

Análise da Dinâmica de Sucção do Solo em Londrina/PR e Sua Relação com Eventos Climáticos

Alana Dias de Oliveira

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, alanaoliveira@utfpr.edu.br

Bruno Henrique de Lima

Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, bruno.henrique1@uel.br

Renan Felipe Braga Zanin

Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, renanzanin@uel.br

Flávia Gonçalves Pissinati Pelaquim

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Brasil, fgoncalves@professores.utfpr.edu.br

Raquel Souza Teixeira

Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, raquel@uel.br

RESUMO: A tensiometria, uma técnica essencial na engenharia geotécnica e hidrologia, é fundamental para entender as interações entre água e solo. Este estudo explora a tensiometria no solo argiloso e laterítico de Londrina/PR, focando na dinâmica de sucção e saturação em resposta a variações climáticas. Quatro tensiômetros, coletando dados semanalmente por dois anos, registraram sucções de 2 a 40 kPa, refletindo a capacidade moderada do solo em reter água. As leituras variaram significativamente entre períodos úmidos e de estiagem, com menores sucções indicando maior saturação. Um destaque foi a influência de uma forte precipitação em março de 2021, que seguiu uma resposta linear nas sucções do solo, sugerindo uma complexa interação entre eventos climáticos e propriedades do solo. Foi observado que, quanto maiores as sucções iniciais, maiores foram as reduções na sucção após eventos de precipitação. A análise também revelou que a profundidade influencia a resposta da sucção do solo, com tensiômetros instalados a 25, 50, 75 e 90 cm apresentando diferentes respostas, sendo os tensiômetros mais profundos (75 cm e 90 cm) os que apresentaram leituras mais estáveis. Esses achados sublinham a importância da tensiometria para entender a hidráulica do solo em aplicações geotécnicas e de gestão de recursos hídricos.

PALAVRAS-CHAVE: Tensiometria, Monitoramento Hidrológico, Solo Argiloso, Propriedades Hidráulicas do Solo.

ABSTRACT: Tensiometry, an essential technique in geotechnical engineering and hydrology, is fundamental for understanding soil-water interactions. This study explores tensiometry in the clayey and lateritic soils of Londrina/PR, focusing on the dynamics of suction and saturation in response to climatic variations. Four tensiometers, collecting data weekly over two years, recorded suctions ranging from 2 to 40 kPa, reflecting the soil's moderate water retention capacity. The readings varied significantly between wet and dry periods, with lower suctions indicating higher saturation. A notable observation was the influence of a heavy rainfall event in March 2021, which did not follow a linear response in soil suctions, suggesting a complex interaction between climatic events and soil properties. It was observed that higher initial suctions were associated with greater reductions in suction after precipitation events. The analysis also revealed that depth influences the soil suction response, with tensiometers installed at 25, 50, 75, and 90 cm showing different responses, with the deeper tensiometers (75 cm and 90 cm) exhibiting more stable readings. These findings underscore the importance of tensiometry in understanding soil hydraulics for geotechnical applications and water resource management.

KEYWORDS: Tensiometry, Hydrological Monitoring, Clayey Soil, Soil Hydraulic Properties.

1 INTRODUÇÃO

Estudos realizados por Mirzaii e Yasrobi (2012) apontam que, em solos não saturados, a permeabilidade é influenciada principalmente por dois fatores: a tensão vertical e a sucção matricial. Estes controlam o teor de água no solo, de modo que um aumento na sucção matricial resulta na redução do teor de água e, conseqüentemente, numa diminuição significativa da permeabilidade. Adicionalmente, foi observado que a condutividade hidráulica em solos não saturados pode variar significativamente em resposta às alterações na sucção matricial, o que evidencia uma relação direta com a curva característica solo-água durante processos de umedecimento e secagem (FREDLUND *et al.*, 1994; JIMÉNEZ *et al.* 2020).

