

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTIMATIVA DA UMIDADE DO SOLO COM FIBRAS ÓPTICAS AQUECIDAS: CONTRIBUIÇÕES DA EXPERIMENTAÇÃO EM PEQUENA ESCALA

Luis Eduardo Bertotto ¹; Alan Reis ²; Érick Rúbens O. Cobalchini ³; Dimaghi Schwamback ⁴; José Gescilam Sousa M. Uchôa ⁵; Cristina de Hollanda C. Tsuha ⁶ & Edson Cezar Wendland ⁷

Abstract: Recently, estimates of soil water content (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) have been enhanced by the actively heated fiber optics (AHFO) technique, which monitors temperature increases along heated fiber optic (FO) cables using distributed temperature sensing (DTS) devices. This article synthesizes the results of Bertotto *et al.* (2024; 2025), who evaluated two AHFO-based approaches for estimating θ : SPHP-DTS (single-probe) and DPHP-DTS (dual-probe). In both approaches, a resistive metallic alloy was used to heat the soil, and an FO cable was used to monitor temperature changes. The SPHP-DTS approach used the maximum temperature increase (T_{max} , °C) to build a specific calibration curve, achieving high accuracy ($RMSE = 0.019 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$). In contrast, the DPHP-DTS approach estimated θ from the specific heat capacity (C , $\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) using a semi-analytical solution to the heat conduction equation, resulting in lower accuracy ($RMSE = 0.042 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$). Both techniques exhibited reduced sensitivity under wet soil conditions due to the low signal-to-noise ratio of DTS measurements. Although SPHP-DTS provided higher accuracy, it requires controlled laboratory experiments and extensive calibration. Conversely, DPHP-DTS is more straightforward and practical, requiring no prior knowledge of the relationship between θ and the soil's thermal properties. The findings highlight operational challenges, such as heating variability and measurement noise, and emphasize the importance of conducting larger-scale and field-based studies to support the broader application of DTS technology in vadose zone investigations in Brazil.

Resumo: Recentemente, estimativas do teor de umidade do solo (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foram potencializadas pela técnica do aquecimento de fibras ópticas (AHFO), que monitora a elevação de temperatura ao longo de cabos de FO aquecidos, utilizando dispositivos de medição distribuída de temperatura (DTS). Este artigo sintetiza os resultados de Bertotto *et al.* (2024; 2025), que avaliaram duas abordagens baseadas nesse método para estimar θ : SPHP-DTS (sonda única) e DPHP-DTS (sonda dupla). Em ambas, utilizou-se uma liga metálica resistiva para aquecer o solo e um cabo de FO para monitorar a temperatura. A abordagem SPHP-DTS utilizou o máximo aumento de temperatura (T_{max} , °C) para construir uma curva de calibração específica, resultando em alta acurácia ($RMSE = 0,019$

1) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. bertotto@usp.br

2) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. alanreisar@gmail.com

3) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. cobalchini@usp.br

4) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. dimaghis@gmail.com

5) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. gescilam@usp.br

6) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-9501. chchtsuha@sc.usp.br

7) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Av. Trab. Sancarlenense, 400 - Parque Arnold Schmidt, São Carlos - SP, 13566-590 - (16) 3373-8270. ew@sc.usp.br

$\text{m}^{-3} \text{m}^{-3}$). Já a abordagem DPHP-DTS estimou θ a partir do calor específico (C , $\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) com base em uma solução semianalítica da equação de condução de calor, obtendo menor acurácia ($RMSE = 0,042 \text{ m}^{-3} \text{m}^{-3}$). Ambas as técnicas apresentaram sensibilidade reduzida em condições de solo úmido devido à baixa razão sinal-ruído do DTS. Apesar da maior acurácia da SPHP-DTS, sua aplicação exige experimentos controlados e extensiva calibração. Em contrapartida, a DPHP-DTS é mais prática e direta, dispensando conhecimento prévio da relação entre θ e propriedades térmicas do solo. As conclusões destacam desafios operacionais, como a variabilidade do aquecimento e o ruído nas medições, e apontam para a importância de pesquisas em maiores escalas e em condições de campo heterogêneas, visando ampliar o uso da tecnologia DTS em estudos da zona vadosa no Brasil.

Palavras-Chave – Medição distribuída de temperatura; propriedades térmicas do solo; solos não saturados.

INTRODUÇÃO

O método do pulso de calor (*heat pulse*, método HP) é uma técnica consagrada que tem sido amplamente utilizada em estudos relacionados aos solos (Lu *et al.* 2018; Meng *et al.* 2023). O método envolve a medição pontual de variações de temperatura ao longo do tempo, devido à emissão de fluxo de calor radial por uma fonte linear de calor inserida no solo. Essas variações de temperatura permitem o cálculo de propriedades térmicas do solo - como a condutividade térmica (λ , $\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$) e o calor específico (C , $\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) - e do teor de umidade do solo (θ , $\text{m}^{-3} \text{m}^{-3}$) (He *et al.* 2018).

Os dois tipos de sonda mais comuns do método HP são a sonda única (*single-probe heat pulse*, SPHP) e a sonda dupla (*dual-probe heat pulse*, DPHP). A SPHP consiste em um aquecedor e um sensor de temperatura integrados em uma única sonda, enquanto o dispositivo DPHP é composto por um aquecedor e um sensor de temperatura alojados em sondas paralelamente separadas (Bristow *et al.* 1994). Apesar dos avanços contínuos nas aplicações dos métodos SPHP e DPHP (Liu e Si 2011), ambos são inerentemente limitados a medições em escala pontual.

