

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E PRECIPITAÇÃO E DO SEU IMPACTO NAS VAZÕES SIMULADAS PELO MODELO SMAP NO ESTADO DO CEARÁ

Renan Vieira Rocha ^{1*}; Francisco de Assis de Souza Filho²; Cleiton da Silva Silveira³

Resumo - O objetivo do presente trabalho é analisar uma possível relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (ET_o) mensal nas proximidades de Iguatu (Ceará) e a partir da mesma gerar séries de ET_o pelo preenchimento das falhas com regressões entre essas duas variáveis, calibrar e simular as vazões pelo modelo SMAP e observar se possíveis alterações constatadas na ET_o impactam nas vazões simuladas. Foi observada uma maior correlação negativa no primeiro semestre, acima de 70% para janeiro, fevereiro e abril, quando comparado com o segundo, entre 39% e 56%. Foi detectado uma possível tendência de acréscimo na ET_o ao longo do tempo, com valores predominantemente maiores nos últimos anos, e uma alta variação dos seus valores, até 37% maiores que a média e até 26% abaixo. O modelo SMAP calibrado e simulado com séries preenchidas não resultou em valores significativamente diferentes de vazão, o coeficiente de eficiência de NASH-Sutcliffe variou entre 0,84 a 0,86, exceto quando adotado os valores mínimos mensais, que resultou em um valor significativamente menor (0,46). Os resultados indicam que meses com menores precipitações podem resultar em maiores valores de ET_o.

Palavras chave - Evapotranspiração Potencial, Precipitação, SMAP

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION AND PRECIPITATION AND ITS IMPACT ON SIMULATED FLOWS BY SMAP MODEL IN THE STATE OF CEARÁ

Abstract - The objective of the present work is to analyze a possible relationship between monthly precipitation and potential evapotranspiration (ET_o) in the vicinity of Iguatu (Ceará) and from it generate ET_o series by filling the gaps with regressions between these two variables, calibrate and simulate flows with SMAP model and observe if possible alterations found in ET_o impacts in the simulated flows. It was observed an higher negative correlation in the first semester, up to 70% for january, february and april, compared to the second, between 39% and 56%. It was detected a possible increase tendency of ET_o along time, with predominating higher values in the last years, and a high variation between it values, up to 37% higher than mean and 26% below. The SMAP model calibrated and simulated with filled series did not result in significantly different flow values, the NASH-Sutcliffe efficiency coefficient varied between 0,84 and 0,86, except when minimum monthly values were adopted, which resulted in an significantly lower value (0,46). The results indicates that months with lower precipitation can result in higher values of ET_o.

Keywords - Potential Evapotranspiração, Precipitation, SMAP

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará (UFC), renanvierochoa@gmail.com; victorporto@gmail.com

² Dr. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA-UFC), assis@ufc.br

³ Dr. Professor do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (IEDS-UNILAB), cleitonsilveira@unilab.edu.br

* Autor correspondente.

INTRODUÇÃO

A modelagem chuva-vazão pelo modelo *Soil Moisture Account Procedure* (SMAP) mensal usualmente adota o valor médio de evapotranspiração potencial (ET_o) de cada mês para simulação das vazões, partindo da premissa de que essa variável de entrada não tem variações significativas que impeçam essa simplificação (TUCCI, 1998).

O método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO é considerado padrão para determinação da ET_o (ALLEN, *et al.* 1998), utilizando dados de temperatura máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento, o que impossibilita a geração de séries contínuas de ET_o devido a dificuldade de obtenção de séries longas e sem falhas de todas essas variáveis.

Os eventos de precipitação podem alterar os resultados da ET_o devido ao seu impacto nas variáveis mencionadas, como alteração na nebulosidade. ANG *et al.* (2016) analisando tendências na ET_o e sua relação com precipitação em uma região da China associou a tendência de redução na ET_o com uma redução na precipitação e na umidade do ar. Um efeito contrário, menores precipitações associadas a maiores valores de ET_o podem amplificar o impacto de uma escassez de chuvas.

