

Gestão do Rio Poxim-Açu: um modelo Swat para avaliação de cenários de irrigação

Management of the Poxim-Açu River: a Swat model for evaluating irrigation scenarios

Gestión del Río Poxim-Açu: un modelo Swat para la evaluación de escenarios de riego

Recebido: 29/08/2022 | Revisado: 05/09/2022 | Aceito: 06/09/2022 | Publicado: 15/09/2022

Carlos Alberto Prata de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9603-4082>

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Brasil

E-mail: carlos.prata@gmail.com

Antenor de Oliveira Aguiar Netto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3555-6776>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: antenor.ufs@gmail.com

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo principal aplicar o modelo SWAT à bacia hidrográfica do Rio Poxim-Açu, realizando uma avaliação da produção de água da mesma, tendo como objeto de estudo o enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza (São Cristóvão/SE). A problemática justifica-se pela crescente relevância do conhecimento do complexo hidrológico para a gestão de recursos naturais, devido a seu auxílio na tomada de decisão. O registro de medições de dados será posteriormente usado em 4 cenários de irrigação em duas áreas da bacia. Busca-se testar a aplicabilidade do modelo em estudos de balanço hidrológico em pequenas bacias e os efeitos das interações naturais e da ação humana, com o uso da irrigação, nas vazões e volumes produzidos. Através deste estudo conclui-se que: o modelo SWAT é aplicável na realização de simulações da produção de água e nos estudos do balanço hidrológico na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu; o desenvolvimento de procedimento validativo, a partir do acúmulo de água no enchimento de um reservatório, permitiu a avaliação de cenários de uso da irrigação; a realização de práticas de irrigação com o uso da água proveniente diretamente dos rios causaria reduções relevantes nos volumes produzidos e podem afetar o enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza em São Cristóvão-SE e o uso da água para irrigação, proveniente do aquífero raso, pode acarretar reduções das vazões do rio Poxim-açu.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; Gestão de recursos hídricos; Bacia hidrográfica.

Abstract

The present work has as main objective to apply the SWAT model to the Poxim-Açu River watershed, carrying out an assessment of its water production, having as object of study the filling of the Sindicalista Jaime Umbelino de Souza dam (São Cristóvão/SE). The problem is justified by the growing relevance of knowledge of the hydrological complex for the management of natural resources, due to its aid in decision making. Recording data measurements will later be used in 4 irrigation scenarios in two areas of the basin. It seeks to test the applicability of the model in studies of hydrological balance in small basins and the effects of natural interactions and human action, with the use of irrigation, on the flows and volumes produced. Through this study it can be concluded that: the SWAT model is applicable in the realization of simulations of water production and in the studies of the hydrological balance in the hydrographic basin of the Poxim-açu river; the development of a validating procedure, from the accumulation of water in the filling of a reservoir, allowed the evaluation of irrigation use scenarios; carrying out irrigation practices using water directly from the rivers would cause significant reductions in the volumes produced and could affect the filling of the Sindicalista Jaime Umbelino de Souza dam in São Cristóvão-SE and the use of water for irrigation, coming from the shallow aquifer, can lead to reductions in the flows of the Poxim-açu River.

Keywords: Hydrological modeling; Water resources management; Hydrographic basin.

Resumen

El presente trabajo tiene como principal objetivo aplicar el modelo SWAT a la cuenca del río Poxim-Açu, realizando una evaluación de la producción de agua de la misma, teniendo como objeto de estudio el relleno de la represa Sindicalista Jaime Umbelino de Souza (São Cristóvão /SE). El problema se justifica por la creciente relevancia del conocimiento del complejo hidrológico para la gestión de los recursos naturales, por su ayuda en la toma de decisiones. Las mediciones de datos de registro se utilizarán posteriormente en 4 escenarios de riego en dos áreas de la cuenca. Se busca probar la aplicabilidad del modelo en estudios de balance hidrológico en pequeñas cuencas y los efectos de las interacciones naturales y la acción humana, con el uso del riego, sobre los caudales y volúmenes producidos. A través de este estudio se puede concluir que: el modelo SWAT es aplicable en la realización de simulaciones de producción de agua y en los estudios del balance hidrológico en la cuenca hidrográfica del río Poxim-açu; el desarrollo de un procedimiento de validación, a partir de la acumulación de agua en el llenado de un embalse, permitió la evaluación de

escenarios de uso de riego; realizar prácticas de riego utilizando agua directamente de los ríos provocaría reducciones significativas en los volúmenes producidos y podría afectar el llenado de la represa Sindicalista Jaime Umbelino de Souza en São Cristóvão-SE y el uso de agua para riego, proveniente del acuífero somero, puede conducir a reducciones en los caudales del río Poxim-açú.

Palabras clave: Modelado hidrológico; Gestión de los recursos hídricos; Cuenca hidrográfica.

1. Introdução

A gestão dos recursos hídricos e o conhecimento dos mecanismos que gerem o funcionamento dos recursos naturais numa bacia hidrográfica inserem-se no contexto das novas práticas para com o meio ambiente, cuja realidade é antecedida por estudos que apontem e demonstrem as formas de apropriação e os níveis de suporte da relação homem-ambiente. Para a gestão deve-se ter, ao menos, o conhecimento do funcionamento dos recursos naturais, em uma área, na sua capacidade de produção e reprodução das quantidades com as qualidades desejadas, para os mais diversos usos (Aguiar Netto et al., 2008).

Segundo Moraes et al. (2003), a modelagem matemática entra nesse contexto como ferramenta utilizada no conhecimento mais aprofundado dos fenômenos físicos envolvidos e previsão de cenários, permitindo a percepção objetiva das inter-relações que formam o complexo hidrológico.

