Physical-hydric properties of Oxisols as influenced by soil structure and clay mineralogy. *Catena*, v. 211, p. 106009, 2022.
- PHILIP, J. R., The Theory of Infiltration, 1, 2, 4. *Soil Sci.* 83, 84 (1957) 345-357, 435-448, 257-264.
- PHILIP, J. R. Theory of infiltration. *Advances in Hydrosience*, v. 5, p. 215-296, 1969.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Riverside, CA: U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, 85 p., 1991.

AGRADECIMENTOS ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB).