



MODELAGEM HIDROLÓGICA EM UMA TÍPICA BACIA DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO BRASIL

Franklin Mendonça Linhares
Universidade Federal da Paraíba

Pedro Costa Guedes Vianna
Universidade Federal da Paraíba

Alexandro Medeiros Silva
Universidade Federal da Paraíba

Tuany Kerolayne de Oliveira Ferreira
Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

A região semiárida do Nordeste do Brasil constitui-se numa região marcada pela escassez de recursos hídricos, decorrente de chuvas irregulares, altas taxas de evapotranspiração e solos rasos com pouca capacidade de armazenagem de água em aquíferos. Neste contexto, compreender a hidrologia, o solo, a geologia e a pedologia são essenciais para entender as áreas em diferentes regiões do Nordeste. Essa região apresenta diferentes tipos de clima, diversidade ecológica e geológica. A região Nordeste é formada por dois contextos hidrogeológicos: (a) embasamento cristalino (52,3%), com rochas praticamente impermeáveis, e (b) bacia sedimentar, como rochas sedimentares (47,6%) onde ocorrem importantes aquíferos. Assim, conhecer as características da geologia é desmitificar os efeitos das secas que abrange essa região. Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é analisar a influência das ilhas hidro-pedo-geológicas na disponibilidade de água no semiárido do Nordeste com aplicação de modelagem hidrológica na Bacia do Rio Salgado. Neste trabalho, foram utilizados os seguintes procedimentos metodológicos: (a) visitas in loco nas diversas bacias hidrográficas no Nordeste do Brasil, para se analisar diferenças hidrológicas e geológicas, e (b) técnicas de modelagem hidrológica utilizando o modelo matemático Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para analisar o balanço hídrico de água no solo nas porções cristalina e sedimentar. Os resultados do balanço hídrico foram analisados para entender a influência da infiltração e do escoamento superficial em diferentes formações geológica do semiárido do Nordeste do Brasil.

Palavras-chave: Hidrogeografia, modelagem hidrológica, modelo SWAT, semiárido.

HYDROLOGICAL MODELING IN A TYPICAL BASIN IN THE SEMI-ARID REGION OF BRAZIL

ABSTRACT

The semi-arid region of Northeast Brazil is a region marked by the scarcity of water resources, due to irregular rains, high rates of evapotranspiration and shallow soils with little water storage capacity in aquifers. In this context, understanding hydrology, soil, geology and pedology are essential to understanding the different areas of the Northeast. This region has different types of climates, ecological and geological diversity. The Northeast region is formed by two hydrogeological contexts: (a) crystalline basement (52.3%), with virtually impermeable rocks, and (b) sedimentary basin, such as sedimentary rocks (47.6%) where important aquifers occur. Thus, knowing the characteristics of geology is to demystify the effects of droughts that cover this region. In this sense, the objective of this study is to analyze the influence of hydro-pedo-geological islands on the availability of water in the semi-arid region of the Northeast with the application of hydrological modeling in the Salgado River Basin. In this work, the following methodological procedures were used: (a) on-site visits in the different hydrographic basins in Northeast Brazil, to analyze hydrological and geological differences, and (b) hydrological modeling techniques using the Soil and Water Assessment Tool mathematical model (SWAT), which uses physical parameters of the soil, precipitation, flow and other elements of the hydrological cycle to analyze the water balance in the soil in the crystalline and sedimentary portions. The results of the water balance were analyzed to understand the influence of infiltration and runoff in different geological formations in the semiarid region of Northeast Brazil. Based on the results obtained, the study confirmed that there are hydro-pedo-geological "islands" in several portions of the Brazilian Semi-arid Region of Northeast.

Keywords: Hydrogeography, hydrological modeling, SWAT model, semi-arid.

INTRODUÇÃO

As estiagens no Nordeste do Brasil vêm sendo, durante muitos períodos, um enorme problema socioeconômico e ainda são reconhecidas atualmente como graves situações que geram calamidades públicas, desde as duas primeiras décadas do século XX. Desde então, até a presente data, passaram a ser uma questão tratada por órgãos instituídos para auxiliar na minimização os prejuízos causados pelos eventos de secas sobre a população nordestina (CIRILO, 2008). Das consequências das secas se originaram a Inspetoria de Obras Contra as Secas-IOCS, criada em 1909, e a Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas-IFOCs, instituída, no lugar daquela, em bases mais bem estruturadas no ano de 1919 (LINHARES, 2019).

Existe atualmente um conceito que todo o semiárido nordestino é caracterizado pela escassez hídrica. Todavia, este estudo discute que nessa região existem grandes áreas com condições climáticas, hidrológicas e pedológicas atípicas a grande porção do semiárido, as chamadas ILHAS “HIDRO-PEDO-GEOLÓGICAS”.

Ao longo da última década, a associação entre os grupos de pesquisa Gestão em Água e Território e o grupo Recursos Hídricos, ambos da Universidade Federal da Paraíba, busca entender a distribuição espacial e os mais variados aspectos dos conflitos pelo uso da água no semiárido da Região Nordeste. É o caso deste estudo, onde apresentamos a hipótese de que a região semiárida do Nordeste do Brasil possui em seu espaço geográfico uma série de “ilhas-hidro-pedo-geológicas” que, de certa forma, desmistifica a ideia rígida de que todo o semiárido se caracteriza pela falta de água.

Sabe-se que as águas da Terra encontram-se em permanente movimento, constituindo o assim chamado “Ciclo Hidrológico”. Efetivamente, desde os primórdios dos tempos geológicos, a água – líquida ou sólida - que é transformada em vapor pela energia solar que atinge a superfície da Terra - oceano, mares continentais e ilhas – pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e pela densidade da cobertura vegetal e a transpiração pelos organismos vivos, sobe à atmosfera, onde esfria progressivamente, dando origem às nuvens. Essas massas de água voltam a cair na Terra, sob a ação da gravidade, na forma de chuva, neblina e neve, principalmente.

Em todos os lugares da terra, a presença de água é influenciada por quatro variáveis controladoras: (a) precipitação (P), que formam um recurso para a vegetação natural e culturas pluviais, (b) evapotranspiração (ET), (c) escoamento superficial (R), (d) fluxos de água subterrânea, e (e) recarga de água. A avaliação das perdas de água por escoamento e evapotranspiração são problemas complexos devido à grande amplitude dessas variáveis, tanto no espaço como no tempo (REBOUÇAS, 2006). Dessa forma, torna-se necessário a realização de estudos que analisem as diferentes condições hidrológicas, pedológicas e geológicas do semiárido nordestino, analisando suas diferentes capacidades de produção de água, bem como realizando a identificação das áreas que apresentam uma maior escassez de água, possibilitando assim, um melhor gerenciamento de água para a população. Esse estudos ganham ainda mais importância nessa região, onde o déficit hídrico é elevado, devido aos altos valores de ET.

Vale ressaltar que a situação de escassez de água não depende apenas dos totais pluviométricos, mesmo em regiões com excedente hídrico. A falta de condições geológicas ideais para a formação de reservas importantes de água subterrânea, como ocorre no domínio de rochas cristalinas da zona semiárida do Nordeste do Brasil, pode originar um quadro de rios temporários ou intermitentes durante os períodos de estiagem (DANTAS et al., 2020).

A interação rio-água subterrânea é distinta para diferentes meios litológicos, principalmente devido à dinâmica do fluxo subterrâneo. Aquíferos fraturados são formados por rochas ígneas, metamórficas ou cristalinas, onde a circulação da água

ocorre em fraturas, aberta devido ao movimento tectônico. A capacidade dessas rochas de acumular água está relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação que permitem a infiltração e o fluxo da água (OLIVEIRA et al., 2022).

Aquíferos sedimentares por sua vez, são formados por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos não consolidados ou solos arenosos, onde a circulação da água ocorre nos poros entre os grãos de areia, silte e argila de granulação variada (SILVA et al., 2018). Nesses aquíferos, parte das águas das chuvas recarregam os aquíferos. Em seguida, essas águas fluem em direção às drenagens superficiais, correspondentes às áreas de descarga do aquífero, evidenciando potenciais ganhos hídricos no rio devido ao fluxo de base (FONTENELE, 2010).

Em regiões semiáridas existe uma demanda crescente de água, devido ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, bem como uma redução na disponibilidade hídrica devido às possíveis mudanças climáticas, podendo agravar a escassez de água no futuro (GÜNTNER, 2002).