A modelagem hidrológica é uma ferramenta importante para o planejamento, manejo e gestão dos recursos hídricos. As simulações podem ser usadas para estimar a disponibilidade hídrica, previsão de vazão e a resposta hidrológica das bacias hidrográficas às mudanças no uso da terra (Cecílio et al., 2020).

Vários simuladores baseados em modelos que retratam processos físicos têm sido desenvolvidos, dentre eles o SWAT – “Soil and Water Assessment Tool” merece destaque, por sua fácil ligação a ferramentas de análise de sensibilidade, calibração e análise de incerteza (Van Griensven et al., 2012). Os resultados de Silva (2013) na modelagem da bacia do rio Poxim-açú, demonstrando que este modelo pode ser utilizado no planejamento e gestão de bacias hidrográficas, respaldam o seu uso.

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), foi desenvolvido para entender os processos do ciclo hidrológico, prever impactos e avaliar práticas de gestão de recursos hídricos, produção de sedimentos e agroquímicos em bacias hidrográficas, interpretação da variação de uso e ocupação do solo e práticas de gestão durante um longo período de tempo (Neitsch et al., 2005; Sales et al., 2022).

A bacia hidrográfica do rio Poxim-açú é responsável pelo abastecimento de mais de 20% da população urbana de Aracajú, capital do Estado de Sergipe. Entender o funcionamento do ciclo hidrológico desta bacia é de suma importância na busca por respostas para questões, tais como: "quais as consequências da utilização das águas de aquífero quando consideramos a alta condutividade hidráulica do embasamento geológico e dos solos das bacias hidrográficas na região litorânea de Sergipe?".

Estudos hidrológicos apoiam-se no conceito de bacia hidrográfica, que considerando a conformação do relevo contempla o conjunto das áreas sendo drenadas para um rio principal, fazendo convergir as chuvas para um exutório, o que permite a medição e registro de dados. As bacias hidrográficas podem contar com ampla variação de ecossistemas e comportamentos edafoclimáticos, influenciando processos culturais e econômicos regionais.

As bacias hidrográficas desempenham um papel fundamental no desenvolvimento territorial desde que a exploração dos recursos naturais seja equilibrada tanto pela população quanto na gestão dos órgãos competentes (Silva et al., 2020).

Este estudo aplica o modelo SWAT na estimativa da produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açú, realizando uma validação a partir do enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza em São Cristóvão- SE para, posteriormente, utilizar a técnica desenvolvida na avaliação de 4 cenários de irrigação em duas áreas da bacia.

2. Metodologia

Este trabalho, de acordo com Pereira et al. (2018), trata-se de uma pesquisa básica de abordagem quantitativa exploratória e em relação aos procedimentos técnicos é do tipo estudo de caso.

Caracterização da área de estudo

O local do estudo compreende a Bacia Hidrográfica do rio Poxim-açú, com latitudes sul, 10°47'48"/10°56'12", e longitudes oeste, 37°11'05"/37°24'19", numa área de 109 km². Seu relevo é de colina com cristas e topos arredondados, embora também hajam interflúvios tabulares (Sergipe, 2012). A quase homogeneidade das formas deve-se às características sedimentares das rochas, variando o nível de aprofundamento da drenagem (Aguiar Netto et al., 2007).

Na área compreendida pela sua captação, predominam solos: Neossolo quartzarênico litólico (7,59%), sob relevo forte ondulado nas serras residuais; Neossolo quartzarênicos (13,94%) e Argissolo vermelho amarelo (64,26%), nos tabuleiros costeiros e Gleissolo (14,21%), margeando o Poxim-açú (Sergipe, 2012).

O embasamento geológico pertence ao domínio da Bacia Sergipe-Alagoas e registra as diferentes fases de fragmentação, há registros sedimentares de sinéclises paleozóicas que cobriam extensas áreas do continente (Campos Neto, 2007).

Destro (1995), explicita que, além das falhas principais, ocorrem diversas falhas de alívio com direções NW-SE. Uma falha de alívio intercepta a bacia do rio em sua porção mediana, estendendo-se até as bacias vizinhas do Poxim-mirim ao norte e do Vaza-barris ao sul (Sergipe, 2012).

A área de estudo está localizada na unidade geoambiental denominada Tabuleiros Costeiros Sergipanos. O clima na bacia é tropical quente e úmido (As) com seca no verão (Sergipe, 2012; Leite et al., 2020). O período chuvoso compreende os meses de maio, com precipitações mais frequentes na região do exutório, a agosto, quando o são na região da nascente (Cruz, 2009). Os índices pluviométricos variam de 1.600 mm a 1.900 mm anuais e a temperatura de 23 °C (junho a agosto) a 31 °C (dezembro e fevereiro) (Silva et al., 2015).

A bacia do Poxim-açú está inserida no bioma Mata Atlântica, possuindo fragmentos de matas primárias (Sergipe, 2012). Em relação ao uso/ocupação do solo, tem: pecuária (50,15%), agricultura (6,6%), Floresta Estacional (37,01%), uso urbano (0,46%), Mata ciliar (2,71%), restinga (2,84%), espelho d'água (0,04%) e outros (0,19%) (Sergipe, 2012).

Obtenção dos dados

Os dados climáticos históricos diários de precipitação (mm), Temperatura Máxima (°C), Temperatura Mínima (°C), Radiação Solar (MJ m²), Umidade Relativa Média (%) e Velocidade média do Vento (m s⁻¹), de 1980 até 2012 foram obtidos na estação N° 83096 (INMET/Aracajú) e os dados diários de precipitação na estação N° 1037007 (ANA/Itaporanga d'Ajuda), formando assim, o conjunto das variáveis de entrada do modelo. Já dados de precipitação obtidos na rede estadual através da Secretaria de Meio Ambiente e dos recursos Hídricos do Estado de Sergipe e de uma estação experimental localizada no Instituto Federal de Sergipe (IFS) foram utilizados como referência na resolução de outliers.

