

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO SERIDÓ COM SWAT

Alanderson Firmino de Lucas¹; Hermínio Sabino de Oliveira Júnior¹; Sandra Isay Saad² & Jonathan Mota da Silva¹

Resumo – A utilização de recursos do solo na bacia do Rio Seridó está provocando à intensificação da desertificação nessa região, cujo fenômeno possui interferência em diversos setores da sociedade, em especial, o setor hídrico. Entre os efeitos da desertificação sobre o solo, estão a baixa qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a vazão simulada para a bacia do Rio Seridó, uma bacia hidrográfica da região semiárida brasileira, com uso do SWAT, um modelo hidrológico utilizado para avaliar os efeitos de uso do solo na hidrologia. O modelo foi forçado com dados climáticos provenientes do conjunto de dados espaçados regularmente em grades de alta resolução ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) e interpolados com pluviômetros para gerar dados de precipitação diária, e foi usada a mesma base para mais cinco variáveis climáticas (temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) para o período de 1983-2016, e utilizou as bases de dados de diversos projetos e instituições (MapBiomas, Embrapa e SRTM) para construir a bacia hidrográfica. A destreza do SWAT foi avaliada por meio do hidrograma da vazão mensal, coeficientes de funções que quantifica a destreza/erro do modelo e curva de permanência. O SWAT mostrou-se uma ferramenta eficaz, pois simulou satisfatoriamente a sazonalidade da vazão mensal em quatro sub-bacias tributárias do Rio Seridó, simulando em mais de 60% a variância da vazão observada. O modelo apresentou resultados mais favoráveis na simulação da vazão máxima oriunda de eventos extremos de precipitação. Entretanto, o SWAT superestimou a vazão superior àquelas acima/iguais à permanência de 30%. Em média, as sub-bacias avaliadas apresentaram um PBIAS (RMSE) de $\sim 30\%$ ($8.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e 50% ($11.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) durante o período de calibração e validação, respectivamente. O efeito da operação de reservatórios nestes rios influencia a vazão medida, proporcionando consideráveis discrepâncias entre as curvas de permanência simulada e observada. De maneira geral, o SWAT simulou a vazão de forma aceitável e, sendo assim, o modelo é aplicável para investigações hidrológicas na bacia do Rio Seridó e demais bacias do semiárido.

Palavras-Chave – Semiárido, Modelagem Hidrológica, SWAT.

HYDROLOGICAL MODELING OF SERIDÓ RIVER BASIN WITH SWAT

Abstract – The use of soil resources in the Seridó River basin is causing the intensification of desertification in this region, whose phenomenon has interference in several sectors of society, especially the water sector. Among the effects of desertification on the soil are the low quality and availability of water resources. Thus, the aim of this study was to evaluate the simulated flow for the Seridó River basin, a hydrographic basin in the Brazilian semiarid region, using SWAT, a hydrological model used to assess the effects of land use in hydrology. The model was forced with weather data from the dataset regularly spaced in high-resolution grids ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) and interpolated with rain gauges to generate daily rainfall data, and the same base was used for five more weather variables (temperature maximum and minimum, solar radiation, relative humidity, and wind

¹) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Avenida Salgado Filho, 3000, 59078-970, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil, (84) 99999-6823, (84) 99669-3463, (11) 97398-2365, alanderson.lucas.107@ufrn.edu.br, herminiosabino@gmail.com, jonathanmota.ufrn@gmail.com

²) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Dep. de Ciências Atmosféricas, Rua Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Universitário, Campina Grande, PB, Brasil, sandraisaad@gmail.com

speed) for the period 1983-2016 and used the databases of several projects and institutions (MapBiomas, Embrapa and SRTM) to build the watershed. The dexterity of the SWAT was evaluated using the monthly flow hydrograph, function coefficients that quantify the dexterity/error of the model and the permanence curve. SWAT proved to be an effective tool, as it satisfactorily simulated the seasonality of the monthly flow in four tributary sub-basins of the Seridó River, simulating the variance of the observed flow in more than 60%. The model showed results more favorable in simulating the maximum flow from extreme precipitation events. However, SWAT overestimated the flow above those above/equal to 30% permanence. On average, the sub-basins evaluated presented a PBIAS (RMSE) of ~ 30% (8.3 m³s⁻¹) and 50% (11.8 m³s⁻¹) during the calibration and validation period, respectively. The effect of the operation of reservoirs on these rivers influences the measured flow, providing considerable discrepancies between the simulated and observed permanence curves. In general, SWAT simulated the flow in an acceptable way and, therefore, the model is applicable for hydrological investigations in the Seridó River basin and other semi-arid basins.

Keywords – Semiarid, Hydrological Modeling, SWAT.

INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta uma condição climática caracterizada por períodos de seca prolongada e chuvas concentradas em poucos meses. O clima dessa região é sensível a mudanças extremas de sua cobertura vegetal [Oyama (2003)], bem como a hidrologia é sensível a tal mudança.

O ecossistema predominante do NEB é a Caatinga, que compreende cerca de 63% da região, com extensão territorial de aproximadamente 800.000 km². Apesar da grande extensão, este ecossistema é proporcionalmente pouco estudado se comparado com outros ecossistemas do Brasil [Oliveira et al. (2006)].

Adicionalmente, a Caatinga vem sendo substituída por áreas desérticas devido ao avanço da desertificação. Uma das regiões mais atingidas por esse processo no Brasil é a região do Seridó, compreendida entre os estados do Rio Grande do Norte (RN) e da Paraíba (PB) [MMA (2005)]. O desmatamento da Caatinga contribui para a desertificação e, nessa região o desmatamento se dá principalmente devido a produção de lenha, exploração mineral e a fabricação de telhas e tijolos [Sampaio et al. (2003)]. As áreas degradadas dessa região já apresentam alterações no balanço de energia, com implicações no saldo de radiação e fração evaporativa, comparativamente com as áreas vegetadas [Lima (2017)].

A desertificação afetará os processos hidrológicos na região do Seridó, que por sua vez modificará a disponibilidade e a qualidade hídrica da região, que é semiárida. Essa região já enfrenta consideráveis desafios em função da demanda crescente pelo uso da água; do convívio com a sua hidroclimatologia, que é marcada pela irregularidade das chuvas e intermitência dos seus rios; de problemas ambientais (baixa qualidade dos corpos hídricos) e de competência administrativa [Souza et al. (2012)].

