CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (CRAS) E HISTERESE: FUNDAMENTOS FÍSICOS, MODELAGEM AVANÇADA E IMPLICAÇÕES HIDROLÓGICAS E AGRONÔMICAS

Daianne Santos dos Anjos[1];Larissa Vasconcelos Santos[2];Walmir Souza Vasconcelos[3] & Maria Isidoria Silva Gonzaga [4]

RESUMO – A curva de retenção de água no solo (CRAS) e a histerese são propriedades essenciais para a compreensão do funcionamento e movimento da água em meios não saturados. Portanto, este trabalho visa apresentar uma revisão crítica da literatura sobre os fundamentos físicos da CRAS e da histerese hidráulica, abordando os avanços na modelagem da dinâmica água-solo e os desafios da representação de solos reais, com ênfase na estrutura, bimodalidade dos poros e implicações hidrológicas e agronômicas. A metodologia consistiu na busca de artigos nas bases de dados Web of Science e Scopus, selecionando-se 106 artigos para o desenvolvimento deste trabalho, publicados entre 2021 e 2026. Os metadados foram analisados utilizando o software R (pacote Bibliometrix) e o VOSviewer. Os resultados bibliométricos demonstram que o pico de publicações sobre este tema ocorreu em 2024. A análise conceitual destaca que a CRAS e a histerese são controladas por forças matriciais, mineralogia, capilaridade e teor de matéria orgânica presente no solo. Portanto, conclui-se que a integração desses processos físicos correlacionados com os biológicos é essencial, pois contribuem efetivamente para o manejo sustentável do solo.

ABSTRACT– The soil water retention curve (CRAS) and hysteresis are essential properties for understanding the functioning and movement of water in unsaturated media. Therefore, this work aims to present a critical literature review on the physical fundamentals of the SWRC and hydraulic hysteresis, addressing advances in modeling water-soil dynamics and the challenges of representing real soils, with emphasis on structure, pore bimodality, and hydrological and agronomic implications. The methodology consisted of searching for articles in the Web of Science and Scopus databases, selecting 106 articles for the development of this work, published between 2021 and 2026. The metadata were analyzed using the R software (Bibliometrix package) and VOSviewer. Bibliometric results demonstrate that the peak of publications on this topic occurred in 2024. Conceptual analysis highlights that the CRAS and hysteresis are controlled by matric forces, mineralogy, capillarity, and the organic matter content found in the soil. Therefore, it is concluded that the integration of these physical processes correlated with biological ones is essential, as they effectively contribute to sustainable soil management.

Palavras-Chave – Matéria Orgânica; arquitetura dos poros; Água no solo.

[1]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99640-6586, daianne1696@gmail.com
[2]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99860-2771, larissavasconcelos.ufs@gmail.com
[3]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 83 99603-4541, walmirsv@hotmail.com
[4]) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, Rosa Elze, São Cristóvão - SE, 79 99820-6008, mariaisisilva@gmail.com

INTRODUÇÃO

A curva de retenção de água no solo (CRAS) constitui uma das propriedades físico-hídricas mais importantes para o desenvolvimento agrícola, expressando a relação entre o teor de água e a energia com que esta permanece retida nos poros do solo (Wei et al., 2024; Xu et al., 2024). Dessa forma, as propriedades físicas do solo influenciam diretamente o comportamento hidrológico, bem como a disponibilização de nutrientes e o desenvolvimento das culturas (Wang et al., 2023).

A retenção hídrica é fortemente condicionada pela mineralogia da fração argila e pelo teor de matéria orgânica, fatores que afetam a área superficial especifica, a conectividade dos poros e as forças de adsorção da água. Solos com argilominerais expansivos e elevados teores de matéria orgânica tendem a apresentar maior retenção de água devido à elevada superfície reativa e à interação entre partículas coloidais e moléculas de água (Smagin, 2025; Xu et al., 2024). Em paralelo, têm sido discutidas estratégias como o uso de biochar modificado para o aumento da capacidade de armazenamento de água em matrizes porosas degradadas ou submetidas a condições limitantes (Zhou et al., 2025).

