

# Workshop de Simulação de Fluxos de Água e Solutos no Solo

Embrapa Solos e Universidade do Estado do Rio de Janeiro

## Estimativa de recarga da água subterrânea na ilha de São Luís-MA: análise de uma série temporal de 27 anos

Groundwater recharge estimate on the island of São Luís - MA: analysis of a 27-year time series

**Alba Leonor da Silva Martins<sup>(1)</sup>; Wenceslau Geraldes Teixeira<sup>(2)</sup>; Edgar Shinzato<sup>(3)</sup>  
Marlen Barros e Silva<sup>(4)</sup>; Rogério Valença Ferreira<sup>(5)</sup>; Alexandre Ortega Gonçalves<sup>(6)</sup>**

(1) Pesquisadora Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, alba.leonor@embrapa.br (apresentadora do trabalho); (2) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, wenceslau.teixeira@embrapa.br; (3) Pesquisador do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Rio de Janeiro, RJ, edgar.shinzato@cprm.gov.br; (4) Professora da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), marlenbarros2012@gmail.com; (5) Pesquisador do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Rio de Janeiro, RJ, rogerio.ferreira.gov.br; (6) Pesquisador Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ, alexandre.ortega@embrapa.br

**RESUMO:** Os estudos de modelagem para avaliação da recarga dos aquíferos são essenciais à gestão dos recursos hídricos. A vulnerabilidade das águas subterrâneas constitui uma preocupação na ilha de São Luís (MA), onde a salinização pela intrusão da água do mar nos aquíferos pode estar associada à sobre extração de água subterrânea e redução dos níveis do aquífero em áreas costeiras em decorrência da excessiva perfuração de poços. Esse estudo objetivou estimar a recarga da água subterrânea na ilha de São Luís a partir da análise de uma série temporal de 1994 a 2020 com o uso do Hydrus-1D. Os resultados durante os 27 anos de simulação apresentaram uma taxa de recarga média de 1.333 mm/ano e uma taxa de recarga acumulada (*cumulative bottom flux*) de 36.000 mm. O balanço hídrico para os dois anos mais secos apresentou, respectivamente, taxas de recargas de 504 e 571 mm/ano e o mais chuvoso 2105 mm/ano.

**Palavras-chave:** Hydrus-1D; modelo de simulação de fluxos; aquífero.

**ABSTRACT:** Modeling studies to assess aquifer recharge are essential for water resources management. The vulnerability of groundwater in aquifers is a concern on the island of São Luís (MA) where salinization caused by seawater intrusion in aquifers can be associated with groundwater overdraft and lowered water levels in coastal areas because of excessive well drilling. This study aimed to estimate groundwater recharge on the island of São Luís from the analysis

of a time series from 1994 to 2020 using Hydrus 1D. The results over the 27-year simulation showed an average recharge rate 1.333 mm/year and cumulative bottom flux reached 36.000 mm. The water balance for the two driest showed respectively recharge rates of 504 and 571 mm/year and wettest years 2105 mm/year.

**Keywords:** Hydrus-1D; flow simulation model; aquifer.

### INTRODUÇÃO

No ciclo hidrológico, o estudo de avaliação da recarga dos aquíferos é essencial para fins de gestão dos recursos hídricos e de transporte de poluentes e constitui um componente laborioso para a quantificação em uma determinada área, sendo consequência das variabilidades temporal e espacial das chuvas e das características dos materiais geológicos superficiais e profundos, topografia, vegetação e uso do solo. Sem sua adequada avaliação, os aquíferos podem ser explorados além dos limites sustentáveis para uma determinada região ou mesmo serem submetidos a elevado risco de contaminação em função do uso da água (Fagundes, 2010).

De acordo com Santos (2012), a recarga dos aquíferos pode ser estimada por várias metodologias: métodos diretos como o balanço hídrico, modelos físicos e determinísticos ou métodos indiretos (zona insaturada) como a oscilação piezométrica, traçadores ambientais ou artificiais e estimativa Darcyana, modelagens numéricas ou soluções numéricas das equações que regem o escoamento em meios porosos.