O estado do Ceará tem como característica longos períodos com escassez pluviométrica e diversos reservatórios interanuais visando minorar os impactos resultantes desses eventos, cujos três maiores são Castanhão, Orós e Banabuiú.

O presente trabalho visa analisar uma possível relação entre a precipitação e a ET_o mensal nas proximidades de Iguatu (Ceará) e a partir da mesma gerar séries de ET_o pelo preenchimento das falhas com regressões entre essas duas variáveis, calibrar e simular as vazões que alimentam o reservatório de Orós pelo modelo SMAP e observar se possíveis alterações constatadas na ET_o impactam nas vazões simuladas.

METODOLOGIA

Área de estudo e dados

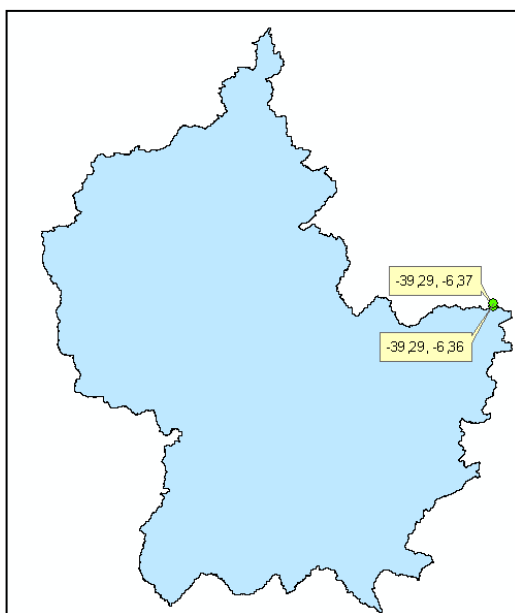


Figura 1 - Bacia hidrográfica da estação fluviométrica de Iguatu, estação meteorológica e fluviométrica em destaque.

A estação meteorológica de Iguatu, gerenciada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na latitude $-6,36^\circ$ e longitude $-39,29^\circ$ (Figura 1), apresenta dados das variáveis necessárias para cálculo da ET_o e também de precipitação a partir do ano de 1961, embora com

falhas significativas. Os dados climatológicos foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)

A estação fluviométrica de Iguatu (36160000) localiza-se no rio Jaguaribe, na bacia do Alto Jaguaribe, com área de drenagem de aproximadamente 20664 km², na latitude -6,37° e longitude -39,29° (Figura 1), apresentando dados de vazão média a partir de 1912, embora com falhas significativas. Para calibração e simulação do modelo SMAP foi utilizado os dados de vazão dessa estação e de precipitação das estações pluviométricas contidas na bacia hidrológica, obtidos pelo Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) e pelo site da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), respectivamente.

Séries de Precipitação e ETo

A precipitação média diária na bacia hidrológica foi obtida pela ponderação dos dados pelo método dos polígonos de Thiessen, agrupando os resultados em uma série mensal contínua.

A ETo diária foi calculada através da equação de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN *et al.* 1998) a seguir, para todo o período com dados disponíveis das variáveis: insolação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento média, e umidade relativa média, considerando a umidade relativa mínima e máxima igual a média. Os resultados foram agrupados mensalmente, descartando os meses incompletos.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_m + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

Onde: ETo é a evapotranspiração potencial (mm/dia); R_n é a radiação líquida total (MJ/m².dia); G é a densidade do fluxo de calor no solo (MJ/m².dia); T_m é a temperatura média diária do ar (°C); u₂ é a velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m/s); e_s é a pressão de saturação e vapor (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura (kPa/°C) e γ é a constante psicrométrica (kPa/°C).

A partir dos resultados de ETo é analisado a variação mensal dos valores obtidos e verificado, a existência de uma possível relação entre os respectivos valores de precipitação e ETo. Para cada mês, uma regressão linear simples, uma regressão linear robusta e uma regressão polinomial local (LOESS) é aplicada entre essas duas variáveis para representar essa relação.

