



**Simulação do Regime Hidrológico da Cabeceira do Rio São Francisco a Partir da Utilização dos Modelos SMAP e RegCM**  
Simulation of the Hydrological Behavior of the São Francisco River Headwaters Using the SMAP and RegCM Models

Nathallia Mercedes Miranda<sup>1</sup>; Marcio Cataldi<sup>2</sup> & Felipe das Neves Roque da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-900, Maracanã, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup>Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Agrícola e do Meio Ambiente, Rua Passo da Pátria, 156, Sala 209, 24210-240, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil.

<sup>3</sup>Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Coordenadoria de Meteorologia, Av. Maracanã, 229, bloco A, 4º andar, Torre, 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
E-mails: miranda.nathallia@gmail.com; mcataldi@id.uff.br; felipe.silva@cefet-rj.br

Recebido em: 20/10/2017 Aprovado em: 21/11/2017

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2017\\_3\\_328\\_339](http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_328_339)

## Resumo

Estudos realizados nas últimas décadas demonstram que os diferentes processos ambientais que ocorrem no planeta são, geralmente, de natureza bastante complexa, o que reforça a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de modelagem numérica de sistemas ambientais. Tendo em vista as possíveis alterações causadas pelas mudanças climáticas e ciente da importância da bacia do Rio São Francisco na geração hidrelétrica nacional, o presente estudo utilizou o modelo hidrológico de chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) para comparar as vazões Médias de Longo Termo (MLT) observadas da cabeceira da bacia, à montante da usina hidrelétrica de Três Marias, com as simuladas pelo modelo de circulação geral da Atmosfera MIROC, regionalizadas pelo modelo climático regional RegCM, ambos utilizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC. Para a avaliação destas simulações foi comparado o comportamento da vazão simulada na bacia, tendo como dado de entrada a precipitação prevista pelo modelo climático e também a precipitação observada no período de 2001 a 2009. Para calibração do modelo SMAP foram utilizados dados de precipitação observada no período de junho de 1991 a maio de 2001. Posteriormente, foi analisado o comportamento do modelo hidrológico utilizando dados de precipitação simulados pelo modelo climático RegCM, com e sem aplicação de técnicas estatísticas de remoção de viés. A modelagem utilizando a chuva real observada na bacia apresentou uma boa aderência com a vazão real observada no período, demonstrando que o modelo SMAP é capaz de reproduzir a MLT da bacia. No entanto, a modelagem utilizando a precipitação simulada pelo RegCM apresentou índices baixos de eficiência, sendo necessária uma análise para remoção de viés da precipitação do modelo. Após isso, as simulações apresentaram melhora significativa nos índices estatísticos de desempenho, que ainda foram inferiores aos índices da precipitação real. Com isso, o estudo verificou que os modelos climáticos apresentam potencial para serem utilizados neste tipo de análise, mas necessitam de uma verificação minuciosa de suas simulações em situações climáticas passadas conhecidas, para que sejam identificados possíveis erros sistemáticos e seus prognósticos possam ser utilizados de forma correta pela sociedade, principalmente em processos mitigadores dos efeitos das mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrológica; Modelagem Climática; Remoção de viés; Mudanças Climáticas

## Abstract

Studies done in the last decades demonstrate that the different environmental processes that occur on the planet are generally very complex, which reinforces the need for development and improvement of numerical environmental systems modeling technologies. Considering the possible alterations caused by climate change and aware of the importance of the São Francisco river in the national hydroelectric generation, the present study used the Soil Moisture Accounting Procedure (SMAP) to compare the mean flow rates, upstream of the Três Marias hydroelectric power plant, with those simulated by the general MIROC Atmospheric circulation model, regionalized by the RegCM regional climate model, both used by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The generation of scenarios, comparing the flow behavior was obtained by the rainfall predicted by the climate model and the actual rainfall of the basin in the period from 2001 to 2009. For the evaluation of these simulations, the behavior of the simulated flow in the basin was compared, taking as input the precipitation predicted by the climatic model and also the precipitation observed in the period from 2001 to 2009. For calibration of the SMAP model, data of real precipitation observed between June 1991 and May 2001 were used. Later, the behavior of the hydrological model was analyzed using precipitation data simulated by the RegCM climate model with and without statistical removal techniques of bias. The modeling using the real rain observed in the basin presented a good adhesion with the real flow observed in the period, demonstrating that the SMAP model is able to reproduce the mean flow rates of the basin. However, modeling using RegCM simulated precipitation showed low efficiency indices, requiring an analysis to remove bias from the precipitation of the model. After that, the simulations showed a significant improvement in the statistical performance indices, which were still lower than the actual precipitation indexes. Thus, the study found that climate models have the potential to be used in this type of analysis, but they need a thorough verification of their predictions in known climatic conditions in order to identify possible systematic errors and its prognoses can be used in a correct way by the society, especially in mitigating processes of the effects of climate change.