Modelos de simulação de fluxos de água são utilizados para simular processos hídricos na zona insaturada (vadosa) do solo, sendo também requisito para o entendimento dos processos de drenagem e recarga dos lençóis freáticos.

A ilha de São Luís, constituída pelos municípios de São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, apresenta a maior concentração populacional do estado do Maranhão, estimada em 1.409.162 habitantes (IBGE, 2017). De acordo com Sousa (2021) o sistema de abastecimento urbano na ilha de São Luís mostra que os mananciais superficiais representam 56,86% do abastecimento da área, contra 43,14% dos mananciais subterrâneos.

A contribuição da água subterrânea para o abastecimento urbano da ilha de São Luís é garantida, principalmente, pelos sistemas produtores do Paciência (I e II) e do Sacavém, compostos por poços tubulares que exploram os recursos hídricos dos aquíferos Barreiras e Itapecuru, respectivamente. Outros conjuntos de poços, em menor escala geográfica, garantem o abastecimento urbano.

Considerando a vulnerabilidade das águas subterrâneas em aquíferos, a preocupação com o controle das águas aumenta pelo fato de São Luís ser uma ilha, onde a salinização pela água do mar nos aquíferos pode ser provocada por bombeamento nas áreas próximas ao litoral em decorrência da excessiva perfuração de poços.

Diante do exposto, esse estudo objetivou estimar a recarga da água subterrânea na ilha de São Luís (MA) a partir da análise de uma série temporal de 27 anos (1994 a 2020) com o uso da modelagem no Hydrus-1D.

## MATERIAL E MÉTODOS

Esse estudo de modelagem da recarga da água subterrânea na ilha de São Luís consiste na continuidade da etapa realizada em 2017–2018 onde foram realizadas avaliações da velocidade de infiltração básica (VIB), retenção da água e condutividade hidráulica saturada (Kfs) nos solos da ilha, através da parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com apoio da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

A ilha de São Luís está situada na região costeira do Estado do Maranhão, limitando-se ao norte com o Oceano Atlântico; ao sul, com a baía de São José e o Estreito dos Mosquitos; a leste com a baía de São José e a oeste com a baía de São Marcos.

O clima local, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw', com índice pluviométrico médio em torno de 2.000 mm/ano.

A área selecionada para o estudo da modelagem se localiza próxima a um dos poços tubulares da Companhia de Águas e Esgoto do Maranhão (CAEMA), no bairro do Sacavém (latitude 583481 e longitude 9716888). A área está inserida na bacia hidrográfica do rio Bacanga sobre o aquífero

Itapecuru. O solo do local foi classificado como um Argissolo Vermelho–Amarelo pelos autores, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018).

Na etapa realizada entre 2017 a 2018, a VIB foi determinada com um infiltrômetro de anel (*single ring*) e a Kfs pelo método do Permeâmetro de Guelph (Teixeira et al., 2020). A análise de retenção de água no solo foi realizada conforme Teixeira e Bhering (2017) com a determinação da umidade volumétrica nos potenciais: 0, 1, 3, 6, 10, 33, 100, 1.500 kPa, sendo os dados em função do potencial ajustados para a equação de van Genuchten (1980) utilizando o software RETC 6.02 (van Genuchten et al., 1991). As funções hidráulicas do solo foram consideradas segundo os modelos de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980), relacionando o potencial matricial do solo com a umidade volumétrica, e expressando-se a condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

A modelagem de forma direta realizada no programa HYDRUS-1D, utiliza o modelo numérico pelo método dos elementos finitos para a simulação da dinâmica de água, vapor, solutos e calor em meios porosos (Šimůnek et al., 2013). O fluxo de água no solo ou fluxo em meio poroso insaturado é descrito pela equação de Richards (Richards, 1931), uma extensão da equação de Darcy, com a condutividade expressa em função da sucção matricial (Hillel, 1998). O modelo unidimensional para o fluxo vertical incorpora o termo (*Sink*) relativo à extração de água pelas raízes e contempla a evapotranspiração.