Além disso, essas regiões sofrem frequentemente com chuvas abaixo da média, bem como de secas severas (MONTENEGRO e RAGAB, 2012). De acordo com estudos estatísticos realizados por Frischkorn et al. (2003), a cada década uma seca severa acomete a região semiárida do Nordeste do Brasil.

A hidrologia do semiárido é bastante diferente das regiões úmidas. As chuvas irregulares, os eventuais períodos de seca, o clima e as mudanças de uso da terra, adicionam complexidade à hidrologia de regiões semiáridas. Nesse contexto, compreender a hidrologia sob o clima atual e futuro, bem como sob a influência do uso e ocupação do solo, da geologia e da pedologia são essenciais para determinar as áreas de profunda escassez hídrica no semiárido do Brasil (SILVA et al., 2022).

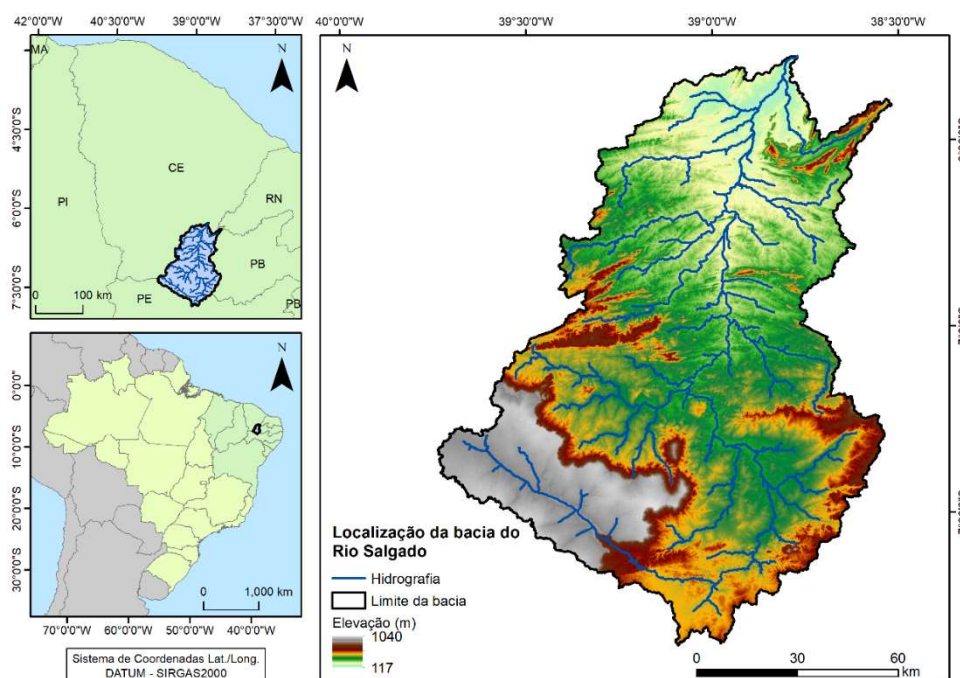
Assim, o presente trabalho se propõe a utilizar como área de pesquisa a Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, localizada no alto curso do Rio Jaguaribe, para analisar as ilhas “hidro-pedo-geológicas” no contexto da região semiárida do nordeste brasileiro. A bacia do Rio Salgado possui áreas com características geológicas distintas. Na maior parte da bacia é possível identificar áreas de formação cristalina e nas demais áreas formações sedimentares. Nas áreas cristalinas, são identificados majoritariamente solos rasos e são áreas que não propiciam a formação de aquíferos. Já as áreas sedimentares da bacia do rio Salgado fazem parte da formação sedimentar do Araripe, regiões essas que possuem solos mais profundos e que podem apresentar alta capacidade de armazenamento de água. Nesse sentido, pretende-se mostrar que as diferentes características geológicas do semiárido podem ser elemento chave para disponibilidade hídrica da região, podendo então existir uma seca hidro-pedo-geológica na bacia hidrográfica do Rio Salgado. Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é analisar a influência das ilhas hidro-pedo-geológicas na disponibilidade de água no semiárido do Nordeste com aplicação de modelagem hidrológica na Bacia do Rio Salgado.

MATERIAIS E MÉTODOS

A Área de Estudo

Para a realização desse estudo foi escolhida a bacia hidrográfica do Rio Salgado, que é uma sub-bacia do Rio Jaguaribe. A bacia hidrográfica do Rio Salgado possui uma área de 13.009,57 km², e está localizada entre as latitudes 6,24° Sul a 7,92° Sul e as longitudes 38,36° Oeste a 39,80° Oeste, mais precisamente na porção sul do estado do Ceará (Figura 1). Essa bacia limita-se ao oeste com a sub-bacia do Alto Jaguaribe, ao sul com o estado de Pernambuco, ao leste com o estado da Paraíba e a nordeste com a sub-bacia do Médio Jaguaribe.

Figura 1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Salgado.



O principal rio desta sub-bacia é o rio Salgado e seu trajeto dá-se no sentido sul-norte, até encontrar com o rio Jaguaribe, próximo à cidade de Icó, logo à jusante da barragem do açude Orós. Possui uma extensão de 308 km e drena uma área de 12.623,89 km², o equivalente a 9% do território cearense. A bacia hidrográfica do Rio Salgado está inserida na Província Borborema, entidade tectônica Neoproterozóica (Brasiliana – Pan-Africana), parcialmente encoberta por sedimentos Fanerozóicos de bacias interiores e marginais do Nordeste brasileiro - na área em estudo, da Bacia Sedimentar do Araripe. Essa bacia sedimentar está inserida sobre terrenos pré-cambrianos da Zona Transversal da Província Borborema, no domínio do Sistema de Dobramento Piancó-Alto Brígida, no seu limite com a zona geotectônica de Teixeira (BRITO NEVES et al., 2005), e tem seu

arcabouço estrutural constituído por sequências estratigráficas, limitadas por discordâncias regionais.

A bacia do Rio Salgado está totalmente inserida no bioma Caatinga e possui um clima semiárido, característico pela alta variabilidade sazonal e intra-anual da precipitação, com médias anuais entre 500mm e 700mm concentrados entre os meses de janeiro a maio, relacionada com o fenômeno *El Niño*, que resulta em secas recorrentes (BRESSIANI et al., 2015).

A bacia do Rio Salgado apresenta uma característica geológica atípica para a região semiárida nordestina, pois é constituída de 57% de embasamento cristalino e 43% de sua área possui depósitos sedimentares. A grande parte da região sedimentar dessa bacia são da formação Araripe, que possui sistemas de aquíferos livres com alto potencial hídrico, localizadas ao sul da bacia (Silva, 2019).

Modelagem hidrológica: dados de Entrada do Modelo SWAT

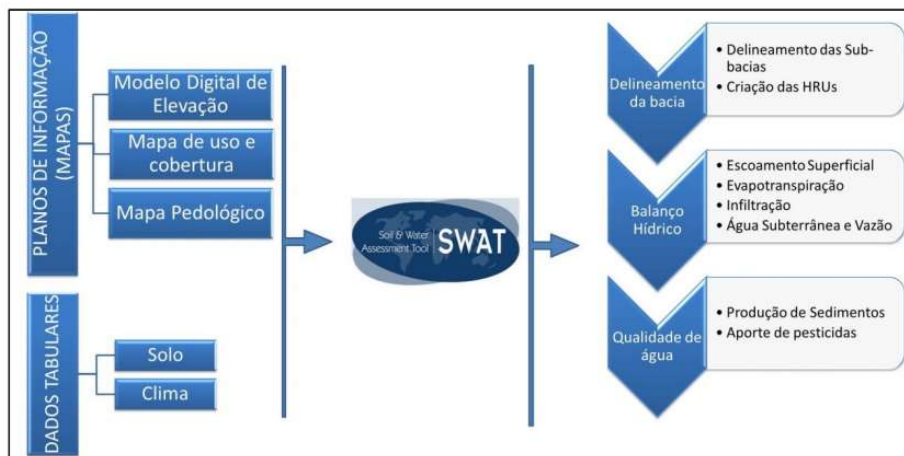
O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD et al., 1998) é um modelo de domínio público, que foi desenvolvido pelo Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture (ARS/USDA) com o objetivo de analisar os diferentes processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas, como os efeitos e impactos gerados pela as alterações decorrentes do uso e manejo do solo, gerenciamentos de reservatórios, retiradas e escoamento de águas superficiais e subterrâneas, quantificação de sedimentos, nutrientes e poluentes de origem agroquímicos (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT foi escolhido para o desenvolvimento desse trabalho em virtude de ser uma ferramenta importante para estudos que trabalham com os efeitos da modificação no uso e ocupação do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, bem como na produção de sedimentos. O modelo SWAT funciona como uma extensão do programa ArcGIS (*ESRI – Environmental Systems Research Institute*). O modelo geo-espacial ArcSWAT é responsável pelas ferramentas necessárias às etapas de pré e pós-processamento dos mapas temáticos necessários para a execução do modelo hidrológico SWAT. As informações dos dados de entrada capazes de serem armazenadas no ArcSWAT, são os dados geoespacial, numérico e de texto, alimentando assim os algoritmos da modelagem da bacia hidrográfica em estudo. Os dados geoespaciais referem-se aos arquivos de Modelo do Terreno (MNT), uso e ocupação do solo e tipo de solo, os dados de numéricos e de textos caracterizam os dados espaciais, climáticos e hidrológicos.

