



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.3.1.2018.1708.146-154



Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema com o Modelo SWAT

Estimate water balance of a sub-basin of the Ipanema River Hydrographic Basin with the SWAT Model

Wanderson dos Santos Sousa^a, Jussara Freire de Souza Viana^b, Rafael Rodrigues da Silva^c, Ricardo Alexandre Irmão^a

^a Instituto de Tecnologia de Pernambuco-ITEP, Av. Prof. Luiz Freire, n. 700, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50.740-545. E-mail: wanderson.santos@itep.br, ricardo@itep.br.

^b Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Civil, Rua: Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-530. E-mail: jussarafsouza@yahoo.com.br.

^c UFPE, Departamento de Energia Nuclear-DEN, Av. Prof. Luiz Freire, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-540. E-mail: rodriguesrs19@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 14 Nov 2017
Aceito Dia Mês Ano
Publicado Dia Mês Ano

ABSTRACT

The use of hydrological models aimed to obtain a realistic prediction of the hydrological processes that occur on hydrographic basins, especially the transformation of precipitation into surface runoff and evapotranspiration. Currently, a large number of hydrological predict models are used, highlights to Soil and Water Assessment Tool (SWAT), developed by the US Agricultural Research Service / United States Department of Agriculture (ARS / USDA). The study aimed to compare and analyze the water balance of a subbasin of the Ipanema River basin-PE by means of the estimation presented by the SWAT model and the method of Thornthwaite & Mather. Thus, this research aimed to map the sub-basin of the Ipanema river, located on Agreste mesoregion of Pernambuco State. The counties selected were to map were Venturosa, Alagoinha, Pedra, and Buíque. The monthly mean values of water balance components simulated by the SWAT were compared to monthly averages simulated by the Thornthwaite & Mather method. The monthly values were compared using the means of dispersion plots and the coefficient of determination, which was included the total amount of rain that precipitates over the area of the sub basin during the simulation time and the evapotranspiration measured in-situ and potential evapotranspiration. The two methods and the three variables studied showed a good representation of temporal cycle, and estimations of monthly: precipitation, real evapotranspiration, and potential evapotranspiration.

Keywords: Rain, evapotranspiration, SWAT model.

RESUMO

O uso de modelos hidrológicos tem buscado prever de forma realista os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas, sobretudo a transformação da precipitação em escoamento superficial e evapotranspiração, dentre os inúmeros modelos existentes atualmente, um dos mais utilizados em todo o mundo é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) dos Estados Unidos. O estudo objetivou comparar e analisar o balanço hídrico de uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE por meio da estimativa apresentada pelo modelo SWAT e pelo método de Thornthwaite & Mather. Para a realização desta pesquisa foi selecionada uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Ipanema-PE, inserida no Agreste Pernambucano, que abrange os municípios de Venturosa, Alagoinha, Pedra e Buíque. Os resultados das médias mensais das componentes do balanço hídrico simuladas pelo SWAT foram comparados com as médias mensais simuladas pelo método de Thornthwaite & Mather para a área da sub-bacia. Foram comparados os

valores mensais, através de gráficos de dispersão e análise do coeficiente de determinação, da quantidade total de chuva que precipita sobre a área da sub-bacia durante o tempo de simulação, a evapotranspiração real da sub-bacia e a evapotranspiração potencial. O ciclo temporal, considerando valores climáticos mensais para toda a bacia, foi bem representado entres os dois métodos utilizados e para as três variáveis estudadas, precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial

Palavras-Chave: Precipitação, evapotranspiração, modelo SWAT

Introdução

As estimativas de variáveis de processos hidrológicos têm sido muito utilizadas atualmente para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em todo o mundo. Estudos hidrológicos em bacias hidrográficas visam analisar o balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da mesma.

O entendimento do balanço hídrico em uma bacia é muito importante, pois permite analisar os efeitos das ações antrópicas sobre o ambiente, conferir a disponibilidade hídrica e avaliar a sustentabilidade do ambiente. Sendo assim, tem-se a bacia hidrográfica como uma unidade hidrológica de estudo, assim como unidade de planejamento, devido as suas características estarem diretamente ligadas a produção de água (Rennó & Soares, 2003).