Na estimativa de recarga do modelo foi assumido um perfil vertical unidimensional na profundidade do lençol freático de 20 m. Esse perfil, caracterizado com textura franco-arenosa, foi separado em duas camadas no HYDRUS, a primeira a 20 cm da superfície e a segunda camada foi considerada até a altura do lençol freático a 20 m. Acima do lençol foi estabelecida uma franja capilar a uma altura de 10 cm. Assumiu-se que as distribuições de raízes se comportam linearmente uniforme da superfície até a profundidade máxima de enraizamento de 60 cm e combinaram com o modelo de resposta ao estresse hídrico de Feddes et al. (1978) modificado por van Genuchten (1987) para incluir estresse osmótico que explica a absorção de água pela raiz da pastagem, vegetação presente na área de estudo.

Como condições de fronteira superior, foram estabelecidas as condições atmosféricas variáveis (evapotranspiração potencial e precipitação efetiva) sem escoamento superficial e para as condições de fronteira inferior, foi considerada a drenagem livre. Para o cálculo da evapotranspiração potencial foram utilizados dados de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar empregando-se a equação de Penman-Monteith

(Allen et al., 1998). Os dados meteorológicos foram obtidos de diversas estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) e outras (ANA Hidroweb, Nasa Power) para complementação da série temporal de 1994 a 2020.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados foram discutidos conforme van Genuchten et al. (2014).

O padrão de chuva apresentou um índice com dois períodos bastante distintos, um chuvoso (de janeiro a junho) e outro de estiagem (de julho a dezembro), típico da região da ilha de São Luís. No período simulado, a menor taxa média anual de precipitação pluvial ocorreu em 2012 com 1.133 mm/ano e a mais elevada ocorreu em 2009 com 2.847 mm/ano (Figura 1).

A Figura 2 mostra a taxa de transpiração cumulativa (16.523 mm) para a recarga durante os 27 anos de simulação.

O fluxo de recarga anual (Figura 3) e a taxa de transpiração cumulativa de água pela raiz (Figura 2) mostram a estreita correlação com os dados de precipitação (Figura 1), sendo crescente a recarga quando a precipitação é mais elevada.

A taxa de recarga mais alta corresponde à taxa máxima de precipitação que ocorreu no ano de 2009. A taxa de recarga média durante os 27 anos foi de aproximadamente 1.333 mm/ano e a taxa de recarga acumulada (*cumulative bottom flux*) nesse período foi de 36.000 mm (Figura 4). O balanço hídrico para os dois anos mais secos apresentou, respectivamente, taxas de recargas de 504 e 571 mm/ano e o mais chuvoso 2.105 mm/ano (Figura 3), demonstrando a importância de se considerar um período histórico para os cálculos de recarga e não apenas a média anual de precipitação local. Observa-se que no ano de 1994 (Figura 3) a recarga mais elevada pode ter ocorrido devido ao teor de umidade muito alto no perfil inicial do HYDRUS, por isso, não foi considerada na discussão como sendo a maior.

## CONCLUSÕES

Nos cálculos das taxas de recarga torna-se importante considerar um período histórico das variações de precipitação local e não apenas uma média anual da precipitação para evitar subestimativas ou superestimativas e que os aquíferos sejam explorados além dos limites sustentáveis para uma determinada região. Neste estudo, a média da recarga para os 27 anos foi 1.333 mm/ano e correspondeu a precipitação média de 2.164 mm/ano. No ano mais seco, a precipitação média foi de 1.133mm/ano e contribuiu para uma recarga de 571

mm/ano, enquanto no mais chuvoso a precipitação média de 2.847 mm/ano contribuiu para uma recarga de 2.105 mm/ano.