Estes dados foram analisados quanto à incidência de falhas, selecionando-se assim aqueles entre 1991 e 2012, num total de 22 (vinte e dois) anos de dados diários. Os dados de chuva de 2012 da estação ANA/Itaporanga d'Ajuda apresentaram dois dias com picos elevados, um acima de 140 mm em fevereiro. e outro acima de 130 mm em maio. Simulações de vazão apresentaram resultados ruins devido a estes dias, possíveis outliers. Turco e Carleto (2017) citam estudos onde a má qualidade dos dados de entrada afetam as saídas do modelo SWAT. Assim, os referidos dias, foram substituídos juntamente com dois dias, precedentes e subsequentes, pela média das precipitações entre estações próximas e dados medidos diretamente na bacia.

A distribuição dos solos, do uso e ocupação das terras e da hidrografia foram obtidos na forma de arquivos vetoriais a partir de Sergipe (2012), o Modelo de Elevação do Terreno (MDE), a partir da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -

EMBRAPA, no encarte SC-24-Z-B do Portal “Brasil em Relevô”. Já os dados referentes aos atributos dos solos e dados das análises de solos foram utilizados dados obtidos por Silva (2013).

Modelagem e calibração

Após a obtenção e tratamento dos dados descritos, fora necessário o cadastro preliminar de dados tabulares no SWAT, no seu banco de dados, a exemplo do uso/ocupação das terras que implicou no cadastro de culturas, como Floresta Ciliar (FRSC) e Floresta Restinga (FRSR), utilizando-se valores default do SWAT da cultura Forest-Evergreen (FRSE) e dos tipos de solos: Argissolo, Neossolo Quartzarênico e o Gleissolo. A partir daí pôde-se iniciar o procedimento Delineador de Bacia Hidrográfica, em função do estabelecimento de pontos do tipo “inlet”, escolhidos sob tema de fundo o MDE e os encartes vetoriais da hidrografia e de uso e ocupação das terras.

Na definição de HRU’s (Unidades de Resposta Hidrológica) foram inseridas as camadas vetoriais de solos e usos/ocupação e as classes de declividade foram estabelecidas pela Embrapa (1979). Por fim, definiu-se faixas de corte: 5% para Uso/Ocupação sobre a área da sub-bacia, 10% para Classe de Solo sobre Uso/Ocupação e 5% para declividade sobre a Classe de solo.

A calibração foi manual, partindo-se da admissão de que as distribuições espaciais de eventos que correlacionam fluxo subterrâneo à manutenção das vazões do rio Poxim-açú devam ser consideradas, a exemplo da ocorrência de fraturas geológicas (Destro, 1995), da presença de zonas cársticas e do embasamento geológico (Sergipe, 2012).

Observando-se, estas ocorrências em ambiente SIG, concluiu-se que os parâmetros relativos aos solos (.sol) e às águas subterrâneas (gw) como sendo mais interessantes (O’Connell et al. 1970). Aplicou-se análise de sensibilidade, via Van Griensven (2006), no ranqueamento e confirmação daqueles parâmetros de interesse, fazendo uso de faixas de ajuste específicas para os mesmos em função dos tipos de solos, na calibração.

Validação a partir do enchimento da barragem

Conforme Rocha (2017), os dados mensurados para a bacia são muito precários, devido a isto, não havia disponibilidade de série de vazão para realização do procedimento de validação convencional. Por outro lado, havia na barragem um lance de régua linimétrica que serviu de base para uma série de registros fotográficos datados das alturas de enchimento.

A determinação da cota de enchimento, foi obtida a partir da intercessão com uma reta imaginária, localizada paralelamente à crista do talude, na altura da crista de vertimento, no vertedouro, na marca de 21,2 m no lance de régua (29 m - MDE), utilizando-se um clinômetro e apoio fotográfico nesta determinação.

Já a cota do fundo da barragem, observando-se que na base da torre de tomada d’água havia ocorrido escavações para construção de suas fundações, que após ser preenchida pelas águas do rio, no fechamento das comportas, incidiu em 6m, pelas régua, (14 m pelo MDE).

Com o uso do SIG ArcGIS® da ESRI, calculou-se os volumes acumulados na represa a vários níveis de enchimento, realizando-se também a quantificação da área da superfície do espelho d’água formado a cada nível (Tabela 1).

Tabela 1. Cálculos de enchimento da represa a partir do MDE.

Registro Fotográfico		Correlações MDE		
Data	Cota Régua (m)	Cota (m)	Volume (Hm ³)	Espelho d'água (Hm ²)
23/05/2013	6,21	14,00	0,009	0,016
06/06/2013	7,78	15,57	0,227	0,416
13/06/2013	10,68	18,47	2,472	1,068
02/08/2013	18,40	25,62	21,173	4,057
19/09/2013	20,38	26,19	29,821	4,716
02/10/2013	20,45	28,17	30,151	4,741
15/10/2013	21,31	29,10	34,353	5,069

Fonte: Dados da própria pesquisa.