A condutividade hidráulica também representa um parâmetro essencial na modelagem do movimento da água no solo, sendo amplamente aplicada na engenharia agrícola, ambiental e geotécnica (Darzi; Sadeghi; Zhou, 2023; Xu et al., 2024). Nesse cenário, a curva de retenção de água no solo (CRAS) destaca-se por descrever a relação entre a umidade volumétrica (θ) e o potencial matricial (ψ), subsidiando a compreensão dos processos físico-hídricos do solo bem como o manejo de irrigação (Kumar et al., 2022). Entretanto, diversos fatores que influenciam a retenção hídrica ainda são frequentemente negligenciados na determinação da CRAS, como histerese, difusão de vapor, expansão das argilas, temperatura, concentração de solutos e distribuição do tamanho e arranjo das partículas do solo (Darzi; Sadeghi; Zhou, 2023; Tan et al., 2024).

A histerese é um importante fator de variabilidade da CRAS, caracterizada por diferentes trajetórias de secagem e umedecimento para um mesmo potencial matricial (Polich et al., 2026; Saha, Sekharan e Manna, 2022). Esse fenômeno resulta do aprisionamento de ar nos poros, das variações no ângulo de contato entre água e partículas do solo e das alterações estruturais decorrentes de ciclos de secagem e reumedecimento (Lin, Qian e Zhai, 2022; Sun et al., 2025). Adicionalmente, a heterogeneidade do sistema poroso contribui para a persistência da histerese e influencia a dinâmica da água em solos não saturados (Chen et al., 2024; Matos-Paucar et al., 2026).

Modelos hidrológicos têm usado informações de histerese para aprimorar as estimativas de infiltração, drenagem, evaporação e redistribuição da água no solo. Um exemplo de incorporação da

histerese ocorre em sistemas de irrigação de alta precisão, para melhorar a interpretação de sensores de potencial hídrico e umidade. Contudo, a dinâmica hídrica em solos naturais ainda apresenta desafios relacionados à heterogeneidade estrutural, à histerese hidráulica e à complexidade dos sistemas porosos.

Desse modo, objetiva-se realizar uma revisão bibliográfica crítica sobre os fundamentos físicos da CRAS e da histerese hidráulica, abordando avanços na modelagem da dinâmica água-solo e os desafios da representação de solos reais, com ênfase na estrutura, bimodalidade dos poros e implicações hidrológicas e agronômicas.

MATERIAL E MÉTODOS

A revisão da literatura foi realizada em maio de 2026 por meio da busca de artigos nas bases de dados Web of Science (https://www.webofknowledge.com) e Scopus (https://www.scopus.com). Para a seleção dos artigos, utilizou-se a busca booleana ("water retention curve" OR "soil water retention") AND ("hysteresis") AND ("model*" OR "hydraulic conductivity" OR "hydrologic*"). Foram considerados artigos publicados em português e inglês entre o período de 2021 e 2026. Os critérios de inclusão contemplaram estudos sobre a física do solo, os modelos matemáticos, a retenção de água no solo, a histerese e as transformações estruturais decorrentes do manejo e do uso agrícola do solo.

Os metadados dos artigos selecionados foram exportados no formato BibTeX e analisados no software R com o auxílio do pacote Bibliometrix. Arquivos duplicados foram excluídos, gerando-se uma planilha eletrônica com os artigos únicos. A análise de co-ocorrência de palavras-chave foi realizada com o auxílio do software VOSviewer.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Bibliometria de estudos sobre Curva de retenção de água no solo e histerese

A busca inicial nas bases de dados retornou 183 publicações. Após a exclusão dos registros duplicados, foram selecionados 106 artigos para a análise detalhada com base nos critérios de inclusão estabelecidos. A Figura 1 apresenta a evolução temporal da produção científica sobre a curva de retenção de água no solo associada à histerese, abrangendo o período de 2021 a 2026. Os dados demostram que as publicações atingiram seu pico no ano de 2024.