**Keywords:** hydrological modeling; climate modeling; bias removal; climate changes

## 1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, as tecnologias de modelagem para reproduzir os fenômenos naturais evoluíram rapidamente, propiciando ao homem a oportunidade de ampliar seus conhecimentos sobre a natureza e compreender seus processos físicos e biológicos. Em relação a estes fatos destacam-se os avanços na modelagem numérica dos processos físicos inerentes à previsão de tempo e clima. Para a hidrologia existe um pleno potencial de utilização das previsões de precipitação tanto na área de previsão de vazões quanto no aprimoramento do conhecimento sobre os diferentes fenômenos naturais que constituem o ciclo hidrológico (ONS, 2005).

Os modelos climáticos globais descrevem projeções do clima futuro, que são representações descrevendo como se modificará o clima do planeta em decorrência de uma determinada alteração da composição da atmosfera, resultante das atividades humanas (Kiehl & Gent, 2004). Tais representações são baseadas em um conjunto de suposições e incluem tendências futuras de demanda energética, emissões de gases de efeito estufa, mudanças no uso do solo e aproximações nas leis que regem o comportamento do sistema climático sobre grandes períodos de tempo.

No Brasil, as projeções dos modelos climáticos do futuro indicam que o aquecimento pode variar por região, sendo acompanhado por mudanças na precipitação que podem incluir incrementos ou reduções em diferentes regiões, e também mudanças na variabilidade do clima e na frequência e intensidade de eventos extremos de clima (Marengo, 2011).

É importante ressaltar que no presente trabalho utilizou-se dados de previsão climática oriundos da regionalização de um modelo global, a partir da técnica de “*downscale*” dinâmico, obtendo-se previsões com uma maior resolução espacial, capaz de resolver melhor os processos governantes em escalas espaciais menores e controlados por fatores locais, como vegetação, topografia, linha de costa e lagos.

Já o modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da

superfície e/ou subsuperfície terrestre (Maidment, 1993). Por isso, variações na climatologia de uma bacia, podem representar alterações em modelos hidrológicos.

Tendo em vista as possíveis alterações causadas pelas mudanças climáticas e a importância da bacia do rio São Francisco na geração hidrelétrica nacional, o presente estudo utilizou o modelo hidrológico de chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*, Lopes *et al.*, 1982; Bou *et al.*, 2005) para comparar as vazões Médias de Longo Termo (MLT) da bacia, utilizando como dados de entrada a chuva real, a chuva calculada pelo modelo climático RegCM (*Regional Climate Model*, Giorgi *et al.*, 2012) e a chuva obtida após a remoção de viés da chuva calculada por este modelo.

Sendo assim, o presente estudo tem o propósito de avaliar a aplicação da climatologia do modelo RegCM na obtenção de médias de longo termo de vazões para a cabeceira da bacia do rio São Francisco, através da aplicação do modelo chuva-vazão SMAP, de forma a avaliar se os cenários de mudanças climáticas gerados a partir desta modelagem poderiam trazer uma tendência real do que poderá ocorrer com a disponibilidade de recursos hídricos desta bacia, dado um quadro de aumento de emissões de gases de efeito estufa.

## 2 Materiais e Métodos

A bacia do Rio São Francisco possui uma área de 639.000 km<sup>2</sup> e seu curso principal tem uma extensão de 2.700 km entre as cabeceiras, na Serra da Canastra, em terras do município de São Roque de Minas (MG), e a foz, no Oceano Atlântico, entre os estados de Sergipe e Alagoas. A área da bacia corresponde a aproximadamente 8% do território nacional e abrange parte de seis estados e do Distrito Federal. Destaca-se ainda que a bacia compreende uma parte significativa do Polígono das Secas, que constitui um território reconhecido pela legislação como sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens e situa-se, majoritariamente, na região Nordeste, porém estende-se até o norte de Minas Gerais (Codevasf, 2011).