A série calculada de ETo é então preenchida de diversas maneiras:

- 1.) Adotando o valor médio de cada mês para todo o período;
- 2.) Adotando o valor máximo mensal calculado;
- 3.) Adotando o valor mínimo mensal calculado;
- 4.) Preenchendo os resultados de ETo através das regressões;
- 5.) Preenchendo os resultados de ETo através das regressões para os períodos com falhas no segundo semestre e atribuindo o valor médio mensal para o segundo semestre;
- 6.) Preenchendo os resultados de ETo através das regressões para somente para os meses com maior correlação entre as variáveis e atribuindo o valor médio mensal para o restante.

Regressões

Baseado no estimador M proposto por Huber (1973), a regressão linear robusta é considerada uma alternativa a regressão linear simples em casos cujos erros não são independentes e normalmente distribuídos, nessa regressão a influência de *outliers* é reduzida. O ajuste foi realizado pelo método dos Mínimos Quadrados Reponderados Iterados (IRLS) através da função *rlm* do pacote MASS disponível na linguagem R.

Baseado no conceito de que qualquer função pode ser ajustada localmente por polinômios de baixa ordem, a regressão não paramétrica LOESS ajusta modelos polinomiais para subgrupos das observações, de tamanho definido de acordo com a suavização do ajuste (LEMOS, 2014). O ajuste foi realizado pela função *loess* do pacote em R *stats*.

A regressão linear simples foi realizada pela função *lm* do pacote em R *MASS*.

Modelo chuva-vazão SMAP

O modelo chuva-vazão SMAP, desenvolvido por Lopes *et al.* (1981) é um modelo conceitual concentrado, de estrutura simples baseado nos parâmetros do *US Soil Conservation* (TUCCI, 1998) onde o armazenamento e o fluxos na superfície, na camada superior do solo e no aquífero são representados em três reservatórios, SCS, RSOLO e RSUB (BARROS *et al.*, 2013). Nesse presente trabalho, foi utilizado uma versão com discretização temporal mensal, para maiores informações sobre o modelo empregado consultar as referências citadas.

O modelo empregado utiliza seis parâmetros: capacidade de saturação do solo (SAT); parâmetro de escoamento superficial (PES); coeficiente de recarga do aquífero (CREC), relacionado com a permeabilidade da zona não saturada do solo; a taxa de deplecionamento (K) do nível d'água do reservatório (RSUB), responsável pela geração do escoamento de base (EB); a taxa de umidade inicial do solo (TU_{in}), que determina o nível inicial do segundo reservatório (RSOLO) e o escoamento de base inicial (EB_{in}).

Calibração e simulação

Alexandre *et al.* (2005) concluiu que somente os parâmetros SAT e PES possuem sensibilidade para as bacias localizadas no Ceará, dessa forma a calibração do modelo se resumiria a obter os valores adequados dessas duas variáveis, considerando os outros parâmetros constantes: CREC = 0; K = 3; TU_{in} = 30 e EB_{in} = 0. Porém nesse trabalho foram calibrados os parâmetros CREC, SCS, PES e K.

O modelo foi calibrado para o período entre 1961 a 2016 para cada uma das doze séries de ETo, utilizando como função objetivo o coeficiente de eficiência do modelo de Nash Sutcliffe (NASH) (Nash e Sutcliffe, 1970), dado pela equação (2). Quanto mais próximo o coeficiente NS está de 1 melhor é o ajuste do modelo aos dados observados, onde 1 é considerado um ajuste perfeito.

$$NASH = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_s)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_s)^2} \quad (2)$$

Para a calibração foi utilizado o pacote *DEoptim* disponível na linguagem R para maximizar o valor do NASH através de um algoritmo de evolução diferencial.