## AGRADECIMENTOS

A Aline Mari Huf dos Reis pela contribuição na elaboração e formatação dos gráficos.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, p. 1-333, 1998.

ANA. Agência Nacional das Águas. HIDROWEB. Portal do SNIRH- Sistema Nacional de informações sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

FAGUNDES, J.R.T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2010. 397 p.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield**. Wageningen, PUDOC, 1978. (Simulation Monograph Series).

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego: Academic, 1998. 757p.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico, 2017. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 12 dez. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (1994/2020). Brasília - DF, 2020.

NASA POWER. Power Data access Viewer - Meteorological Data. Disponível em: <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (nasa.gov)>. Acesso em: 12 dez. 2021.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through Porous Mediums. **Journal of Applied Physics**, 1, 318-333, 1931 <http://dx.doi.org/10.1063/1.1745010>.

ŠIMŮNEK. **Manual do Hydrus-1D**. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple

Solutes in Variably-Saturated Media Department of Environmental Sciences., University of California Riverside, 2013.

SANTOS, R.M. dos. **Recarga de águas subterrâneas em ambientes de Cerrado: Estudo com base em modelagem numérica e simulação hidrológica em uma bacia experimental.** Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. 2012. 195 p.

SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; ARAÚJO FILHO, J.C. de; OLIVEIRA, J. B. de CUNHA, T.J.F. 2018. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ed. Brasília-DF: Embrapa. 553p. (also available at: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181677/1/SiBCS-2018-ISBN9788570358172.epub.>).

SOUSA. C. J. da SILVA de. **Caracterização dos aquíferos na Ilha do Maranhão: reconhecimento, levantamento de áreas estratégicas e contribuições ao processo de gestão.** Tese (Doutorado). Universidade de Brasília. 2021. 254 p.

TEIXEIRA, W.G.; BHERING, S. **Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards.** In: TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 34-46.

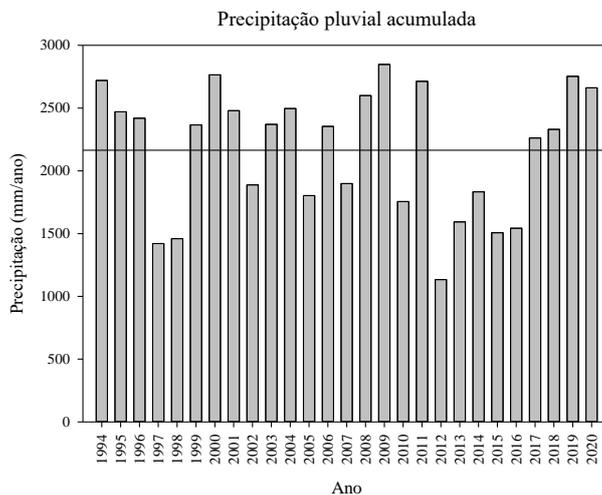
TEIXEIRA, W.G., OTTONI, M.V.; ARMINDO, R.A.; MARTINS, A.L. da S.; LUMBRERAS, J.F.; SILVA, A.C. da; SILVA, M.B. e; FERREIRA, R.V.; SHINZATO, E. 2020. **Estimativas e avaliação da velocidade de infiltração e da condutividade hidráulica saturada em solos do estado do Maranhão.** In Silva, M.B. e; Lumbreras, J.F.; Oliveira, V.A. de; Coelho, M.R. (eds). Guia de campo da XIII Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC do Maranhão. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa. E-book. cap. 15 (disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218466/1/Guia-de-campo-da-XIII-RCC-Maranhao.epub.>>).

van GENUCHTEN, M.T. **A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** *Soil Science Society America Journal*: 44, 892-89, 1980.