Duas equações-chave, que relacionaram o volume (V) à cota (h) do enchimento (Equação 1 com R² = 0,99) e o volume (V) à área (A) do espelho d'água formado (Equação 2 com R² = 0,99), foram obtidas. A equação 1 corrige a faixa da cota do MDE (14 a 29,1 m), resultando em valores na faixa do lance de régua, a fim de facilitar a aplicação das avaliações.

$$h = -0,000007V^4 + 0,001V^3 - 0,0462V^2 + 1,154V + 6,2 \quad (1)$$

$$A = 9,76^{-31}V^5 - 1^{-22}V^4 + 4^{-15}V^3 - 7^{-8}V^2 + 0,5599V + 154852 \quad (2)$$

onde: h é a cota no lance de régua (m), utilizar V em Km³; A é a área da superfície do espelho d'água formado (m²), utilizar V em m³ e V é o volume de enchimento do lago;

Estimaram-se os volumes de evaporação a partir do espelho d'água e de infiltração no fundo da barragem, com cálculos de tais perdas por m² pela área da superfície do espelho d'água formada a cada cota de enchimento, a evaporação (EV) obtida por Morton et al. (1985), via software WREVAP e a infiltração via velocidades de infiltração (VI) (Equação 3).

$$VI = (30t^{0,305}) \times 24 \times \frac{A}{1000} \quad (3)$$

onde: t é o tempo de inundação em horas; A é a área da superfície do espelho d'água formado em m² e VI é o volume infiltrado no dia, pelo fundo da barragem em m³.

A produção de água foi calculada a partir do balanço apresentado na Equação 4, onde é feito sucessivamente, até que se complete o total enchimento do reservatório.

$$\text{Água produzida} = [\text{Acumulada} - (\text{VE} + \text{EV} + \text{VI})] \quad (4)$$

onde: VE é a vazão ecológica, onde foi considerada como 0,2 m³ s⁻¹.

Obteve-se assim a produção de água do rio Poxim-açú entre 23/05/13 e 15/10/13 (enchimento da represa), subsidiando o procedimento de validação, comparando datas entre as do registro fotográfico e as das saídas modeladas, e cotas entre as de enchimento real e as obtidas pelo modelo, a cada acumulo das vazões preditivas subtraídas das perdas estimadas.

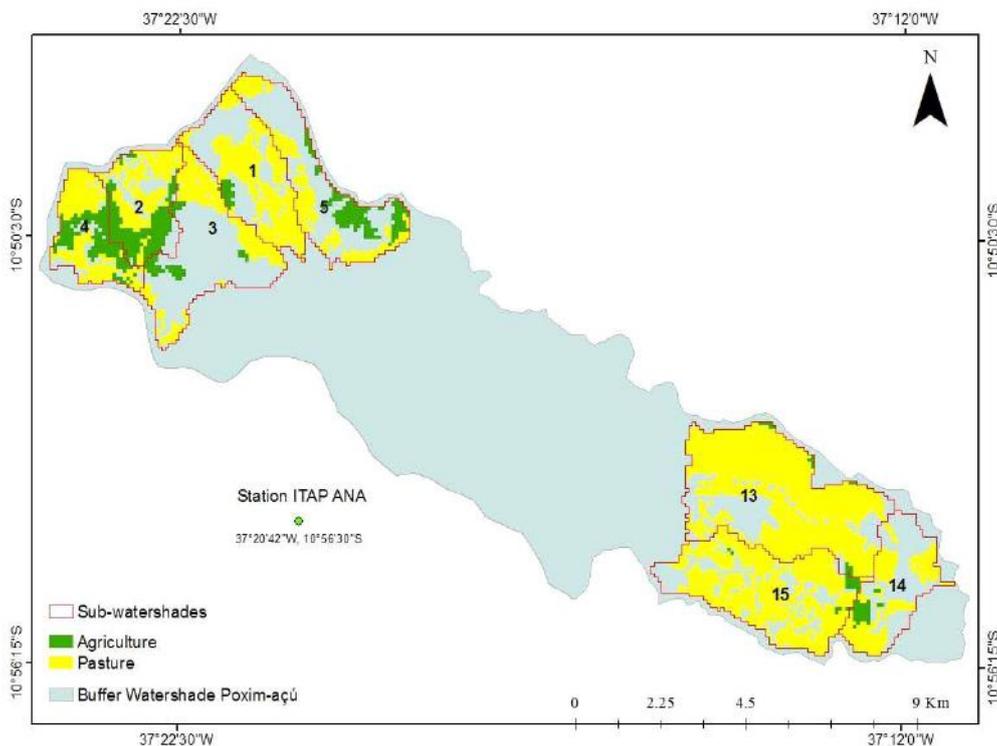
Cenários de gestão de irrigação

Foram confeccionados 4 cenários de irrigação, sendo 2 (dois) para a região que contempla as nascentes do rio Poxim-açú e 2 (dois) contemplando a região do entorno da barragem (exutório). Assim, na nascente contou-se com um cenário de irrigação utilizando a água exclusivamente retirada do aquífero raso e o outro, exclusivamente do rio. Do mesmo modo para a região do Exutório.

Neste estudo se considerou tanto o uso para agricultura como o uso para pastagem conjuntamente como uso produtivo rural para o tratamento da irrigação.

No modelo SWAT, selecionou-se a opção de manejo AutoIrrigação em função da retenção da água no solo, com ativação a cada perda de 10 mm aplicar uma lâmina de 13 mm e a eficiência do método de aplicação ajustado para 0,7. A bacia hidrográfica do rio Poxim-açú foi subdividida em 15 sub-bacias. As sub-bacias 1, 2, 3, 4 e 5 foram selecionadas como representativas da região da nascente, enquanto as sub-bacias 13, 14 e 15 da região do exutório como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1. Áreas da nascente e exutório avaliadas na bacia do Poxim-Açú.



Fonte: Sergipe (2012).