A construção da base de dados foi direcionada seguindo as recomendações do referencial teórico do SWAT, conforme publicado por Neitsch et al. (2005) e também os procedimentos de entrada e saída do modelo, conforme documentação tutorial e metodológica desenvolvida pelos criadores do SWAT com revisão e atualização publicadas por Arnold *et al.*, (2012). Foi utilizado o ArcSWAT na versão 10.3, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, em parceria com a Texas A&M University. A interface desenvolvida entre o SWAT e o

ArcGIS, facilita a entrada de dados no modelo, além de possibilitar a subdivisão automática da bacia em sub-bacias com a utilização dos dados do MNT. Essa interface possibilita que os dados de saída sejam exibidos em forma de mapas, gráficos e tabelas. A Figura 2 ilustra os dados de entrada necessários e os processos do modelo.

Figura 2. Dados de entrada no SWAT e resumo dos processos.



Fonte: Carvalho (2014).

Modelo Digital de Elevação

A primeira etapa estabelecida para a simulação da modelagem no SWAT consistiu em discretizar e delimitar a bacia hidrográfica em sub-bacias, que podem ser tratadas como unidades independentes no processo de modelagem. Neste processo também é definida a área mínima de fluxo e acumulação para geração da rede de drenagem na bacia e nos exutórios. Essa etapa é realizada pelo o ArcSWAT que requer como dado de entrada apenas o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia. O MDE utilizado foi o do projeto desenvolvido no ano de 2000 pelas Agência Nacional de Inteligência Geoespacial (NGA) e pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), ambas dos Estados Unidos da América. O MDE utilizado possui resolução espacial de 30 m e foi obtido através do *United States Geological Survey* (USGS).

Em seguida, são definidas a direção de fluxo, a área de acumulação de água e sedimentos com base na topografia do terreno. Nesse momento, é necessário indicar a área mínima de fluxo e acumulação para geração da rede de drenagem na bacia e dos exutórios. Quanto menor for o valor da área mínima, maior será o nível de detalhes da rede de drenagem. Adotamos para a bacia do Rio Salgado o valor de 4000 ha a partir de vários testes com diferentes valores para a área mínima de fluxo e acumulação. Após essa etapa, foram então criadas 180 sub-bacias, cada qual com

suas respectivas características topográficas, sendo 3 exutório monitorados com dados hidrológicos de vazão.

Com a rede de drenagem e os exutórios criados, o próximo passo é indicar a localização do exutório da bacia. Com o exutório selecionado, o *software* é capaz de delinear a bacia hidrográfica e delimitar as sub-bacias. Após essa etapa são calculados os parâmetros topográficos em cada sub-bacia. A Figura 3a mostra o resultado da discretização da bacia do Rio Salgado.

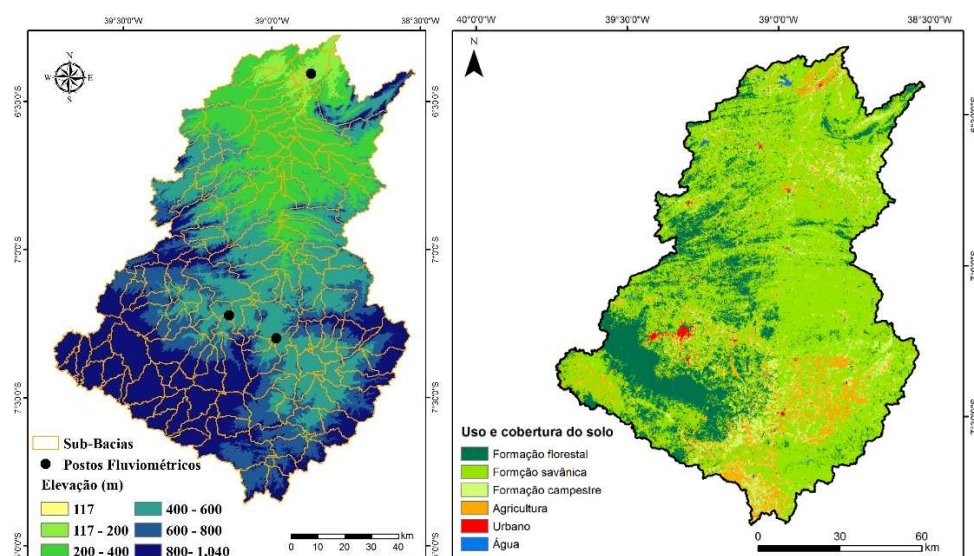


Figura 3. (a) MDE utilizado e delimitação automatizada das sub-bacias, e (b) espacialização dos tipos de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Salgado.

Uso e ocupação do solo

Com relação aos dados de uso e cobertura da terra, foram utilizados os mapas do Projeto MapBiomas (Coleção 4), que é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. A descrição completa do projeto encontra-se em <http://mapbiomas.org>.

O projeto MapBiomas disponibiliza um mapa anual de uso e cobertura da terra para todo o Brasil, para o período de 1985 a 2021. Além dos mapas, esse projeto também disponibiliza dados de mudanças dos usos e coberturas da terra, bem como, diversas estatísticas das imagens, como a qualidade dos mosaicos e da classificação. No que tange as etapas de calibração e validação do modelo SWAT (1986–2017), foi utilizada como entrada do modelo o uso e cobertura da terra para o ano de 2000 (Figura 3b). A Tabela 1 apresenta as classes de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Salgado e do banco de dados do SWAT.

Em seguida foi realizada a associação entre as classes de uso da bacia do Rio Salgado com as classes existentes no banco de dados do modelo tendo como fator determinante o porte da vegetação (excetuando-se as classes de Açudes e Solo Exposto). Vemos que a Bacia do Rio Salgado possui uma distribuição do uso e ocupação do solo com grande presença das classes de Caatinga Arbustiva e Caatinga Arbórea-Arbustiva, seguidas da classe de Caatinga Herbácea, o que indica uma boa cobertura do terreno pela vegetação. Contudo, essa distribuição do uso e ocupação do solo identificada para a Bacia do Rio Salgado pode estar sendo influenciada pela data de coleta da imagem de satélite.

Tabela 1. Classes de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do Rio Salgado e do banco de dados do SWAT.

Uso do solo	Classe no SWAT	Área (km ²)	Área (%)
Água	<i>Water – WATR</i>	55,73	0,43
Caatinga arbórea-arbustiva	<i>Forested Mixed – FRST</i>	2492,32	19,16
Caatinga arbustiva	<i>Range-Brush – RNGB</i>	7969,28	61,26
Caatinga herbácea	<i>Range-Grass – RNGE</i>	1106,54	8,51
Solo Exposto	<i>Barren – BARR</i>	52,72	0,41
Agricultura e pastagem	<i>Agricultural Land-Generic</i>	1332,38	10,24

Mapa e parâmetros do solo

Os dados de solo foram obtidos junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os dados de solos foram adquiridos na escala de 1:100.000. As classes de solo identificadas na bacia encontram-se especializadas na Figura 4a. Para essa bacia foram identificadas oito classes de tipos de solo (Tabela 2). Os parâmetros físicos dos solos foram obtidos a partir do portal SISOLOS da EMBRAPA (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br>).

