

ANÁLISE DE DIFERENTES FUNÇÕES-OBJETIVO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO SMAP

Taison Anderson Bortolin^{1*} & *Pedro Antonio Roehe Reginato*² & *Marco Antônio Presotto*³ & *Vania Elisabete Schneider*⁴ & *Ludmilson Abritta Mendes*⁵

Resumo – Os modelos de simulação são amplamente utilizados em todos os tipos de estudos hidrológicos. Porém, para que estes possam representar da forma mais adequada os processos da natureza, há a necessidade de que os parâmetros sejam calibrados. Para isto, podem ser utilizadas funções-objetivo que otimizam uma solução a ser selecionada a partir das muitas alternativas oferecidas. Neste trabalho foram utilizadas seis funções-objetivo na calibração do modelo determinístico chuva-vazão SMAP para uma bacia hidrográfica inserida na região nordeste do Rio Grande do Sul. As funções-objetivo que apresentaram melhores resultados dentro da escala de aceitabilidade foram o CNS e o Erro de Volume, com valores de R^2 próximos a 0,77, mostrando-se condizentes para aplicação do modelo na área de estudo. As funções utilizadas procuraram avaliar a qualidade do ajuste entre dados observados e calculados, sendo que estas foram mais sensíveis aos erros nas vazões máximas do que nas mínimas.

Palavras-Chave – Modelo Hidrológico, Funções Objetivo, Calibração.

ANALYSIS OF DIFFERENT OBJECTIVE-FUNCTIONS IN THE CALIBRATION OF THE SMAP RAIN-FLOW MODEL

Abstract – Simulation models are widely used in all types of hydrological studies. However, in order for these to be representative of the shape most suited to nature's processes, there is a need for what are the calibration standards. For this, it may be what works with a solution selected from the alternative alternatives. In this work, we try the functions, the objective in the calibration of the SMAP rain-flow deterministic model for a hydrographic basin inserted in the Northeast region of Rio Grande do Sul. Objective functions that presented the best results within the acceptability scale were the CNS and the Volume Error, with R^2 values close to 0.77, being suitable for application of the model in the study area. The functions used sought to evaluate the quality of fit between observed and calculated data, and these were more sensitive to errors in maximum flows than in minimum ones.

Keywords – Hydrological Model, Objective Functions, Calibration.

¹ Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. Instituto de Saneamento Ambiental - ISAM/UCS. tabortol@ucs.br

² Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS. pedro.reginato@ufrgs.br

³ Afiliação: Instituto de Saneamento Ambiental – ISAM/UCS. marco_presotto@hotmail.com

⁴ Afiliação: Instituto de Saneamento Ambiental – ISAM/UCS. veschnei@ucs.br

⁵ Afiliação: Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe – UFS. ludmilsonmendes@yahoo.com.br

* Autor Correspondente

INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos apresentam um grande número de parâmetros que não podem ser diretamente medidos e, por isso, devem ser estimados através dos procedimentos de calibração. A estimativa deve ser realizada de forma a ajustar adequadamente os dados calculados pelo modelo àqueles observados na bacia hidrográfica ou área de estudo (DINIZ, 1999).

O sucesso na aplicação de modelos hidrológicos conceituais depende em grande parte de sua calibração (YAPO et al., 1996). Ao mesmo tempo, esta tarefa se mostra de difícil execução devido a um grande número de fatores, tais como não linearidade dos modelos, grande número de parâmetros desconhecidos, erros nos dados medidos, dados hidrológicos não representativos (GUPTA, SOROOSHIAN, 1985). Por mais que o modelo consiga representar da forma mais fiel possível o sistema real, sempre haverá alguma incerteza associada à estimativa dos parâmetros ótimos globais.

Não existe um conjunto único de parâmetros capaz de representar os processos hidrológicos, devido às incertezas inerentes dos dados, das simplificações na estrutura do modelo e da falta de representatividade dos parâmetros (COLLISCHONN, TUCCI, 2003). Existem várias opções possíveis para os valores dos parâmetros que, de forma adequada, darão a resposta desejada.