Qualificação da modelagem hidrológica

Da estação fluviopluiométrica do Instituto Federal de Sergipe (constituída por sensor de nível (WL400) e datalogger (GW500), Global Water, um pluviômetro modelo SP-3, JCTM, placa solar e componentes para alimentação de energia) foram obtidos os dados das alturas diárias do rio, que com o uso da curva-chave proposta por Silva (2011) para essa estação, pode-se obter as estimativas de vazão diária necessárias à calibração desejada do modelo.

Na avaliação da qualidade de modelos de vazão, o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), a Tendência Percentual (PBIAS) e a Razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR), são os mais recomendados (Moriassi et al., 2007). As faixas utilizadas para a classificação das avaliações realizadas estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Quantificação da qualidade de simulações hidrológicas.

Avaliação	RSR	NSE	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS > \pm 25$

Fonte: (Moriassi et al., 2007).

3. Resultados e Discussão

Estudo das chuvas no entorno da bacia do Poxim-açú

Em relação às chuvas, a partir do ordenamento dos resultados das médias, variâncias e desvios padrão anuais, num intervalo de 24 anos (1988-2012) de dados diários da estação do INMET/Aracaju, o ano de 2012 foi o terceiro pior ano em relação às chuvas e com um dos menores desvios padrão e variância. Do mesmo modo, as precipitações da estação da ANA, na Fazenda Belém em Itaporanga D´Ajuda, também registraram queda superior a 30%. Apesar do ano de 2012 apresentar-se atípico quanto à ocorrência das chuvas, era o que se dispunha de dados de vazão passíveis de serem utilizados na calibração do modelo SWAT.

Tais fatos parecem não ter gerado problema, uma vez que no ano posterior, 2013, as precipitações registradas em Itaporanga já excediam a média anual na primeira quinzena de outubro e ainda assim as vazões produzidas pelo modelo foram muito realísticas.

Em relação aos aspectos humanos confirmou-se, a partir de visitas de campo, que a bacia se encontra povoada em duas porções representativas: a primeira delas é o entorno do exutório, onde a estrutura fundiária predominante é de pequenas propriedades e a segunda na região das nascentes, predominam sítios e ocorre uso de irrigação e agrotóxicos. Já na porção central da bacia é pouco habitada, sendo a agropecuária predominante, ocorrendo cultivo tecnificado de cana-de-açúcar à margem esquerda do rio.

Calibração de um modelo SWAT para o Poxim-Açú

A separação gráfica, simplificada, do fluxo de base do escoamento superficial apresentou uma relação próxima à 0,2, entre aquele existente e a produção de água na bacia do Poxim-açú. Esta primeira análise não contribuiu, deste modo, sobre se o modelo deveria representar fortemente a participação da água subsuperficial nos volumes de vazão do rio. Por outro lado, Costa e Bacellar (2010), apontam que além de permitir estimar indiretamente a difusividade e a transmissividade, o conhecimento do fluxo de base permite estimar a reserva renovável de um aquífero.

Silva (2013) nos experimentos de infiltração, utilizando-se de infiltrômetro de duplo anel, concluiu que os solos Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho Amarelo (90% da área total) apresentavam velocidade de infiltração superiores a 3 cm h^{-1} .

A bacia do Poxim-açú apresenta uma fratura extensional na sua porção central. Em Sergipe (2012), é constatado que na região do divisor d´água da bacia hidrográfica do Poxim-açú com o Vaza-Barris, na interseção desta fratura, consta a nascente do riacho Pé da Serra.

Assim, entende-se que a interação destes elementos: solos, com características de infiltração predominantemente muito elevadas, embasamento geológico arenítico-sedimentar caracterizado por alta porosidade e condutividade hidráulica, além da existência de fratura geológica e de regiões cársticas (Sergipe, 2012), podem estar promovendo afluência das suas águas subterrâneas para bacias vizinhas.

Estas considerações permitiram estabelecer os valores e os parâmetros de calibração apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros considerados no procedimento final de calibração.

Processo	Parâmetro	Limite		Valor ajuste
		Inferior	Superior	
Evapotranspiração	(hru) Canmx*	0	10	2 (Todos os solos)
Escoamento superficial	(mgt) Cn2*	35	92	40,28 (Neossolos)
				50,73 (demais)
Água no Solo	(sol) Sol_Z	0	3000	-25,55% (Neossolo Q)
				- 45% (Demais Solos)
				+95 (Neossolo Q)
				+43,39 (Demais Solos)
Água subterrânea	Sol_K	0	100	+61,3% (Neossolos)
				+95,8% (Argissolos)
				+86,5% (Gleissolos)
				+3,95% (em todos Solos)
Água subterrânea	(gw) Rchrg_Dp*	0	1	0,6 (Neossolos)
				0,3 (Argissolos)
				0,25 (Gleissolos)
	Alpha_BF*	0	1	0.026 (para todos)

* Ajustados por substituição integral de valores. Fonte: Dados da própria pesquisa.

Em relação à análise de sensibilidade, sem uso de função-objetivo, dos parâmetros selecionados para calibração, somente Sol_Z, Sol_Awc, Cn2 e Alpha_BF foram coincidentes com as pressuposições de relevância, enquanto Sol_K foi identificado somente no procedimento com ativação da função-objetivo.