Uma técnica semelhante que foi introduzida nas últimas décadas para o monitoramento de θ é o método do aquecimento ativo de fibras ópticas (*actively heated fiber optics*, método AHFO) (Sayde *et al.* 2010). Esse método baseia-se no monitoramento da temperatura ao longo da extensão de FO utilizando dispositivos de medição distribuída de temperatura (*distributed temperature sensing*, DTS), após a aplicação de um pulso de calor em elementos metálicos embutidos ou em contato com os cabos de FO (Sourbeer e Loheide II 2015; Zubelzu *et al.* 2019). Os instrumentos DTS mais modernos podem fornecer dados de temperatura com intervalos de amostragem de até 12,5 cm e frequências de leitura de 1 s (Shehata *et al.* 2020).

Dada a semelhança entre os métodos AHFO e HP, alguns estudos tentaram aprimorar as aplicações de DTS integrando medições distribuídas de temperatura com modelos consagrados do método SPHP, formando a abordagem SPHP-DTS. No entanto, as estimativas de λ e θ a partir do SPHP-DTS podem ser fisicamente implausíveis e não revelar uma relação clara entre λ e θ (Dong *et al.* 2017). Uma opção comumente adotada é a construção curvas de correlação entre medições de θ e os dados diretamente medidos de aumento da temperatura (Sourbeer e Loheide II 2015; Lagos *et al.* 2020).

Alternativamente, pesquisas têm integrado o método AHFO com o método DPHP. Na abordagem DPHP-DTS, pelo menos dois cabos de FO são posicionados paralelamente e separados por uma distância de 5 a 25 mm (Apperl *et al.* 2019). Geralmente, um material resistivo ou um cabo com elementos metálicos ao redor da FO funciona como aquecedor, enquanto outro cabo de FO

monitora as variações de temperatura resultantes do pulso de calor. Nesse contexto, diversos estudos estimaram θ com sucesso com base em propriedades térmicas do solo utilizando soluções da equação de condução de calor (Apperl *et al.* 2019; Shehata *et al.* 2020).

Apesar dos avanços contínuos nas abordagens SPHP- e DPHP-DTS, poucas pesquisas aplicaram e compararam ambas em condições similares e controladas de laboratório. Assim, o objetivo deste artigo foi sintetizar os principais resultados de Bertotto *et al.* (2024) e Bertotto *et al.* (2025), que buscaram estimar θ a partir implementação experimental em pequena escala das abordagens SPHP- e DPHP-DTS, respectivamente. A partir disso, foram compilados os desafios e as oportunidades associados ao método AHFO, por meio dos quais buscou-se contribuir com a popularização da tecnologia DTS no Brasil e com o uso da temperatura como um traçador para estudos hidrológicos da zona vadosa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Configuração experimental

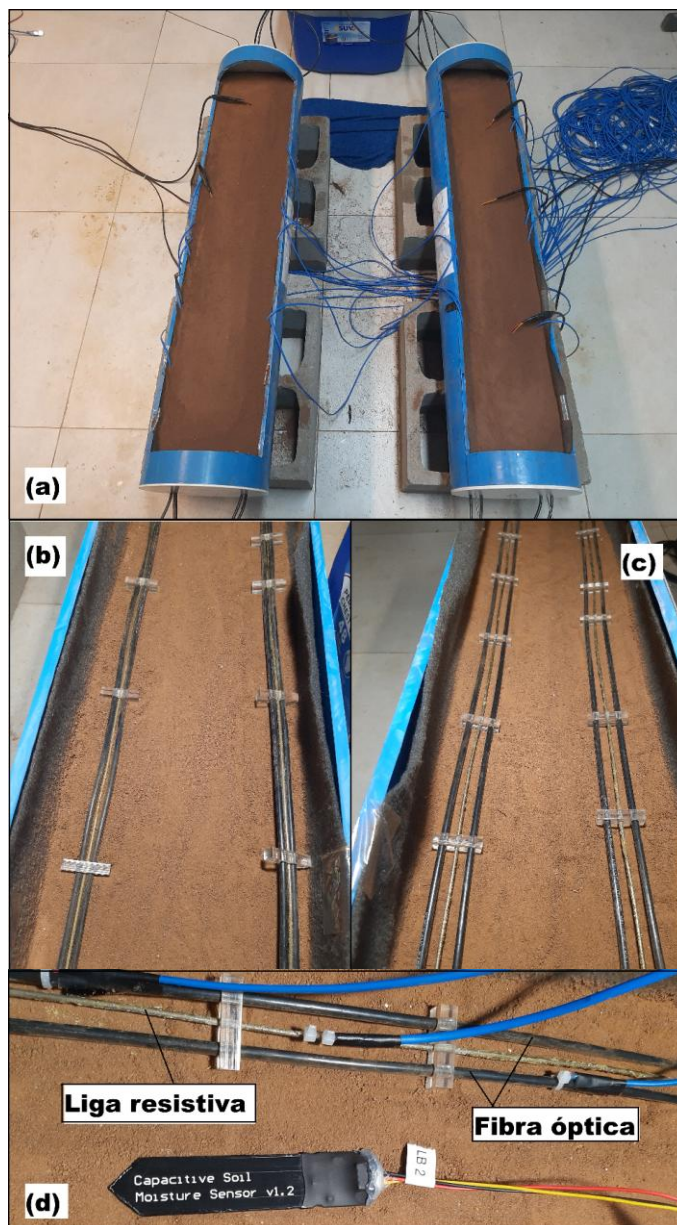
Nos artigos de Bertotto *et al.* (2024; 2025), dois modelos físicos experimentais foram construídos para a aplicação das abordagens SPHP- e DPHP-DTS em pequena escala. Em ambas, utilizou-se uma liga metálica resistiva para gerar o aquecimento do solo, enquanto um cabo de FO conectado a um dispositivo DTS realizou as medições de temperatura. Os experimentos consistiram em dois tubos de PVC de 1 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro horizontalmente orientados e devidamente preparados para receberem o solo em seus interiores (Figura 1a). Cinquenta orifícios de 4 mm de diâmetro, espaçados regularmente no fundo dos tubos, criaram uma condição de contorno inferior de drenagem livre, enquanto a evaporação da água do solo atuava na superfície.