Considerando que a infiltração de água eleva o grau de saturação em solos não saturados, provocando mudanças na pressão da água contida nos poros e, conseqüentemente, nas características de infiltração (JIMÉNEZ *et al.* 2020), torna-se fundamental entender a interação entre os parâmetros hidráulicos e constitutivos dos solos não saturados com as condições iniciais e de contorno enfrentadas em diversos desafios geotécnicos relacionados à infiltração de água. Projetos inadequados de estruturas de infiltração podem levar a problemas como colapso, expansão, erosão interna e impactos negativos em fundações próximas (LEÃO CARVALHO, 2013; ASSADOLLAHI; NOWAMOOZ, 2017). Nesse contexto, a tensiometria emerge como uma técnica crucial, proporcionando medições precisas da pressão da água no solo, ou sucção, fundamentais para a análise do grau de saturação e das propriedades hidráulicas do solo (CHENG *et al.* 2021).

Portanto, este trabalho se dedica a explorar a aplicabilidade da tensiometria na análise da sucção e do grau de saturação do solo, com um olhar voltado para as características específicas dos solos de Londrina/PR, Brasil. A natureza argilosa e laterítica desses solos demanda uma investigação aprofundada, essencial para otimizar a gestão dos recursos hídricos e para planejar infraestruturas resilientes às variações climáticas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Contexto Geotécnico e Características Hidráulicas

Realizado em Londrina, Paraná, este trabalho foca no solo local, situado em uma zona climática Cfa (KÖPPEN; GEIGER, 1928), caracterizada por um clima subtropical úmido. A temperatura média anual é de 22°C, variando entre 11°C e 34°C (INMET, 2022). Londrina está na bacia do rio Tibagi, sobre o Aquífero Serra Geral, fazendo parte dos Sistemas Aquíferos Serra Geral e Guarani, essenciais para o abastecimento hídrico de cerca de 40% da população do Paraná (ITCG, 2018; Celligoi *et al.*, 2019). A geologia inclui o Grupo São Bento e a Formação Serra Geral, com derrames basálticos da era Mesozoica (MINEROPAR, 2001; ITCG, 2018).

O solo é granulometricamente classificado como argila siltosa e silte arenoso, com e sem defloculante, respectivamente (GONÇALVES *et al.*, 2018; OLIVEIRA, 2023). Adicionalmente, Teixeira *et al.* (2010) classificaram o solo como LG', um solo argiloso laterítico, utilizando o ensaio MCT (Miniatura Compactado Tropical). Pelaquim (2021) designou o solo como um silte de alta compressibilidade (MH) segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). As propriedades físicas e hidráulicas do solo são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades Físicas e Hidráulicas do Solo – Até 1 m de profundidade.

Propriedade	Valor
Massa Específica dos Sólidos – ρ_s (g/cm ³)	3,03
Limite de Liquidez – LL (%)	51
Limite de Plasticidade – LP (%)	13
Teor de Umidade Natural em Campo – w (%)	38,5
Grau de Saturação em Campo – Sr (%)	64,0
Coefficiente de Permeabilidade Saturado (Laboratório) – k_s (cm/s)	10 ⁻⁴
Coefficiente de Permeabilidade Saturado (Campo) – k_s (cm/s)	10 ⁻³

Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2018) e Oliveira (2023)

As curvas características solo-água para o ramo de secagem, estudadas em amostras indeformadas por Oliveira *et al.* (2022) e ajustadas conforme Gitirana Jr. e Fredlund (2004), são ilustradas na Figura 1. Até 1.000

kPa, os dados foram obtidos utilizando a panela de pressão de Richards, e para valores superiores, a técnica do papel filtro foi empregada. Reitera-se que o foco deste estudo foi exclusivamente no ramo de secagem devido à relevância específica dessa fase para a dinâmica de sucção observada em condições de diminuição do teor de água no solo.