O algoritmo de evolução diferencial é classificado como um algoritmo evolutivo, onde populações de soluções candidatas são evoluídas seguindo operadores heurísticos inspirados em processos de adaptação natural, apesar da mutação diferencial não ter base em nenhum processo natural. A mutação diferencial utiliza a diferença entre pares de indivíduos na população corrente para gerar os vetores de perturbação, cujas orientações e tamanho dos vetores passíveis de criação são alterados com a distribuição espacial da população, modificada ao longo da progressão do algoritmo de acordo com a função objetivo. Dessa forma, essa autoadaptação da mutação diferencial proporciona robustez, versatilidade e eficiência em diversos problemas (GUIMARÃES, 2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de ETo apresentaram uma alta variação em relação ao valor médio, os valores máximos de cada mês foram entre 15% até 37% maiores que a sua média mensal, cujos meses com maior distância percentual da média se concentraram no primeiro semestre, enquanto os mínimos estiveram entre 15% até 26% abaixo da sua média mensal (Figura 2). Os maiores valores mensais de ETo se concentraram predominantemente nos últimos anos da série, em torno do ano 2000, como pode ser visualizado na figura 3, e também nas figuras 4 e 5, onde os pontos azuis concentram a maioria dos valores mais altos de ETo. Esses resultados indicam uma possível tendência de acréscimo da ETo ao longo do tempo.

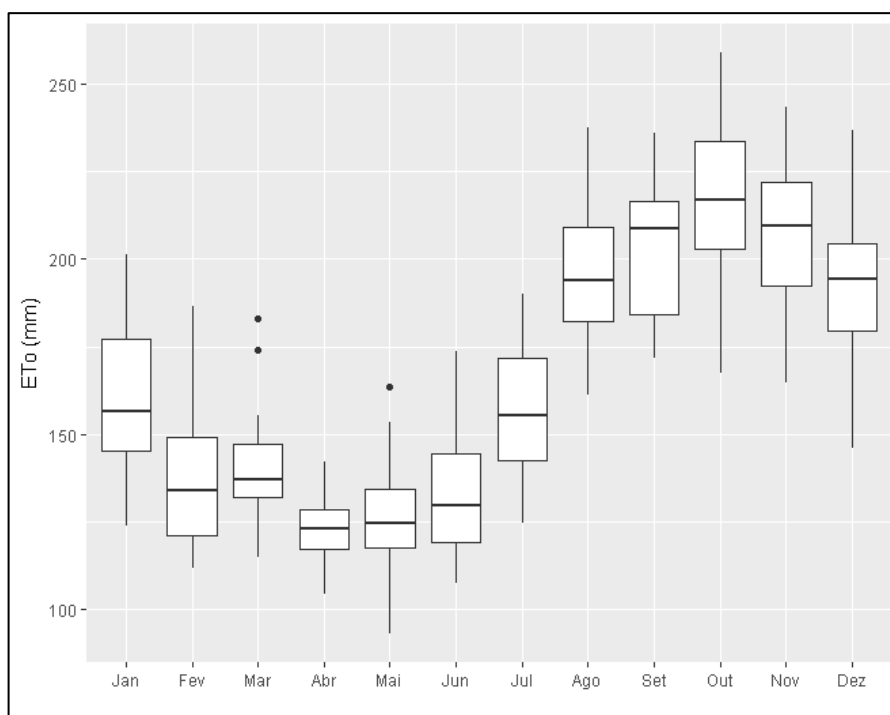


Figura 2 - Variação da ETo mensal.