Os processos hidrológicos estão relacionados às características dos ecossistemas existentes na bacia hidrográfica, bem como a sua geomorfologia, solo e clima. Esses processos podem ser estudados a partir da modelagem hidrológica e para algumas bacias hidrográficas do semiárido brasileiro existem esforços nesse sentido [(Felix e Paz (2016); Meira (2020); Montenegro e Ragab (2012)], que contribuem para o entendimento de parte da hidrologia da região, mas que não contemplam a bacia do rio Seridó utilizando o modelo hidrológico SWAT. Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi calibrar e validar a vazão para a bacia do Rio Seridó, uma bacia hidrográfica da região semiárida brasileira, com uso do modelo hidrológico SWAT, para torná-lo adequado e prosseguir com a aplicação dele na investigação da resposta hidrológica a mudança do uso do solo.

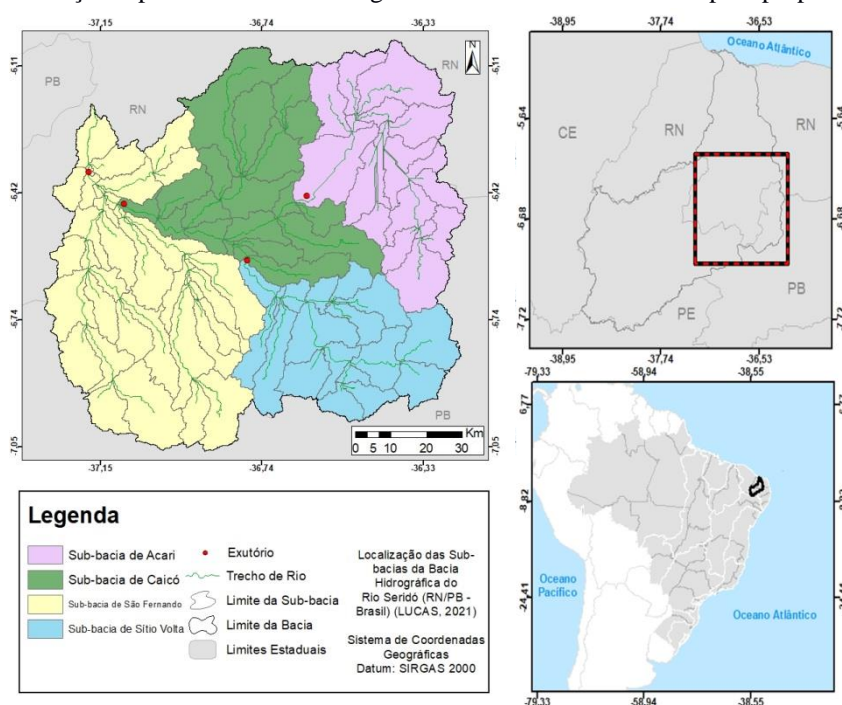
MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A área objeto de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Seridó (BHS), situada no centro-leste da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (BHPPA) que compreende os estados do RN e da (PB) (Figura 1). É a principal sub-bacia da BHPPA por se tratar da maior unidade de planejamento hidrológico (UPH) da BHPPA com uma área de drenagem de aproximadamente 9.931 km². A BHS conta com 37 municípios, a maioria desses localizados no RN [Melo (2008)].

O principal curso fluvial da BHS é o Rio Seridó, que nasce na base da Serra do Alagamar no entorno do município de Cubati (PB), e deságua no Rio Piranhas-Açu nas imediações do município de São Fernando (RN), próximo ao exutório da bacia, onde está localizada a estação fluviométrica de São Fernando (9.710 km²), uma das quatro estações presentes na região e que dispõe de dados observacionais de vazão. As demais estações fluviométricas utilizadas na calibração e validação da vazão foram: Caicó (6.310 km²), Sítio Volta (1.860 km²) e Acari (2.140 km²), onde cada uma das estações formaram uma sub-bacia (Figura 1). Os rios da bacia do Rio Seridó são intermitentes [ANA (2016)], assim como uma considerável parte das bacias do semiárido, p.ex., a bacia do Rio Piancó, onde Felix e Paz (2016) mostram que a maioria dos rios existentes nessa bacia são intermitentes, e que por vezes são perenizados mediante a construção de médios e grandes reservatórios hídricos, conhecimentos regionalmente como açudes.

Figura 1 – Localização espacial e rede de drenagem da BHS. Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2021).



Inicialização do SWAT & Dados

A modelagem hidrológica foi realizada com o modelo SWAT. SWAT é o acrônimo para *Soil Water Assessment Tool*, um modelo hidrológico distribuído desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold para o *Agricultural Research Service (ARS)* do *United States Department of Agriculture (USDA)*. O SWAT é um modelo computacional gratuito e foi inicialmente desenvolvido para avaliar o impacto das práticas agrícolas na produção de água, sedimentos, ciclo de nutrientes entre os processos em bacias hidrográficas complexas de pequena a grande escala, levando em consideração diferentes solos, uso e cobertura da terra e variabilidade climática [Arnold et al. (2012)].

O SWAT considera a variedade de biomas, zonas climáticas e outras condições ambientais que existem no Brasil [Bressiani et al. (2015)]. Com relação ao processo superficial de escoamento,

o SWAT possui o módulo de escoamento superficial que é baseado na metodologia de excesso de capacidade de armazenamento, que pode ser estimado pelo método do número de curva do SCS (*Soil Conservation Service*) [Gonzalez et al. (2015); SCS (1972)] ou pelo método de Green & Ampt [Neitsch et al. (2011)].

Neste estudo, o SWAT foi forçado com dados meteorológicos de um conjunto de dados espaçados regularmente em grades de alta resolução ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$) de acesso aberto obtidos de Xavier et al. (2016), os quais podem ser baixados através do sítio: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA> e interpolados, para a precipitação com pluviômetros, não considerados na versão original destes dados na área da bacia [Oliveira Júnior et al. (2021)]. As demais variáveis meteorológicas diárias (temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) foram utilizadas da mesma base [Xavier et al. (2016)]. O período utilizado nas simulações foi de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2016. Os dados de vazão diária utilizados na calibração foram obtidos das estações fluviométricas da ANA (Agência Nacional das Águas – <http://hidroweb.ana.gov.br/>), cujas falhas foram preenchidas pelo método de correspondência média preditiva a partir do algoritmo MICE (*Multivariate Imputation by Chained Equations*) [(van Buuren e Groothuis-Oudshoorn (2011)].