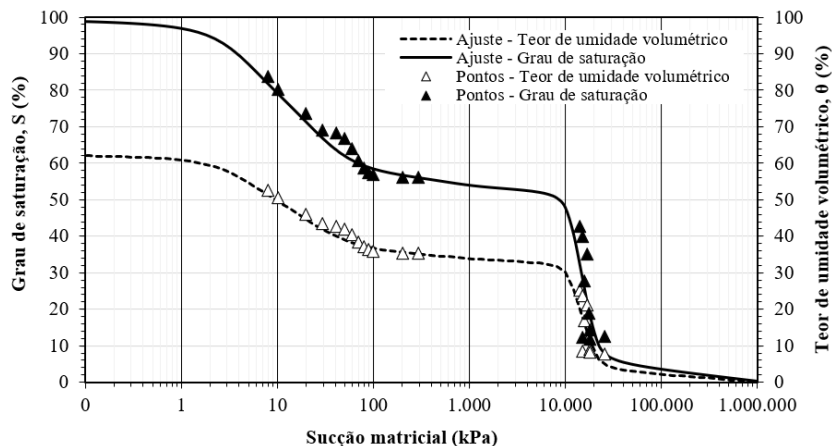


Figura 1 – Curva característica solo-água para o ramo de secagem.

2.2 Monitoramento

Os tensiômetros foram posicionados no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da UEL, cujas coordenadas são 23°19'40,4"S e 51°12'06,3"W. O reconhecimento geotécnico do perfil do solo local foi realizado por meio de sondagens de simples reconhecimento com SPT (Standard Penetration Test) e revelou um perfil de argila siltosa, variando de muito mole a dura, com cores vermelho escuro e variegada, até a profundidade de 18 metros. O nível de água não foi encontrado até essa profundidade na data da sondagem.

Os tensiômetros foram locados próximos a poços de infiltração e furos de sondagem, inseridos durante outros experimentos. Foram instalados quatro tensiômetros SoloTest® (T01 a T04), como indicado na Figura 2. Cada tensiômetro foi instalado em uma profundidade diferente, com as pedras porosas posicionadas nas seguintes profundidades: T01 a 90 cm, T02 a 75 cm, T03 a 50 cm, e T04 a 25 cm. Cada tensiômetro consiste em uma haste de PVC de 90 cm, com uma ponta conectada a um vacuômetro de aço inoxidável (0 a 760 mmHg) e a outra a uma pedra porosa.

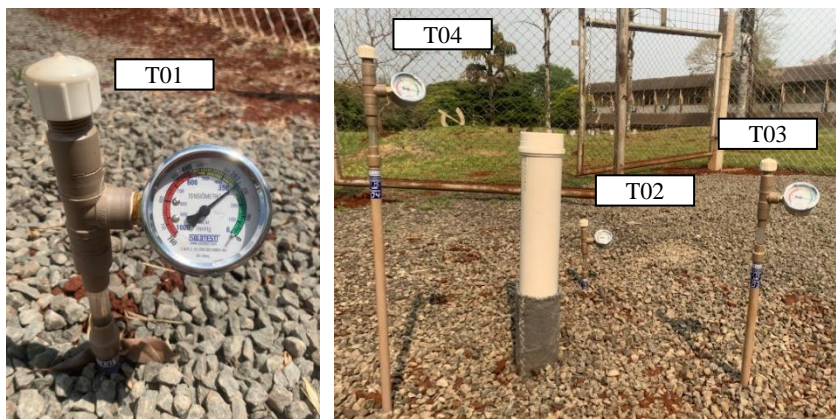


Figura 2. Profundidade de instalação dos tensiômetros.

A calibração envolveu a saturação com água destilada, remoção de bolhas com bomba de vácuo e testes de pressão. A instalação no campo usou um trado de 1" de diâmetro, com os tensiômetros colocados em profundidades especificadas na Figura 2, visando análise radial das variações de sucção. O monitoramento da sucção foi realizado semanalmente por um ano, totalizando 48 leituras de setembro de 2020 a setembro de 2021. E, duas vezes por semana por um ano, totalizando 96 leituras de março de 2023 a março de 2024.

Os dados de chuva foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), coletados por um pluviômetro instalado nas coordenadas 23°19'32" S e 51°08'30" W, e altitude: 566 metros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta as leituras dos tensiômetros T01, T02, T03 e T04, enquanto a Figura 4 compila as leituras dos tensiômetros T02, T03 e T04, ambas ao longo de um ano.