Para avaliar o desempenho do modelo, ou seja, a capacidade de combinar os diferentes parâmetros para que a resposta seja semelhante ou próxima aos dados observados, é comum a utilização de diferentes funções objetivo. A função objetivo (FO) é uma função associada a um problema de otimização que determina quão boa é uma solução. É a função real que precisa ser minimizada ou maximizada para uma escolha ideal ou uma solução a ser selecionada a partir das muitas alternativas oferecidas (MATA-LIMA, 2011). A escolha de uma função objetivo adequada é uma questão fundamental para uma resposta mais próxima aos processos que ocorrem na natureza.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise de seis funções-objetivo aplicadas para calibração do modelo chuva-vazão SMAP, a fim de avaliar quais destas FO ajustam de forma mais adequada os parâmetros de calibração do modelo.

METODOLOGIA

O SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão que realiza o balanço da umidade do solo baseado em dois reservatórios lineares, um representando o solo na camada superior e o outro o aquífero (LOPES et al. 1982), conforme mostra a Figura 1.

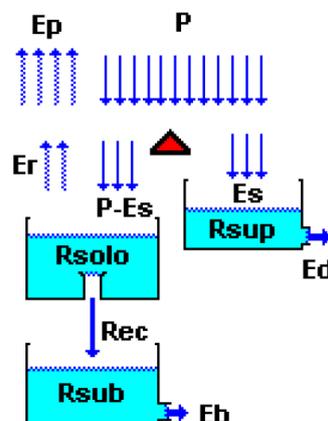


Figura 1 - Estrutura do Modelo SMAP diário
Fonte: Lopes et al. (1982)

Para análise, o modelo utiliza uma estrutura de três reservatórios: um superficial (R_{sup}), um do solo (R_{solo}) e o subterrâneo (R_{sub}). O armazenamento superficial (R_{sup}) pode ser matematicamente escrito por:

$$\frac{dR_{sup}}{dt} = E_s - E_d \quad (1)$$

$$E_s = 0 \text{ se } P \leq AI \quad (2)$$

$$E_s = \frac{(P - AI)^2}{P - AI - S} \text{ se } P > AI \quad (3)$$

$$E_d = R_{sup} (1 - K_2), \text{ onde } K_2 = 0,5^{1/K_2t} \quad (4)$$

onde E_s representa o escoamento superficial direto, obtido pelo método do *Soil Conservation Service* (SCS), E_d representa a vazão de depleção do escoamento superficial direto, P é a precipitação, AI é abstração inicial para o método do SCS, e S é a abstração potencial também para o método do SCS. E_d é definido como função do nível do reservatório superficial (R_{sup}) e K_2t o coeficiente de depleção do reservatório superficial, como definido em Lopes (1982). Todas as unidades são em mm, exceto para dt e K_2t , que possuem dimensão de tempo (dia).

O reservatório da camada superior do solo (R_{solo}) pode ser matematicamente escrito como:

$$\frac{dR_{solo}}{dt} = P - E_s - E_r - Rec \quad (5)$$

$$E_s = E_p \text{ se } IN > E_p \quad (6)$$

$$E_s = IN + (E_p - IN)Ti \text{ se } IN \leq E_p \quad (7)$$

$$Rec = 0 \text{ se } R_{solo} \leq R_{soloM} \quad (8)$$

$$Rec = Crec \times TU \times (R_{solo} - R_{soloM}) \text{ se } R_{solo} > R_{soloM} \quad (9)$$

$$TU = \frac{R_{solo}}{Str} \quad (10)$$

$$IN = P - E_s \quad (11)$$

onde P e E_s conforme definidos acima, E_r é a taxa de evapotranspiração, Rec é a recarga do reservatório do subsolo, $Crec$ o coeficiente de recarga do reservatório do subsolo, IN é definido como a diferença entre P e E_s e é a parcela da precipitação que infiltra, TU o teor de umidade do solo, STR a capacidade de campo máxima do solo e $Capc$ a capacidade de campo máxima do solo em porcentagem (LOPES et al. 1982).

O reservatório do subsolo (R_{sub}) pode ser escrito matematicamente:

$$\frac{dR_{sub}}{dt} = Rec - E_b \quad (12)$$

$$E_b = R_{sub}(1 - K_k) \text{ com } K_k = 0,5^{(1/K_kt)} \quad (13)$$

onde E_b representa a vazão do escoamento de base e K_kt é o coeficiente de depleção do reservatório do subsolo, como definido em Lopes et al. (1982).

$$Q_m = (E_b + E_d)CoefConv \quad (14)$$

onde *CoefConv* é o coeficiente de conversão de mm para m³/s e *Qm* é a vazão na saída da bacia em m³/s.