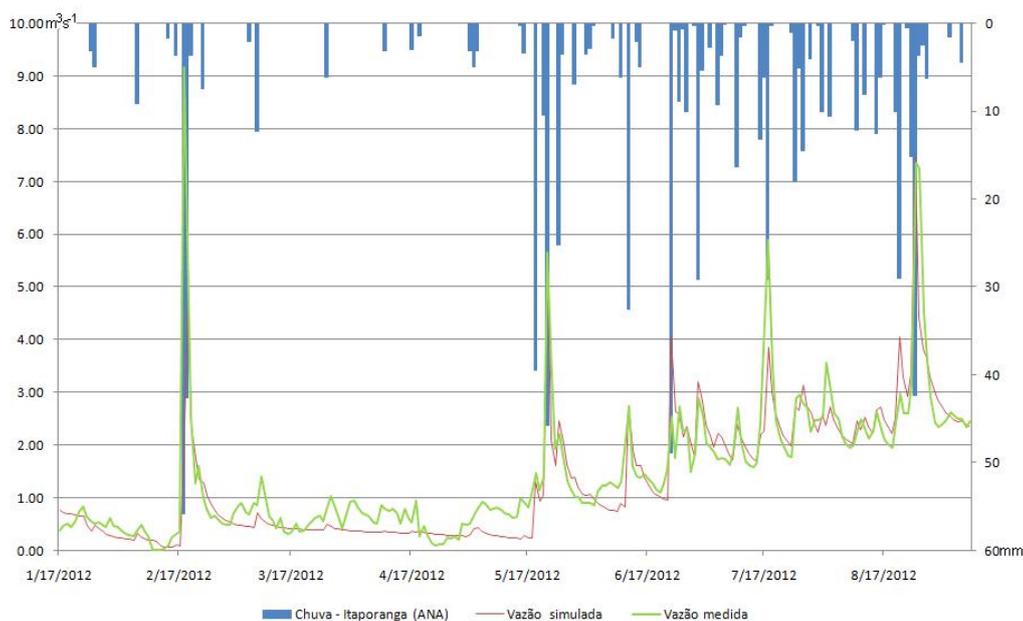
Por outro lado, Rchrg_Dp não constou das relações resultantes das análises de sensibilidade, sendo um parâmetro advindo do encarte Geológico que, conforme Alves et al. (2006) é o ponto de partida para a compreensão da qualidade e quantidade das águas subterrâneas que contribuem com o fluxo de base.

O primeiro ajustado foi o CANMX, regulando-se a evapotranspiração, em seguida, a profundidade do solo (Sol_Z) que apresentou grande sensibilidade, depois a taxa de infiltração (Sol_K) foi aumentada para representar maior permeabilidade dos solos, ajustou-se a transmissão de água para aquíferos profundos (Rchrg_Dp), para contemplar perdas por afluência, reduzindo-se a liberação das águas profundas para o fluxo base (Alpha_BF).

Assim, ajustou-se a recessão e, finalmente, o escoamento superficial foi regularizado, diminuindo-se a curva número (Cn2), levando-se em conta a suavidade do relevo e permeabilidade dos solos.

O resultado obtido aponta a necessidade de pesquisas aprofundadas, visto que a relação entre o escoamento superficial e o escoamento sub superficial foi de 0,02 e o balanço hídrico resultou numa ETR - Evapotranspiração Real na faixa de 600 mm. Graficamente vê-se ajuste satisfatório das saídas do modelo, como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2. Ajuste gráfico da calibração com base na hipótese de afluência.



Fonte: Dados da própria pesquisa.

Por outro lado, a calibração apresentou suficiência estatística, conforme Tabela 4 e não esquecendo que temas como separação do escoamento de base (Nash & Sutcliffe, 1970) e evapotranspiração real (Mandeville et al. 1970) são no mínimo polêmicos.

Tabela 4. Avaliações estatísticas da calibração final do estudo.

Estatística Básica dos dados de Vazão			Estatística de avaliação do modelo		
Descrição	Observados	Simulados	Estatística	Valor	Desempenho
Total ($m^3s^{-1} \text{dur}^{-1}$)	343,50	323,70	NSE	0,82	Muito Bom
Média (m^3s^{-1})	1,46	1,37	PBIAS	-5,78	Muito Bom
Desv. Pad. (m^3s^{-1})	1,28	1,21	RSR	0,42	Muito Bom

Fonte: Dados da própria pesquisa.

Observa-se uma diferença aproximada na produção de água de 5% a menos no montante simulado. Tal diferença é refletida pelo PBIAS, cujo valor de melhor ajuste é 0 (zero). Valores negativos indicam subestimação e positivos superestimação das simulações. Quanto ao desvio padrão, os dados simulados obtiveram um valor mais baixo indicando que o modelo suaviza a variação das vazões.

Abordagem para validação do modelo

A simulação do enchimento da represa atingiu resultados de elevada adequação para a produção de água que, conforme anúncios oficiais sobre o volume armazenado no reservatório é acima de 32 milhões de m^3 .

O volume final simulado foi de 32,5 milhões de m^3 , diferença pequena, já que no dia 15/10/2013 ocorria um vertimento de lâmina aproximada de 10 cm acima da cota do vertedouro, o que corroborava com a simulação ligeiramente maior. Observou-se uma grande aderência dos resultados simulados em relação tanto aos valores de cotas observados, registrados fotograficamente, quanto aos volumes estimados.

Avaliando-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o RSR e o PBIAS para estes dados, obteve-se como classificação resultados muito bons, tanto na avaliação relativa aos volumes de enchimento quanto relativa às cotas. Apesar da curta série de dados de enchimento registrados (5 momentos), houve correlação/corroboração pelo bom ajuste gráfico.