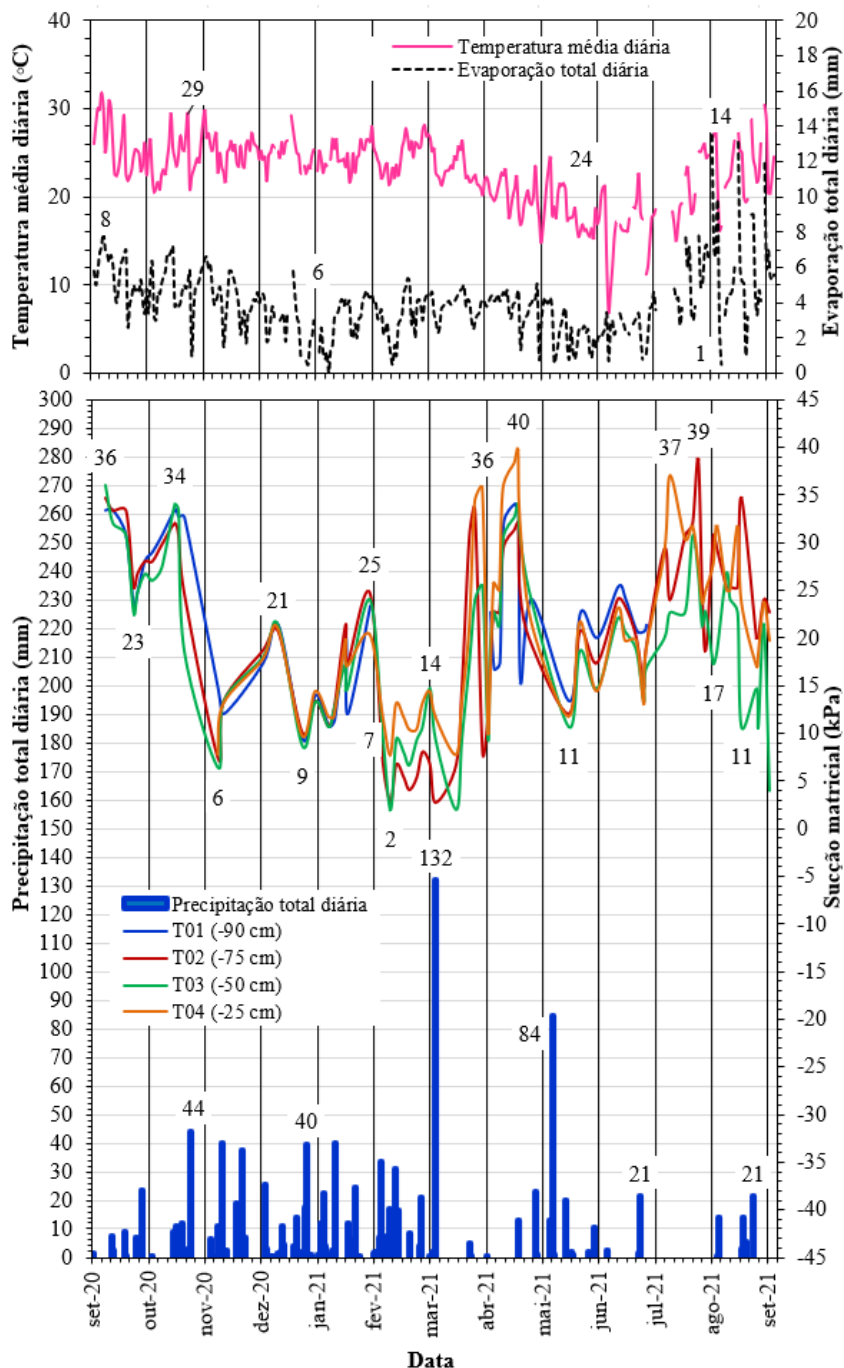


Figura 3. Condições climáticas e tensiometria registrada no período de setembro de 2020 a setembro de 2021. Fonte: INMET (2022)¹ e Oliveira (2023)