O solo utilizado foi de textura franco-argilo-arenosa composta por 67% de areia, 7% de silte e 26% de argila. Após o posicionamento de uma manta geotêxtil na superfície interna de cada tubo, a fim de permitir apenas a passagem de água pelos orifícios inferiores, eles foram preenchidos com material granular em três etapas. Primeiramente, uma camada de 20 mm de cascalho foi posicionada para garantir a drenagem uniforme pelos orifícios. Em seguida, o assentamento de uma camada de 50 mm de solo sobre o cascalho permitiu alcançar o nível de posicionamento da liga resistiva e do cabo de FO, atingindo o nível horizontal de medição. Um dos tubos foi arranjado para permitir o contato da liga metálica com o revestimento externo do cabo óptico (abordagem SPHP-DTS, Figura 1b), enquanto o outro garantiu uma distância de centro a centro de 9,6 mm entre a liga e o cabo de FO (abordagem DPHP-DTS) (Figura 1c e 1d). Por fim, uma camada de 60 mm de solo cobriu o nível horizontal de medição, completando cada montagem experimental com uma altura total de solo de 130 mm. Um total de 29 kg de solo seco foi usado para preencher cada tubo, resultando em uma densidade aparente seca (ρ_b) de 1,38 g cm⁻³.

Em relação às medições realizadas, a configuração experimental foi composta por três sistemas: (1) o sistema de aquecimento, (2) o sistema de medição de temperatura e (3) o sistema de monitoramento da umidade do solo. O sistema de aquecimento consistiu em elementos para gerar e controlar os pulsos de calor, sendo eles o elemento de aquecimento, uma fonte de alimentação e um relé. O material de aquecimento utilizado foi uma liga metálica com propriedades resistivas (tipo Kanthal A-1, Sandvik AB, Estocolmo, Suécia) composta por ferro, cromo e alumínio, sendo ideal para aplicações que requerem aquecimento controlado. Uma fonte de alimentação (modelo AFR FA-3010-M, Simitron Comercial Ltda, São Paulo, Brasil) com regulagem de tensão e corrente aqueceu a liga com precisão de 0,1 V e 0,01 A, respectivamente, enquanto um relé compatível com Arduino controlou a duração do aquecimento com precisão de 1 ms. Com esse sistema, aplicou-se uma

potência de aquecimento de $4,3 \text{ W m}^{-1}$ durante 600 s no experimento de abordagem SPHP-DTS, enquanto utilizou-se uma potência de $8,1 \text{ W m}^{-1}$ durante 300 s no experimento DPHP-DTS.

Figura 1 – (a) Fotografia dos experimentos construídos para a aplicação das abordagens (b) SPHP-DTS e (c) DPHP-DTS. Em (d), detalhamento do posicionamento da liga resistiva e do cabo de FO na abordagem DPHP-DTS



O sistema de medição de temperatura foi composto por um cabo de FO (tipo Fiber-Lan Indoor-Outdoor, fabricado por Furukawa Electric Co., Ltd., Tóquio, Japão) e um dispositivo XT-DTS (Silixa Ltd., Hertfordshire, Reino Unido). Uma vez que o cabo era composto por duas FO, elas foram fusionadas na extremidade oposta ao DTS, que por sua vez foi configurado para coletar dados a cada 25,4 cm com uma frequência temporal de 20 s. Um banho frio ($\sim 0^\circ \text{C}$) e um banho quente ($\sim 40^\circ \text{C}$) calibraram as medições de temperatura da FO utilizando a configuração *double-ended*. Dessa forma, cada experimento gerou um total de 24 pontos de medição (3 por metro de fibra, 2 fibras, 4 m de cabo FO). Devido às condições aproximadamente homogêneas no nível horizontal de medição em cada

experimento, foi realizada uma média espacial entre esses 24 pontos amostrais, a fim de fornecer um único valor de temperatura associado a uma certa condição de θ .

Por fim, o sistema de monitoramento da umidade do solo foi caracterizado por medições pontuais de θ . Três sensores capacitivos (SKU: sensor SEN0193 v1.2) foram regularmente distribuídos no nível horizontal de medição em cada tubo. Antes do seu posicionamento dentro dos experimentos, os sensores foram individualmente calibrados conforme Schwaback *et al.* (2023), a fim de aumentar sua confiabilidade e acurácia. Os sensores foram conectados a uma placa Arduino Uno e um *datalogger shield*, permitindo que cada sensor realizasse seis leituras replicadas em intervalos de 5 minutos. Para mais detalhes sobre a configuração experimental, as propriedades do solo e a instrumentação empregada, recomenda-se a leitura de Bertotto *et al.* (2024; 2025).