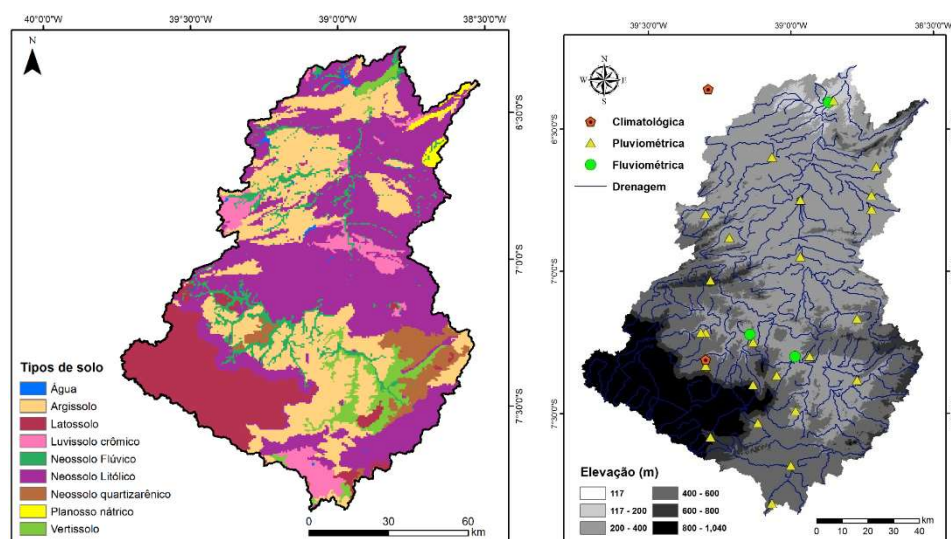


Figura 4. (a) Especialização dos tipos de solo, e (b) distribuição espacial dos postos fluviométricos, pluviométricos e estação climatológica na bacia do Rio Salgado.

Tabela 2. Distribuição dos tipos de solo na bacia do rio Salgado

Classes de tipo de solo	Área ocupada (km²)	Área ocupada (%)
Água	42,52	0,33%
Argissolo	3332,94	25,62%
Latossolo	1765,88	13,57%
Luvissolo crômico	593,36	4,56%
Neossolo Flúvico	704,45	5,41%
Neossolo Litólico	5417,00	41,64%
Neossolo quartizarênico	524,25	4,03%
Planossolo nátrico	104,63	0,80%
Vertissolo	524,54	4,03%
TOTAL	13.009,57	100,00%

Dados meteorológicos e de vazão observados

A bacia do Rio Salgado foi escolhida para o desenvolvimento dessa pesquisa devido à grande disponibilidade de dados meteorológicos e hidrológicos necessários para uma boa modelagem do SWAT. Para a calibração, foram utilizados dados dos anos entre 1986 a 2005. A validação utilizou dados dos anos entre 2006 a 2017. Dos 36 anos de dados observados, os 5 primeiros anos foram utilizados para o período de aquecimento do modelo. Nessa área, foram catalogadas 83 estações pluviométricas, das quais foram utilizadas 22 estações após a análise da quantidade e qualidade dos dados diários. Na bacia do Rio Salgado existem 7 estações fluviométricas, das quais foram utilizadas 3 estações pela qualidade e quantidade de dados com o mesmo período das estações pluviométricas.

Os dados necessários para o gerador climático foram coletados em 2 estações meteorológicas existentes nessa área. Essas estações estão distribuídas na bacia do Rio Salgado conforme a Figura 4b. Os dados das estações pluviométricas e fluviométricas foram adquiridos diretamente no HIDROWEB, da Agência Nacional de Águas (ANA). Já os dados de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, foram coletados nas estações de Barbalha e Iguatu operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Os dados gerados na bacia do Rio Salgado têm toda uma qualidade e quantidade tanto nas estações pluviométricas como nas estações fluviométricas. Esses dados foram analisados e constatou-se que o período de maior qualidade e quantidade de dados para essas estações é de 1981 a 2017, perfazendo um total de 36 anos. Com isso, foi possível englobar as principais variações climáticas e hidrológicas que ocorreram na área da Bacia do Rio Salgado, com especial atenção para os períodos cíclicos de secas e chuvas, compreendendo os períodos utilizados para calibração e validação do modelo, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Descrição das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas usadas neste estudo

Código	Nome	Tipo	Latitude (°)	Longitude (°)
739046	Abaiara	Pluviométrica	-7,3667	-39,0500
638010	Aurora	Pluviométrica	-6,9500	-38,9667
638091	Baixio	Pluviométrica	-6,7333	-38,7167
739016	Barbalha	Pluviométrica	-7,3333	-39,3000
738060	Barro	Pluviométrica	-7,1667	-38,7667
738006	Brejo Santo	Pluviométrica	-7,4911	-38,9833
739011	Caririacu	Pluviométrica	-7,0333	-39,2833
639026	Cedro	Pluviométrica	-6,6000	-39,0667
639009	Granjeiro	Pluviométrica	-6,8833	-39,2167
638093	Icó	Pluviométrica	-6,4000	-38,8500
638013	Ipaumirim	Pluviométrica	-6,7833	-38,7167
739003	Jamacaru	Pluviométrica	-7,4000	-39,1333
739038	Jardim	Pluviométrica	-7,5833	-39,2833
739065	Juazeiro do Norte	Pluviométrica	-7,2167	-39,3167
638056	Lavras da Mangabeira	Pluviométrica	-6,7500	-38,9667
738001	Mauriti	Pluviométrica	-7,3833	-38,7667
738008	Milagres	Pluviométrica	-7,3000	-38,9333
739007	Missão velha	Pluviométrica	-7,2500	-39,1333
739060	Pena Forte	Pluviométrica	-7,8167	-39,0667
739010	Porteiras	Pluviométrica	-7,5333	-39,1167
639034	Várzea Alegre	Pluviométrica	-6,8000	-39,3000
638008	Umari	Pluviométrica	-6,6333	-38,7000
36290000	Icó	Fluviométrica	-6,4067	-38,8672
36250000	Podimirim	Fluviométrica	-7,3000	-38,9847
36210000	Sítio Lapinha	Fluviométrica	-7,2222	-39,1439
82784	Barbalha	Meteorológica	-7,3100	-39,3000
82686	Iguatu	Meteorológica	-6,3600	-39,2900

Calibração e sensibilidade dos parâmetros

Para a otimização dos parâmetros do modelo SWAT, foi utilizado o programa SWAT-CUP (ABBASPOUR et al., 2007), porque o modelo SWAT possui uma enorme quantidade de parâmetros que influenciam no modelo, o que torna o trabalho da modelagem bastante difícil. Assim, neste estudo, optou-se pela automatização dos parâmetros do SWAT durante o processo de calibração, pois as possibilidades de combinações entre os parâmetros são inúmeras e demandam muito tempo para que seja obtido um bom ajuste. A utilização do SWAT-CUP possibilitou testes de análise de sensibilidade, calibração e verificação dos parâmetros do modelo SWAT. Para tanto, neste estudo, foi usado o algoritmo SUFI-2 (ABBASPOUR et al., 2004).

Para De Medeiros et al. (2019), a vantagem do SUFI-2 é a calibração multiparamétrica, sendo capaz de analisar simultaneamente um grande número de parâmetros que norteiam os processos de simulações do SWAT, com o objetivo de buscar o melhor resultado através de inúmeras combinações dos parâmetros, variando-os dentro do intervalo permitido pelo SWAT.

A confiabilidade dos ajustes e dos graus de eficiência do modelo calibrado para as incertezas são avaliadas pelo fator-P e fator-R. Os valores do fator-P variam entre 0 e 100%, enquanto o fator-R varia entre 0 e infinito. O fator-P de 1 e o fator-R de 0 indicam uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos, ou seja, um ajuste perfeito entre os dados observados e os estimados.

Para a calibração dos parâmetros do SWAT neste estudo, foram realizadas 500 iterações, sendo que a cada iteração, os valores de cada parâmetro são modificados simultaneamente, o que agiliza o processo de calibração. Ao final da calibração, o SWAT-CUP calcula índices estatísticos que analisam o desempenho dos resultados obtidos, mostrando: (a) os valores de cada parâmetro, (b) os valores calculados para os índices de desempenho do modelo, (c) os valores simulados para a variável indicada (nesse caso a vazão) e (d) a iteração que apresentou o melhor ajuste.