¹ Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em 30 de set. de 2023

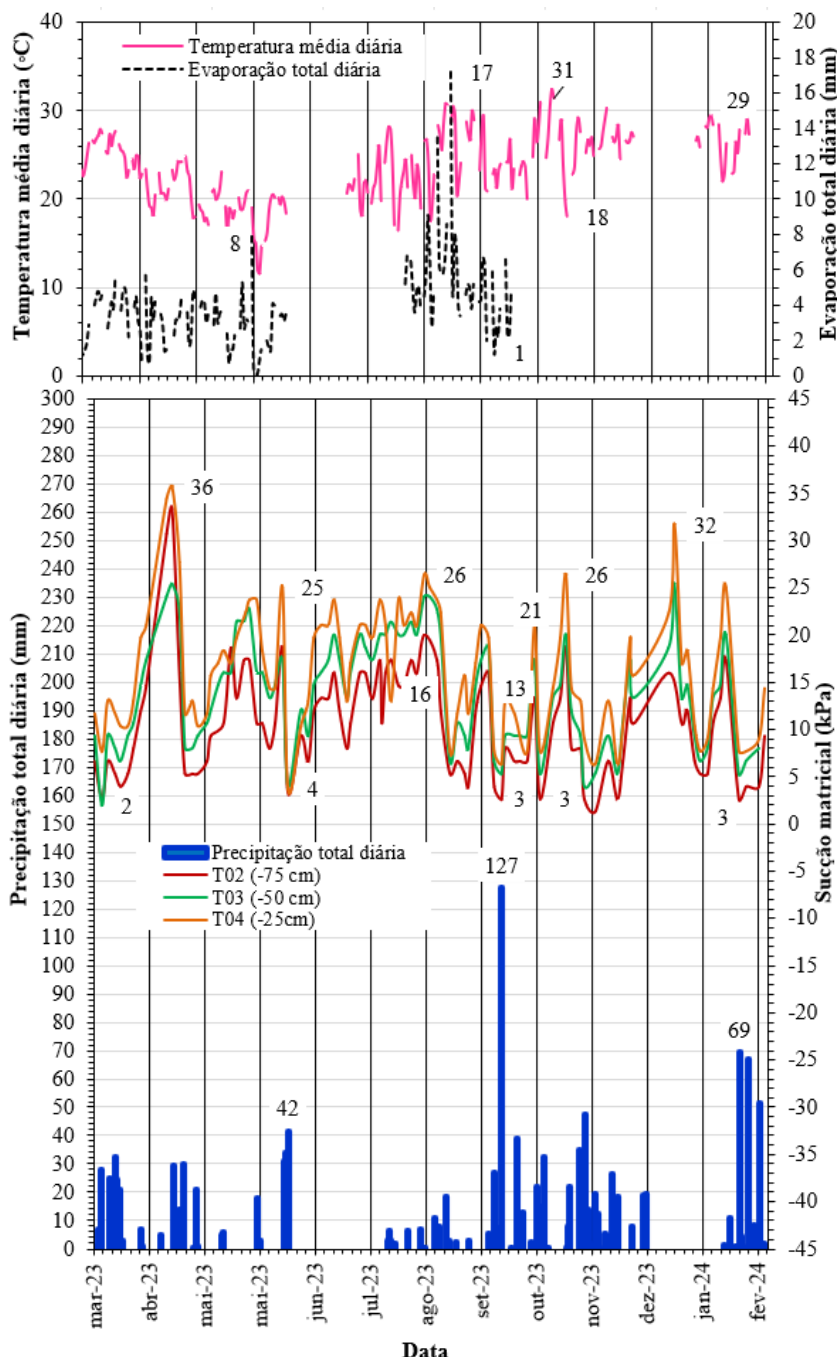


Figura 4. Condições climáticas e tensiometria registrada no período de março de 2023 a março de 2024.
 Fonte: INMET (2024)². Nota: O T01 não foi considerado nesta análise pois foi retirado do campo.