Em seguida, para delimitar a bacia hidrográfica, e atribuir os tipos de solo e o uso e ocupação da terra da bacia, respectivamente, utilizou-se: o Modelo Digital de Elevação (MDE) de uma reamostragem da missão espacial da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) denominada de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) concernente ao ano de 2012, sendo que esta missão foi responsável pelo imageamento do relevo do globo com resolução espacial de 30 metros; sobre a classificação de solos da bacia do Rio Seridó o mapeamento foi feito baseado nos dados geométricos com atualização de nomenclatura [Santos et al. (2011)], da Embrapa Solos (Centro Nacional de Pesquisa de Solos – divisão da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), atualizado de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos [SiBCS (2006)], classificado até o terceiro nível categórico, escala 1:5.000.000; e o uso e cobertura da terra da bacia foi mapeado com base na reclassificação e agrupamento de dados em escala de 30 metros compilados em 2019 da Coleção 5 do Projeto MapBiomias.

O SWAT foi calibrado para a vazão em quatro sub-bacias com uso da vazão diária a partir do algoritmo implementado por Zambrano-Bigiarini (2020) empregado com o uso da função KGE (*Kling-Gupta efficiency*). A calibração e validação do modelo foi avaliada a partir do coeficiente de determinação (R^2), PBIAS (*Percent bias*), KGE e RMSE (*Root-Mean-Square Error*) [Wilks (2006)], e hidrogramas mensais e diagramas de dispersão da vazão mensal. Embora a avaliação da vazão mensal proporcione resultados mais adequados, este se deu devido ao expressivo número de falhas nas medições da vazão diária nas quatro sub-bacias estudadas.

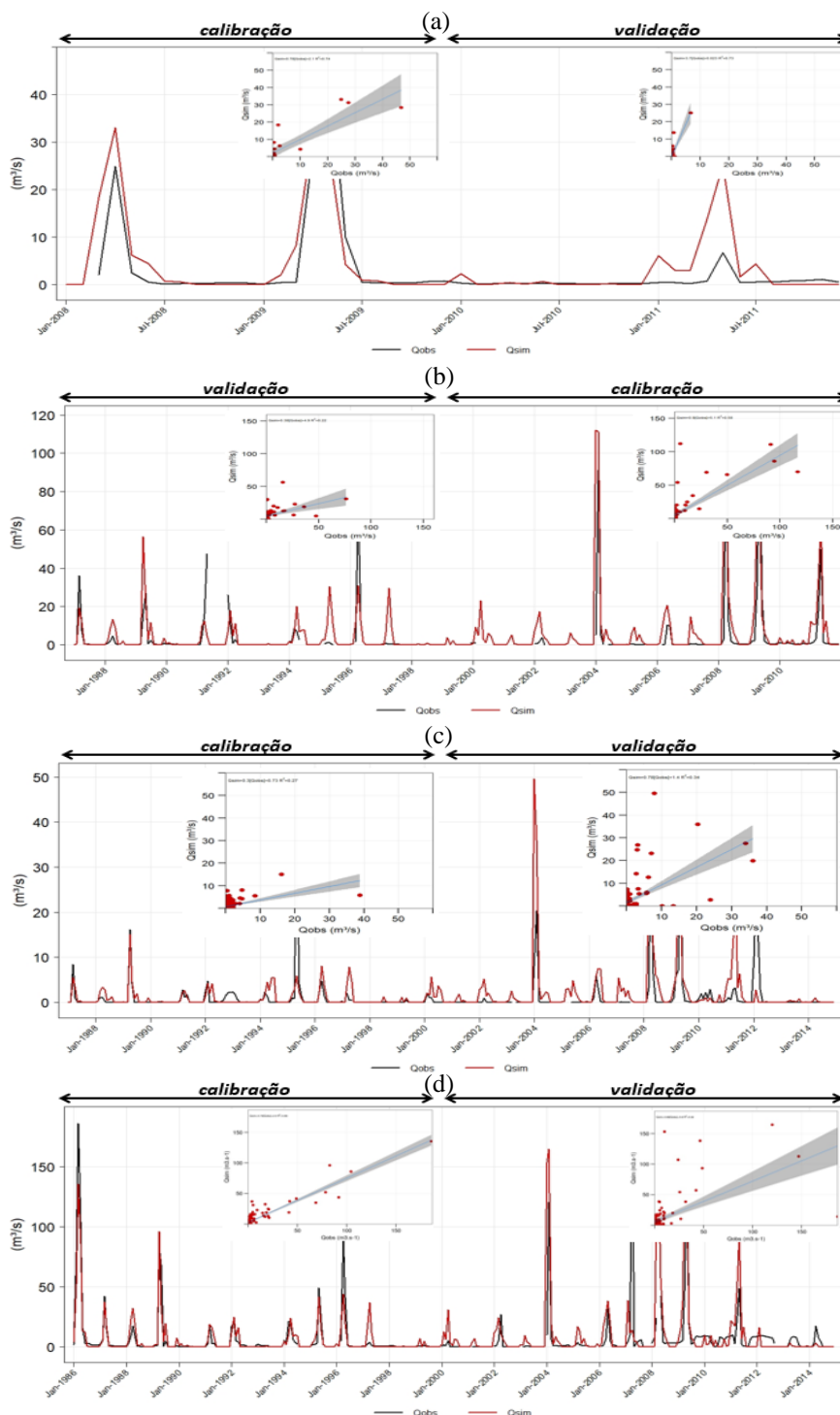
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral, o SWAT simulou satisfatoriamente a vazão na bacia do Rio Seridó, onde a sazonalidade das cheias e estiagens foi simulada coerentemente bem, embora para o período de estiagem, o modelo tenha superestimado a vazão observada, ou simulado alguns pulsos hidrológicos que não foram registrados na vazão observada, como os que ocorreram nas sub-bacias de Caicó e do Sítio Volta (Figura 2b e 2c). No entanto, é comum um modelo ajustar bem as vazões altas e superestimar (ou subestimar) as vazões mínimas [Tucci (2005)].

Como esperado, os hidrogramas mensais de menor magnitude são observados e simulados nas sub-bacias Sítio Volta e Acari, respectivamente. A vazão mensal máxima simulada nessas sub-bacias foi inferior a $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 2c e 2a). Já os hidrogramas mensais com maiores vazões foram

simulados nas sub-bacias Caicó e São Fernando. As vazões mensais máximas nessas sub-bacias ultrapassam $150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Figura 2b e 2d).