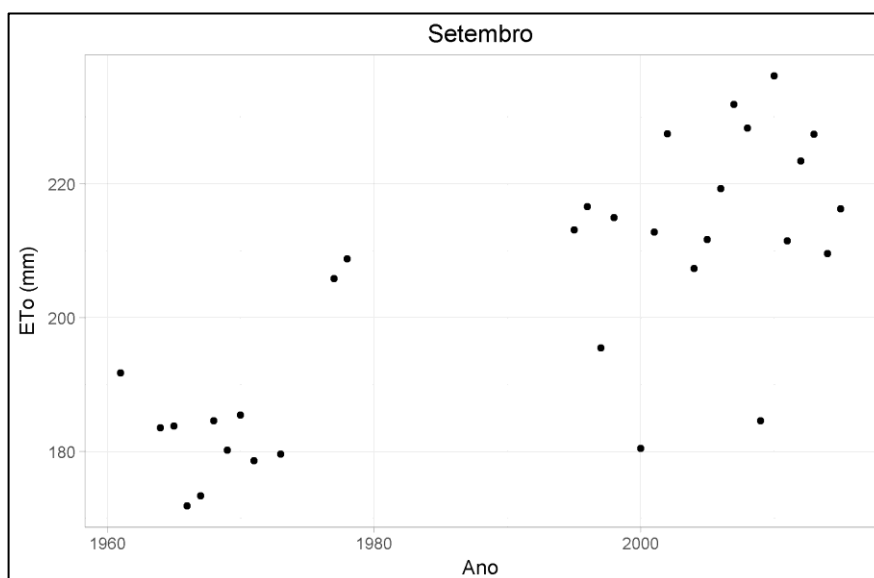


Figura 3 - Evolução temporal da ETo do mês de setembro.

Os resultados de ETo apresentaram correlação significativamente maior com as precipitações ponderadas pelo método do Thiessen para a bacia hidrológica do que quando comparados com a precipitação local da estação meteorológica, como pode ser visto na Tabela 1. Dessa forma, será analisado a relação entre a precipitação média e a ETo.

Tabela 1 - Correlação entre a precipitação mensal e a ETo mensal, para precipitação local e média da bacia.

| Correlação (%) | Jan | Fev | Mar | Abr | Maio | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Precipitação local | -57,1 | -64,3 | -29,9 | -37,0 | -43,3 | -40,7 | -48,0 | -31,2 | -36,5 | -33,1 | -22,1 | -1,8 |
| Precipitação média bacia | -71,2 | -73,0 | -46,8 | -70,6 | -65,2 | -50,8 | -56,2 | -39,2 | -50,8 | -45,1 | -56,5 | -54,9 |

Os valores mensais de precipitação e ETo apresentaram uma alta correlação negativa, acima de 70%, para os meses de janeiro, fevereiro e abril. A quarta maior correlação negativa foi obtida para o mês de maio, 65%. O restante dos meses apresentou correlação negativa variando entre 45% a 56%, exceto para o mês de agosto cuja correlação é próxima a 39%. O mês de março, apesar de localizado nos meses de maior precipitação do estado, apresentou uma correlação de apenas -46%.

As figuras 4 e 5, apresentam os resultados das regressões aplicadas para um dos meses de maior correlação e para o mês de menor correlação, respectivamente. Nota-se que devido a variabilidade dos resultados a regressão com melhor ajuste é a LOESS e os resultados entre as regressões robustas e linear são similares.

Esses resultados indicam menores valores de ETo significativamente menores para meses com maiores precipitações, inclusive para meses com baixa pluviosidade e correlação entre as variáveis, como agosto.