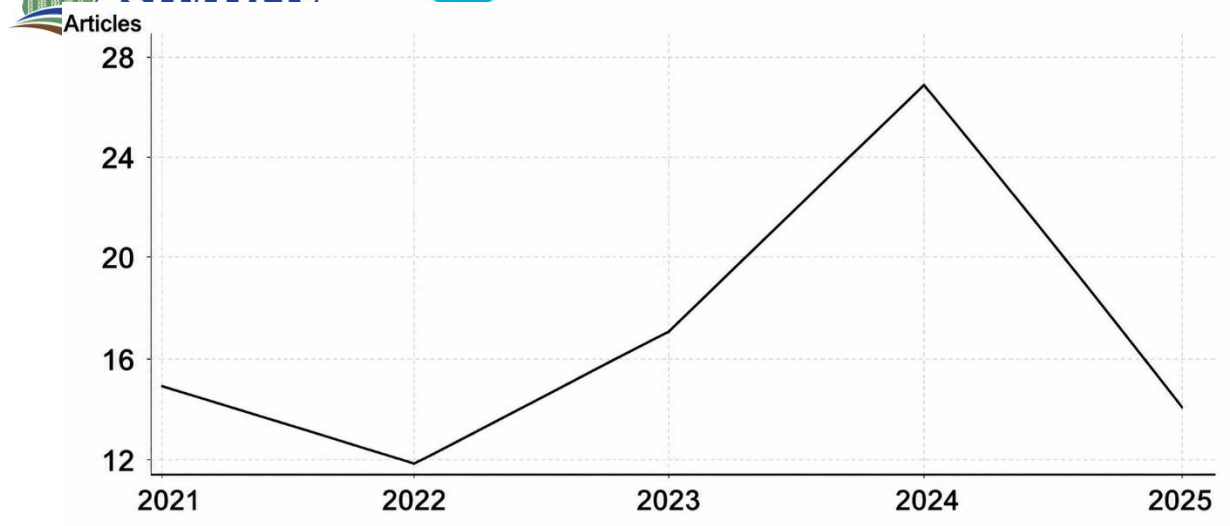


Figura 1 – publicações anuais

Essa tendência pode estar relacionada com a crescente demanda de modelos hidrogeológicos diante de um cenário de eventos climáticos extremos, a exemplos de estiagens prolongadas e períodos de precipitações intensas, os quais demandam maior precisão na estimativa da retenção de água no solo (Luo *et al*.,2023).

Para entender as interconexões, realizou-se análise das estruturas sociais (rede de colaboração entre os autores) e conceituais (palavra-chave sobre o tema). Conforme detalhadas nas Figuras 2 e 3.

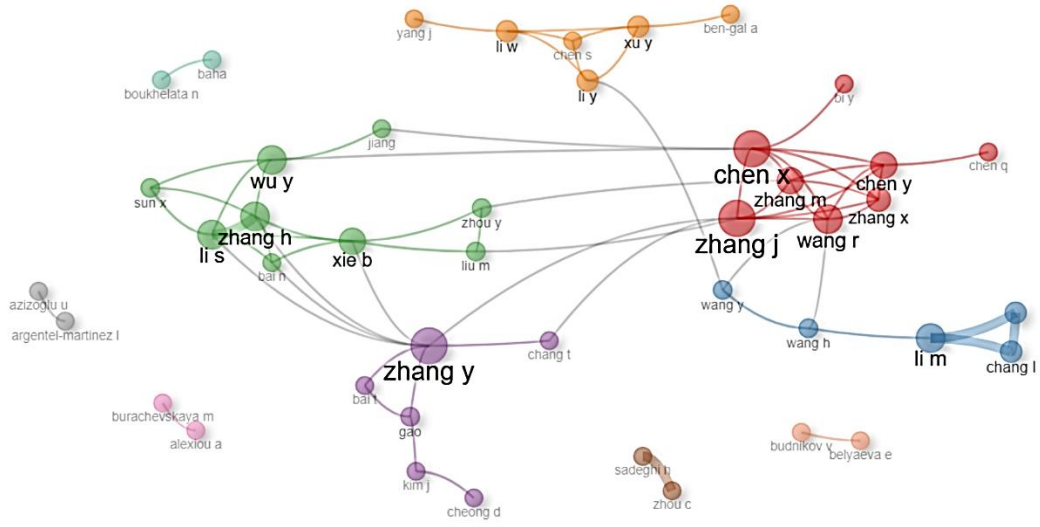


Figura 2 – Rede de colaboração entre os autores

Histerese da retenção de água no solo: causas e interpretações modernas

A histerese da curva de retenção de água no solo (CRAS) refere-se à diferença observada entre as trajetórias de secagem e umedecimento para um mesmo valor de sucção ou teor de água,

constituindo um dos fenômenos mais relevantes da física dos solos não saturados (Polich et al., 2026; Saha, Sekharan e Manna, 2022). Esse comportamento demonstra que a retenção hídrica não depende apenas do estado atual do solo, mas também do histórico de variações de umidade ao qual o sistema foi submetido (Matos-Paucar et al., 2026).