A calibração do modelo foi realizada com o algoritmo de calibração do Solver do Microsoft Excel® com diferentes funções objetivo, as quais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Funções-Objetivo (FO) usadas na calibração do modelo SMAP.

Função Objetivo	Equação	Escala de Aceitabilidade	Referências
Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (CNS)	$Cns = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Qobs(t) - Qcal(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Qobs(t) - \bar{Qobs})^2}$	Apropriadamente calibrado: Cns > 0,75; Aceitável: 0,75 < Cns < 0,36; Não satisfatório: Cns < 0,36	Gottshalk e Mtovilov (2000, apud Collischonn, 2001); Schaefli (2007).
Relação entre os volumes calculados e observados (Erro percentual de volume)	$\Delta V = \frac{\sum(Qcal(t)) - \sum(Qobs(t))}{\sum(Qobs)} \times 100$	O valor ótimo para este critério é 0.	Gupta et al. (1999); Liew (2007)
Erro padrão (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum((Qcal(t)) - (Qobs(t)))^2}{n}}$	O valor ótimo para este critério é 0.	Chanasyk et al. (2003)
Erro padrão do inverso da vazão (RMSEI)	$RMSEI = \sqrt{\frac{\sum\left(\frac{1}{Qobs(t)} - \frac{1}{Qcal(t)}\right)^2}{n}}$	O valor ótimo para este critério é 0.	Tucci (1998); Collischonn e Tucci (2003)
Soma quadrática das diferenças (SSR)	$SSR = \sum_{t=1}^N \left(\frac{Qobs(t) - Qcal(t)}{Qobs(t)}\right)^2$	O valor ótimo para este critério é 0.	USACE (2001); Cunderlik e Simonovic (2004, 2005); Schardong (2011).
Soma dos Erros Absolutos (SAR)	$SAR = \sum_{t=1}^N Qobs(t) - Qcal(t) $	O valor ótimo para este critério é 0.	Pandey e Nguyen (1999); USACE (2001); Cunderlik e Simonovic (2004, 2005); Schardong (2011).

onde *Qobs(t)* é a vazão observada no tempo *t*; *Qcal(t)* é a vazão calculada no tempo *t*; *n* é o número de intervalos de tempo; e Σ indica somatório entre *t*=1 e *t*=*n*.

A área de estudo compreende uma sub-bacia localizada no Estado do Rio Grande do Sul, tendo como exutório o posto fluviométrico Ponte do Prata (86420000), e área de drenagem total de 317 km². Esta sub-bacia pertence à bacia hidrográfica Taquari-Antas, conforme apresentado na Figura 2, e está inserida no Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), caracterizado por possuir aquíferos com baixa a média possibilidade de se obter águas subterrâneas, condicionado pelo sistema geológico de rochas vulcânicas fraturadas e solo predominantemente dos tipos cambissolos e nitossolos associados a cambissolos.

Para calibração foi selecionado o período de 2003 a 2005, em que se dispunha dos dados de precipitação, evaporação e vazão. Para o uso deste modelo, inicialmente se fez necessária a obtenção dos dados diários de precipitação média, chuva e evapotranspiração potencial da bacia analisada. Tais dados foram obtidos no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA) e no banco de dados meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET.