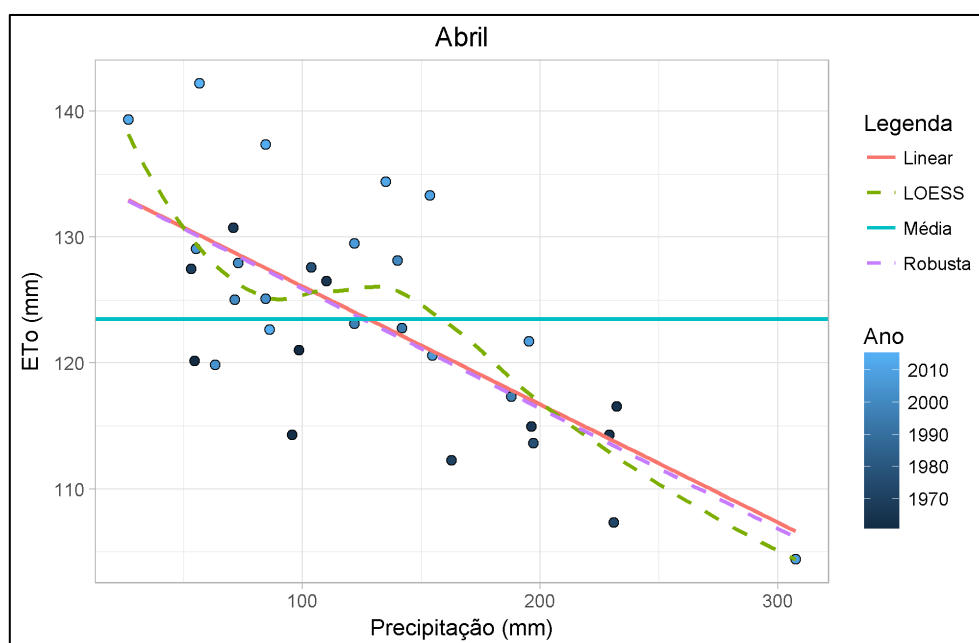


Figura 4 - Resultados das regressões para um dos meses de maior correlação.

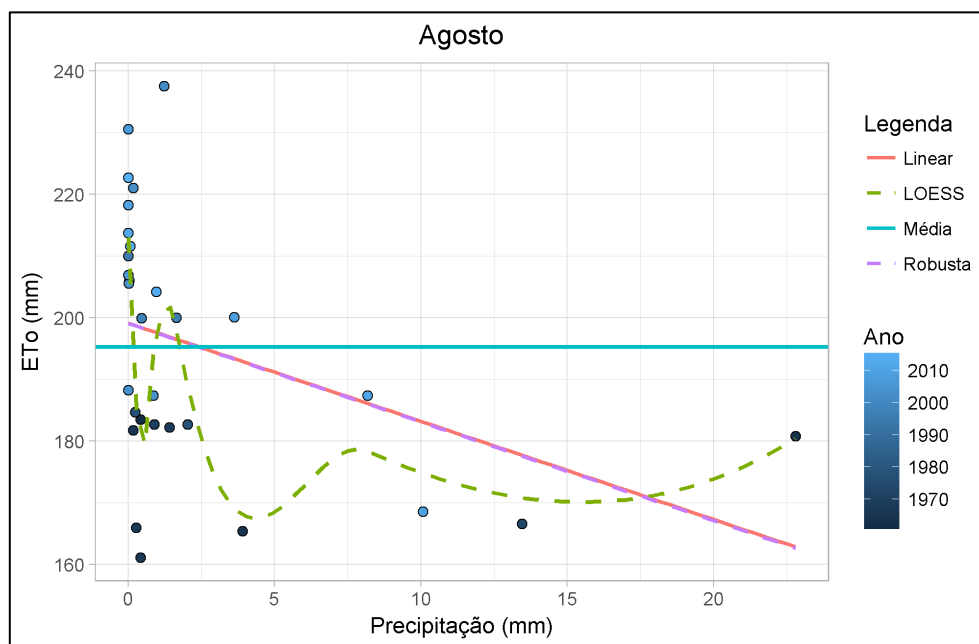


Figura 5 - Resultados das regressões para o mês com menor correlação.

A calibração do modelo SMAP resultou em que valores de NASH semelhantes para todas as séries de ET_0 , variando entre 0,84 a 0,86 no período entre 1961-2016, não indicando alterações significativas na utilização de séries preenchidas e mostrando uma baixa sensibilidade a variações na ET_0 , exceto para valores menores, visto que a utilização dos valores mínimos resultou em um valor de NASH significativamente menor (0,46).