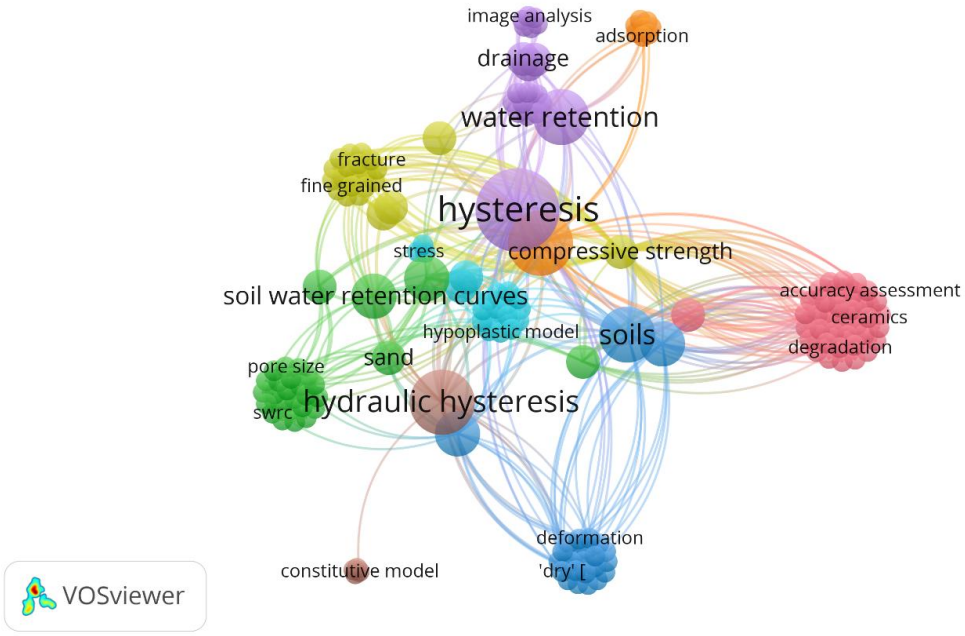


Figura 3 – Rede de Coocorrência das Palavras relacionada a histerese associada a outras conexões

A Figura 3 demonstra que os estudos sobre a CRAS estão concentrados nos termos hysteresis, water retention, hydraulic hysteresis. Observa-se ainda associações entre os termos *adsorption*, *drainage*, o que indica a importante relevância dos processos de adsorção e distribuição no tamanho dos poros. A relação entre *adsorption (adsorção)*, *drainage (drenagem)* e a *deformation* (deformação) identifica a integração entre os processos hidráulicos e estruturais. Dessa maneira, a rede de palavra-chave bibliométrica mostra a relação existente entre os processos mencionados associados às propriedades físicas e estruturais do solo.

Entre os mecanismos responsáveis pela histerese destaca-se o aprisionamento de ar (*air entrapment*) que ocorre durante o processo de umedecimento. Nessa condição, parte do ar permanece retida nos poros, reduzindo o espaço disponível para água e alterando as relações entre sucção e teor de umidade (Sun et al., 2025). Esse fenômeno influencia diretamente as curvas de retenção e a condutividade hidráulica, sendo considerado um dos principais responsáveis pela diferença entre os ramos de drenagem e embebição (Usowicz e Lipiec, 2025).

Além dos fenômenos interfaciais, a histerese está associada às modificações estruturais promovidas pelos ciclos sucessivos de secagem e umedecimento. Durante esses ciclos, ocorrem

processos de contração, expansão e reorganização do sistema poroso, alterando a distribuição e a conectividade dos poros (Yu, Gui e Li, 2024). Estudos microestruturais demonstram que essas alterações podem modificar significativamente a forma da curva de retenção de água ao longo do tempo (Xu et al., 2024; Qiao et al., 2021).