Figura 2 – Hidrograma e diagrama de dispersão da vazão mensal observada e simulada pelo SWAT no período de calibração e validação para (a) Acari, (b) Caicó, (c) Sítio Volta e (d) São Fernando. Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2021).



Na sub-bacia de São Fernando foi encontrado o melhor ajuste da vazão simulada, onde foi explicado pelo modelo uma variação relevante da vazão, cerca de 86% da variância da vazão observada ($R^2 = 0.86$, Tabela 2 - calibração). Por outro lado, no período de validação a proporção da variância da vazão simulada foi substancialmente inferior, com uma redução de 0.54 no coeficiente de determinação (R^2) comparado ao R^2 da calibração (Tabela 2 - validação). Nas sub-bacias de Caicó

e Acari ocorreu o mesmo padrão, onde a vazão simulada explicou a maior parte da variância da vazão observada durante o período de calibração. O Sítio Volta foi a única sub-bacia onde foi observado um padrão oposto, i.e., a vazão simulada no período de validação explicando a maior parte da variância da vazão observada, mas em ambos os períodos de avaliação do fluxo simulado pelo SWAT, o R^2 obtido para essa sub-bacia foi insatisfatório (Tabela 2).

Embora a calibração tenha sido satisfatória, os coeficientes das funções utilizadas na avaliação da vazão simulada (Tabela 2) apresentaram uma redução/aumento, o que implicou na diminuição da destreza do SWAT no período de validação, como já era esperado. Para outras sub-bacias, Caicó e Sítio Volta, o SWAT não simulou a vazão de forma desejável. É esperado que os resultados da calibração mostrem uma correspondência melhor do que os resultados da validação, onde os valores simulados caíram de muito bons (São Fernando e Acari) e razoáveis (Caicó) na calibração para intervalos insatisfatórios (Caicó e São Fernando) e muito bons (Acari) durante a validação [Braga et al. (2019); Moriasi et al. (2007)].

De maneira geral, a vazão simulada na bacia do Rio Seridó foi aceitável, uma vez que a sub-bacia com maior área de drenagem, São Fernando, o modelo simulou a vazão durante a calibração satisfatoriamente, com um KGE e um R^2 superiores a 0.75 e um PBIAS inferior a 4%. A magnitude média dos valores mensais de fluxo simulado está dentro da faixa muito boa (PBIAS $< \pm 10$) durante a calibração para a sub-bacia de São Fernando (Tabela 2), de acordo com o estudo de caso que o SWAT foi aplicado para a bacia do Rio Leon no Texas [Moriasi et al. (2007)]. Similarmente, fazendo uso da rotina *hydroPSO* para a calibração mensal do fluxo simulado pelo SWAT, Musau et al. (2014) também constatou R^2 superior a 0.75 e PBIAS de apenas -1.4% na bacia do rio Nzoia (Quênia). Igualmente para a sub-bacia Acari, com KGE, R^2 e PBIAS iguais a 0.77; 0.74 e 16.3%, respectivamente, onde avaliações de desempenho relatadas para o PBIAS usando o modelo SWAT indicaram que o viés do fluxo simulado na sub-bacia de Acari foi satisfatório ($< 25\%$) para a fase de calibração [Bracmort et al. (2006); van Liew et al. (2007)].

O processo de calibração do SWAT resultou no ajuste dos parâmetros descritos na Tabela 1, com valores do CN_2 e do GWQMN próximos aos que foram encontrados por Meira (2020) (63 e 4533, respectivamente) para uma bacia de clima semiárido, especialmente, o CN_2 de Acari e Sítio Volta, e o GWQMN de Sítio Volta e São Fernando. Do mesmo modo, a condutividade hidráulica saturada (SOL_K) foi próxima daquela definida pela Embrapa Solos (1997) e por Medeiros e Silva (2014) para luvisolo, que é o solo predominante na sub-bacia de Caicó, bem como foram correlatos com os valores de SOL_K determinados por Corrêa et al. (2003), Medeiros e Silva (2014), Ramos (2018) e Silva (2018), cujo valor é comum em regiões com tipo de solo neossolo, sendo este dominante nas sub-bacias de Acari e Sítio Volta.

Valores do índice estatístico RMSE a nível mensal nas sub-bacias de Acari e Caicó denotam congruência com o RMSE obtido por Felix e Paz (2016) para o rio Piancó, dado que quando calculado em escala mensal o modelo produz erros menores, sendo 17.89 m^3/s na calibração (13.7 m^3/s na validação) (Tabela 5.4.2). A redução na destreza da vazão simulada pelo SWAT se deve a incerteza da simulação durante o período da estação chuvosa, predominantemente para a validação nas quatro sub-bacias. De maneira geral, o SWAT superestimou a vazão durante as cheias. O PBIAS e o RMSE médio durante o período de validação para as quatro sub-bacias foi $\sim 107\%$ (ou 50% desconsiderando Acari) e 11.8 m^3s^{-1} , respectivamente (Tabela 2). Estes indicadores durante a calibração são aceitáveis, correspondendo a 30% e 8.3 m^3s^{-1} , respectivamente (Tabela 2). Logo, a quantidade e a representatividade das informações para ajuste e validação do modelo é fundamental para permitir um resultado de qualidade. Evidentemente, quanto menores forem as séries e pior a qualidade dos dados, maiores são as incertezas [Tucci (2005)].

O desafio desse processo, predominantemente, é a incerteza na precipitação, que gera erros na simulação da vazão. Haja vista que os padrões de precipitação nos trópicos são caracterizados por

uma variabilidade espacial e temporal extremamente alta que são difíceis de representar adequadamente com redes pluviométricas. Uma vez que a precipitação é comumente o dado de entrada mais importante em modelos hidrológicos, o desempenho do modelo e a incerteza serão impactados negativamente em áreas com redes de pluviômetro esparsas [Strauch et al. (2012)].