A precipitação é um fator que exerce influência direta na determinação das condições hidrológicas

de uma região. Como o presente estudo visa modelar a cabeceira da bacia do rio São Francisco a partir dos dados de postos pluviométricos, foi identificada a necessidade de se caracterizar a sazonalidade das chuvas na região, visando o conhecimento do seu comportamento.

Para obtenção dos dados pluviométricos foram utilizadas as séries históricas obtidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA) através do banco de dados Hidroweb. A Tabela 1 descreve as informações dos dez postos pluviométricos utilizados no presente trabalho.

Posto	Código	Latitude S	Longitude O	Responsável
P1	01945008	19,743	45,255	ANA
P2	02046013	20,330	46,366	ANA
P3	01945039	19,332	45,228	ANA
P4	01944004	19,956	44,307	ANA
P5	02044009	20,625	44,433	ANA
P6	01945042	19,469	45,602	ANA
P7	01943009	19,687	45,921	ANA
P8	01944010	19,268	44,402	ANA
P9	01944007	19,880	44,422	ANA
P10	01944031	19,423	44,548	ANA

Tabela 1 Postos pluviométricos utilizados

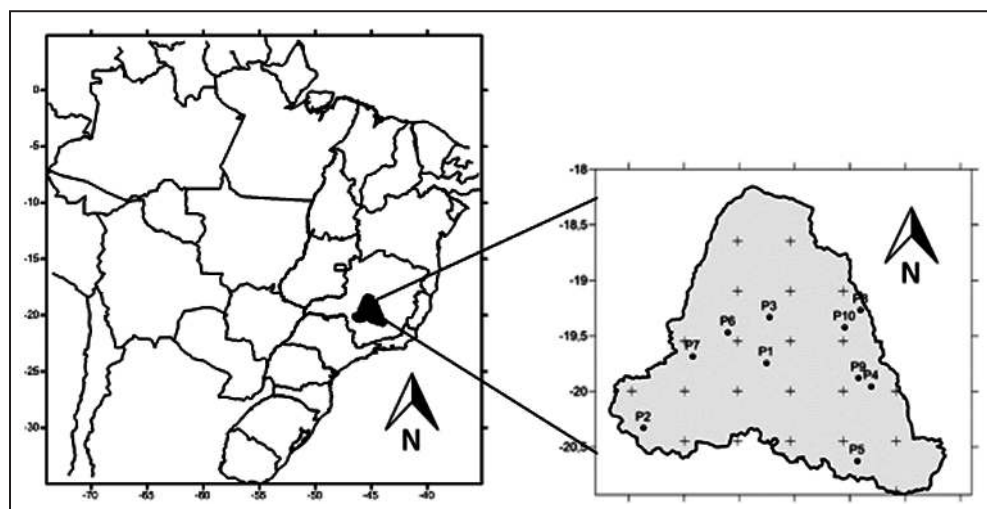
A Figura 1 ilustra a distribuição espacial destes postos, bem como os pontos de grade do modelo RegCM utilizados na validação do modelo.

As previsões do clima futuro, elaboradas com a utilização de modelos numéricos, têm sido feitas por cerca de três décadas. No entanto, esta técnica ainda possui deficiências na caracterização

do clima regional, já que utiliza resoluções espaciais de algumas centenas de quilômetros. Os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera MCGA não são capazes de reproduzir de maneira eficiente os processos governantes na escala sub-grade, controlados por fatores locais como vegetação, topografia, linha de costa e lagos (Pequero *et al.*, 2010). Tais modelos são inapropriados para simular ou prever circulações locais como brisas, jatos estreitos, nuvens convectivas, etc. Dessa forma, a utilização de modelos regionais de clima torna-se extremamente necessária. Esses modelos podem ser utilizados para simular o clima desde escalas temporais curtas (mensal) a longas (decadal). Outros estudos já utilizam os modelos regionais de clima para prever o clima futuro na América do Sul diante dos vários cenários de mudanças climáticas do IPCC (Nuñez *et al.*, 2008; Marengo *et al.*, 2009a, 2009b).