Sistematização das medições

Após a conclusão da montagem dos experimentos, as medições de temperatura pelo DTS foram realizadas em duas etapas. A primeira etapa começou com a saturação do solo inicialmente seco. Essa umidificação homogênea foi feita manualmente próximo à superfície do solo, com o objetivo de permitir que θ diminuísse ao longo do tempo sob influência da drenagem livre (dominante no curto prazo) e da evaporação (dominante no longo prazo). Quando os sensores de umidade indicaram valores de θ próximos à umidade residual, uma nova saturação do solo marcou o início da segunda etapa de medições. Os dados coletados durante ambas as etapas foram utilizados no experimento de abordagem SPHP-DTS, enquanto apenas os dados da primeira saturação foram utilizados na abordagem DPHP-DTS.

Estimativa de θ na abordagem SPHP-DTS: construção de uma curva de calibração específica

Para interpretar os dados de temperatura na abordagem SPHP-DTS, Bertotto *et al.* (2024) aplicaram diferentes métodos, dentre os quais selecionou-se para este artigo o método do máximo aumento de temperatura (T_{max} , °C) (Equação 1). O T_{max} representa uma média dos dados de temperatura coletados durante um determinado período (Δt , s), uma vez que o aumento de temperatura se aproxima de um platô (Striegl e Loheide II 2012).

$$T_{max} = \frac{1}{N} \sum_{t_p - \Delta t}^{t_p} \Delta T(t) \quad (1)$$

Em que: N é o número de medições contidas no intervalo Δt , que foi definido como 40 s ($N = 3$), t_p é a duração do pulso de calor (s) e $\Delta T(t)$ é a diferença de temperatura entre o tempo t (s) e o início do pulso de calor ($t = 0$) (°C).

Os valores de θ associados a T_{max} foram calculados a partir da média das medições de θ coletadas pelos sensores capacitivos nos 15 min que antecederam o início de cada pulso de calor. Com essa abordagem, 12 pares de dados coletados durante a primeira saturação do solo foram usados para construir a curva de calibração entre θ e T_{max} , enquanto 6 pares de dados da segunda saturação foram utilizados para validar o modelo. Para garantir o ajuste adequado de uma curva de calibração aos dados experimentais, os modelos exponencial, polinomial (de segundo grau) e de potência foram testados usando o método dos mínimos quadrados (*ordinary least squares*, OLS).

Ademais, a qualidade do ajuste do modelo de calibração foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2). Adicionalmente, a acurácia das estimativas de θ na segunda saturação do solo foi investigada por meio da raiz do erro quadrático médio (*root mean square error*, RMSE, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), calculada entre as medições observadas e estimadas de θ .

Estimativa de θ na abordagem DPHP-DTS: uso de uma solução semianalítica da equação de condução de calor

Bertotto *et al.* (2025) utilizaram o modelo semianalítico desenvolvido por Knight *et al.* (2012) para o método DPHP para estimar as propriedades térmicas do solo, λ e C . O modelo é inicialmente formulado em termos da variação de temperatura no domínio de Laplace, mas a sua inversão numérica para o domínio do tempo permite determinar $\Delta T(t)$ para certos períodos de interesse. Assim, para transformar o modelo de Knight *et al.* (2012) para o domínio do tempo, foi utilizado o algoritmo de Stehfest (Stehfest 1970), com 16 coeficientes (ω_i para $Z_n = 16$ na Equação 2). O algoritmo é detalhado das Equações (2) a (4), e os coeficientes podem ser encontrados em Knight *et al.* (2012).

$$\Delta T(t) \sim \frac{q'}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{i} \frac{K_0(\mu_i r)}{\left\{ \mu_i a_1 \left[K_1(\mu_i a_1) + \left(\frac{\mu_i a_1 \beta_1}{2} \right) K_0(\mu_i a_1) \right] \right\} \left\{ \mu_i a_2 \left[K_1(\mu_i a_2) + \left(\frac{\mu_i a_2 \beta_2}{2} \right) K_0(\mu_i a_2) \right] \right\}} \quad (2)$$

$$\mu_i = \sqrt{\frac{C \ln(2)}{\lambda t}} i; i = 1, 2, \dots, Z \quad (3)$$

$$\beta_n = \frac{C_n}{C} \quad (4)$$

Em que: q' é a potência aplicada ao material aquecedor ($= 8,1 \text{ W m}^{-1}$); r é a distância entre os centros da liga resistiva e do cabo de FO ($= 0.0096 \text{ m}$); K_0 e K_1 são as funções de Bessel modificadas do segundo tipo de ordem 0 e 1, respectivamente; a_n é o raio do material aquecedor ($n = 1$) e do cabo de FO ($n = 2$) (m); e C_n é o calor específico volumétrico do material aquecedor ($n = 1$) e do cabo de FO ($n = 2$) ($\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Os valores de a_1 , a_2 , C_1 e C_2 podem ser consultados em Bertotto *et al.* (2025).

O modelo de Knight *et al.* (2012) pode ser aplicado quando o tempo considerado, t , exceder a duração do pulso de calor, t_p , indicando a fase de resfriamento do solo ($t > t_p$). Assim, o modelo foi ajustado à média espacializada dos 24 pontos amostrais coletados pelo DTS com um tempo de ajuste de 600 s, que incluiu, portanto, as fases de aquecimento e resfriamento do solo. O algoritmo simplex de Nelder-Mead (Lagarias *et al.* 1998) foi aplicado para solucionar o modelo de Knight *et al.* (2012) com a função objetivo de otimizar os valores de λ e C para 14 curvas de $\Delta T(t)$, sendo cada uma delas associada a uma certa condição de θ .