Nesse contexto, estudos de impacto ambiental, causados por atividades antrópicas, culminou no aumento de pesquisas para desenvolver novas ferramentas que pudessem avaliar os impactos que as mudanças no uso do solo provocam nos recursos hídricos.

Entretanto, as incertezas hidrológicas, as variações climáticas, as mudanças das demandas hídricas, os efeitos antrópicos sobre o meio natural e o grande número de variáveis representativas dos processos físicos, químicos e biológicos, conferem elevado nível de complexidade à análise dos sistemas de recursos hídricos. Devido a essa complexidade na representação dos processos hídricos os modelos hidrológicos têm sido uma ferramenta promissora no auxílio à compreensão dos sistemas e à tomada de decisão empregada no processo de gerenciamento de bacias hidrográficas.

Neste sentido, o uso de modelos hidrológicos tem buscado prever de forma realista os processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas, sobretudo a transformação da precipitação em escoamento superficial e evapotranspiração. Alguns modelos hidrológicos apresentam vantagens também de analisar cenários, sejam eles realistas ou hipotéticos, com custo baixo, possibilitando estudar diferentes respostas dos processos hidrológicos diante de cada condição de uso do solo, por exemplo. No entanto, os modelos precisam ser calibrados e validados

critérios para apresentar resultados realistas dos processos hídricos. A confiabilidade em modelos matemáticos para estudo hidrológico torna-se o principal aspecto que sugere o seu uso como uma ferramenta de suporte à decisão.

Modelos hidrológicos distribuídos apresentam a capacidade de auxiliar no entendimento de peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, sendo tais observações expressas nos dados de entrada e saída. Esta é uma característica muito importante, uma vez que, quando o “onde” é a questão, o geoprocessamento tende a oferecer o suporte (Santos et al., 2013). Modelos hidrológicos integrados a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) permite a visualização espacial da distribuição dos resultados dos processos hidrológicos, como a produção de mapas temáticos, assim como são empregados na criação de banco de dados para esses modelos, destinados à aquisição e tratamento de dados georreferenciados.

Na atualidade, existem diversos modelos que tratam dos processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas e que possuem interface integrada a um SIG. Muitos desses modelos necessitam de uma quantidade grande de informações sobre parâmetros físicos da bacia e dos solos, cujas informações podem ser construídas com o auxílio de técnicas de SIG. Dentre os inúmeros modelos existentes atualmente, um dos mais utilizados em todo o mundo é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Bressiani et al., 2015; Arnold et al., 2012; Santos, 2015; Gassman et al., 2014; Pagliero et al., 2014; Betrie et al., 2011, Srinivasan et al., 2009).

Esse modelo permite representar distintos processos físicos em uma bacia hidrográfica como, a evapotranspiração, infiltração, escoamento de água, entre outros, com o objetivo de analisar os impactos gerados por alterações no uso do solo sobre o escoamento (superficial e subterrâneo), produção de sedimentos e também qualidade de água, de forma espacializada em bacias hidrográficas grandes e complexas, não instrumentadas (Neitsch et al., 2011). O SWAT se destaca pela sua robustez, capacidade de análise e correlação que obtém entre elementos físicos de

uma bacia hidrográfica. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo comparar e analisar o balanço hídrico de uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Ipanema-PE por meio da estimativa apresentada pelo modelo SWAT e pelo método de Thornthwaite & Mather (1955).

Material e Métodos

Área de estudo

Para a realização desta pesquisa foi selecionada uma sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Ipanema – PE, inserida no Agreste Pernambucano, que abrange os municípios de Venturosa, Alagoinha, Pedra e Buíque (Figura 1). A sub-bacia corresponde a uma porção da área denominada UP7 (Unidades de Planejamento), que é uma das 13 mais importantes Unidades de Planejamento (UP) estabelecidas pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) da área da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (SECTMA, 1998). A área da UP7 é de 6.217 km² e localiza-se entre as coordenadas de 8°18' e 9°23' de latitude sul e 36°36' e 37°28'' de longitude oeste, entretanto a porção aqui trabalhada tem uma área de aproximadamente 502,66 km².

A Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema (BHRI) faz parte de uma das bacias hidrográficas mais importantes do país, a do rio São Francisco, que é responsável pela geração de energia hidroelétrica para importantes centros urbanos e pela transposição das águas do seu curso principal para outros rios intermitentes menores da região Nordeste do Brasil (Cardoso et al., 2005). O rio principal da BHRI (rio Ipanema) nasce no estado de Pernambuco, no município de Pesqueira-PE, a uma altitude aproximada de 1.000 m e atravessa o estado de Alagoas antes de desaguar na margem esquerda do rio São Francisco. A área da BHRI se insere em uma região do Nordeste do Brasil denominada Polígono das Secas, caracterizada por apresentar longos períodos de estiagem e intensa disputa pelo uso da água (Krol et al., 2006).

O clima da região é caracterizado como semiárido muito quente com temperaturas médias anuais superiores a 23°C, de acordo com a classificação estabelecida por Köppen. Na região, o período chuvoso está mais concentrado entre os meses de março a maio, com média anual inferior a 700 mm (Montenegro & Montenegro, 2006). A média anual da evapotranspiração potencial também é elevada, com índices que podem ser superiores a 1.600 mm. Com isso, tem-se um déficit hídrico na região durante a maior parte do ano (Montenegro & Ragab, 2010).

A vegetação é do tipo caatinga hipoxerófila e brejos de altitude. Os brejos de altitude, presentes na região com vegetação de caatinga mais densa,

tiveram parte da vegetação original substituída por gramíneas, principalmente pelo capim braquiária (EMBRAPA, 2000).

Atualmente, grande parte da vegetação natural da bacia foi devastada em detrimento das atividades exploratórias da região, como a pecuária extensiva, a agricultura familiar e a retirada de madeira para abastecer padarias, indústrias de calcário e outras indústrias maiores (Coelho, 2016).

Os tipos de solo presentes na região da sub-bacia são os Luvisolo, Neossolo Litólico, Neossolo Quartzarenico, Neossolo Regolítico e o Planossolo, que abrange a maior parte da região (Figura 4 e Tabela 1) (EMBRAPA, 2002). O relevo é composto pelo Pediplano Central do Planalto da Borborema (PCPB) e pelo Pediplano do Baixo São Francisco (PBSF) (<http://geobank.cprm.gov.br>).

Modelo Soil and Water Assessment Tools (SWAT)

O modelo SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture (ARS/USDA)* dos Estados Unidos. Ele permite a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas e a análise de diversos cenários, como a previsão dos impactos: do manejo do solo sobre a qualidade da água, do transporte de sedimentos, e do transporte de químicos agrícolas. O SWAT possibilita a modelagem de grandes bacias hidrográficas, com diferentes tipos e usos do solo ao longo de grandes intervalos de tempo (Neitsch et al., 2005). É um modelo distribuído de base física, contínuo no tempo, o qual simula o escoamento superficial, a erosão em planos e canais, o transporte de nutrientes e pesticidas em escalas de tempo diárias, mensais e anuais (Aragão et al., 2013; Neitsch et al., 2011).

O balanço hídrico no solo pode ser escrito como (Equação 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq.(1)}$$

onde SW_t é o armazenamento final da água no solo (mm); SW_0 é o armazenamento inicial da água no solo no dia i (mm); t é o tempo (dias); R_d é a precipitação no dia i (mm); Q_{sup} é o escoamento superficial no dia i (mm); E_a é a evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} é a percolação no dia i (mm); Q_{gw} é o fluxo de retorno (ascensão capilar a partir da zona vadosa) no dia i (mm).