Para simular a chuva na cabeceira do Rio São Francisco, foi utilizado o modelo regional de clima RegCM na sua versão 4.1. O RegCM é um modelo hidrostático de área limitada, com discretização em diferenças finitas e que utiliza a coordenada sigma na vertical (Grell *et al.*, 1994). Ele foi executado entre janeiro de 1989 e dezembro de 2010 com resolução espacial de 50 km utilizando como condições iniciais e de contorno os dados atmosféricos do ERA-Interim (Simmons *et al.*, 2007), que possuem resolução espacial de 1,5°x1,5° e temporal de 6 horas (00:00, 06:00, 12:00 e 18:00 TMG). Os dados de temperatura da superfície do mar (TSM) são as médias semanais de todo o período, provenientes do NOAA *Optimum Interpolation* (OI) V2 (Reynolds *et al.*, 2002). Essas médias foram interpoladas para médias diárias pelo

Figura 1  
 Distribuição espacial dos postos pluviométricos e dos pontos de grade do modelo RegCM na cabeceira do rio São Francisco.



modelo RegCM para evitar descontinuidades. Os dados de topografia e uso do solo com 30 segundos de resolução espacial são do *United States Geological Survey* (USGS) e do *Global Land Cover Characterization* (GLCC; Loveland *et al.*, 2000), respectivamente, onde ambos foram utilizados para se obter as características do terreno.

Os cálculos do esquema de radiação consideram os efeitos dos gases  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ . Já a componente solar considera os efeitos destes e também do  $O_2$ . Ela inclui 18 intervalos espectrais de 0,2 a 5  $\mu m$ . Os gases de efeito estufa  $NO_2$ ,  $CH_4$  e CFCs e os aerossóis atmosféricos também são considerados. O modelo de superfície é o *Community Land Model CLM 3.5* (Oleson *et al.*, 2008).

Os valores adotados para a chuva do modelo foram obtidos pelos dados de chuva do ponto de grade mais próximo, nos casos onde a distância entre o posto pluviométrico utilizado e o ponto de grade era grande, utilizou-se a média aritmética dos três pontos de grade mais próximos.

Com o intuito de minimizar a tendência do modelo climático RegCM em subestimar os valores de chuva, utilizou-se a remoção de viés, a partir de uma adaptação da metodologia proposta em Braga (2009). Primeiramente, calculou-se, para os dez postos da bacia, a média mensal da chuva observada e a média mensal da chuva prevista pelo modelo climático, respeitando a série temporal de 1991 a 2009. Em seguida, fez-se uma curva de permanência, onde os dados foram dispostos de maneira crescente, não respeitando a série temporal. Após esta etapa, elaborou-se uma curva de dispersão no Excel, cujo eixo das ordenadas era composto pela chuva observada e o eixo das abscissas era composto pela chuva prevista pelo modelo climático. Então, traçou-se uma linha de tendência polinomial de ordem 2, cuja equação foi utilizada para a remoção de viés.

O modelo SMAP é um modelo determinístico e conceitual de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão. Foi desenvolvido em 1981 por Lopes, J.E.G., Braga, B.P.F. e Conejo, J.G.L., apresentado no *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* realizado em Mississipi, U.S.A. e publicado pela *Water Resources Publications* (Lopes *et al.*, 1982).

O desenvolvimento do modelo baseou-se na experiência com a aplicação do modelo

*Stanford Watershed IV* e modelo Mero em trabalhos realizados no DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Foi originalmente desenvolvido para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentadas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura (Lopes *et al.*, 1982).

Os dados básicos utilizados no modelo são a série histórica de chuvas médias na bacia e um padrão intra-anual de perdas evaporimétricas, expresso em nível mensal. Para fins de calibração, também é requerida uma série de vazões observadas no exutório da bacia, sendo desejável um período mínimo da ordem de cinco anos de dados (ONS, 2005).