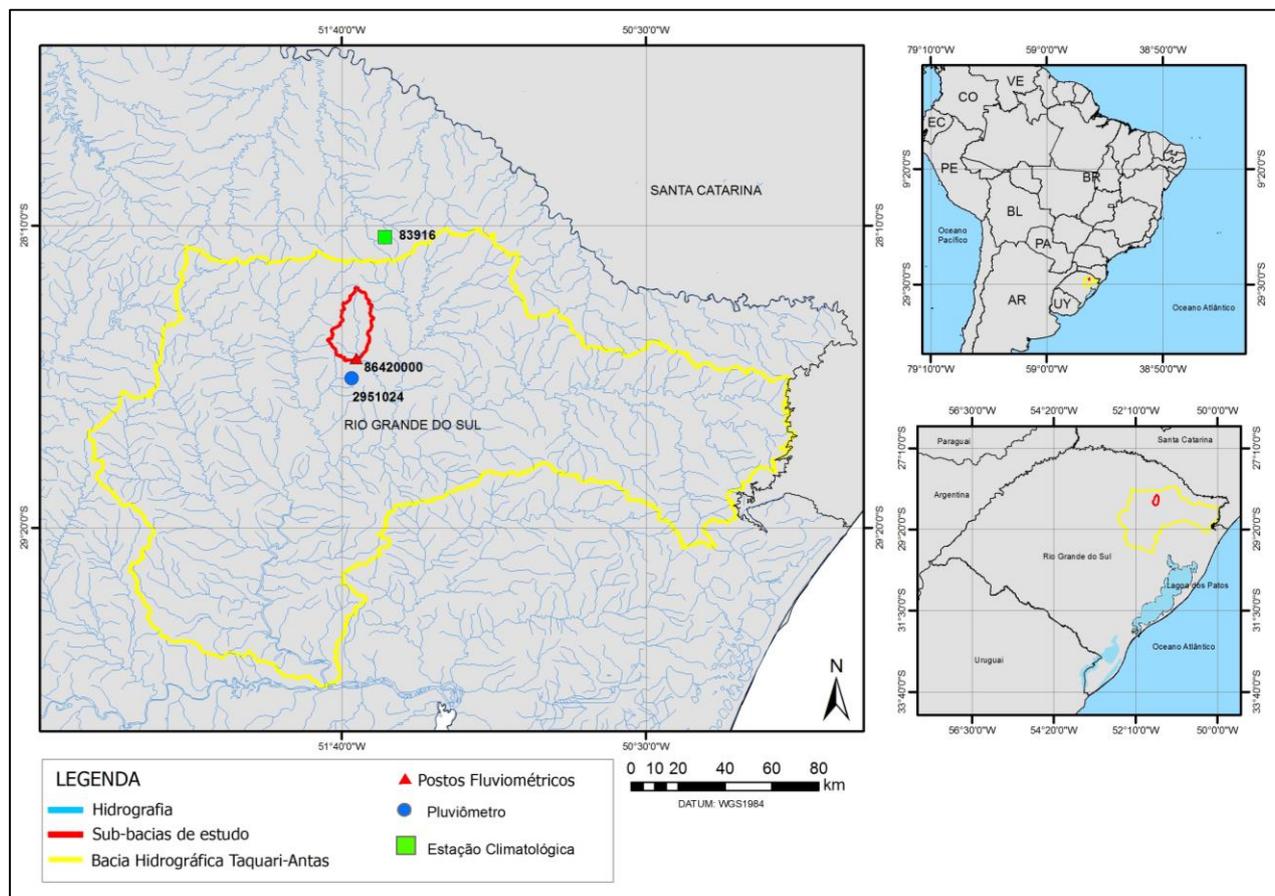


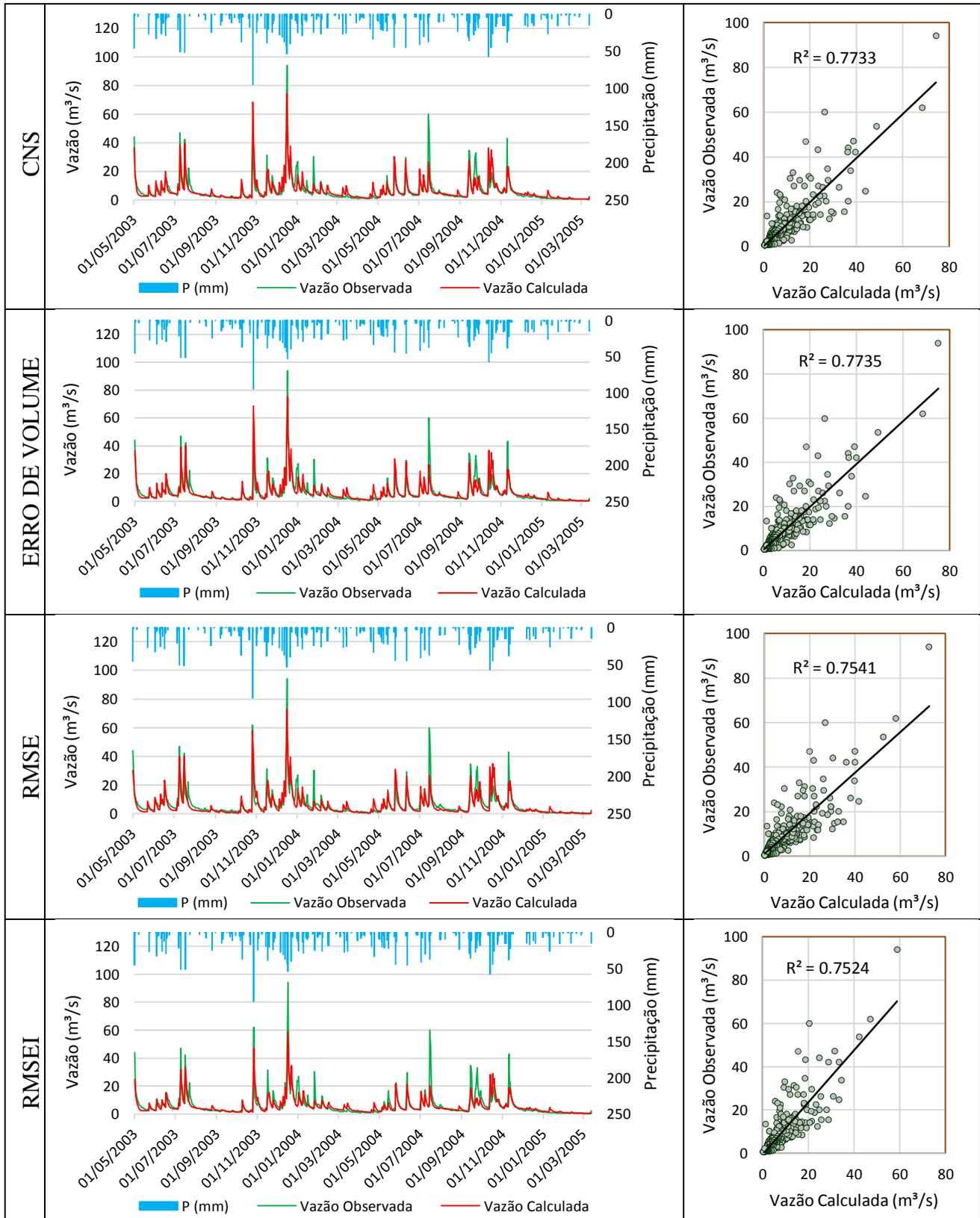
Figura 2 – Localização da área de estudo

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros de entrada e os valores calibrados no SMAP para as funções objetivo utilizadas são apresentados na Tabela 2. Os resultados das calibrações realizadas com as diferentes funções objetivo são apresentados na Figura 3.

Tabela 2. Parâmetros iniciais e valores calibrados

	CNS	Erro (Volume)	RMSE	RMSEI	SSR	SAR
Valor da Função Objetivo	0,77	$2,18 \cdot 10^{-10}$	4,17	0,19	47,09	$2,40 \cdot 10^{-4}$
R ²	0,77	0,77	0,75	0,75	0,58	0,59
Parâmetros calibrados						
Sat (Capacidade de saturação do solo - mm)	150,36	149,02	127,25	234,17	305,55	100,00
K2t (Constante de recessão do escoamento superficial - dias)	1,54	1,54	2,08	1,99	5,91	5,35
Crec (Coeficiente de Recarga - adimensional)	5,08	4,85	1,88	2,06	0,44	3,46
Valores iniciais						
AI (Abstração Inicial)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Capc (Capacidade de Campo)	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Kkt (Constante de Recessão)	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00