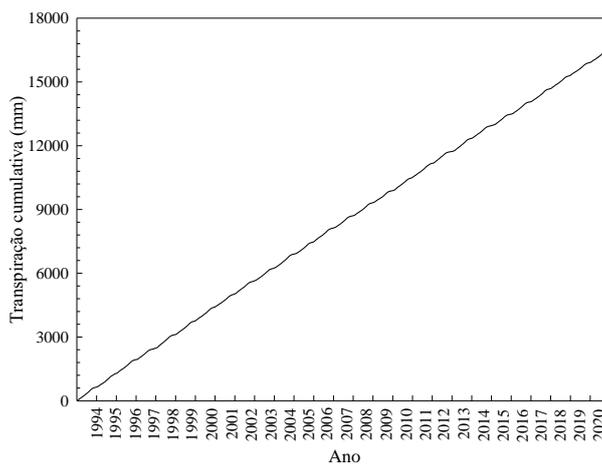
van GENUCHTEN, M. T. **A numerical model for water and solute movement in and below the root zone.** Unpublished Research Report, U. S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, CA, 1987.

van GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.** US Salinity Lab., USDA, Riverside, CA, 1991.

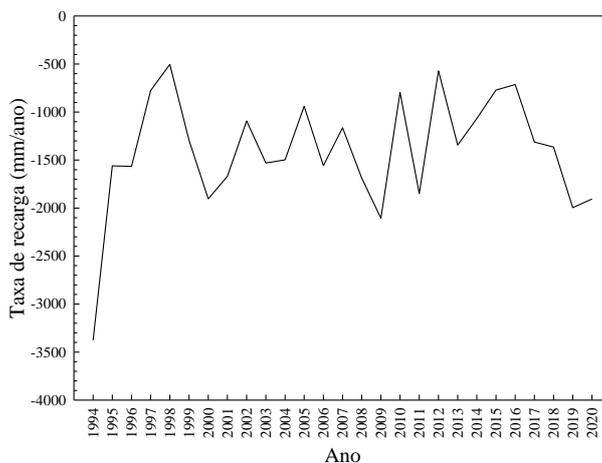
van GENUCHTEN, M.T; NAVEIRA-COTTA, C.; SKAGGS, T.H.; RAOOF, A.; PONTEDEIRO, E.M. **The Use of Numerical Flow and Transport Models in Environmental Analyses.** Chapter 15. 2014. In: TEIXEIRA, W.G.; CEDDIA, M.B.; OTTONI, M.V.; DONNAGEMMA, G.K. Application of Soil Physics in Environmental Analyses Measuring, Modelling and Data Integration. Springer International Publishing Switzerland 2014, 499 p.



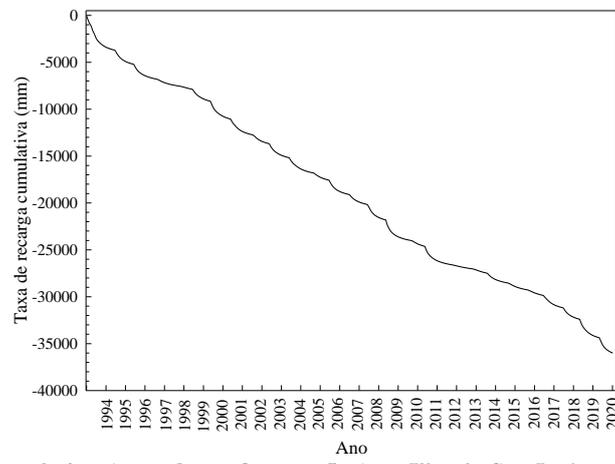
**Figura 1.** Precipitação pluvial acumulada de taxas anuais para a recarga na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 2.** Taxa de transpiração cumulativa para a recarga na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 3.** Taxa de recarga anual (*bottom flux*) na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.



**Figura 4.** Taxa de recarga cumulativa (*cumulative bottom flux*) na Ilha de São Luís para o período de 1994 a 2020.