Índices de Desempenho Para Validação do Modelo SWAT

Para a análise de eficiência do modelo, isto é, para verificar o quanto o modelo foi capaz de simular a realidade, foram utilizados o Nash e o R^2 , os quais estão descritos nas Equações 34 e 35. O R^2 e a Nash são estatísticas que foram usadas em muitos estudos para avaliar o desempenho preditivo do SWAT (DA SILVA et al., 2018; DE MEDEIROS et al., 2019; FONSECA et al., 2022).

$$Nash = \left[1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right] \quad (1)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \right] \quad (2)$$

sendo Q_{obs} : vazão observada; Q_{sim} : vazão simulada pelo modelo; $\overline{Q_{obs}}$ média da vazão observada; $\overline{Q_{sim}}$ média da vazão simulada; n : quantidade de dados na série de vazões observadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 mostra as análises estatísticas das calibrações e validações para o posto Icó. Os resultados dessa tabela mostram que no período de calibração as métricas de calibração utilizadas neste estudo podem ser consideradas boas ($R^2 = 0,84$ e Nash = 0,65), enquanto no período de validação o desempenho do modelo foi ligeiramente inferior ($R^2 = 0,83$ e Nash = 0,57). Esses resultados podem ser entendidos como comuns no âmbito da modelagem, como também obtidos nos

estudos de Yesuf et al. (2015), Ayele et al. (2017), Worku et al. (2017), e De Medeiros et al. (2019), e Fonseca et al. (2022).

Entretanto, pode-se notar que mesmo com essa diminuição dos valores de R^2 e Nash, as métricas de desempenho da modelagem ainda podem ser considerados boas para a análise do comportamento das vazões nessa seção de controle. Os resultados obtidos mostraram que o modelo SWAT subestimou as vazões estimadas quando comparadas as observadas, tanto na calibração (média simulada foi de 14,73 m^3/s e a média observada de 21,60 m^3/s , uma diferença de 32%), quanto no período de validação (média simulada foi de 13,52 m^3/s e a média observada de 20,44 m^3/s , uma diferença de 34%).

Tabela 4. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Icó.

Estadísticas	Calibração (1986–2005)	Validação (2006–2017)
R^2	0,84	0,83
Nash	0,65	0,57
Média simulada (m^3/s)	14,73	13,52
Média observada (m^3/s)	21,60	20,44

A Figura 5 apresenta os resultados da modelagem hidrológica para o posto Icó entre 1986-2005 (calibração) e 2006-2017 (validação). Nota-se que os hidrogramas observados e simulados acompanharam o comportamento da série de dados observados, entretanto, os picos não ficaram bem ajustados. Com relação às vazões calibradas para os meses considerados normais e secos, as vazões simuladas ficaram bem próximas das vazões observadas, sendo classificada como uma calibração muito boa, porém nos meses em que ocorreram os maiores eventos de vazões o ajuste pode ser considerado razoavelmente satisfatório. Nota-se ainda que as vazões em nenhum momento ficaram acima dos picos máximos observados, o que pode implicar em características particulares dessa região sedimentar na produção de água.

A Figura 6 apresenta os hidrogramas das vazões observada e simulada para o período da calibração no posto Lapinha. Observou-se um Nash = 0,70 e $R^2 = 0,85$ (Tabela 5), que são considerados muito bons para a modelagem hidrológica, segundo Moriasi et al. (2007). Os resultados mostram que não houve uma discrepância nos valores do fluxo de base assim como nos picos de vazão, com exceção de alguns eventos em que SWAT superestimou os picos de vazão (Figura 6).

O comportamento gráfico das vazões, no geral, é considerado bom em que as vazões médias observadas e simuladas no período de calibração foram de 3,85 e 3,51 m^3/s , respectivamente, enquanto na fase de validação foram de 3,65 e 2,95 m^3/s , respectivamente. Os resultados para o posto Lapinha mostram que o SWAT subestimou as vazões médias, mas que, graficamente os resultados são muito bons.

Assim como nos demais postos já apresentados, a calibração do modelo SWAT foi realizada automaticamente utilizando dados de vazão mensais correspondentes ao posto fluviométrico Podimirim, cujas análises estatísticas (Nash e R^2) apresentaram resultados considerados bons, como podem ser conferidos na Tabela 6.

Figura 5. Modelagem hidrológica para o posto Icó, para o período entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

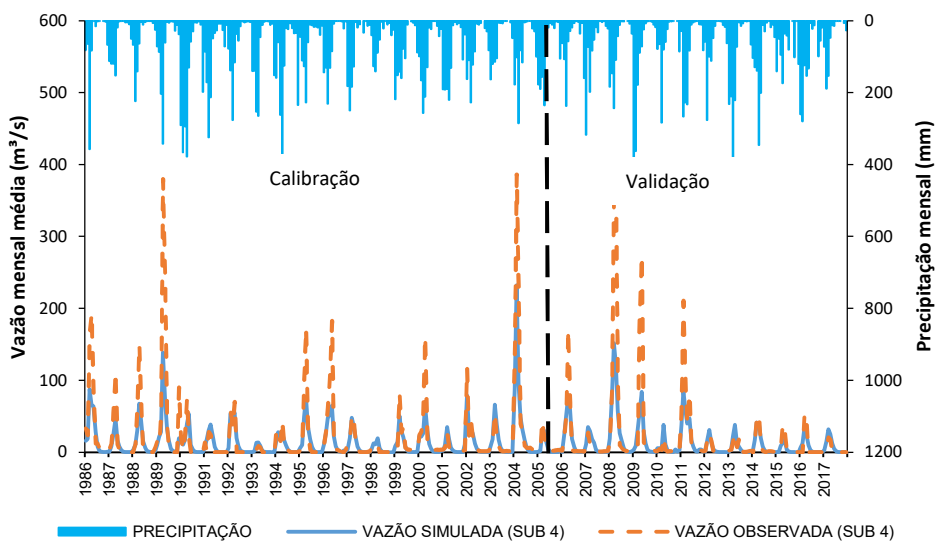


Figura 6. Modelagem hidrológica para o posto Lapinha entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

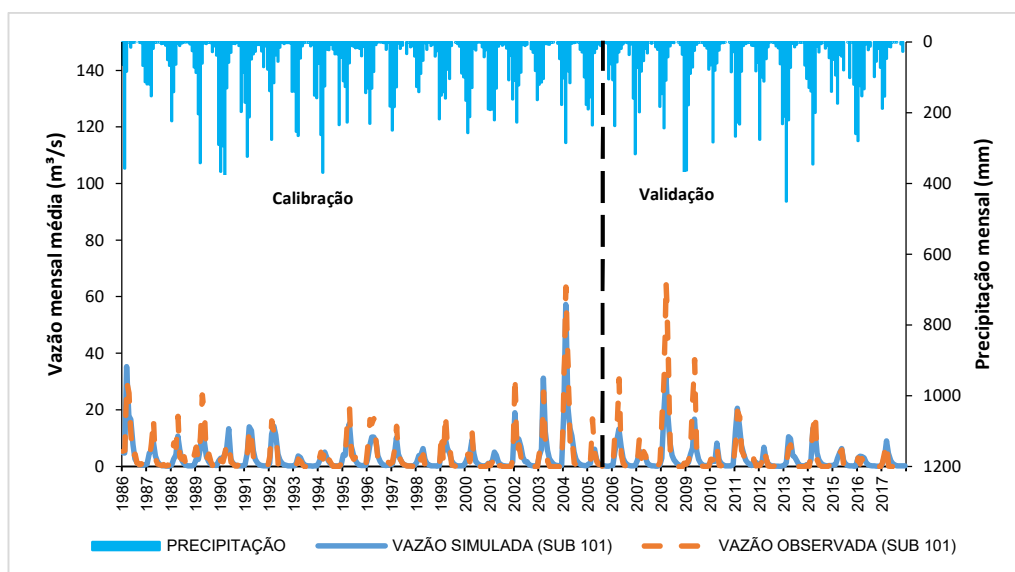


Tabela 5. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Lapinha.

Estatísticas	Calibração (1986–2005)	Validação (2006–2017)
R ²	0,85	0,82
Nash	0,84	0,68
Média simulada (m ³ /s)	3,51	2,95
Média observada (m ³ /s)	3,85	3,65

Tabela 6. Análise estatística das calibrações e validações para o posto Podimirim.