Apesar do SWAT superestimar a vazão nas sub-bacias avaliadas durante o período chuvoso, vale ressaltar que ocorrem diversas cheias simuladas pelo modelo que não são constatadas na vazão observada. É provável que isso seja uma limitação das medidas de vazão, que não tem o sinal destes eventos, ou a chuva utilizada na modelagem, que já passou por uma análise de consistência, imponha um excesso de chuva nestes eventos. Pois embora a modelagem hidrológica seja usada em todo o mundo como uma ferramenta importante para avaliar as consequências da cobertura da terra e das mudanças no uso da terra nos processos hidrológicos, a falta de dados espaço-temporais de chuva e vazão compromete a confiabilidade dos resultados em várias regiões do Brasil [Meira Neto et al. (2018)]. O entrave acerca das medições de vazão pode ocorrer, posto que as medições de recarga direta são muito difíceis em bacias semiáridas e contêm um alto nível de incerteza. O último é geralmente abordado por calibração em escala de curto e longo tempo e validação na escala de captação, bem como pelo exame da sensibilidade do modelo aos parâmetros físicos responsáveis pela recarga [Montenegro e Ragab (2010)].

Tanto quanto a estimativa dos parâmetros depende da disponibilidade de dados de entrada e saída do modelo, representativos do seu comportamento (Tabela 1). As incertezas do modelo aumentam à medida que as informações são limitadas. Portanto, uma das principais incertezas envolvidas em um modelo são as incertezas na estimativa dos parâmetros. As incertezas nos parâmetros do modelo podem ser devidas a vários fatores, entre os quais: limitações na estrutura do modelo; procedimentos inadequados na estimativa dos parâmetros e; falta de dados históricos ou físicos da bacia, em que o último aspecto trata do desconhecimento do comportamento da bacia frente a estrutura do modelo, fundamental para todos os modelos, principalmente aqueles em que os parâmetros não têm uma relação bem definida com as características físicas das bacias [Tucci (2005)].

Nos métodos estatísticos de modelos empíricos como os de regressão são adotadas algumas suposições sobre a distribuição dos erros da equação básica [Draper e Smith (1981)], de modo que quando os erros não são estatisticamente independentes das variáveis de entrada e saída, indica que o modelo pode ser melhorado, buscando representar a parcela que apresenta correlação ou os parâmetros do modelo que foram tendenciosamente ajustados. E segundo Troutman (1985) a mais frequente e provável violação das condições ocorre pela falta de independência entre a variância dos erros e a estimativa do modelo (homocedasticidade). Isso ocorre no modelo devido a magnitude dos valores envolvidos, onde na simulação a variância dos erros aumenta com a intensidade das vazões.

Tabela 1 – Parâmetros calibrados, sua respectiva descrição e valor ajustado após a calibração das sub-bacias de Acari, Caicó, Sítio Volta e São Fernando.

Parâmetro	Descrição	Valor Ajustado			
		Acari	Caicó	Sítio Volta	São Fernando
CN ₂	Número da curva na condição de umidade II	71	39	72	87
GWQMN (mm)	Limite do nível de água no aquífero raso necessário para ocorrer fluxo de retorno	2264	2001	3395	3796
RCHRG_DP	Fração de percolação do aquífero profundo	0.001	0.001	0.001	0.004
SOL_K (1ª camada do solo) (mm.hora ⁻¹)	Condutividade hidráulica saturada	15.02	15.04	15.00	32.58

Se por um lado a vazão simulada no período chuvoso foi superestimada, as vazões máximas extremas, iguais e/ou inferiores a Q_{5%}, foram simuladas próximas das vazões observadas, conforme

é observado nas curvas de permanência da vazão mensal (jan/83-dez/16) apresentadas na Figura 3 para as quatro sub-bacias estudadas. Da mesma forma, Felix e Paz (2016) notou que para as maiores vazões de cheias, com permanência inferior a 5%, houve maior correspondência entre as curvas de permanência dos valores observados e calculados pelo modelo MGB-IPH na bacia semiárida do rio Piancó.

Tabela 2 – Coeficientes (coef.) das funções R^2 , PBIAS, KGE e RMSE calculadas com a vazão simulada pelo SWAT e vazão observada para as quatro sub-bacias Acari, Caicó, Sítio Volta e São Fernando durante os seus respectivos períodos de calibração (calib.) e validação (valid.) da vazão mensal.

Coef. das funções	Acari		Caicó		Sítio Volta		São Fernando	
	calib. (2008- 2009)	valid. (2010- 2011)	calib. (2004- 2011)	valid. (1987- 1997)	calib. (1987- 2000)	valid. (2001- 2014)	calib. (1986- 2000)	valid. (2001- 2014)
R^2 (-)	0.74	0.73	0.58	0.22	0.27	0.34	0.86	0.32
PBIAS (%)	16.30	275.40	79.20	28.70	22.40	90.80	3.40	31.50
KGE (-)	0.77	-3.34	0.15	0.37	0.32	-0.06	0.77	0.43
RMSE (m^3s^{-1})	6.08	4.91	15.33	12.09	2.96	5.50	9.08	24.52

No entanto, para as vazões com permanência superior a 5% a vazão simulada foi consideravelmente distinta da vazão observada para as sub-bacias Acari, Caicó e Sítio Volta (Figura 3a a 3c). Felix e Paz (2016) também apontaram que a comparação entre as curvas de permanência, por outro lado, ressalta que a partir da permanência de 5% até 60% (e até ~ 30% para a sub-bacia Sítio Volta), o modelo apresentou maiores valores do que os observados, mas seguindo uma curva de permanência paralela à observada. Em geral, o SWAT superestimou a vazão até ~ 30% de permanência, passando a subestimar a vazão a partir da permanência de ~ 30% (Figura 3a e 3b), exceto para o Sítio Volta, onde a vazão simulada foi superior a observada durante todo intervalo de permanência a partir de 5% (Figura 3c).