Avaliação dos cenários de irrigação

Nas áreas em uso produtivo rural, destaca-se que a agricultura representou 3,36% da área na região do exutório e 39,3% na região da nascente e outras totalizações importantes podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5. Cálculos de áreas/percentuais em uso em relação à área total da bacia

Nascente (3.061,4 ha, 55,5% em uso produtivo rural)			Exutório (2.772,4 ha, 70,6% em uso produtivo rural)		
Sub-bacia	Usos (ha)	% Bacia	Sub-bacia	Usos (ha)	% Bacia
1	373,9	3,43	13	1.024,1	9,40
2	356,9	3,27	14	250,7	2,30
3	283,0	2,59	15	684,1	6,28
4	356,1	3,27			
5	328,9	3,02			
Totais	1.698,9	15,60	Totais	1958,9	18,00

Fonte: Dados da própria pesquisa.

Observe-se que a abordagem de unificação dos usos, aliada às restrições impostas à irrigação (com gatilho no teor de umidade do solo) e boa proximidade entre os tamanhos das áreas nos cenários para o alto e para o baixo da bacia, permitem isolar, em parte, as diferenças entre as regiões de captação, centrando as comparações nas produções de água.

Ao serem calculadas as produções de água e estatísticas de avaliação para o período do enchimento da barragem, em função dos diferentes cenários, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Estatísticas para avaliação dos cenários de irrigação.

Cenário	Volume Milhões m ³	Data_Ench	Cota (m)	PBIAS	RSR
SEM_IRR	32,5	15/10/2013*	21,3	0,43	0,018
IRR_Exutório_RCH	30,9		20,9	-0,83	0,020
IRR_Exutório_AQF	32,1	15/10/2013**	21,2	0,10	0,017
IRR_Nascente_RCH	31,0		20,97	-0,77	0,020
IRR_Nascente_AQF	31,9	15/10/2013**	21,17	-0,01	0,018

(Onde: RCH - captação na calha do rio e AQF - no aquífero raso; IRR - Irrigação; * - 0.3 milhões m³ excesso; ** - praticamente cheio). Fonte: Dados da própria pesquisa.

Pode-se constatar pelos coeficientes RSR, PBIAS, Cota de enchimento e Volume acumulado, que os cenários de irrigação com captação proveniente diretamente do rio apresentaram reduções da produção de água equivalentes, da ordem de 1,5 milhões de m³ a menos no período avaliado, acarretando um impacto negativo de quase 5% à mesma.

Os mesmos coeficientes podem demonstrar ainda que não houveram diferenças significativas quanto à localização de uma área, ou seja, se no baixo ou no alto da bacia do Poxim-açú. Demonstram ainda que captar água no aquífero raso também apresenta um limiar crítico na redução da produção de água do rio, muito próximo.

Pela observação da Figura 3, o gráfico da esquerda representa o pior cenário para produção de água, que é o de captação direta no rio sendo realizado nas áreas em produção no entorno do exutório, enquanto o da direita é resultado da produção de água no modelo de prova, calibrado e sem uso da irrigação em toda a bacia do Poxim-açú.

Figura 3. Variação do nível da barragem a partir dos cenários IRR_XX_RCH e SEM_IRR.



Fonte: Dados da própria pesquisa.

Em relação aos cenários idealizados nesta pesquisa, não se estabeleceram evidências de qualquer conflito entre as necessidades de uso da água na bacia e a necessidade do uso dessa mesma água para abastecimento de Aracajú, até os limites estabelecidos.

Contudo, outra questão a ser levantada é como os usos da água são pautados, também, por disputas políticas, como por exemplo num advento de conflito social acerca dos usos da água entre produtores agropecuários e Companhia de Saneamento e Distribuição de água de Sergipe (DESO), na região da bacia do rio Poxim-açú. Nesse sentido, há uma necessidade constante e também uma função social exercida ao avaliar a qualidade da água e sua situação de vulnerabilidade frente às atividades antrópicas, visando a importância da gestão dos recursos hídricos no que se refere ao seu gerenciamento, uso e conservação (Santi et al., 2012).

A questão central que deve reger a gestão é a integração dos vários aspectos que interferem no uso dos recursos hídricos e na sua proteção ambiental. (Porto & Porto, 2008). Destaca-se a relevância de ferramentas que permitam conhecer mais profundamente o funcionamento do ciclo hidrológico, que abarquem contextos das bacias hidrográficas litorâneas, fornecendo acesso a informações que auxiliem na tomada de decisão, a partir de cada cenário e ainda, do monitoramento contínuo do comportamento hidrológico em áreas experimentais visando o entendimento do fenômeno hidrológico, conforme Santos (2009).

Dessa forma, dados sobre a água, melhor uso dos mesmos e transparência, advinda da facilidade de acesso a eles são dilemas a serem resolvidos para a sociedade e a ciência na contemporaneidade.

4. Conclusão

O modelo SWAT é aplicável na realização de simulações da produção de água e nos estudos do balanço hidrológico na bacia hidrográfica do rio Poxim-açú.

O desenvolvimento de procedimento validativo, a partir do acúmulo de água no enchimento de um reservatório, permitiu a avaliação de cenários de uso da irrigação na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

A realização de práticas de irrigação com o uso da água proveniente diretamente dos rios causaria reduções relevantes nos volumes produzidos e podem afetar o enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza em São Cristovão-SE.

O uso da água para irrigação, proveniente do aquífero raso, pode acarretar reduções das vazões do rio Poxim-açu.

Recomenda-se estudos posteriores com diferentes cenários do uso da irrigação no decorrer do tempo para servir de subsídio na tomada de decisão sobre a discussão do uso da água no local de estudo.