Em sua versão mensal, o modelo SMAP adota a simplificação de que todos os processos de armazenamento de água na bacia possam ser representados por dois reservatórios, um associado à zona aerada do solo e outro à zona saturada do solo. Esses reservatórios, submetidos à ação da chuva e da evaporação potencial, estariam sujeitos aos seguintes processos de transferência de água: evapotranspiração, infiltração e percolação, que seriam atuantes no reservatório referente à zona aerada; e, recarga e escoamento básico, atuantes no reservatório correspondente a zona saturada do solo. A cada mês, o volume liberado pela bacia corresponderia, então, ao total precipitado, reduzido do volume infiltrado no reservatório superior e acrescido do volume descarregado pelo reservatório inferior (ONS, 2005).

O modelo SMAP (Lopes *et al.*, 1982), utilizado neste estudo, é um modelo hidrológico do tipo chuva-deflúvio que necessita das informações de precipitação, vazão e evapotranspiração como dados de entrada de sua modelagem. Além disso, para que a calibração seja feita de forma consistente, os parâmetros iniciais que caracterizam a bacia devem estar próximos da realidade local.

Os parâmetros do modelo são:

- Str capacidade de saturação do solo, em mm.
- Pes parâmetro de escoamento superficial.
- Crec coeficiente de recarga.
- Kk coeficiente de recessão, em  $mês^{-1}$

A Figura 2 ilustra a estrutura da versão mensal, cujas funções de transferência do modelo.

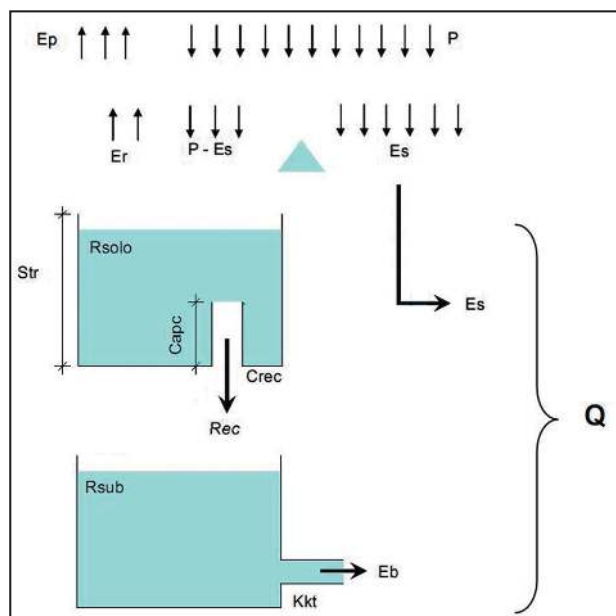


Figura 2 Representação Esquemática do Modelo SMAP (adaptado de ONS, 2005).

Onde:

- Rsolo armazenamento no reservatório do solo (zona aerada).
- Rsub armazenamento no reservatório subterrâneo (zona saturada).
- P chuva incidente.
- Es escoamento superficial (diferença entre a chuva e a infiltração).
- Ep evaporação potencial atuante. Er evapotranspiração real.
- Rec recarga subterrânea, corresponde à percolação do reservatório superior.
- Eb escoamento de base.

As séries históricas de precipitação a serem inseridas no modelo SMAP foram obtidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA). As séries de vazão foram obtidas através do site do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Como os dados pluviométricos possuíam falhas de preenchimento, utilizou-se o método da ponderação regional, que é um método simplificado, geralmente utilizado para o preenchimento de séries

mensais e anuais, onde as falhas de um posto são preenchidas através de uma ponderação com base nos dados de pelo menos três postos vizinhos, que devem ser de regiões climatológicas semelhantes a do posto em estudo e ter uma série de dados de no mínimo 10 anos.

Designando por x a estação que apresenta falhas e por A, B e C as estações vizinhas, pode-se determinar a precipitação desta estação através da seguinte equação:

$$P_x = \frac{1}{3} \cdot \left( P_a \cdot \frac{M_x}{M_a} + P_b \cdot \frac{M_x}{M_b} + P_c \cdot \frac{M_x}{M_c} \right) \quad (1)$$

Onde:

- $P_x$ : É a variável que guardará os dados corrigidos
- $M_x$ : Média aritmética da estação com falha
- $M_a, M_b$  e  $M_c$ : Média aritmética das estações vizinhas
- $P_a, P_b$  e  $P_c$ : É o dado da estação vizinha, ao posto com falha, do mesmo ano que utilizamos para preencher a falha.