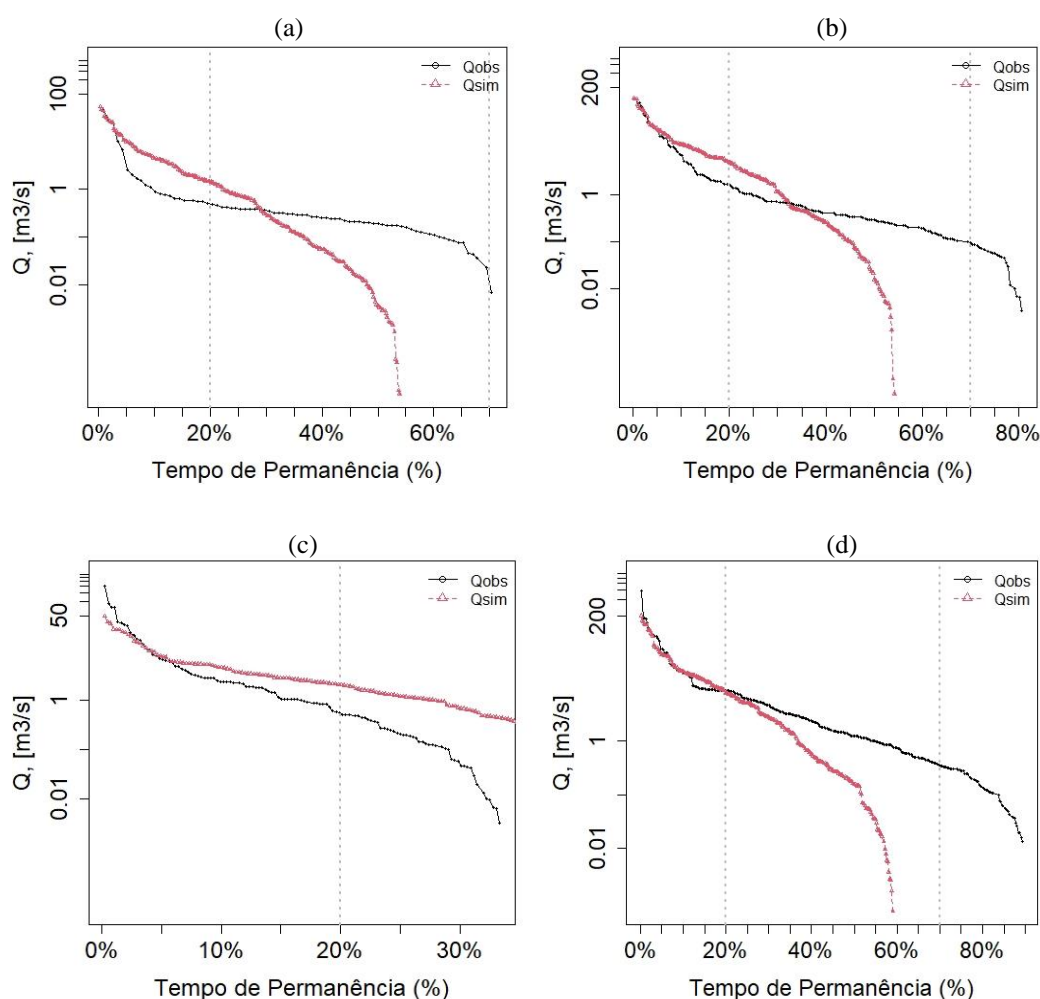
Para a sub-bacia São Fernando a destreza do SWAT foi superior. Nesta sub-bacia, a curva de permanência da vazão simulada subestimou a vazão observada para permanência superior a ~ 30% (Figura 3d). O SWAT simulou o efeito da intermitência dos rios na bacia do Rio Seridó (Figura 3a, 3b e 3d), onde a vazão se tornou nula ~ da permanência de 60%, exceto para a sub-bacia do Sítio Volta (Figura 3c). Enquanto nos períodos de estiagem em que o rio seca completamente, o SWAT simulou vazões muito pequenas (abaixo de $0.01 m^3/s$) para as sub-bacias de Acari, Caicó e São Fernando em torno de 60%, à exceção das vazões superadas na sub-bacia de Sítio Volta (abaixo de $1 m^3/s$) após 30% do tempo, do mesmo modo que Felix e Paz (2016) reparou na bacia do rio Piancó empregando o modelo MGB-IPH.

É provável que efeitos de regulação da vazão, com objetivo de perenizar estes rios, estejam presentes a montante das sub-bacias, visto que as vazões observadas com permanência superior ~ 30% são superiores a vazão simulada (Figura 3). O efeito da operação de reservatórios nestes rios influencia a vazão medida, proporcionando consideráveis discrepâncias entre as curvas de permanência simulada e observada. Isso decorre por consequência da presença dos reservatórios Itans, Passagem das Traíras e Cruzeta (RN) a montante da sub-bacia de Caicó, bem como os reservatórios Sabugi, Carnaúba e Esguincho no RN e os açudes São Mamede e Santa Luzia na PB, todos estes rio acima da sub-bacia de São Fernando, afora, os açudes Marechal Dutra (Gargalheiras) e Dourado no RN e o açude Várzea Grande na PB próximos à cabeceira da sub-bacia Acari, e os reservatórios Caldeirão e Boqueirão de Parelhas (RN) a montante de Sítio Volta [ANA (2016); Medeiros (2017)].

Foi possível notar que a operação de reservatórios perto da cabeceira das sub-bacias delimitadas, produziu maior efeito quanto a assimetria entre as curvas de permanência observada e simulada nas sub-bacias de São Fernando e Caicó, essencialmente, em São Fernando, isso é resultante

da vazão regularizada $Q_{90\%}$ atingir até $2.16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ nos reservatórios Sabugi (sub-bacia de São Fernando) e Passagem das Traíras (sub-bacia de Caicó), enquanto nos demais reservatórios a vazão regularizada não ultrapassa $0.48 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ [ANA (2016)]. Esse efeito também é mais pronunciado em São Fernando, uma vez que nesta sub-bacia quatro dos cinco açudes detêm capacidade de regularização para $Q_{90\%}$, número maior do que nas sub-bacias restantes. E vale reforçar que o açude Passagem das Traíras assim como em praticamente todos os reservatórios apresenta déficit, isto é, situação mais crítica em relação ao balanço hídrico, sendo os maiores déficits nos açudes Boqueirão de Parelhas, Itans, Cruzeta e Gargalheiras, em que dois destes contemplam a sub-bacia de Caicó, e os reservatórios Sabugi, Esguincho e São Mamede são os únicos da bacia do rio Seridó que contém disponibilidade suficiente para atender a demanda pelos usos associados, todos estes situados na sub-bacia de São Fernando [ANA (2016)].

Figura 3 – Curva de permanência da vazão mensal observada e simulada durante jan/1983 a dez/2016 para as sub-bacias: (a) Acari, (b) Caicó, (c) Sítio Volta e (d) São Fernando. Fonte: Elaborada pelo próprio autor (2021).



De modo geral, o ajuste das curvas de permanência permitiu, evidenciar que o ajuste foi tendencioso com relação as vazões mínimas, com um viés positivo, isto é, indicando superestimativa do SWAT, isso foi possível, pois a escala de análise das curvas de permanência é logarítmica (Figura 3) [Tucci (2005)].