O escoamento superficial é estimado a partir de dois métodos: Curva Número (SCS - *Soil Conservation Service*) e o método de infiltração de *Green Ampt* (Neitsch et al., 2011). Neste estudo, o escoamento superficial é calculado usando o método número da Curva Número SCS modificado (Neitsch et al., 2011).

$$Q_{sup} = \frac{(R_d - I_a)^2}{(R_d - I_a + S)} \quad \text{Eq.(2)}$$

onde Q_{sup} é o escoamento superficial acumulado ou o excesso de precipitação (mm H₂O), R_d é a lamina precipitada para o dia (mm), I_a é a abstração inicial a qual inclui o armazenamento superficial, a interceptação e a infiltração inicial para o escoamento (mm), e S é o parâmetro de retenção (mm). O parâmetro de retenção varia espacialmente devido à mudança no solo, uso da terra, manejo e declividade e temporalmente devido às mudanças do conteúdo de água do solo. O parâmetro de retenção é definido por:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad \text{Eq.(3)}$$

onde CN é a Curva Número. A abstração inicial, I_a , é comumente aproximado de $0,2S$ e na Equação 2 tem-se:

$$Q_{sup} = \frac{(R_d - 0,2S)^2}{(R_d + 0,8S)} \quad \text{Eq.(4)}$$

Para o cálculo da evapotranspiração potencial o modelo disponibiliza três métodos: Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989); Priestley & Taylor (Priestley-Taylor, 1972) e Hargreaves & Samani (Hargreaves et al., 1985). Sendo que para este estudo utilizou-se o Penman-Monteith, o qual requer dados diários de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Este método combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, o estreito mecanismo requerido para remover o vapor de água e os termos aerodinâmicos e de resistência superficial.

No início da modelagem hidrológica com o SWAT, a bacia hidrográfica é dividida em várias microbacias e a quantidade destas depende da área mínima de drenagem. Com a delimitação finalizada, o modelo faz combinações entre o uso e ocupação do solo, tipos de solos e declividade, que origina as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's).

Os processos hidrológicos que podem ser simulados no SWAT são: interceptação, infiltração, redistribuição da água, evapotranspiração e escoamentos. O modelo simula o movimento de água no solo apenas sob condições saturadas, ou seja, quando a umidade do solo está acima da umidade na capacidade de

campo. O conteúdo de água que excede a capacidade de campo fica disponível para percolação, fluxo lateral ou drenagem.

Para obter a modelagem inicial da bacia, o SWAT necessita de três diferentes arquivos geoespaciais, no qual é composto pelo modelo digital de elevação (MDE), mapa de tipos de solo da área de estudo e o mapa de uso e ocupação do solo. Além desses dados são necessários dados tabulares referentes às condições climáticas da região de estudo, sendo eles caracterizados por informações de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa.

Por meio da interface ArcSWAT os dados geoespaciais são tratados e convertidos em informações para o processo de funcionamento do modelo. Após o tratamento e organização dos dados é possível estabelecer parâmetros adequados para utilizar no modelo, almejando resultados mais consistentes possíveis. Nos itens a seguir serão apresentados os dados de entrada que foram utilizados para realizar a modelagem pelo SWAT na sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipanema.

Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE utilizado possui resolução espacial de 90 m e foi obtido da EMBRAPA Monitoramento por Satélite, onde são disponibilizados arquivos sobre a altimetria do Brasil (Miranda, 2005). As imagens possuem formato Geotiff (16 bits) e Sistema de Coordenadas Geográficas WGS-84, no qual foi alterado para Sirgas 2000 (Figura 2). No processo de delimitação automatizada da bacia, o ArcSWAT gera a rede de drenagem da área e divide a bacia em sub-bacias de acordo com o relevo apresentado pelo MDE. O modelo digital de elevação também é utilizado para o cálculo de parâmetros de área, declividade média e elevação (média, máxima e mínima) para cada sub-bacia.

Mapa de uso e ocupação do solo e tipos de solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi disponibilizado pelo Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco. Esse mapa fez parte do projeto "Impactos de mudanças climáticas sobre a cobertura e uso da terra em Pernambuco: geração e disponibilização de informações para o subsídio a políticas públicas", composta pela equipe do DEN. Para a composição do mapa foi utilizada uma imagem do Landsat 5-TM (30 m de resolução), órbita-ponto 215/066, cuja data foi de 09 de maio de 1987.