Avanços recentes também destacam a importância da heterogeneidade estrutural dos poros na interpretação da histerese. O chamado efeito *ink-bottle* ocorre quando os poros maiores são conectados por gargantas menores, fazendo com que o processo de drenagem e umedecimento ocorram de maneira distinta (Chen et al., 2023). Evidências obtidas por tomografia computadorizada revelam que a heterogeneidade espacial dos poros desempenha papel fundamental na memória hidráulica do solo e na persistência dos fenômenos de histerese (Jiang, Leung e Liu, 2026).

Embora menos explorado nos estudos encontrados na presente revisão, o componente biológico também pode contribuir para a histerese da retenção hídrica. Biofilmes microbianos e exsudatos radiculares podem modificar a molhabilidade das partículas, alterar a geometria dos poros e influencia os processos de adsorção e redistribuição da água no solo. Dessa forma, a integração entre processos físicos, estruturais e biológicos representa uma das principais perspectivas para o avanço das interpretações modernas da histerese em solos não saturados.

Modelagem Matemática e Parametrizacão da CRA

A estrutura do solo também influencia significativamente a retenção hídrica. Em muitos solos ocorre dupla porosidade, caracterizada pela coexistência de macroporos, responsáveis pela infiltração e drenagem da água, e microporos, responsáveis pelo seu armazenamento. Essa condição frequentemente resulta em distribuições bimodais de poros, nas quais dois grupos predominantes de tamanhos de poros controlam o comportamento hidráulico do solo, exigindo abordagens de modelagem mais complexas (Chen et al., 2023; Seki, Toride e van Genuchten, 2023).

Para representar matematicamente esses processos, destacam-se os modelos de Brooks e Corey (1964) e de van Genuchten (1980), amplamente utilizados na descrição da CRA. Além desses, modelos com histerese explícita, como os propostos por Mualem (1976) e Kool e Parker (1987), permitem representar de forma mais realista os ciclos de secagem e umedecimento do solo. A aplicação desses modelos requer a determinação de parâmetros específicos por meio da parametrização, procedimento que ajusta as equações aos dados experimentais. Entretanto, um desafio frequente é a equifinalidade, situação em que diferentes combinações de parâmetros produzem ajustes semelhantes aos dados observados, dificultando a interpretação física dos resultados e aumentando as incertezas das simulações (Farooq et al., 2024).

As propriedades hidráulicas do solo e a forma da CRA são fortemente influenciadas pelo uso da terra e pelas práticas de manejo. Alterações na estrutura do solo modificam a distribuição dos poros, afetando diretamente os processos de infiltração, armazenamento e disponibilidade de água.

A compactação, frequentemente associada ao tráfego de máquinas e ao manejo inadequado, reduz a macroporosidade e a infiltração de água, podendo limitar o crescimento radicular e diminuir a disponibilidade hídrica para as plantas. Em contrapartida, sistemas conservacionistas, como o plantio direto, favorecem a estabilidade estrutural, o aumento da matéria orgânica e a formação de bioporos, contribuindo para maior retenção e armazenamento de água no perfil do solo (Silva et al., 2022).

A agregação do solo também exerce papel fundamental na retenção hídrica, pois determina a continuidade e a distribuição dos poros. Solos bem agregados tendem a apresentar maior estabilidade estrutural e melhor funcionamento hidrológico. Por outro lado, processos de salinidade e sodicidade podem promover a dispersão das partículas e a degradação da estrutura, alterando negativamente a dinâmica da água no solo (Chen et al., 2023; Farooq et al., 2024).

Nos últimos anos, tem crescido o interesse pelo uso de condicionadores físicos, como biochar, matéria orgânica particulada e polímeros hidroretentores. Esses materiais contribuem para melhorar a estrutura do solo, aumentar a retenção de água e ampliar sua disponibilidade para as culturas, especialmente em ambientes degradados ou sujeitos a déficit hídrico (Farooq et al., 2024).

Dessa forma, os efeitos do manejo refletem-se diretamente no ciclo hidrológico do perfil do solo, influenciando a infiltração, a evapotranspiração, a recarga hídrica e o escoamento superficial. Consequentemente, práticas que favoreçam a manutenção da estrutura e da matéria orgânica do solo contribuem para o uso mais eficiente da água e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Silva et al., 2022; Farooq et al., 2024).