Geralmente, há uma tendência para que a vegetação de maior porte associada a solos com maior profundidade conduza às maiores taxas de evapotranspiração e vice-versa [Ribeiro Neto (2006)]. Nesse âmbito, Bezerra (2013) verificou, para a região semiárida do Rio Grande do Norte, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, utilizando Sistema de Informação Geográfica (SIG)

e dados meteorológicos, que áreas desertificadas apresentaram taxas de evapotranspiração menores que 1 mm.dia^{-1} , enquanto que a vegetação nativa (caatinga muito rala e sem folhas) apresentou taxa que variou de 1 a 3 mm.dia^{-1} e a caatinga mais densa obteve variação de 3 a 5 mm.dia^{-1} .

Além disso, Santos, Montenegro e Silva (2011) observaram na bacia do rio Ipanema, localizada no semiárido pernambucano, que a presença de vegetação ao livre escoamento no solo influenciou na contenção do escoamento superficial. Desta forma, a despeito do pouco detalhamento adotado em termos dos aspectos da vegetação que não foram incluídos no SWAT, como o índice de área foliar máximo e mínimo, condutância estomática, capacidade máxima de interceptação do dossel, altura máxima do dossel, e profundidade máxima radicular, esses parâmetros biofísicos devem repercutir em uma simulação coerente da evapotranspiração e, por conseguinte, da vazão e do balanço hídrico, de forma que a representação da variabilidade da evapotranspiração simulada reflita diretamente a profundidade do solo e a cobertura vegetal [Felix e Paz (2016)].

CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a vazão simulada pelo modelo hidrológico SWAT para uma bacia hidrográfica de clima semiárido, a bacia do Rio Seridó, integrante da bacia do Atlântico Oriental, trecho Norte/Nordeste. O SWAT mostrou-se uma ferramenta eficaz, pois simulou satisfatoriamente a sazonalidade da vazão mensal em quatro sub-bacias tributárias do Rio Seridó, simulando em mais de 60% a variância da vazão observada. O modelo apresentou resultados mais favoráveis na simulação da vazão máxima oriunda de eventos extremos de precipitação.

Entretanto, o SWAT superestimou a vazão superior àquelas acima/iguais à permanência de 30%. Em média, as sub-bacias avaliadas mostraram que o PBIAS (RMSE) foi $\sim 30\%$ ($8.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) e 50% ($11.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) durante o período de calibração e validação, respectivamente. O efeito da operação de reservatórios nestes rios influencia a vazão medida, proporcionando consideráveis discrepâncias entre as curvas de permanência simulada e observada. De maneira geral, o SWAT simulou a vazão de forma aceitável e, sendo assim, aplicável para a investigação hidrológica das bacias do semiárido.

Com o modelo hidrológico, agora adequado, os efeitos da mudança de uso da terra (desertificação) foram investigados, onde esse estudo baseado em simulações hidrológicas apresenta uma série de desdobramentos, entre os quais: capacidade de quantificar a resposta hidrológica aos efeitos da mudança no uso da terra e auxiliar à tomada de ações mitigatórias e de gestão que atenuam os efeitos das cheias e as secas, que causa danos à segurança hídrica e gera uma série de conflitos no uso da água.

A investigação dos processos hidrológicos nesta região é de grande interesse, não apenas para as estratégias de planejamento hídrico, mas também para abordar o possível impacto das futuras mudanças climáticas e do uso da terra sobre os recursos hídricos [Montenegro e Ragab (2010)]. Portanto, os estudos de modelagem hidrológica são essenciais para o planejamento hídrico, principalmente nas regiões com maior vulnerabilidade à seca, como é o caso das bacias hidrográficas do NEB. Pesquisas neste sentido garantem informações, dados para auxiliar o planejamento e gestão dos recursos hídricos, e informam ao conjunto da sociedade o regime de vazão das bacias e suas potenciais alterações devido à variabilidade hidroclimática e/ou a ação antrópica.

A disponibilidade de dados históricos de vazão permitiu uma substancial melhoria na estimativa dos parâmetros e na resposta da bacia. Todavia, o modelo pode produzir resultados fisicamente incompatíveis, apesar de otimizar a função objetivo. Diante disso, a prática deve ser a de utilizar os parâmetros de alguns eventos e validar com outros e buscar o conjunto que melhor represente as duas situações, já que para cada evento haverá um conjunto de parâmetros que melhor ajuste o hidrograma simulado ao observado [Tucci (2005)]. Perante o exposto, a incerteza na precipitação e, por conseguinte, na simulação da vazão deve ser investigada e/ou propor redução dela, isso pode ser cumprido por várias técnicas [Meira Neto et al. (2018); Strauch et al. (2012, 2016)], tal

qual recomenda-se prescrever parâmetros biofísicos no modelo hidrológico, com o intuito de representar corretamente a evapotranspiração, que implica no mesmo resultado para a vazão e as componentes hidrológicas.

REFERÊNCIAS

- ANA, A. N. de Á. (2016). *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu: Resumo Executivo*. Brasília.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., and Neitsch, S. L. (2012). *Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation: Version 2012*. Texas Water Resources Institute.
- Bezerra, H. N. (2013). “Estimativa da evapotranspiração espacial em uma região semiárida utilizando sensoriamento remoto.” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Bracmort, K. S., Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., and Arnold, J. G. (2006). “Modeling long-term water quality impact of structural BMPs.” *Transactions of the ASABE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 49(2), 367–374.
- Braga, P. D. B., Oliveira Júnior, H. S. de, Saad, S. I., and Mota da Silva, J. (2019). “Simulação de Vazão da Bacia do Rio Piancó, uma Bacia do Semiárido Brasileiro.” *VIII Simpósio Internacional de Climatologia*, Belém, 1–12.
- Bressiani, D. de A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., and Mendiondo, E. M. (2015). “Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects.” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 9–35.
- van Buuren, S., and Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). “mice: Multivariate imputation by chained equations in R.” *Journal of Statistical Software*, 45(1), 1–67.
- Corrêa, M. M., Ker, J. C., Mendonça, E. S., Ruiz, H. A., and Bastos, R. S. (2003). “Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB).” *Revista Brasileira de Ciência do Solo: Seção V - Gênese, Morfologia e Classificação do Solo*, 27(2), 311–324.
- Draper, N. R., and Smith, H. (2014). *Applied regression analysis. Applied Regression Analysis*, John Wiley and Sons, New York.
- Embrapa Solos, E. B. de P. A.-C. N. de P. de S. (1997). *Manual de Métodos de Análises do Solo. Ministério da Agricultura e do Abastecimento*, 2.ed, Rio de Janeiro.
- Felix, V. de S., and Da Paz, A. R. (2016). “Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída.” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 556–569.
- Gonzalez, A., Temimi, M., and Khanbilvardi, R. (2015). “Adjustment to the curve number (NRCS-CN) to account for the vegetation effect on hydrological processes.” *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, 60(4), 591–605.
- van Liew, M. W., Veith, T. L., Bosch, D. D., and Arnold, J. G. (2007). “Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: Comparison on USDA agricultural research service watersheds.” *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers, 12(2), 173–189.
- Lima, J. G. F. (2017). “Alterações Micrometeorológicas causadas pelas Mudanças do Uso do Solo no Seridó Potiguar.” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Medeiros, A. D. de. (2017). “Análise da gestão das águas de reservatórios no Seridó do Estado do Rio Grande do Norte.” Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- MEDEIROS, I. C. de, and SILVA, R. M. da. (2014). “Análise da erosão hídrica na região semiárida da Paraíba usando o modelo SWAT acoplado a um SIG.” *Geociências*, 33(3), 457–471.
- Meira Neto, A. A., Oliveira, P. T. S., Rodrigues, D. B. B., and Wendland, E. (2018). “Improving