A imagem passou por um tratamento vetorial para a classificação do uso e cobertura do solo, onde foi disponibilizada em formato de arquivo *shapefile*. Para esta área foram identificadas oito classes de uso e cobertura do solo, sendo elas: agricultura, água, área urbana, caatinga aberta, caatinga densa, mata serrana, pastagem e solo exposto (Figura 3). A Tabela 1 indica a área em porcentagem ocupada por cada uso do solo presente na sub-bacia e o código atribuído a cada uso durante os procedimentos de entrada no modelo SWAT.

Para simular os processos hidrológicos na sub-bacia do Rio Ipanema, visando avaliar o balanço hídrico, foram utilizados parâmetros dos solos relacionados ao tipo de solo (nome do solo, número de camadas, grupo hidrológico do solo, profundidade total) e às camadas do solo (profundidade de cada camada, densidade do solo, capacidade de água disponível, porcentagem de carbono orgânico, condutividade hidráulica, albedo, fator de erodibilidade, porcentagens de argila, silte, areia e esqueleto da terra).

Os parâmetros do solo obtidos para a região da bacia estudada seguiram as classificações da EMBRAPA Solos (2013) por meio do portal na internet: Sistema de Informação de Solos Brasileiros (<http://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>) e de alguns trabalhos aplicados no Brasil que definiram valores para alguns parâmetros do solo (Mercuri et al., 2009; Fernandes, 2015; Lelis et al., 2012; Santos, 2015). O mapa de tipos de solos foi obtido a partir de um mapa associação adquirido no Projeto Solos do Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE) (EMBRAPA, 2002), cuja escala é de 1:100.000 (Figura 4). A Tabela 1 indica a área ocupada em porcentagem por cada tipo de solo presente na sub-bacia.

Dados climáticos

Para analisar a climatologia da sub-bacia e atender o objetivo do trabalho se fez necessário considerar duas bases de dados meteorológicas, uma proveniente de estações meteorológicas convencionais e outra de dados de reanálise. A primeira foi baseada em dados observados de precipitação e temperatura do ar obtidas de estações meteorológicas convencionais, localizadas nos municípios de Pedra e Venturosa em Pernambuco, gerenciadas pela Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). A segunda base foi obtida a partir de dados de reanálise fornecido pela modelagem meteorológica do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), disponibilizados no site da *Global*

Weather Data for SWAT (<https://globalweather.tamu.edu/>), com periodicidade diária das variáveis, precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. A Tabela 2 apresenta as informações das estações meteorológicas utilizadas para este estudo.

As séries de dados de precipitação e temperatura do ar das estações convencionais (Pedra e Venturosa) apresentam períodos distintos, sendo de 90 anos para a estação Pedra (1920-2010) e de 15 anos para a estação Venturosa (1993-2008), porém estas foram consistidas pelo Núcleo de Gestão Territorial Sustentável, na Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco (NGTS/ITEP-OS), onde calculou-se os valores das médias climatológicas mensais destas variáveis de modo a representar a variabilidade climática observada de toda a sub-bacia.

As variáveis dos dados de reanálise correspondem ao período de 01 de janeiro de 1979 a 31 de julho de 2014 (35 anos) e foram utilizadas para alimentar o modelo SWAT, assim como o gerador climático do modelo (WXGEN) (Neitsch et al., 2011), na área da sub-bacia, conforme ilustra a Figura 1.

Estimativas das componentes do balanço hídrico

A estimativa do balanço hídrico climatológico mensal foi feita de forma a ser representativo para toda a sub-bacia, sendo calculado através de dois métodos e, posteriormente, realizadas as comparações. Para cada método utilizou-se uma base de dados climáticos diferente.

No primeiro método utilizou-se os dados climáticos observados da estação Pedra e Venturosa para calcular o balanço hídrico segundo Thornthwaite & Mather (1955). De acordo com Nogueira e Lima (1989) este método contabiliza a água do solo, onde a precipitação representa seu ganho e a evapotranspiração a perda de umidade do solo. Este balanço, segundo Medeiros et al. (2012), constitui-se de uma proposta de classificação qualitativa para os índices pluviométricos e variabilidade da temperatura de uma dada área de estudo.