Mecanismos físicos da retenção de água no solo

A retenção de água no solo é controlada por forças matriciais, pelos fenômenos de capilaridade e pelos processos de adsorção, os quais regulam o armazenamento e a movimentação da água em solos não saturados (Liu et al., 2025). A capilaridade exerce papel essencial nesse processo, principalmente nos microporos, onde a tensão superficial da água e da geometria dos poros, favorecem a retenção hídrica contra a ação da gravidade (Lin, Qian e Zhai, 2022).

Associada a capilaridade, a adsorção constitui um importante mecanismo de retenção de água, principalmente em solos com elevada superfície especifica e alta reatividade mineralógica (Fang, Sun e Lu, 2026; Polich et al.,2026).A mineralogia da fração argila influencia significativamente na retenção de água devido as diferenças na área superficial especifica, carga elétrica e capacidade de expansão dos minerais (Fang, Sun e Lu, 2026; Matos -Paucar et al., 2026). Argilas 2:1, como esmectitas apresentam maior retenção de água, enquanto argilas 1:1, como a caulinita, possuem menor capacidade de adsorção (Li et al., 2025; Zhang et al., 2024).

A matéria orgânica também exerce papel essencial na dinâmica da água no solo, aumentando a estabilidade dos agregados, a microporosidade e a capacidade de armazenamento de água (Yu, Gui e Li, 2024). Seus grupos funcionais hidrofílicos favorecem a adsorção de moléculas de água e auxiliam na manutenção da umidade em condições de déficit hídrico (Liu et al., 2025).

A retenção de água também depende da distribuição dos poros, sendo que poros maiores drenam sob baixas tensões e poros menores retêm água em potenciais matriciais mais negativos. Assim, a curva de retenção de água no solo reflete indiretamente a distribuição do sistema poroso (Xu et al., 2024; Wang et al., 2023). Durante os processos de secagem e umedecimento, diferenças no esvaziamento e preenchimento dos poros podem gerar trajetórias distintas de retenção para um mesmo potencial matricial, caracterizando o fenômeno da histerese (Polich et al., 2026; Lin, Qian e Zhai, 2022).

CONCLUSÃO

Os mecanismos físicos da CRAS associados à histerese agem de forma integrada, isto é, desde a mineralogia, fração de argila e pela matéria orgânica encontrada no solo. Através da análise bibliométrica, pode-se evidenciar a associação das conexões da pesquisa, assim como os autores que trabalham em parceria. A análise também demonstrou o seu pico de publicações para o ano de 2024, sendo esta associada à grande necessidade de modelagens hidrogeológicas. Fica claro que uma única curva de retenção de água nem sempre representa adequadamente o comportamento hídrico do solo em campo, sendo recomendado o uso de faixas de manejo da água ao invés de valores estáticos. A histerese, no entanto, é uma excelente ferramenta de interpretação.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Sergipe (UFS), a Fundação de Apoio à Pesquisa e a Iniciação Tecnológica do Estado de Sergipe

(FAPITEC/SE) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

REFERÊNCIAS

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins: Colorado State University, 27 p.

CHEN, K. et al. (2023). *Contribution of capillary pressure to effective stress for unsaturated soils: Role of wet area fraction and water retention curve*. Computers and Geotechnics, 154, p. 105140.

CHEN, Y.; ZHANG, X.; LI, H. et al. (2023). *A simple water retention model of dual-porosity soils based on self-similarity of bimodal pore size distribution*. Computers and Geotechnics, 161, p. 105612.

DARZI, A. G.; SADEGHI, H.; ZHOU, C. (2023). *A soil-brine retention model for wetting processes considering the hysteresis effects*. Transportation Geotechnics, 41, p. 101032.

FANG, X.; SUN, H.; LU, L. (2026). *Thermal Effects on Soil Water Retention Curves of Bentonites: Experiments and Modelling*. Minerals, 16(2), p. 191.

FAROOQ, U.; AJMAL, M.; ALI, S. et al. (2024). *Evaluation of pedotransfer functions to estimate soil water retention curve: a conceptual review*. Water, 16(17), p. 2547.