Para verificar a homogeneidade dos dados obtidos foi feita a análise de consistência. A partir desta análise é possível observar se houve alguma anormalidade na estação pluviométrica, tal como mudança de local ou das condições do aparelho ou modificação no método de observação.

Par isso, foi utilizado o método da dupla massa que consiste em selecionar os postos de uma região, acumular para cada um deles o valor total anual, plotar em um gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto a consistir (eixo ordenado) com os valores médios das precipitações anuais acumuladas em vários pontos da região (eixo das abcissas) que servirá como base para comparação.

Se os valores dos postos a consistir forem proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar segundo uma única retas. A declividade desta reta determina o fator de proporcionalidade entre ambas as séries. Quando os pontos não se alinham podem ocorrer as seguintes situações:

a) Mudança na declividade: determina duas ou mais retas. Constitui o exemplo típico da ocorrência de erros sistemáticos, mudança nas condições de observação ou no meio físico, como alterações climáticas. Para se considerar a existência de mudança na declividade é prática comum exigir-se a ocorrência de pelo menos 5 pontos sucessivos alinhados segundo a nova tendência.

b) Alinhamento dos pontos em retas paralelas: ocorre quando existem erros de transcrição de um ou mais dados ou pela presença de valores extremos em uma das séries plotadas. A ocorrência de alinhamentos, segundo duas ou mais retas aproximadamente horizontais (ou verticais), pode ser a evidência de postos com diferentes regimes pluviométricos.

c) Distribuição errática dos pontos: geralmente é resultado da comparação de postos com diferentes regimes pluviométricos, sendo incorreta toda associação que se deseje fazer entre os dados dos postos plotados.

d) Distribuição dos dados ao longo de uma única reta: é a situação ideal que caracteriza dados sem inconsistência.

Calibrar um modelo significa determinar o conjunto de valores de parâmetros, que uma vez substituído nas equações do modelo, resultará na melhor aproximação das vazões simuladas às vazões observadas (Silva, 1990).

Os parâmetros de calibração utilizados foram:

- Str: capacidade de saturação do solo (mm).
- Capc: capacidade de campo (%).
- Crec: parâmetro de recarga subterrânea (%).
- K2t: constante de recessão do escoamento superficial (mês).
- Kkt: constante de recessão do escoamento básico (mês).

Atualmente, há um grande número de técnicas de otimização disponíveis. Um procedimento típico para estimar os valores ótimos de parâmetros de modelos chuva-vazão considera os seguintes elementos: função objetivo (FO); algoritmo de otimização; critério de parada (Bravo, 2007). Uma

das etapas deste processo consiste na escolha da função objetivo que irá ser maximizada ou minimizada através de algum método de otimização.

Segundo Fernández Bou *et al.* (2015), os parâmetros que foram empregados como função objetivo no processo de calibração automática deste modelo são:

$$E = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - Q_c(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0(i) - \bar{Q}_0)^2} \right) \quad (2)$$

$$MAPLE = \left( \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n |Q_0(i) - Q_c(i)|}{Q_0(i)} \right) \quad (3)$$

$$CEF = (1 - MAPLE) + E; \quad - \alpha \leq$$

$$C.Eficiência \leq 2$$

Onde:

▪ E: Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, adimensional.

▪ MAPE: Erro de percentagem média absoluta (do inglês mean absolute percentage error), adimensional.

▪ C. Eficiência: Coeficiente de eficiência utilizado no SMAP, adimensional.

▪  $Q_0(t)$ : Vazão observada, em  $m^3/s$ .

▪  $Q_c(t)$ : Vazão calculada, em  $m^3/s$ .

▪  $Q_0$ : Média das vazões observadas, em  $m^3/s$ .

▪ n: número de amostras

O coeficiente de Nash- Nash-Sutcliffe (E) apresenta valores sempre inferiores à unidade, podendo variar na faixa de valores compreendidos entre  $-\infty$  e 1. Valores elevados do coeficiente de eficiência (próximos à unidade) indicam elevada associação entre os dados observados e calculados, representando um bom ajuste do modelo aos dados de campo. A obtenção de um coeficiente de eficiência igual à unidade representaria o ajuste perfeito (ou seja, a coincidência perfeita) entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, esse coeficiente é mais sensível aos desvios nas vazões mais elevadas (Braga, 2009).