Com base nos dados de precipitação, temperatura do ar e da capacidade de armazenamento de água no solo foi obtido o balanço hídrico da bacia. Para caracterização da disponibilidade hídrica regional é usual assumir valores da Capacidade de Água Disponível (CAD) entre 75 a 125 mm (Camargo et al., 2001). A partir desse critério, adotou-se a CAD igual a 100 mm. A evapotranspiração potencial foi calculada conforme o método de Thornthwaite (1948). Como

resultado o balanço hídrico forneceu estimativas climatológicas mensais da evapotranspiração real, da deficiência hídrica, do excedente hídrico e do armazenamento de água no solo. Entretanto, os principais componentes do balanço hídrico discutidos neste trabalho foram: precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial.

No segundo método utilizou-se os dados climáticos de reanálise e calculou-se o balanço hídrico por meio do modelo SWAT, segundo Penmam-Monteith. O período dos dados definido para a análise do balanço hídrico da sub-bacia no modelo SWAT compreendeu os anos de 1979 a 2014, sendo os três primeiros anos (1979 a 1981) destinados ao período de aquecimento do modelo, ou seja, desconsiderados para a simulação requerida. Sendo assim, realizou-se a simulação inicial apenas das componentes do balanço hídrico utilizando todo o banco de dados descrito anteriormente, que é exigido pelo modelo.

Dessa forma, os resultados das médias mensais das componentes do balanço hídrico simuladas pelo SWAT foram comparados às médias mensais simuladas pelo método de Thornthwaite & Mather (1955) para a área da sub-bacia.

Resultados

Análise da precipitação

As climatologias mensais da precipitação dos dados observados e dos dados de reanálise estão apresentadas na Figura 5a. Podemos observar uma semelhança no padrão climatológico mensal entre as duas séries de dados onde o trimestre março-abril-maio como meses mais chuvosos e o trimestre setembro-outubro-novembro como meses mais secos. Este diagnóstico é reforçado pelo valor significativo de 0,8634 no coeficiente de determinação apresentado na Figura 5b, onde retratamos a dispersão entre as séries de dados e o cálculo da linha de tendência.

Análise da evapotranspiração real

As climatologias mensais da evapotranspiração real calculadas por TM e pelo modelo SWAT estão apresentadas na Figura 6a. Pode-se observar uma semelhança no padrão climatológico mensal entre as duas séries de dados, onde o trimestre março-abril-maio como meses com maior evapotranspiração e o trimestre setembro-outubro-novembro como meses com menor evapotranspiração. Este diagnóstico é reforçado pelo valor significativo do R^2 de 0,9079 (Figura 6b), onde é retratada a dispersão entre as séries de dados e o cálculo da linha de tendência.

No entanto, é observada uma discrepância mensal dos valores entre as séries.

Análise da evapotranspiração potencial

As climatologias mensais da evapotranspiração potencial calculadas por TM e pelo modelo SWAT estão apresentadas na Figura 7a. Podemos observar uma semelhança no padrão climatológico mensal entre as duas séries de dados, onde o bimestre dezembro-janeiro como meses com maior evapotranspiração e o bimestre junho-julho como meses com menor evapotranspiração potencial. Este diagnóstico é reforçado pelo valor significativo de 0,8904 no coeficiente de determinação apresentado na Figura 7b, na qual retrata-se a dispersão entre as séries de dados e o cálculo da linha de tendência. Também é observada uma discrepância mensal nos valores entre as séries.

Análise do desvio mensal obtido pelo método de Thornthwaite & Mather e pelo modelo SWAT

A Tabela 3 mostra a o desvio mensal das variáveis precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial obtidas pelo método de Thornthwaite & Mather e pelo SWAT, que utiliza o método de Penmam-Monteith. Analisando os dados observa-se uma discrepância mensal dos valores entre as variáveis, onde a precipitação apresenta valores bem maiores nos sete primeiros meses (Jan-Jul) em relação aos últimos cinco meses da série (Ago-Dez), com diferenças maiores no período úmido, como no mês de março de 61,47 mm, e diferenças mínimas no período seco, como no mês de setembro, cujo desvio mensal foi de 4,11 mm.