Referências

- Aguiar Netto, A. O. Gomes, C. C. S., Lins, C. C. V., Barros, A. C., Campeche, L. F. S. M., & Blanco, F. F. (2007). Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro Irrigado Califórnia, SE, Brasil. *Ciência Rural*, 37(6), 1640-1645. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000600021>
- Aguiar Netto, A. O., Santos, D., & Moreira, F. D. (2008). Caminhos da Gestão de recursos hídricos: O caso da sub-bacia hidrográfica do Riacho Jacaré, Baixo São Francisco Sergipano. *Irriga*, 13(1), 12-25. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n1p12-25>
- Alves, J. P. H., Garcia, C. A. B., Aguiar Netto, A. O., & Ferreira, R. A. (Eds.). (2006). *Diagnóstico e avaliação da sub-bacia Hidrográfica do rio Poxim*. Relatório de Pesquisa. Sergipe: EDUFS/FAPESE, 245p.
- Campos Neto, O. P. A., Lima, W. S., & Cruz, F. E. G. (2007). Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências Petrobras*, 15(2), 405-415
- Cecílio, R. A., Campanharo, W. A., Zanetti, S. S., Lehr, A. T., & Lopes, A. C. (2020). Modelagem hidrológica de bacias hidrográficas tropicais sob baixa disponibilidade de dados. *Research, Society and Development*, 9(5), e100953262. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3262>
- Costa, F. M., & Bacellar, L. A. P. (2010). Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 15(3), 173-183. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v15n3.p173-183>
- Cruz, M. A. S. (2009). *Regionalização de precipitações médias e prováveis mensais e anuais no estado de Sergipe*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, 26p.
- Destro, N. (1995). Release fault: a variety of cross fault in linked extensional fault systems, in the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 17(5), 615-629. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(94\)00088-h](https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)00088-h)
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1979). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa, 83p.
- Leite, I. V., Almeida, A. Q., Loureiro, D. C., Souza, R. M. S., Gonzaga, M. I. S., Pereira, D. R., & Santos, A. A. (2020). Avaliação de métodos de interpolação em dados de batimetria na barragem do rio Poxim-Açu – SE. *Research, Society and Development*, 9(9), e690997755. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7755>
- Mandeville, A. N., O'Connell, P. E., Sutcliffe, J. V., & Nash, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 3 - The Ray catchment at Grendon Underwood. *Journal of Hydrology*, 11(2), 109-128. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90098-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90098-3)
- Moraes, J. M., Schuler, A. E., Manuel, E. G., Guandique, L. C., Milde, J. D., Groppo, L. A., Martinelli, R., & Victoria, L. (2003). Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8(1), 61-70. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n1.p61-70>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Morton, F. I., Ricard, F., & Fogarasi, F. (1985). *Operational estimates of areal evapotranspiration and lake evaporation - Program WREVP*. National Hydrologic Research Institute, Paper N° 24, Ottawa.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2005*. (2005). Temple: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 494p. <https://swat.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>
- O'Connell, P. E., Nash, J. E., & Farrell, J. P. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 2 - The Brosna catchment at Ferbane. *Journal of Hydrology*, 10(4), 317-329. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90221-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90221-0)
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria: UAB/NTE/UFSM. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_MetodologiaPesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1
- Porto, M. F. A., & Porto, R. L. (2008). Gestão de bacias hidrográficas. *Revista Estudos Avançados*, 22(63), 43-60. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004>
- Rocha, M. R., Espinola Júnior, J., Nunes, F. W. G., Nascimento, J. H. M., & Santos, I. N. (2017). Hydrological Modeling applied with the IPH2 Model in the

River Poxim Açú Rio Sub-Basin, Brazil. *Ecosystems and Sustainable Development XI*. 214, 115-120. <https://doi.org/10.2495/eco170121>

Sales, J. M. J., Aguiar Netto, A. O., & Carvalho, C. M. (2022). Hydrological modeling of hydrographic basin in the northeast semiarid region of Brazil. *Research, Society and Development*, 11(3), e48711326735. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26735>

Santi, G. M., Furtado, C. M., Menezes, R. S., & Keppeler, E. C. (2012). Variabilidade espacial de parâmetros e indicadores de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, Rio Branco, Acre, Brasil. *Revista Ecologia Aplicada*. 11(1), 23-31. <https://doi.org/10.21704/rea.v11i1-2.422>

Santos, L. L. (2009). Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2(3), 1-19. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v2i3.232624>

Sergipe - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. (2012). *Atlas digital sobre recursos hídricos de Sergipe*. Aracaju:SRH, 2012.

Silva, A. S., Anjos, M. M. S., Gomes, A. W. A., Bezerra, A. C., & Guimarães, M. J. M. (2020). Modelagem automática e cálculo da precipitação média da Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú. *Research, Society and Development*, 9(10), e4919108867. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8867>

Silva, M. G. (2013). Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu/SE e suas relações antrópicas. Tese de Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente. São Cristóvão: UFS, 224p.

Silva, M. G., Oliveira, J. A., Aguiar Netto, A. O., Vasco, A. N., & Quintiliano, D. S. (2011). Determinação da curva-chave no rio Poxim-Açu, para auxílio na gestão dos recursos hídricos. *Anais...* In: Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação Tecnológica, 6, Natal: IFRN, 2011.

Silva, W. L., Dereczynski, C. P., Chang, M., Freitas, M., Machado, B. J., Tristão, L., & Ruggeri, J. (2015). Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(2), 181-194. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130622>

Turco, J. E. P., & Carleto N. (2017). Integridade de dados meteorológicos para uso em modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 11(8), 2084-2097. <https://doi.org/10.7127/rbai.v11n800668>

Van Griensven, A., Mewixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., & Sirinivasan, R. (2006). A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324, (1-4), 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>

Van Griensven, A., Ndomba, P., Yalew, S., & Kilonzo, F. (2012). Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 16(9), 3371-3381. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3371-2012>