Estatísticas	Calibração (1986–2005)	Validação (2006–2017)
R ²	0,74	0,73
Nash	0,68	0,30
Média simulada (m ³ /s)	4,76	4,27
Média observada (m ³ /s)	2,91	1,78

A Figura 7 mostra a modelagem hidrológica para o posto Podimirim nos períodos de calibração (entre 1986-2005) e validação (entre 2006-2017). Nota-se que o modelo foi capaz de reproduzir de maneira adequada as vazões mensais, pois o SWAT apresentou uma boa correlação entre as vazões simuladas e observadas, evidenciando a adequada transferência de água da fase de bacia para a fase de canal. O modelo subestimou as vazões de picos em aproximadamente 12 eventos e superestimou em 5 eventos. Tal fato sugere que parte de água precipitada está sendo infiltrada no solo e usada para o escoamento subterrâneo. Assim, pode-se relacionar essas oscilações nas vazões a influência das características do Aquífero que possui uma área de recarga de 5.670 km² e pertence à Bacia Sedimentar do Araripe. Assim, os valores elevados nos gráficos indicam uma recessão, enquanto valores baixos expressam que a drenagem é mais lenta. Segundo Silva et al. (2013), tal fato é um fator importante, pois essa é uma zona produtora de águas proveniente do aquífero, é também nessa região onde se encontram muitas das nascentes de rios nessa região.

Análise do Espaço temporal do balanço hídrico de água no Solo

Dentre os fatores climáticos, a precipitação é a principal variável do balanço hídrico, pois ela controla a disponibilidade e/ou déficit de água na atmosfera e no solo. Os valores dessa variável meteorológica medida ao longo do período de avaliação estão presentes na Figura 8. Essa figura apresenta a distribuição temporal da precipitação na bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. Os resultados mostram que a bacia do Rio Salgado apresenta sua quadra chuvosa entre os meses de janeiro e abril, com valores máximos variando de entre 145 e 210 mm/mês, enquanto o período chuvoso, a precipitação não ultrapassa 55 mm/mês. Analisando esses valores, verifica-se que a ocorrência das chuvas foi irregular, como esperado.

Figura 7. Modelagem hidrológica para o posto Podimirim entre 1986–2005 (calibração) e 2006–2017 (validação).

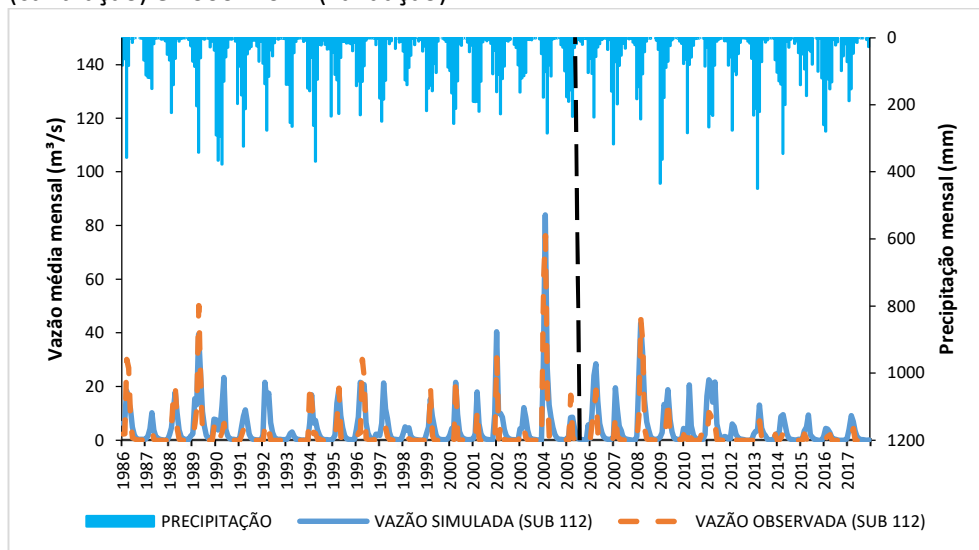
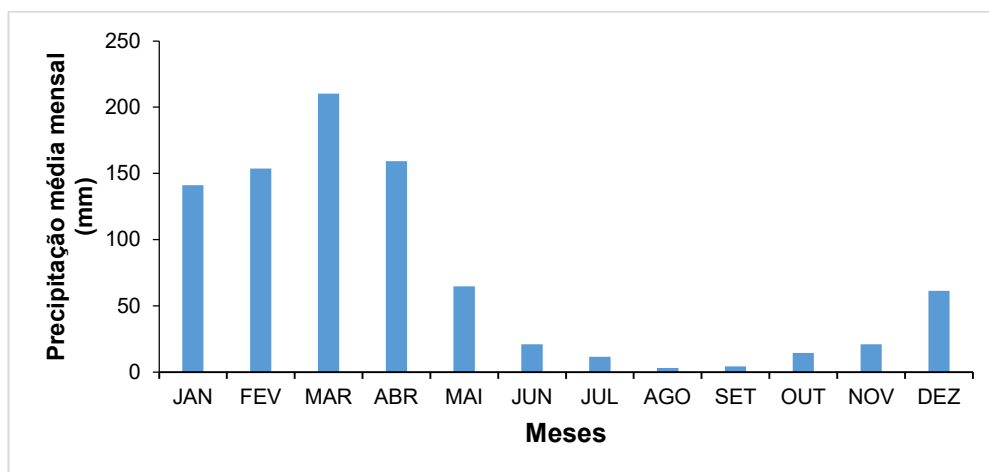


Figura 8. Distribuição temporal da precipitação entre 1986–2017 na área de estudo.



Os resultados dos componentes do balanço hídrico estimado pelo SWAT também foram sintetizados em base mensal (Tabela 7). Na bacia hidrográfica do Rio Salgado, observa-se uma pequena diferença na produção de água entre as áreas do cristalino e a sedimentar na bacia, com 50,18 mm e 50,70 mm, respectivamente, mesmo para uma bacia hidrográfica com as características do Rio Salgado, que possui solos rasos e pouco desenvolvidos e relevo fortemente acidentado que, normalmente, indicam um alto índice de escoamento superficial. Além disso, na bacia hidrográfica do Rio Salgado, as pedofomas desta bacia hidrográfica com predomínio de feições côncavo-côncavas favorecem o

escoamento subsuperficial e, por conseguinte, o predomínio do escoamento de base na vazão do curso d'água (GOMES et al., 2008).

Tabela 7. Valores estatísticos das variáveis hidrológicas do balanço hídrico

Variáveis hidrológicas	Área sedimentar na bacia				Área do cristalino na bacia			
	Mínimo	Máximo	Média	DP*	Mínimo	Máximo	Média	DP*
Precipitação	559,84	1050,47	878,46	135,57	559,84	1006,00	861,52	95,03
ET	444,95	857,13	637,99	96,88	444,95	711,45	571,98	58,34
Produção de água	11,16	136,85	50,70	21,70	15,86	136,85	50,18	20,90
Escoamento superficial	0,04	8,15	0,92	0,83	0,04	8,15	0,47	0,47
Percolação	1,67	30,45	16,97	6,04	2,57	30,45	21,21	5,28
Água no solo	16,80	319,03	178,44	72,48	16,80	316,90	67,55	50,00

* Desvio padrão.

As Figuras 9a–b mostram a espacialização das variáveis do balanço hídrico no solo estimado pelo modelo SWAT para cada sub-bacia do Rio do Salgado. A Figura 9a apresenta a distribuição espacial da precipitação anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017. Percebe-se que os maiores valores de precipitação ocorreram na porção oeste da bacia, com valores variando de 900 a 1000 mm/ano. A Figura 9b mostra a distribuição espacial da percolação mensal média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.