Na evapotranspiração real (ETR) observa-se valores maiores nos primeiros meses do ano, cuja diferença máxima ocorre no mês de março (58,25 mm) e a mínima no mês de setembro com valor de 8,02 mm. A evapotranspiração potencial (ETP) apresentou diferenças máximas nos meses de outubro a março, com destaque para o mês de dezembro, cuja diferença foi de 125,01 mm, sendo as diferenças mínimas observadas nos meses de maio a agosto, com ênfase no mês de junho que apresentou diferença de 57,04 mm.

Discussão

Constatou-se que o desempenho das distribuições na análise de precipitação foi muito semelhante, diferenciando-se apenas na comparação entre os valores, na qual os dados observados mostraram superioridade, conforme visto em Detzel & Mine (2011). A maioria dos modelos representa razoavelmente a climatologia observada, porém, principalmente no período da

estação chuvosa, os modelos divergem quanto à quantidade de chuva nessa região (Silveira et. al., 2013).

Os resultados obtidos pelos dois métodos de determinação da evapotranspiração demonstraram-se discrepantes. O método Penman-Monteith requer uma quantidade grande de informações, tornando-o bastante robusto, pelo fato de trabalhar com uma quantidade maior de parâmetros de importância para a etapa de evapotranspiração (Neves et. al., 2005), enquanto Thornthwaite & Mather trabalham apenas com temperatura e precipitação.

Conclusão

A análise do balanço hídrico na sub-bacia do Rio Ipanema realizada pelo estudo comparativo da estimativa pelo modelo SWAT e pelo método de Thornthwaite & Mather (TM) apresentou valores satisfatórios na climatologia hídrica local. O ciclo temporal, considerando valores climáticos mensais para toda a bacia, foi bem representado entre os dois métodos utilizados e para as três variáveis estudadas, precipitação, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial.

No estudo da precipitação, os dados de reanálise foram subestimados para todos os meses em relação aos observados. Na análise das evapotranspirações mensais, com uso do modelo SWAT, a evapotranspiração real foi subestimada e a evapotranspiração potencial foi superestimada em relação ao método TM, para todos os meses. No entanto, entende-se que seria necessário obter dados medidos da ETR para analisar quais dados estão mais próximos à realidade do lugar. Porém, considera-se que, tanto a estimativa por TM como pelo modelo SWAT podem ser consideradas no computo do balanço hídrico, uma vez que os dois métodos representaram bem a climatologia hídrica mensal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP-OS) pelo espaço cedido para a execução deste estudo e pelos dados disponibilizados, à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de doutorado da segunda e do terceiro autores, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado sanduíche da segunda autora e ao Departamento de Energia Nuclear da UFPE por disponibilizar as informações de uso e ocupação do solo da região.

Referências

- ALLEN, R. G. 1986. A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 12, p. 348-368.
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, v. 81, n. 4, p. 650-662.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/XO49OE/XO49OEOO.htm>. Acesso em: 01 julho de 2015.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S. 2013. Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo swat e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1091-1102.
- ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M.K. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. 2012. American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1491-1508.
- BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y.A.; GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 807-818.
- BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y.A.; GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. 2011. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 807-818.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. 2015. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, v. 8, n. 3, p. 9-35.