Essas leituras são correlacionadas com a precipitação e evaporação total diária, além das temperaturas médias. Ressalta-se que para o período de 31/12/2023 a 31/01/2024, ainda há dados de precipitação, temperatura e evaporação indisponíveis no INMET.

Observa-se que a maioria dos valores de sucção variam de baixos, com um mínimo de 2 kPa, a moderados, alcançando um máximo de 40 kPa. Isso indica uma capacidade moderada de retenção de água pelo solo. Valores mais baixos de sucção sugerem um solo mais saturado ou eficiente na retenção de água, particularmente quando o solo laterítico contém uma porção significativa de argila, enquanto valores mais elevados indicam um solo mais seco ou menos retentivo, característica observada quando o solo laterítico apresenta uma textura mais arenosa (LIKOS; JAAFAR, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

² Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em 29 de jun. de 2024

De maneira geral, os dados dos tensiômetros revelam uma variação clara nas sucções durante os períodos úmidos, com sucções mais baixas, e os períodos secos, com sucções mais elevadas. Analisando a Figura 3, observa-se que para uma mesma data em abril de 2021, por exemplo, os tensiômetros registraram sucções matriciais próximas a 40 kPa na superfície (-25 cm) e aproximadamente 34 kPa em profundidades maiores (-90 cm).

No entanto, houve dias em março e maio de 2021, que esses valores foram significativamente menores, com sucções mínimas medidas próximas a 2 kPa e 11 kPa, respectivamente. Essas observações são complementadas pelas descobertas de Jiménez *et al.* (2020), que destacam que as tensões de sucção em solos não saturados dependem do período de análise, apresentando aumento na estação seca e diminuição na estação úmida. O estudo também ressalta a importância dos ciclos de histerese hidráulica, evidenciando que as variações espaciais e temporais nas tensões de sucção se comportaram de maneira semelhante.

É importante destacar que a maior precipitação diária registrada em março de 2021, alcançando 132 mm, resultou em um evento de alagamento significativo em um dos pontos considerados cartão postal da cidade de Londrina/PR. Após esse evento, o tensiômetro T03 indicou a maior variação de sucção passando de 14 para 2 kPa, na profundidade de -50 cm. Entretanto, a análise dos dados de todos os tensiômetros indica que a reação da sucção do solo às precipitações não é imediata: após dias com maior volume de chuva, os níveis de sucção do solo não diminuem de forma uniforme. Ou seja, há um tempo de resposta.

Então, este efeito retardado da sucção aos eventos de precipitação, sugere uma relação complexa que provavelmente é influenciada por fatores como a composição do solo, os níveis anteriores de umidade e outras condições ambientais (XU *et al.*, 2005). Essa complexidade é corroborada pelo estudo de Cheng *et al.* (2021), que demonstrou que o impacto do padrão de chuva na taxa de redução da sucção do solo é caracterizado por uma relação não linear, enfatizando que variações mínimas nos padrões de chuva podem exercer uma influência considerável na rapidez com que a sucção do solo diminui.

Foram também avaliadas as correlações de Pearson entre os valores iniciais de sucção matricial antes da chuva e a quantidade de mudança devido à chuva, conforme apresentado na Tabela 2. Para isto foram considerados eventos de precipitações acumulados de forma contínua (de 2 dias) e somente aqueles dias com leituras registradas nos tensiômetros. A correlação de Pearson é uma medida que quantifica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, variando de -1 a 1. Um coeficiente de correlação igual a 1 indica uma correlação linear perfeita positiva, onde um aumento em uma variável está associado a um aumento proporcional na outra.

Tabela 2. Coeficientes de correlação para cada profundidade.

Tensiômetro	Coeficientes de correlação	
	2020/2021	2023/2024
T01 (-90 cm)	-0,149	/
T02 (-75 cm)	-0,083	-0,343
T03 (-50 cm)	-0,096	-0,379
T04 (-25 cm)	-0,021	-0,385

Os resultados revelaram uma correlação negativa entre os valores iniciais de sucção matricial logo antes da chuva e a mudança na sucção matricial após a chuva para todas as profundidades medidas. Uma correlação negativa sugere que um aumento na precipitação está associado a uma diminuição na sucção matricial, o que faz sentido fisicamente, já que a umidade tende a reduzir a sucção. Além disso, a magnitude dessa relação varia de acordo com a profundidade. Especificamente, os coeficientes de correlação para 2020/2021 variaram de -0,021 a -0,149, enquanto para 2023/2024, os coeficientes variaram de -0,343 a -0,379, sendo estes valores relativamente pequenos, sugerindo que a tendência linear é de fraca a moderada.