Após o cálculo das propriedades térmicas por Bertotto *et al.* (2025), valores de θ derivados de λ e C indicaram a acurácia do modelo de Knight *et al.* (2012). Neste artigo, são apresentados apenas os valores de θ calculados com C , pois levaram a estimativas de θ com menores erros. Dessa forma, após a determinação de C , a Equação 5 foi utilizada para calcular θ , em que C é expresso como a soma ponderada dos calores específicos dos constituintes do solo, desprezando-se a fase gasosa (Kluitenberg 2002). Novamente, o RMSE foi utilizado para avaliar a acurácia das estimativas de θ com base em C , em comparação com as medições pontuais dos sensores de umidade capacitivos.

$$C = \rho_b c_s + \rho_w c_w \theta \quad (5)$$

Em que: c_s é o calor específico dos sólidos do solo ($= 788 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), ρ_w é a massa específica da água ($= 1000 \text{ kg m}^{-3}$) e c_w é o calor específico da água ($= 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

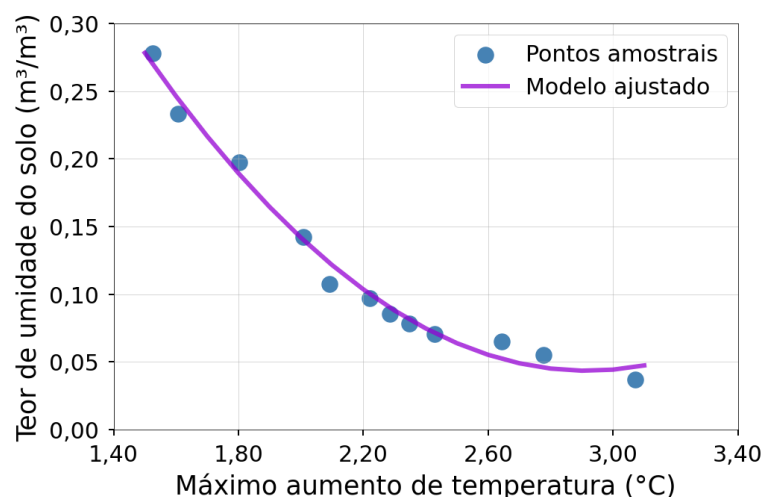
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa de θ na abordagem SPHP-DTS: construção de uma curva de calibração específica

Os pontos amostrais usados na construção da curva de correlação entre θ e T_{max} estão apresentados na Figura 2, a qual também está exibida. Dentre os modelos testados, aquele que apresentou o melhor ajuste ($R^2 = 0,99$) foi a função polinomial de segundo grau. Nesse sentido, a

literatura reporta a aplicação bem-sucedida de diferentes tipos de modelos. Por exemplo, Lagos *et al.* (2020) aplicaram uma função de potência para relacionar θ à temperatura acumulada, método de cálculo semelhante ao T_{max} . Striegl e Loheide II (2012), por sua vez, descreveram a relação entre θ e T_{max} utilizando um modelo bi-exponencial.

Figura 2 – Modelo de calibração ajustado aos pontos amostrais de θ em função de T_{max}

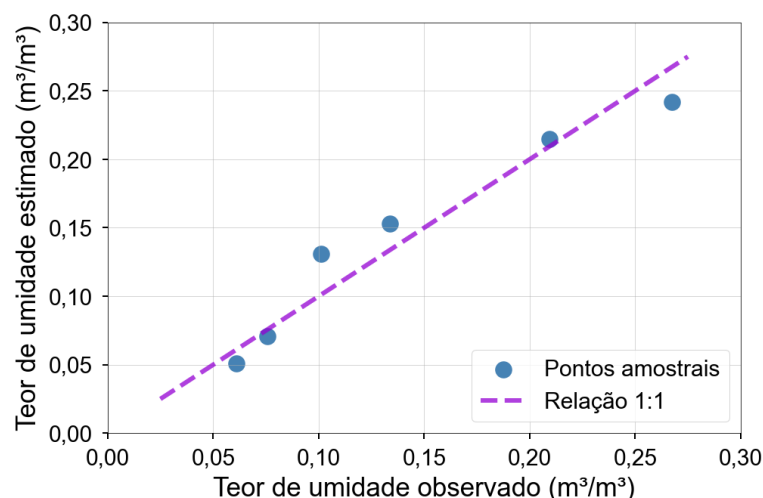


Assim, considerando tanto os relatos da literatura quanto os resultados obtidos por Bertotto *et al.* (2024), destaca-se a vantagem de desenvolver um modelo de calibração específico para o solo em questão. Embora essa abordagem dificulte a aplicação mais ampla do método AHFO, ela permite que tais modelos incorporem indiretamente os aspectos únicos de uma dada aplicação, tais como as propriedades mineralógicas e físicas do solo e as características térmicas do material aquecedor.

Ademais, os resultados de Bertotto *et al.* (2024) indicaram a não linearidade frequentemente identificada na relação de θ com os diferentes métodos baseados no incremento de temperatura. Os resultados mostraram que a inclinação da curva de calibração é ligeiramente maior para valores mais altos de θ (Figura 2). Esse comportamento sugere uma diminuição da sensibilidade de T_{max} à medida que θ aumenta. Em outras palavras, uma mesma variação numérica em θ resultou em variações menores nos valores de T_{max} em condições úmidas, comparativamente às condições secas. Resultados semelhantes foram relatados por Sayde *et al.* (2014).