- CARDOSO, A. O.; CLARKE, R. T.; DIAS, P. L. S. 2005. A case study of the use of sea-surface temperatures (SSTs) to obtain predictors of river flows. In: Regional Hydrological Impacts of Climate Change-impact Assessment and Decision Making. IAHS Publications, pp.231-238.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P.; PALLONE FILHO, W. J. 2001. Modelo climático-fenológico para determinação das necessidades de irrigação de café arábica na região Norte de São Paulo e no Triângulo Mineiro. Boletim Técnico, n.190. Campinas: Instituto Agrônômico, 26p.
- COELHO, V. H. R. 20016. Estimativa da recarga subterrânea em bacia hidrográfica do semiárido pernambucano a partir de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 224p.
- DETZEL, D. H. M.; MINE, M. R. M. 2011. "Modelagem de quantidades precipitadas em escala diária: Uma análise comparativa. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 2, p. 101-110.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária. 2000. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco. Boletim de Pesquisa, n. 11. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 378p.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária. 2002. Zoneamento agroecológico do Estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos UEP.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Agropecuária. 2013. Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- FERNANDES, J. G. 2015. Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT. Tese de doutorado em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 185p.
- GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. 2014. Applications of the SWAT model special section: overview and insights. Journal of Environmental Quality. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/pdf/s/43/1/1>. Acessado em: 19/03/2015.
- HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. 1985. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 111, n. 3, p. 265-275.
- KROL, M. S.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; GÜNTER, A. 2006. Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: a general introduction of methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. Journal of Hydrology, v. 275, p. 417-431.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; FONSECA, A. S.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. 2012. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 623-634.
- MEDEIROS, R. M.; FRANCISCO, P. R. M.; BANDEIRA, M. M. 2012. Balanço Hídrico Climatológico, em Decorrência do Aquecimento Global, no Município de Picuí - Semiárido Paraibano. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 5, n. 1, p. 59-72.
- MERCURI, E. G. F.; DEPPE, F.; LOHMANN, M.; SIMÕES, K. 2009. Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras. Anais Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, RN, Brasil, pp. 4773-4780.
- MIRANDA, E. E. 2005. Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br>. Acessado em: 18/05/2017.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. 2006. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 10, p. 30-37.
- MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. 2010. Hydrological response of a Brazilian semiarid catchment to different land use and climate change scenarios: modeling study. Hydrological Processes, v. 24, p. 2705-2723.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Input/output file documentation: Version. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, EUA, 530p.

- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS GRASSLAND, J. R. 2009. Soil and Water Research Laboratory. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Agricultural Research Service Blackland Research Center-Texas Agrilife Research. Texas A&M University System, 2011.
- NEVES, F. F., SILVA, F. G. B., & CRESTANA, S. 2005. Comparação entre três métodos de evapotranspiração potencial aplicados a duas sub-bacias hidrográficas de Descalvado-SP. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB, Brasil.
- NOGUEIRA, F. C. B.; LIMA, F. A. M. 1989. Classificação Climática de Thornthwaite dos Municípios de Pacoti e Guaramiranga, Ceará. *Ciência Agrônômica*, v. 2, n. 1/2, p. 175-183.
- PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. 2014. Large-scale hydrological simulations using the soil water assessment tool. Protocol development and application in the Danube Basin. *Journal of Environmental Quality*. Disponível em: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/pdf/s/43/1/145>. Acessado em: 13/08/2015.
- PENMAM, M. L. Evaporation: an introductory survey. 1948. *Neth. Jour. Of Agric. Science*, v. 4, p. 9-29.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, v. 100, n. 2, p. 81-92.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. 2003. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte, MG, Brasil.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C. 1999. Balanço hídrico normal por Thornthwaite & Mather (1955). Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia - ESALQ/USP, v. 5.
- SANTOS, J. Y. G.; CARVALHO NETO, J. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. 2013. Aplicação do modelo SWAT para a simulação chuva-vazão na Bacia do Rio Tapacurá, Estado de Pernambuco. Anais XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, RS, Brasil, pp. 01-08.
- SANTOS, J. Y. G. 2015. Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 205p.
- SECTMA. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. 1998. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. Recife, v. 1-3, p. 849.
- SILVEIRA, S. C.; SOUZA FILHO, F. D. A.; COSTA, A. A.; CABRAL, S. L. 2013. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia da Prata e análise das projeções para o cenário RCP8. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 3, p. 317-330.
- SRINIVASAN, V. S.; PAIVA, F. M. L. 2009. Regional validity of the parameters of a distributed runoff-erosion model in the semi-arid region of Brazil. *Science in China Series E: Technological Sciences*, v. 52, n. 11, p. 3348-3356.
- THORNTHWAITE, C. W. 1948. Na approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v.38, p.55-94.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. 1955. The water balance. Centerton, New Jersey: Drexel Institute of Technology. Publications in Climatology, 104p.