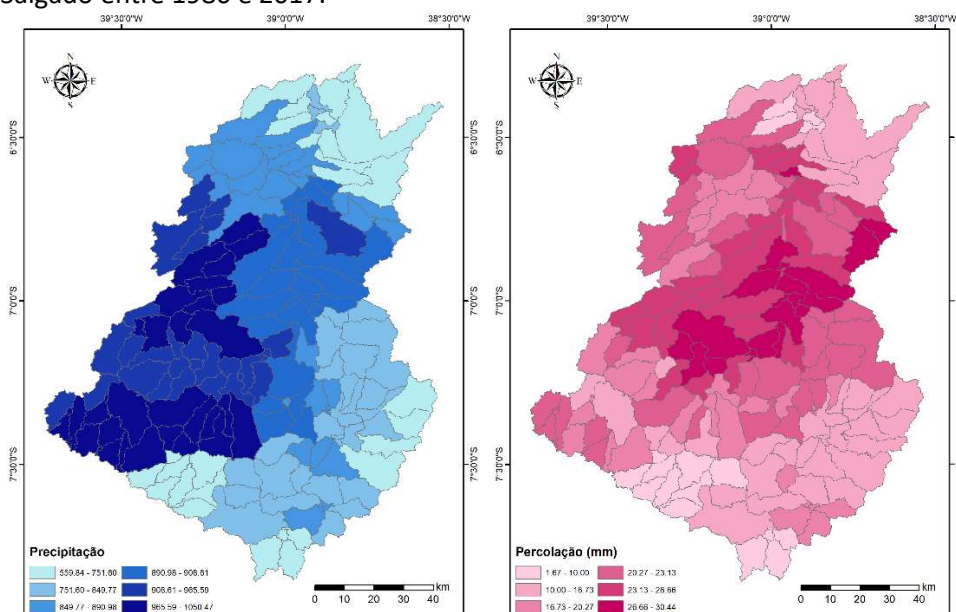
Notou-se que os menores valores ocorrem na porção sul da bacia, que se caracteriza pela presença do pacote sedimentar na bacia. De acordo com Linhares (2019), o contato da Formação Tacaratu com o embasamento cristalino subjacente é marcado por Falhas extensionais ou discordâncias angulares e erosionais, enquanto que com a Formação Inajá Sobrejacente mostra-se concordante e gradativo. Analisando-se as características litológicas, associadas com as estruturas internas deste pacote sedimentar, pode-se concluir que a formação Tacaratu representa um ciclo deposicional continental originado de um sistema fluvial entrelaçado, onde inicialmente predominou a fácies proximal com nítida influência de leques aluviais, evoluindo para uma fácies mediana a distal, com características de planície de inundação e retrabalhamento eólico.

Em termos litológicos, a formação Tacaratu é caracterizada por uma sequência predominantemente arenosa, onde se destacam arenitos grosseiros, arenitos conglomeráticos e níveis de conglomerados, com intercalações pelíticas subordinadas, muitas vezes a média, localmente fina, constituída essencialmente por grãos de quartzo, angulosos a subarredondados. Os níveis conglomeráticos, como também os pavimentos de seixos, bastante comuns nesta formação, são formados por clastos imaturos, sustentados pela matriz arenosa a areno-argilosa (CPRM, 2007).

A Figura 10a mostra a distribuição espacial da evapotranspiração anual média para cada sub-bacia do Rio Salgado no período estudado. Percebe-se uma maior heterogeneidade nos valores dessa variável, ou seja, não existe um padrão espacial, o que se deve ao fato da grande variabilidade espacial da evapotranspiração na

região. A distribuição geográfica da quantidade de água no solo média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado é mostrada na Figura 10b.

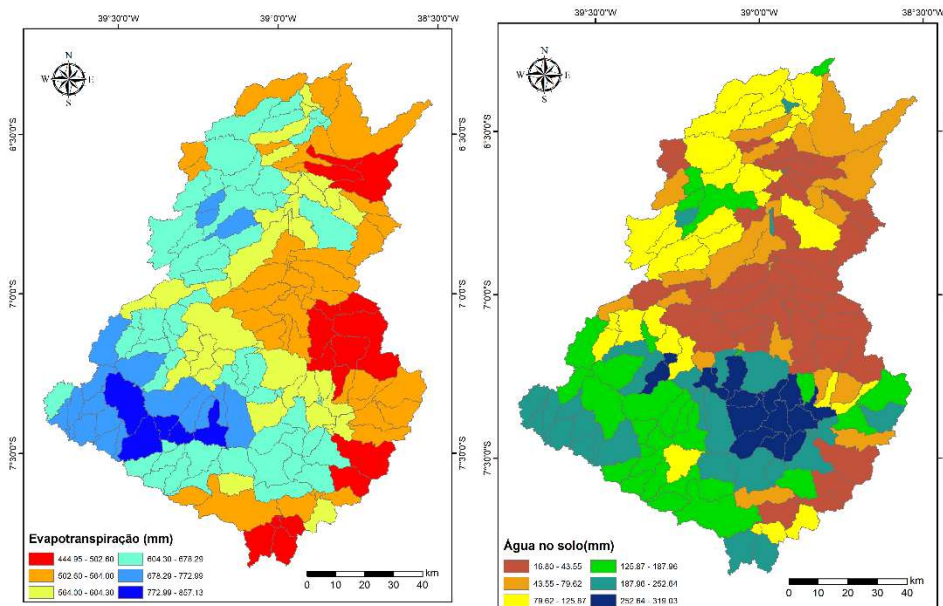
Figura 9. (a) Distribuição espacial da precipitação anual média para cada sub-bacia, e (b) distribuição espacial da percolação mensal média para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.



A combinação de elevadas taxas de evapotranspiração, solos rasos com pouca capacidade de armazenagem de água em aquíferos, e o caráter concentrado das precipitações anuais leva à caracteriza a condição de clima semiárido, onde predomina o bioma caatinga no país. Portanto, a diferença sazonal da quantidade de água que precipita e que evapotranspira, durante a maior parte do ano, e o excedente hídrico durante o curto período chuvoso são importantes características do clima semiárido no Nordeste brasileiro, que estão associadas a fenômenos como o El Niño/Oscilação Sul e o Dipolo do Atlântico (aquecimento/esfriamento do Atlântico Norte/Sul) (ALVES et al., 2006).

Assim, enfrentar os problemas advindos da estiagem no Nordeste tem sido colocado na perspectiva da variabilidade climática, e também pelo fato de secas, sejam nas escalas anuais ou decadais. Neste trabalho, os problemas históricos ligados às secas foram alinhadas dentro de uma perspectiva do problema de armazenamento de água. Pode-se chamar a atenção também que as secas trouxeram enormes problemas e pressões sociais, como por exemplo, os casos de saques tão comuns em décadas passadas.

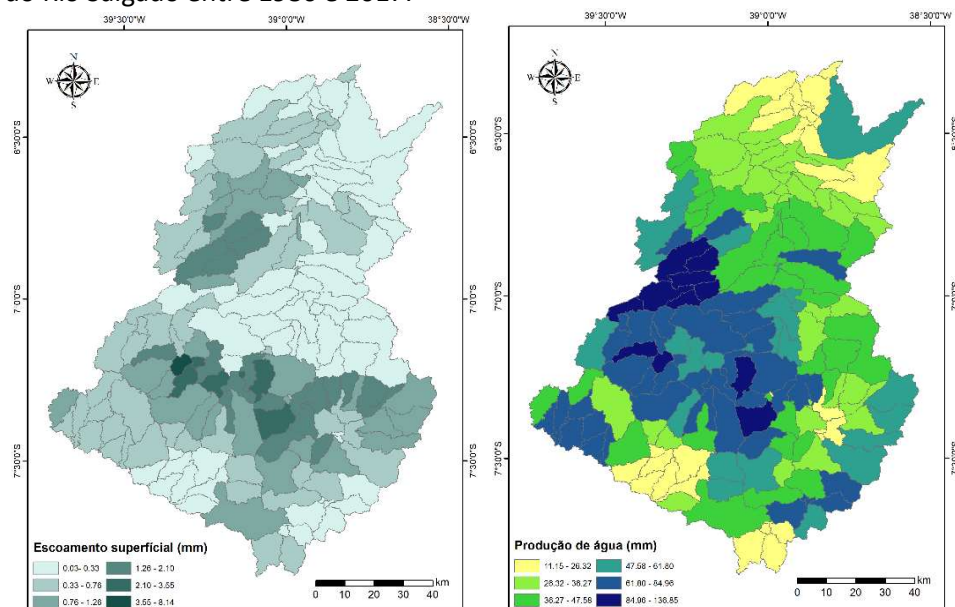
Figura 10. (a) Distribuição espacial da evapotranspiração potencial anual média para cada sub-bacia, e (b) distribuição espacial da quantidade de água no solo média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.



Como esperado, os maiores valores de água no solo ocorrem na porção da bacia com a presença de material sedimentar, enquanto na porção do embasamento cristalino há a ocorrência dos menores valores de água do solo. Essa característica também é notada pela quantidade de escoamento superficial (Figura 11a) e pela produção de água média anual (Figura 11b), ambas variáveis estimadas pelo SWAT, no qual se percebe que os maiores valores (entre 1 e 8 m³/s) ocorrem na porção sedimentar da bacia, onde os solos são mais espessos e há a presença de aquíferos.