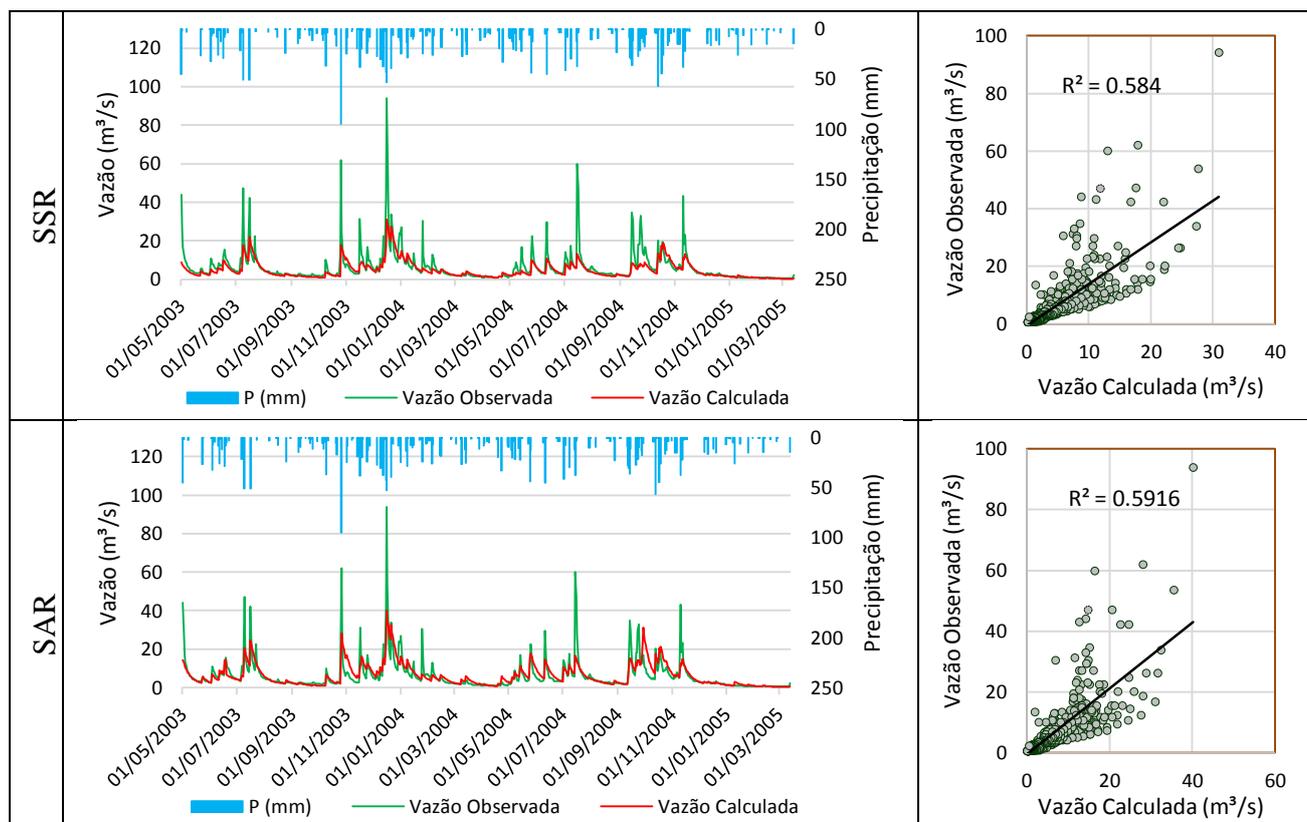


Figura 3 – Resultados da calibração do modelo com diferentes funções-objetivo

Para todas as FO testadas, os valores calibrados para a capacidade de saturação mostraram-se baixos, entre 100 e 300 mm, o que guarda coerência com as características solo presente na área de estudo. Os parâmetros calibrados que apresentaram maior variação entre as FO foram o coeficiente de recarga (0,4 a 5) e a constante de recessão (1,5 a 5,9 dias). Assim, a avaliação da melhor FO deve ser feita considerando os demais resultados obtidos.

As FO que apresentaram menores diferenças entre dados observados e calculados foram o CNS e Erro do Volume. Ambas as funções apresentaram R^2 de 0,77 e se mostraram condizentes com a escala de aceitabilidade proposta por diferentes autores. Estas duas funções também apresentaram valores de parâmetros calibrados muito semelhantes, com capacidade de saturação próxima a 150 mm, constante de recessão de 1,54 dias e coeficiente de recarga em torno de 5. Estas duas funções também foram as que resultaram em um melhor ajuste dos picos de vazão.

Em seguida, na escala de aceitabilidade, vieram as funções RMSE e RMSEI, com R^2 de 0,75. Estas duas funções apresentaram concordância nos valores da constante de recessão, de aproximadamente 2 dias, e do coeficiente de recarga, em torno de 2. A capacidade de saturação, no entanto, variou 84% de uma para outra, sendo o valor obtido pela RMSE mais próximo do obtido pelas duas funções anteriores, o que explica o melhor ajuste de vazões de pico da RMSE em relação à RMSEI.