A relação entre os valores estimados e observados de θ durante a etapa de validação está ilustrada na Figura 3. A aplicação do pulso de calor com potência de $4,3 \text{ W m}^{-1}$ e duração de 600 s no experimento de abordagem SPHP-DTS levou a um $RMSE = 0,019 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Apesar de baixo, esse erro representa alterações não previstas pelo modelo de calibração após a segunda saturação do solo, que se sobrepueram à relação entre θ e T_{max} estabelecida durante o primeiro ciclo de umedecimento (etapa de calibração). No entanto, a aplicação dessa configuração de aquecimento aliada ao uso do método T_{max} levou a estimativas acuradas de θ na etapa de validação.

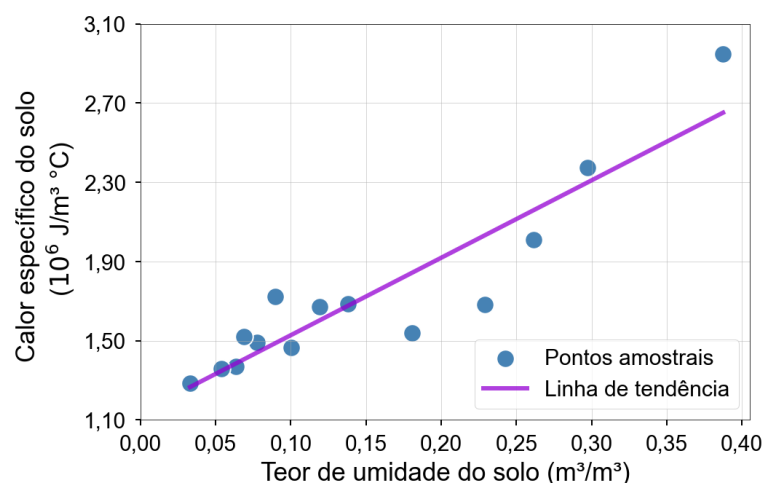
Figura 3 – Relação entre os valores estimados e observados de θ na abordagem SPHP-DTS



Estimativa de θ na abordagem DPHP-DTS: uso de uma solução semianalítica da equação de condução de calor

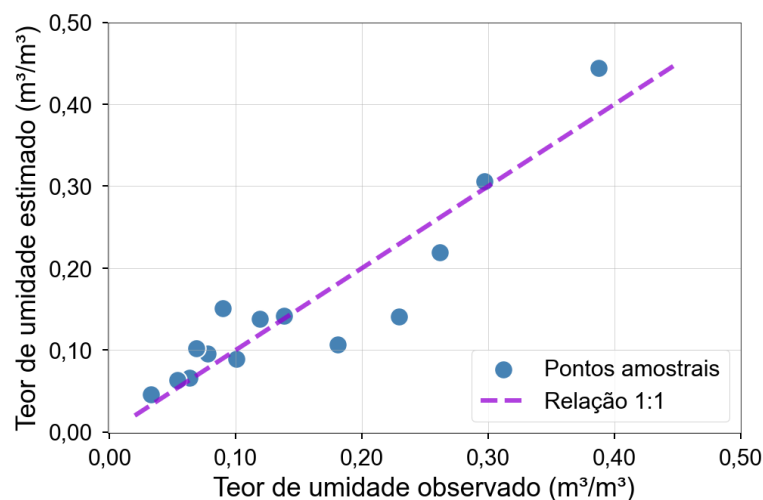
As estimativas de C pela solução semianalítica em função do θ observado são apresentadas na Figura 4. A partir disso, nota-se que C aumenta de magnitude de forma aproximadamente linear à medida que θ aumenta. Isso acontece porque a água proporciona maior capacidade de armazenamento de calor ao solo, aumentando assim os valores de C . Deve-se ressaltar também que a água melhora a capacidade de condução de calor pelo meio poroso, o que se reflete no aumento de λ em condições mais úmidas, conforme discutido por Bertotto *et al.* (2025).

Figura 4 – Relação entre os valores estimados de C pela solução semianalítica e os valores observados de θ



A Figura 5 apresenta a relação entre os valores estimados e observados de θ , cujo $RMSE$ foi de $0,042 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A partir disso, nota-se um aumento na dispersão dos pontos em torno da linha 1:1 à medida que θ aumenta, o que correspondeu a maiores erros em faixas específicas de θ . Por exemplo, os valores de $RMSE$ foram de $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $\theta < 0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,08 \leq \theta < 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; e de $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $\theta > 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Em outras palavras, os resultados mostraram que o erro nas estimativas de θ aumentou sob condições de solo úmido e diminuiu sob condições de solo seco.

Figura 5 – Relação entre os valores estimados e observados de θ na abordagem DPHP-DTS



Assim como destacado no tópico anterior relativo à abordagem SPHP-DTS, tal comportamento encontrado no experimento DPHP-DTS foi atribuído à sensibilidade variável do método AHFO de acordo com diferentes faixas de θ . Para o caso da abordagem DPHP-DTS, alguns estudos também relataram que estimativas de θ baseadas em soluções analíticas ou semianalíticas da equação de condução de calor apresentam maior erro e menor sensibilidade em altos valores de θ (Shehata *et al.* 2020; Yao *et al.* 2022).