- Streamflow Prediction Using Uncertainty Analysis and Bayesian Model Averaging.” *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(5), 05018004.
- Meira, Y. C. L. (2020). “Resposta Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó às Mudanças Climáticas.” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Melo, G. D. (2008). “Planejamento dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Seridó, no Rio Grande do Norte.” Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- MMA, M. do M. A. (2005). “Panorama da desertificação no estado do Rio Grande do Norte.” MMA, Brasília.
- Montenegro, A., and Ragab, R. (2010). “Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study.” *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons, Ltd, 24(19), 2705–2723.
- Montenegro, S., and Ragab, R. (2012). “Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil.” *Journal of Hydrology*, 434–435, 55–68.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). “Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.” *Transactions of the ASABE*, ASABE, St. Joseph, MI, 50(3), 885–900.
- Musau, J., Sang, J., Gathenya, J., Luedeling, E., and Home, P. (2014). “SWAT model parameter calibration and uncertainty analysis using the HydroPSO R package in Nzoia Basin , Kenya.” *Journal of Sustainable Research in Engineering*, 1(3), 17–29.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- Oliveira Júnior, H. S., Saad, S. I., and Mota da Silva, J. (2021). “O efeito do aperfeiçoamento da precipitação na simulação do regime hidrológico.” *In press*.
- Oliveira, M. B. L. de, Santos, A. J. B., Manzi, A. O., Alvalá, R. C. dos S., Correia, M. de F., and Moura, M. S. B. de. (2006). “Trocas de Energia e Fluxo de Carbono entre a Vegetação de Caatinga e Atmosfera no Nordeste Brasileiro.” *Revista Brasileira de Meteorologia*, 211(3b), 378–386.
- Oyama, M. D. (2003). “Conseqüências Climáticas da Mudança de Vegetação do Nordeste Brasileiro: um Estudo de Modelagem.” Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- RAMOS, H. M. M. (2018). “Funções de Pedotransferência para Estimativa da Densidade e Atributos Físico-Hídricos de Solos do Estado do Piauí.” Universidade Federal do Piauí, Teresina.
- Ribeiro Neto, A. (2006). “Simulação Hidrológica na Amazônia.” Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Sampaio, E. V. S. B., Sampaio, Y., Vital, T., Araújo, M. S. B., and Sampaio, G. R. (2003). *Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência*. Ed. Universitária da UFPE, Recife.
- Santos, H. G., Carvalho, W., Dart, R. de O., Áglio, M. L. D., Sousa, J. S., Pares, J. G., Fontana, A., Martins, A. L. S., and Oliveira, A. P. (2011a). *O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. Embrapa Solos*, Documentos, 130. 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000, Rio de Janeiro.
- Santos, T. E. M. dos, Montenegro, A. A. A., and Silva, D. D. (2011b). “Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR).” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, 15(7), 670–679.
- SCS, S. C. S. (1972). “Hydrology.” *National Engineering Handbook*, USDA, Washington D. C.
- SiBCS, S. B. de C. de S. (2006). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Silva, Á. G. da. (2018). “Caracterização e aptidão agrícola de solos representativos do agropólo Mossoró-Assu.” Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.
- Souza, A. C. M., Silva, M. R. F. da, and Dias, N. da S. (2012). “Gestão de Recursos Hídricos: O

- Caso da Bacia Hidrográfica Apodi/Mossoró (RN).” *Irriga*, 280–296.
- Strauch, M., Bernhofer, C., Koide, S., Volk, M., Lorz, C., and Makeschin, F. (2012). “Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation.” *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V., 414–415, 413–424.
- Strauch, M., Kumar, R., Eisner, S., Mulligan, M., Reinhardt, J., Santini, W., Vetter, T., and Friesen, J. (2016). “Adjustment of global precipitation data for enhanced hydrologic modeling of tropical Andean watersheds.” *Climatic Change*, 141(3), 547–560.
- Troutman, B. M. (1985). “Errors and parameter estimation in precipitation-runoff modeling: 1. Theory.” *Water Resources Research*, 21(8), 1195–1213.
- Tucci, C. E. M. (2005). *Modelos Hidrológicos*. Ed. da UFRGS, Porto Alegre.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. International Geophysics Series*, Academic Press, San Diego.
- Xavier, A. C., King, C. W., and Scanlon, B. R. (2016). “Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013).” *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, 36(6), 2644–2659.
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020). *hydroGOF: Goodness-of-Fit Functions for Comparison of Simulated and Observed Hydrological Time Series* R package version 0.4-0.

AGRADECIMENTOS

Pelo financiamento da pesquisa à: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proc. 438271/2018-1 e às Fundações de Amparo à Pesquisa da Paraíba (FAPESQ) e de São Paulo (FAPESP), edital nº 013/2019 - Chamada FAPESQ-FAPESP 2019 (nº termo 268/2020). Pela concessão dos dados à: Empresa de Pesquisa Agropecuária, Dep. de Meteorologia, do Rio Grande do Norte (EMPARN); Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte (IGARN); Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESPA); e à Agência Nacional de Águas (ANA). Por fim, aos desenvolvedores do *software* R e ao ARS-USDA (*Agricultural Research Service-United States Department of Agriculture*) por disponibilizar o SWAT.