JIANG, Z.; LEUNG, A. K.; LIU, J. (2026). *Quantifying pore-scale heterogeneity of drying and wetting soil water retention behaviour using X-ray computed tomography*. Canadian Geotechnical Journal, n. ja.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C. (1987). *Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties*. Water Resources Research, 23(1), pp. 105–114.

KUMAR, A.; AZIZI, A.; TOLL, D. G. (2022). *Application of suction monitoring for cyclic triaxial testing of compacted soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 148(4), p. 04022009.

LI, B. et al. (2025). *Influence of multiple wetting–drying cycles on water retention and pore structure of silt loam from reservoir hydro-fluctuation belt: Experiments and modeling*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 84(2), p. 104.

LIN, Z.; QIAN, J.; ZHAI, Q. (2022). *A novel hysteretic soil–water retention model with contact angle-dependent capillarity*. International Journal of Geomechanics, 22(2), p. 06021037.

LIU, S. et al. (2025). *A state surface model of unsaturated soil considering thermal and adsorptive effects*. Computers and Geotechnics, 177, p. 106869.

LUO, Y. et al. (2023). *Effects of dynamic changes of desiccation cracks on preferential flow: experimental investigation and numerical modeling*. Hydrology and Earth System Sciences, 27(3), pp. 783-808.

MATOS-PAUCAR, G. D. et al. (2026). *Evaluation of generalized soil water retention models and their role in hydro-mechanical modelling of unsaturated soils*. Geomechanics for Energy and the Environment, p. 100794.

MUALEM, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, 12(3), pp. 513–522.

POLICH, N. G. et al. (2026). *Hysteresis of soil hydrological functions. Influence of soil texture, management, and sampling direction*. Soil and Tillage Research, 263, p. 107253.

QIAO, Y. et al. (2021). *A generalized water retention model with soil fabric evolution*. Geomechanics for Energy and the Environment, 25, p. 100205.

SAHA, A.; SEKHARAN, S.; MANNA, U. (2022). *Hysteresis model for water retention characteristics of water-absorbing polymer-amended soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 148(4), p. 04022008.

SEKI, K.; TORIDE, N.; VAN GENUCHTEN, M. T. (2023). *Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties*. Vadose Zone Journal, 22(1), e20224.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E. et al. (2022). *Soil water retention and availability in Brazilian agricultural soils: implications for management and conservation*. Soil and Tillage Research, 223, p. 105456.

SMAGIN, A. (2025). *Disjoining pressure model for the entire soil water retention curve*. Catena, 254, p. 108909.

SUN, P. et al. (2025). *Unraveling trapped air-suction interplay in hydraulic hysteresis: experimental insights and a state-dependent water retention model*. Journal of Hydrology, 661, p. 133793.

TAN, Q. et al. (2024). *Hysteresis of water retention curve of the capillarimetric diapason in saline soils*. Eurasian Soil Science, 57(7), pp. 1217-1230.

USOWICZ, B.; LIPIEC, J. (2025). *Predicting unsaturated soil hydraulic conductivity during drying and wetting processes with a statistical physical model*. Scientific Reports, 15(1), p. 41942.

VAN GENUCHTEN, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44(5), pp. 892–898.

WANG, Q. et al. (2023). *Multiphase lattice Boltzmann modeling of cyclic water retention behavior in unsaturated sand based on X-ray computed tomography*. Canadian Geotechnical Journal, 60(9), pp. 1429-1446.

WEI, X. et al. (2024). *Exploring the effect of volume change on capillary soil water retention in an undisturbed silty clay: an experimental and modeling approach*. Acta Geotechnica, 19(7), pp. 4823-4837.

XU, L. et al. (2024). *Exploring soil water retention hysteresis in the entire suction range and microstructure evolution of loess: The influence of sediment depths*. Engineering Geology, 328, p. 107373.

YU, M.; GUI, Y.; LI, B. (2024). *Modelling soil-water retention curves subject to multiple wetting-drying cycles: An approach for expansive soils*. Computers and Geotechnics, 171, p. 106335.

ZHANG, M. S. et al. (2024). *Compression and water retention behavior of saline soil improved by MICP combined with activated carbon*. Scientific Reports, 14(1), p. 31484.

ZHOU, Z. et al. (2025). *Hysteretic water-retention behaviour of unsaturated hydrophobised soils*. Géotechnique, 75(3), pp. 337-347.