Estimativa da umidade do solo com fibras ópticas aquecidas: desafios e oportunidades

Ao considerar os resultados apresentados por Bertotto *et al.* (2024; 2025) e sintetizados anteriormente, algumas observações foram levantadas tanto individualmente quanto conjuntamente para as abordagens SPHP- e DPHP-DTS. A construção de uma curva de calibração específica se revelou como uma estratégia mais eficaz para as estimativas de θ do que a aplicação de uma solução semianalítica, uma vez que o *RMSE* foi de 0,019 e 0,042 m³ m⁻³ para os experimentos SPHP- e DPHP-DTS, respectivamente.

Apesar disso, deve-se notar que a abordagem da curva de calibração pode ser demorada e trabalhosa, pois requer a construção de experimentos em laboratório envolvendo grandes volumes de solo com características como densidade e classe textural devidamente controladas (Benítez-Buelga *et al.* 2016). Nesse sentido, a partir da validação do modelo no experimento SPHP-DTS, os resultados sugeriram que a relação entre θ e T_{max} pode não ser estacionária, uma vez que o comportamento térmico do solo apresentou pequenas diferenças entre a primeira e a segunda saturação. Essas diferenças foram atribuídas às alterações da estrutura dos poros do solo do primeiro para o segundo umedecimento (Bertotto *et al.* 2024). Dessa maneira, essa não estacionariedade beneficia a adoção da abordagem DPHP-DTS, que se torna vantajosa por não necessitar do conhecimento da relação entre o conteúdo de água e o comportamento térmico do solo a priori, permitindo, portanto, uma aplicação direta nas condições experimentais ou de campo requeridas.

Ademais, como a tecnologia DTS se baseia no processamento de sinais de pulsos de laser para fornecer informações de temperatura (Selker *et al.* 2006), um fator intrínseco que afeta suas medições independentemente da abordagem empregada é o ruído do sinal. Nesse aspecto, o efeito da razão sinal-ruído tem grande impacto nas leituras de temperatura efetuadas em condições de solo úmido (Shehata *et al.* 2020). Isso acontece porque, em condições próximas da saturação, a razão sinal-ruído é reduzida devido ao menor aumento de temperatura detectado pelo DTS (Shehata *et al.* 2022). Em

função disso, ambas as abordagens SPHP- e DPHP-DTS apresentam uma redução de sensibilidade à medida que θ aumenta (Bertotto *et al.* 2024; 2025).

Adicionalmente, embora os resultados de Bertotto *et al.* (2025) tenham demonstrado a eficácia no uso da liga resistiva na estimativa de θ , algumas limitações também foram apontadas. Por exemplo, a uniformidade do aquecimento do material aquecedor não foi constante em toda a faixa de θ . Os resultados sugeriram que o desempenho térmico da liga resistiva é sensível a variações no conteúdo de água do solo (Bertotto *et al.* 2025). Além disso, flutuações na potência elétrica aplicada à liga foram caracterizadas como uma fonte de incerteza. Nesse sentido, variações de voltagem também foram reportadas em uma aplicação de campo do método AHFO por Benítez-Buelga *et al.* (2016). Assim, o uso de instrumentos de alta precisão para a alimentação elétrica do material aquecedor deve ser considerado em futuras pesquisas.

CONCLUSÃO

Neste artigo, foram reportados os principais resultados de Bertotto *et al.* (2024) e Bertotto *et al.* (2025), que aplicaram as abordagens SPHP- e DPHP-DTS, respectivamente, em escala de laboratório para promover estimativas de θ . A partir disso, as seguintes conclusões foram derivadas:

- (1) A avaliação da resposta térmica do solo sob múltiplos ciclos de saturação favorece a aplicação e o aprimoramento do método AHFO;
- (2) A abordagem SPHP-DTS garante estimativas de θ com menores erros, ainda que ao custo da construção de modelos físicos sob condições controladas em laboratório, o que é uma tarefa alongada e trabalhosa;
- (3) Por outro lado, a abordagem DPHP-DTS permite uma aplicação mais direta da tecnologia DTS, uma vez que não requer nenhuma informação prévia da relação entre θ e o comportamento térmico do solo. No entanto, suas estimativas de θ são menos acuradas do que as da abordagem SPHP-DTS;
- (4) Em ambas as abordagens, observou-se uma reduzida sensibilidade em condições de solo úmido, decorrente do ruído inerente às medições distribuídas de temperatura.

De forma geral, esta síntese contribuiu para o avanço do melhor entendimento do método do aquecimento de fibras ópticas para a determinação das propriedades térmicas e do teor de umidade do solo. Estudos futuros devem ampliar a escala do arranjo experimental apresentado neste trabalho, além de incorporar essa configuração em condições de campo heterogêneas.

AGRADECIMENTOS – Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001; em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 131511/2020-3); e em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processos nº 2015/03806-1, 2019/24292-7, 2021/14016-2 e 2023/08756-9).

REFERÊNCIAS

- APPERL, B., BERNHARDT, M., SCHULZ, K., 2019. Towards improved field application of using distributed temperature sensing for soil moisture estimation: A laboratory experiment. *Sensors* 20 (1), 29.
- BENÍTEZ-BUELGA, J., RODRÍGUEZ-SINOBAS, L., SÁNCHEZ CALVO, R., GIL-RODRÍGUEZ, M., SAYDE, C., SELKER, J. S., 2016. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. *Water Resour. Res.* 52 (4), 2985–2995.
- BERTOTTO, L.E., REIS, A., COBALCHINI, É.R., SCHWAMBACK, D., SOUSA MOTA UCHÔA, J.G., WENDLAND, E.C., 2024. Heated fibre optics to monitor soil moisture under successive saturation–drying cycles: An experimental approach. *Eur. J. Soil Sci.* 75 (4), 1–17.