Na maioria dos ecossistemas do semiárido brasileiro, o conteúdo de água no solo é resultado da diferença entre as entradas (chuva) e saída (evapotranspiração). De acordo com Ceballos et al. (2002), no caso de um solo com cobertura vegetal mínima, as taxas de evapotranspiração são controladas não só pela temperatura do ar e pela umidade, mas também pelas características físicas do solo, especialmente sua textura. No semiárido nordestino, a capacidade de infiltração é geralmente baixa, porque o solo é compactado (XXX). Uma das principais razões é a cobertura vegetal esparsa, típicas desses ambientes, que pode proteger apenas parcialmente a superfície do solo contra compactação devido à energia cinética das gotas da chuva. Nessas regiões, a infiltração de água e o escoamento são mais complexos, quando comparados a algumas áreas úmidas.

Figura 11. (a) Distribuição espacial do escoamento média mensal estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017, e (b) distribuição espacial da produção de água média anual estimada pelo SWAT para cada sub-bacia do Rio Salgado entre 1986 e 2017.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou ilhas “hidro-pedo-geológicas” no contexto da região semiárida do Nordeste do Brasil. Essas “ilhas” são caracterizadas pela presença de água mesmo e períodos secos, quando comparadas a outras áreas em uma mesma região climatológica. Essa diferença no comportamento de água no solo se deve ao fato da existência de condições hidrológicas, pedológicas e geológicas dessas ilhas, que fazem com que a água no solo seja constante ou, na maioria das vezes, em maior abundância do que em outras partes da bacia hidrográfica. Essa característica foi confirmada neste estudo baseada em visitas em campo e mediante análise hidrológica que constatou a diferença do conteúdo de água no solo.

Pode-se concluir com o estudo que o escoamento superficial estimado e a percolação da água nas porções sedimentares nas ilhas hidro-pedo-geológica foram maiores do que na porção cristalina, como comprovado na bacia Hidrográfica do Rio Salgado, no estado do Ceará.

A partir da utilização integrada de técnicas de modelagem hidrológica e Sistemas de Informações Geográficas foi possível identificar na bacia do Rio Salgado quais são as áreas mais susceptíveis à produção de água na bacia e uma diferenciação quantitativa no balanço hídrico nas duas zonas geológicas identificadas na bacia (sedimentar e do cristalino) e, assim, permitir o uso dessas informações pelos gestores de recursos hídricos da região. Essa conclusão foi atingida (comprovada) também nos trabalhos de campo, onde foi possível ter um panorama atual das

condições hidrológicas distintas em uma mesma zona climatologicamente homogênea.

No que concerne as recomendações futuras, após a realização deste estudo, pode-se destacar que uma modelagem hidrológica, levando-se em consideração a rede de reservatórios na bacia, deva ser estudada em novos estudos hidrológicos para quantificar o volume escoado e/ou retido nesses locais, com o intuito de auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos da região.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; JOHNSON, A.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, v. 3, n. 4, p. 1340-1352, 2004.

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 413-430, 2007.

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. B.; ASSIS, F. D. S. F.; SOUZA, E. B. D.; DURAN, B. J.; SERVAIN, J.; STUDART, T. M. C. Mecanismo atmosférico associado à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante Janeiro de 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 56-76, 2006.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modelling and assessment Part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

AYELE, G. T.; TESHALE, E. Z.; YU, B.; RUTHERFURD, I. D.; JEONG, J. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*, v. 9, n. 10, p. 782-795, 2017.

BRESSIANI, D. A.; SRINIVASAN, R.; JONES, C. A.; MENDIONDO, E. M. Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 8, 1–16, 2015.

BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; KOZUCH, M.; SANTOS, E. J.; PETRONILHO, L. A Zona Tectônica Teixeira Terra Nova - ZTTN – Fundamentos da Geologia Regional e Isotópica. *Geologia USP*, v. 5, n. 1, p. 57-80, 2005.

CARVALHO, F. H. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. Dissertação de Mestrado. Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014. 154p.

CEBALLOS, A.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J.; SANTOS, F.; ALONSO, P. Soil-water behaviour of sandy soils under semi-arid conditions in the Duero Basin (Spain). *Journal of Arid Environments*, v. 51, p. 501-519, 2002.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. *Estudos Avançados*, v.22, n.63, 2008.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do nordeste brasileiro: hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Jatobá: Sistema Aqüífero Tacaratu/Inajá – Meta B: Caracterização Geológica e Geométrica dos Aqüíferos. CPRM, 2007.

DA SILVA, Richarde Marques; SANTOS, Celso A. G.; BELTRÃO, JOYCE DE ARAÚJO ; DANTAS, J. C. Hydrological simulation in a tropical humid basin in the Cerrado biome using the SWAT model. *Hydrology Research*, v. 49, p. 908-923, 2018.

DANTAS, J. C.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. Drought impacts, social organization and public policies in northeastern Brazil: A case study of the Upper Paraíba River basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, p. 765-785, 2020.

DE MEDEIROS, I. C.; DA COSTA SILVA, J. F. C. B.; SILVA, R. M.; SANTOS, Celso A. G. Run-off-erosion modelling and water balance in the Epitácio Pessoa Dam river basin, Paraíba State in Brazil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 16, p. 3035-3048, 2019.

FONSECA, C. A. B.; AL-ANSARI, N.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; ZEROUALI, B.; Oliveira, D. B.; ELBELTAGI, A. Investigating Relationships between Runoff-Erosion Processes and Land Use and Land Cover Using Remote Sensing Multiple Gridded Datasets. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 11, p. 272, 2022.

FONTENELE, S. B. Modelagem matemática da dinâmica de fluxo riacho aquífero na microbacia hidrográfica do riacho São José, região do cariri cearense. 2010. 99p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2010.

FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C.; SANTIAGO, M. M. F. Water resources of Piauí and Ceará. In: Gaiser; Krol; Frischkorn; Araújo. (Org.). *Global change and regional impacts*. 1 ed. Berlin: Springer Verlag, v. 1, p. 87-94. 2003.

GOMES, N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg soil erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2483-2492, 2008.

GÜNTNER, A. Large-scale hydrological modeling in the semi-arid North-East of Brazil. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Geoecologia, Universidade de Potsdam, Alemanha, 2002.

LINHARES, F. M. As ilhas “hidro-pedo-geológicas” no contexto da região Semiárida do Nordeste Brasileiro. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

MONTENEGRO, S. M. G. L.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semiarid regions: A case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 434-435, 55-68, 2012.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service. Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2011. 647p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. J. Soil and water assessment tool: theoretical documentation – version 2005. Texas USA, 2005. 525p.

OLIVEIRA, N. M.; SILVA, R. M.; BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C. A. G.; VIANNA, P. C. G. Spatiotemporal patterns of agricultural and meteorological droughts using SPI and MODIS-based estimates over a Brazilian semiarid region: Study case of Upper Paraíba River basin. *Geocarto International*, v. 37, p. 1, 2022.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Orgs.). *Águas Doces no Brasil*, 3. ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2006, p. 111-144.

SILVA, A. M. Análise de múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do Rio Salgado, Semiárido Nordestino. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SILVA, A. M.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; LINHARES, F. M.; XAVIER, A.P.C. Modeling the effects of future climate and land use changes on streamflow in a headwater basin in the Brazilian Caatinga biome. *Geocarto International*, v. 37, p. 1, 2022.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; DOS SANTOS, J. Y. G. Evaluation and modeling of runoff and sediment yield for different land covers under simulated rain in a semiarid region of Brazil. *International Journal of Sediment Research*, v. 33, p. 117-125, 2018.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; LIMA SILVA, V. C.; SILVA, L. P. Erosivity, surface runoff, and soil erosion estimation using GIS-coupled runoff-erosion model in the

Mamuaba catchment, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 185, p. 8977-8990, 2013.

WORKU, T.; KHARE, D.; TRIPATHI, S.K. Modeling runoff–sediment response to land use/land cover changes using integrated GIS and SWAT model in the Beressa watershed. *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 16, p. 550-568, 2017.

YESUF, H. M.; ASSEN, M.; ALAMIREW, T.; MELESSE, A. M. Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia. *Catena*, v. 127, p. 191-205, 2015.

Contato com o autor: franklinlinhares.geo@gmail.com

Recebido em: 25/05/2022

Aprovado em: 25/30/2022