Esse comportamento é consistente com as observações de Hossain (2009), que afirmou que a quantidade de diminuição na sucção matricial após a chuva depende da sucção matricial inicial logo antes da chuva. É importante notar que, embora exista uma correlação, esta não implica causalidade. Isto porque, a correlação de Pearson não estabelece uma relação de causa e efeito pois não considera outros fatores que podem influenciar a relação observada.

Além disso, observou-se que a relação entre a variação da sucção e a profundidade em que o tensiômetro foi instalado não foi tão evidente quanto mencionado por Fernandes (2016). Embora existam algumas variações nos dados, elas não parecem seguir uma tendência clara que confirme a expectativa de que a faixa

de variação seja mais ampla para os tensiômetros instalados em profundidades maiores em comparação com os mais superficiais. Mesmo nos períodos sem precipitação evidente, notam-se flutuações na sucção do solo, o que pode ser atribuído a outros fatores, como a evapotranspiração, a capilaridade do solo e outras interações solo-água que não são diretamente observáveis apenas por meio da precipitação.

Observa-se uma tendência distintiva relacionada à profundidade do solo e à sua umidade. Especificamente, o tensiômetro T04, instalado a uma profundidade de -25 cm, apresentou leituras que variaram de forma mais acentuada ao longo dos períodos monitorados, indicando uma maior suscetibilidade às influências externas, como a precipitação e a evaporação, comuns na camada superficial do solo (ASSADOLLAHI; NOWAMOOZ, 2017). Inclusive, na Figura 4, é possível observar que dias com maior evaporação tendem a apresentar sucções menores. Por outro lado, tensiômetros localizados em profundidades maiores, como o T01 e o T02, posicionados a -90 cm e -75 cm, respectivamente, revelaram valores de sucção mais estáveis e menos propensos a flutuações abruptas. Visualmente, as linhas que representam as maiores profundidades (T02) parecem ter uma resposta mais lenta em comparação com as das profundidades menores (T03 e T04), sugerindo uma inércia hidráulica do solo.

Os picos e vales nas linhas de maior profundidade são menos pronunciados e parecem ocorrer de forma mais lenta, o que indica que a sucção do solo em profundidades maiores responde mais lentamente às variações na precipitação. Essa demora em atingir as tensões máximas e mínimas em profundidades maiores sugere que a redistribuição da umidade no solo leva tempo, resultando em uma mudança gradual nas tensões de sucção (JIMÉNEZ *et al.*, 2020). Esse comportamento corrobora a noção de que o teor de umidade do solo tende a ser mais variável nas proximidades da superfície, enquanto em profundidades maiores, os teores de umidade tendem a ser mais constantes e menos afetados por variações diárias ou eventos climáticos de curta duração (OLAIZ; ZAPATA, 2022).

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo destacam o papel crucial da tensiometria na avaliação das propriedades hidráulicas do solo argiloso e laterítico de Londrina/PR, especialmente em resposta a variações climáticas. A implementação de quatro tensiômetros, com leituras semanais ao longo de dois anos, revelou uma faixa de sucção do solo entre 2 e 40 kPa, evidenciando uma capacidade moderada de retenção de água pelo solo. A análise das leituras indicou variações significativas na sucção do solo entre períodos úmidos e de estiagem, com valores mais baixos de sucção refletindo uma maior saturação.