- BERTOTTO LE, REIS A, TSUHA CDHC, WENDLAND EC, 2025. Enhancing the estimation of soil water content using a resistive heater in the dual-probe distributed temperature sensing approach, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- BRISTOW, K., WHITE, R., KLUITENBERG, G., 1994. Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating. *Soil Res.* 32 (3), 447.
- DONG, J.; AGLIATA, R.; STEELE-DUNNE, S.; HOES, O.; BOGAARD, T.; GRECO, R.; GIESEN, N. 2017. The Impacts of Heating Strategy on Soil Moisture Estimation Using Actively Heated Fiber Optics. *Sensors*, v. 17, n. 9, p. 2102.
- HE, H., DYCK, M.F., HORTON, R., REN, T., BRISTOW, K.L., LV, J., SI, B., 2018. Development and application of the Heat Pulse Method for soil physical measurements. *Rev. Geophys.* 56 (4), 567–620.
- KLUITENBERG, G.J., 2002. 5.2 heat capacity and specific heat. In: *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, USA. p. 1201–1208.
- KNIGHT, J.H., KLUITENBERG, G.J., KAMAI, T., HOPMANS, J.W., 2012. Semianalytical solution for dualprobe heat-pulse applications that accounts for probe radius and heat capacity. *Vadose Zone J.* 11 (2), vzj2011.0112.
- LAGARIAS, J.C., REEDS, J.A., WRIGHT, M.H., WRIGHT, P.E., 1998. Convergence properties of the Neldermead simplex method in low dimensions. *SIAM J. Optim.* 9 (1), 112–147.
- LAGOS, M., SERNA, J.L., MUÑOZ, J.F., SUÁREZ, F., 2020. Challenges in determining soil moisture and evaporation fluxes using distributed temperature sensing methods. *J. Environ. Manage.* 261, 110232.
- LIU, G., SI, B., 2011. Single- and dual-probe heat pulse probe for determining thermal properties of dry soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75 (3), 787–794.
- LU, X., SUN, Y., CHEN, G., QIN, Y., BAI, Y., LI, X., MOU, X., 2018. Influences of thermal dispersion on soil water flux estimates using heat pulse technique in saturated soils. *Catena* 167, 228–235.
- MENG, F., LI, T., SHENG, W., DIXON, C., ZHOU, R., JONES, S.B., 2023. Heat pulse probe design optimization using numerical simulation. *Geoderma* 436, 116534.
- SAYDE, C.; GREGORY, C.; GIL-RODRIGUEZ, M.; TUFILLARO, N.; TYLER, S.; GIESEN, N. van de; ENGLISH, M.; CUENCA, R.; SELKER, J., 2010. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, v. 46, n. 6, p. 1-8.
- SAYDE, C., BUELGA, J.B., RODRIGUEZ-SINOBAS, L., EL KHOURY, L., ENGLISH, M., VAN DE GIESEN, N., SELKER, J.S., 2014. Mapping variability of soil water content and flux across 1–1000 m scales using the actively heated fiber optic method. *Water Resour. Res.* 50 (9), 7302–7317.
- SCHWAMBACK, D., PERSSON, M., BERNDTSSON, R., BERTOTTO, L.E., KOBAYASHI, A.N., WENDLAND, E.C., 2023. Automated low-cost soil moisture sensors: Trade-off between cost and accuracy. *Sensors* 23 (5), 2451.
- SELKER, J.S., THÉVENAZ, L., HUWALD, H., et al., 2006. Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resour. Res.* 42 (12).
- SHEHATA, M., HEITMAN, J., ISHAK, J., SAYDE, C., 2020. High-resolution measurement of soil thermal properties and moisture content using a novel heated fiber optics approach. *Water Resour. Res.* 56 (7), e2019WR025204.
- SHEHATA, M., HEITMAN, J., SAYDE, C., 2022. High-resolution field measurement of soil heat capacity and changes in soil moisture using a dual-probe heat-pulse distributed temperature sensing approach. *Water Resour. Res.* 58 (6), e2021WR031680.
- SOURBEER, J.J., LOHEIDE, S.P., 2015. Obstacles to long-term soil moisture monitoring with heated distributed temperature sensing. *Hydrol. Process.* 30 (7), 1017–1035.
- STEHFEST, H., 1970. Algorithm 368: Numerical inversion of laplace transforms [D5]. *Commun. ACM* 13 (1), 47–49.
- STRIEGL, ARLEN M.; LOHEIDE II, STEVEN P. 2012. Heated Distributed Temperature Sensing for Field Scale Soil Moisture Monitoring. *Groundwater*, v. 50, n. 3, p. 340-347.
- YAO, J.C., SHI, B., LIU, J., et al., 2022. Improvement and performance evaluation of a dual-probe heat pulse distributed temperature sensing method used for soil moisture estimation. *Sensors* 22 (19), 7592.
- ZUBELZU, S., RODRIGUEZ-SINOBAS, L., SAA-REQUEJO, A., BENITEZ, J., TARQUIS, A.M., 2019. Assessing soil water content variability through active heat distributed fiber optic temperature sensing. *Agric. Water Manage.* 212, 193–202.