Em último lugar na escala de aceitabilidade ficaram as funções SSR e SAR. Ambas são implicitamente uma medida da magnitude dos picos das vazões, volumes e tempo do pico dos hidrogramas calculados e observados (SCHARDONG, 2011), porém para calibração do modelo SMAP apresentaram as maiores diferenças entre valores observados e calibrados, com um ajuste nas vazões de pico ao longo do período calibrado visivelmente pior que as quatro funções anteriores. Os valores da constante de recessão obtidos com estas FO, entre 5 e 6 dias, estão muito

distantes dos obtidos pelas demais funções. Além disso, a SSR apresentou o maior valor da função objetivo e um coeficiente de saturação que mais destoava dos obtidos pelas demais funções, principalmente em relação ao CNS e ao Erro do Volume.

As FO testadas não apresentaram diferenças significativas entre si no ajuste das vazões de base. Com relação às vazões de pico, embora o melhor ajuste tenha sido obtido pelo CNS e pelo Erro do Volume, ainda assim estas funções não conseguiram que o modelo calculasse uma vazão próxima à observada nos dias 16/12/2003 (94 m³/s), 25/01/2004 (30,38 m³/s), 15/07/2004 (60 m³/s), 14/09/2004 (27,51 m³/s) e 10/11/2004 (43,11 m³/s).

Conforme Tucci (1998), estas funções procuram avaliar a qualidade do ajuste, sendo que algumas são mais sensíveis aos erros nas vazões máximas (RMSE e CNS), outras são especialmente utilizadas para avaliar o ajuste nas vazões mínimas (RMSEI), enquanto o erro dos volumes (ΔV) é complementar e avalia o desvio geral do volume total calculado em relação ao observado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a análise de seis funções-objetivo aplicadas para calibração do modelo chuva-vazão SMAP em uma bacia hidrográfica da região nordeste do Rio Grande do Sul. Das seis funções testadas, as que apresentaram melhores resultados dentro da escala de aceitabilidade foram o CNS e o Erro de Volume, sendo estas mais adequadas para aplicação do modelo na área de estudo, ainda que em alguns eventos não representaram de forma adequada as vazões de pico. Entretanto, apesar da diferença de ajuste, as FO utilizadas não tiveram diferenças significativas nas vazões de base.

REFERÊNCIAS

- CHANASYK, D.S., MAPFUMO, E., WILLMS, W., 2003. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. **Agric. Water Manage.** 59, 137–153.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetro de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39, 2003.
- CUNDERLIK, J. M. e SIMONOVIC, S. P. Calibration, verification, and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrological model. Water Resources Research Report No. 048, Facility for Intelligent Decision Support, Department of Civil and Environmental Engineering, London, Ontario, Canada. 2004.
- CUNDERLIK, J. M. e SIMONOVIC, S. P. Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions. *Hydrological Sciences Journal*. 50 (4), 631-654. 2005.
- DINIZ, L da S. Calibragem de Modelos Hidrológicos. In: GALVAO, C. O.; GALVÃO, M. J. S. *Sistemas Inteligentes: aplicações a recursos hídricos*. 1. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1999. p. 151-164.
- GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., AND YAPO, P. O. (1999). “Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration.” **J. Hydrol. Eng.**, 402, 135–143.
- GUPTA, V. K.; SOROOSHIAN, S. The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 81, nº 1-2, 30 Out. 1985, p. 57-77.

LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrology Resources**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

LOPES, J. E. G., BRAGA, B. P. F. e CONEJO, J. G. L. SMAP: A simplified hydrologic model. In: Applied Modeling in Catchment Hydrology Water Resources Publications, Littleton, Co. p. 167-176. 1982.

Pandey, G.R., Nguyen, V., 1999. A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. **J. Hydrol.** 225, 92-101.

SCHARDONG, A. Aplicação de algoritmos evolucionários à gestão integrada de sistemas de recursos hídricos. Tese. Universidade de São Paulo, 2011. 185p.

USACE, 2001. Hydrologic modelling system HEC-HMS. User's Manual. US Army Corps of Engineers (USACE), Washington, DC, Hydrologic Engineering Center.

YAPO, P. O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. **Journal of Hydrology**, v. 181, nº 1-4, Jun. 1996, P. 23-48.