O parâmetros CREC convergiu para os resultados encontrados por Alexandre *et al.* (2005), já o parâmetro K não alterou significativamente os resultados, podendo ser adotado o valor 3. Os parâmetros PES e SAT variaram entre 1140-1183 e 3,3 a 3,38, respectivamente.

CONCLUSÃO

O presente trabalho conseguiu identificar uma correlação negativa significativa entre precipitações médias mensais de uma área adjacente a estação meteorológica e os resultados de evapotranspiração potencial (ET_0) calculados pelo método de Pennam-Monteith, utilizando os dados da mesma. Os meses localizados no primeiro semestre apresentaram uma maior correlação entre essas duas variáveis, acima de 70% para janeiro, fevereiro e abril, comparados com o segundo semestre, entre 39% e 56%. Além disso, foi detectado uma possível tendência de acréscimo na ET_0 ao longo do tempo, com valores predominantemente maiores nos últimos anos e uma alta variação dos seus valores, até 37% maiores que a média e até 26% abaixo.

A relação observada não resultou em valores significativamente diferentes de vazão ao calibrar e simular o modelo SMAP com séries preenchidas pelas regressões utilizadas, com um valor de coeficiente de NASH-Suthcliffe variando entre 0,84 a 0,86, exceto quando adotado os valores mínimos mensais, que resultou em um valor significativamente menor (0,46). Os resultados dos parâmetros calibrados se assemelharam com os obtidos previamente por Alexandre *et al.* (2005) o valor de CREC convergiu para 0, e K não alterou significativamente os resultados.

A relação estabelecida indica que meses com menores precipitações resultam em maiores valores de ET_0 , devido a variação dos valores de ET_0 , uma regressão polinomial local (LOESS) apresentou melhor ajuste, apesar de uma regressão linear simples conseguir representar o comportamento observado.

Devido a tendência detectada da ETo ao longo do tempo o preenchimento das falhas através das regressões considerando a ETo somente em função da precipitação pode ter contribuído para os resultados obtidos pela simulação pelo SMAP, uma sugestão para futuros trabalhos é considerar a ETo em função da precipitação e também do tempo.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE, A.M.B., MARTINS, E.S., CLARKE, R.T., REIS, D.S JR (2005). Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, João Pessoa - PB, 2005.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ANG, Zesu; ZHANG, Qiang; HAO, Xiaocui. Evapotranspiration Trend and Its Relationship with Precipitation over the Loess Plateau during the Last Three Decades. *Advances In Meteorology*, [s.l.], v. 2016, p.1-10, 2016. Hindawi Publishing Corporation. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6809749>.
- BARROS, Francisco Venícius Fernandes et al. Regionalização de parâmetros do modelo chuva-vazão SMAP das bacias hidrográficas do Ceará. In: *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Org. por Souza Filho, Francisco de Assis de; Campos, José Nilson B.; Aquino, Sandra Helena Silva de. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 9. p. 186-207.
- GUIMARAES, F. G.. Algoritmos de Evolução Diferencial para Otimização e Aprendizado de Máquina. In: A. P. A. da Silva; A. J. R. Reis. (Org.). In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais e Inteligência Computacional (IX CBRN/IC)*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Redes Neurais, 2009, v. 1, p. 1-17.
- HUBER, P.J. (1973). Robust Regression: Asymptotics, Conjectures and Monte Carlo”, *Annals of Statistics*, Vol. 1, 799-821.
- LEMOS, Gabriel Bruno de. *Precificação de derivativos climáticos no Brasil: uma abordagem estatística alternativa e construção de um algoritmo em R*. 2014. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agrônômica) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. doi:10.11606/D.11.2014.tde-07042014-172230. Acesso em: 2017-05-16.
- LOPES, J. C.; BRAGA, Jr. B. F.; CONEJO, J. L. (1981). Simulação Hidrológica: Aplicações de um modelo simplificado. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. V. 2, pp. 42-62.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. V. 10, pp. 282 - 290.
- TUCCI, Carlos E. M.. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 1998. 668 p.