Além disso, a correlação negativa identificada entre as sucções iniciais e as mudanças após a chuva ressalta a sensibilidade do solo às condições iniciais de umidade antes dos eventos de precipitação, sugerindo uma relação direta entre o estado de umidade prévio do solo e sua reação às variações hídricas. A influência da profundidade na resposta da sucção do solo também foi evidenciada, com tensiômetros mais profundos apresentando leituras mais estáveis, o que implica uma menor susceptibilidade às influências externas, como a precipitação e a evaporação, nas camadas mais profundas do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assadollahi, H., Nowamooz, H. (2017) *Using a complementary evapotranspiration relationship to estimate surface suction for soil-atmosphere interaction analysis*, pp.1251-1255. Acesso em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_79 [Acesso em: 13 Março 2024].
- Celligoi, A., Corcóvia, J.A., Pinese, J.P.P. (2019) Análise hidroquímica dos aquíferos Guarani e Serra Geral no município de Ibiporã-PR, *Caminhos de Geografia*, 20(72), pp.77-93. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.14393/rcg207242096> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Cheng, Z.L. *et al.* (2021) *Multivariate modeling of soil suction response to various rainfall by multi-gene genetic programming*, *Acta Geotechnica*, 16(11), pp.1-16. Acesso em: <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01211-y> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S. (1994) *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), pp.533-546. Acesso em:

<http://dx.doi.org/10.1139/t94-062> [Acesso em: 13 Março 2024].

- Gitirana Jr., G.F.N., Fredlund, D.G. (2004) *Soil-Water Characteristic Curve Equation with Independent Properties*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(2), pp.209-212. Acesso em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:2\(209\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:2(209)) [Acesso em: 13 Março 2024].
- Gonçalves, F. *et al.* (2018) *Caracterização físico-química e mineralógica de três solos do Estado do Paraná*. In: Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador. Geotecnia e Desenvolvimento Urbano - COBRAMSEG 2018.
- Hossain, K. (2009) *Effect of rainfall on matric suction and stability of a residual granite soil slope*.
- ITCG (2018) *Mapa Geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná*, Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná, Curitiba.
- Köppen, W., Geiger, R. (1928) *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm.
- Leão Carvalho, E.T. (2013) *Avaliação Geotécnica de Poços de Infiltração de Águas Pluviais*, Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Likos, W.J., Jaafar, R. (2013) *Pore-Scale Model for Water Retention and Fluid Partitioning of Partially Saturated Granular Soil*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(5), pp.724-737. Acesso em: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000811](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000811) [Acesso em: 13 Março 2024].
- MINEROPAR (2001) *Atlas Geológico do Estado do Paraná*, Curitiba: Governo do Estado do Paraná. 125 p.
- Mirzaii, A., Yasrobi, S.S. (2012) *Effect of net stress on hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Transport in Porous Media, 95(3), pp.497-505. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11242-012-0058-1> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Olaiz, A., Zapata, C.E. (2022) *Climate-driven soil suction variation using a natural-order Fourier series approach*, E3S Web of Conferences, 382, pp.22002-22002. Acesso em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338222002> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Oliveira, A.D. (2023) *Avaliação numérica e analítica da infiltração de águas pluviais em perfil de solo argiloso laterítico*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- Oliveira, A.D. *et al.* (2022) *The structure of tropical lateritic soils as an impacting factor in the shape of soil-water characteristic curves*, Soils And Rocks, 45(2), pp.1-13. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2022.070521> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Pelaquim, F.G.P. (2021) *Estabilidade de taludes em solo argiloso não saturado considerando o efeito da variação pluviométrica*, Tese – Doutorado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- Jiménez, J.R. *et al.* (2020) *Suction stress in unsaturated soils considering hydraulic hysteresis*, Current Journal of Applied Science and Technology, pp.110-123. Acesso em: <https://doi.org/10.9734/CJAST/2020/v39I3231007> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Teixeira, R.S. *et al.* (2010) *Mobility of potentially harmful metals in latosols impacted by the municipal solid waste deposit of Londrina, Brazil*, Applied Geochemistry, 25(1), pp.1-15. Acesso em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.022> [Acesso em: 13 Março 2024].
- Xu, Q., Huang, R., Tang, M. (2005) *Investigation and analysis of the suction of unsaturated soils in a landslide*.