O erro relativo médio (MAPE) também apresenta valores sempre inferiores à unidade, podendo variar na faixa de valores compreendidos entre  $-\infty$  e 1. Da mesma forma, a obtenção de um coeficiente de Nash igual à unidade representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, o coeficiente de erro relativo é mais sensível aos desvios nas vazões mais baixas (Braga, 2009).

Como o Coeficiente de Eficiência (Cef) é a soma dos dois coeficientes, o mesmo pode variar entre  $-\infty$  e 2, sendo que a obtenção de uma soma igual a 2 representaria o ajuste perfeito entre as vazões observadas e calculadas. Devido à sua formulação, este coeficiente, utilizado na função objetivo para calibração automática do modelo, é sensível aos desvios em todo o período do ano, tanto nas vazões mais baixas, quanto nas vazões mais elevadas (Braga, 2009).

- teste de sinal: corresponde a um método bastante simples para verificar se a série de vazões calculada apresenta erros sistemáticos. O teste corresponde em associar o índice +1 a cada elemento superestimado da série (ou seja, nos casos em que a vazão calculada é superior à vazão observada) e o índice -1 a cada elemento subestimado da série (ou seja, nos casos em que a vazão calculada é inferior à vazão observada). Os índices são somados e comparados ao valor esperado (zero). Desta forma, caso a soma dos índices seja igual ou próxima a zero, não se constata a presença de erros sistemáticos série de vazões calculadas. Por outro lado, valores muito superiores ou muito inferiores a zero representam, respectivamente, uma tendência do modelo em superestimar ou subestimar o cálculo das vazões (Noronha, 2011).

- Erro relativo quadrático médio ( $\lambda^*$ ) dado por:

$$\lambda^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{obs} - Q_{calc}}{Q_{obs}} \right)^2 \quad (4)$$

Onde:

- $Q_{obs}$  (t): Vazão observada, em  $m^3/s$ .
- $Q_{calc}$  (t): Vazão calculada, em  $m^3/s$ .
- n: número de amostras

Lopes (1999) recomenda escolher o ano hidrológico da região em estudo e dessa forma, iniciar a calibração pelo mês mais seco, pois nesse período a umidade do solo e a vazão básica estão em seus valores mínimos. O armazenamento do período (balanço) deve ser próximo de zero. Isto indica que não está se retendo ou liberando água dos reservatórios do solo de forma tendenciosa. A variação dos reservatórios deve ser cíclica acompanhando a sazonalidade da região.

A recarga e o escoamento básico devem ser aproximadamente iguais. Diferenças entre recarga e escoamento básico indicam problemas com os parâmetros “Crec” (coeficiente de recarga) e “Kkt” (constante de recessão do escoamento básico) (Lopes, 1999).

O modelo SMAP foi calibrado com os valores de chuva e vazão reais da sub-bacia e estes valores foram utilizados para validar o modelo com os dados de chuva real da bacia, da chuva simulada pelo modelo RegCM e da chuva simulada pelo modelo após a remoção de viés.

Para a validação do modelo foram utilizados eventos distintos da etapa de calibração, porém considerando-se a média dos parâmetros obtidos na calibração. Na etapa de validação, há a atualização apenas das variáveis de inicialização do modelo (ONS, 2005).

### 3 Resultados

Analisando a sazonalidade da bacia, representada pela Figura 3, percebe-se que esta região tem seu regime de chuvas bem definido. O trimestre mais seco encontra-se entre os meses de junho a agosto. O período mais chuvoso situa-se nos entre os meses de novembro e fevereiro, onde os índices pluviométricos podem chegar a 350 mm.

Na fase de calibração da bacia o parâmetro encontrado para a capacidade de saturação do solo (Str) foi aproximadamente 1600 mm. O coeficiente de recessão do escoamento superficial (k2t) encontrado foi cerca de 3,5 meses-1. A capacidade de campo (Capc) foi aproximadamente 6% e o coeficiente de recessão do escoamento básico (k) foi igual a 6 meses-1, conforme descrito na Tabela 2.

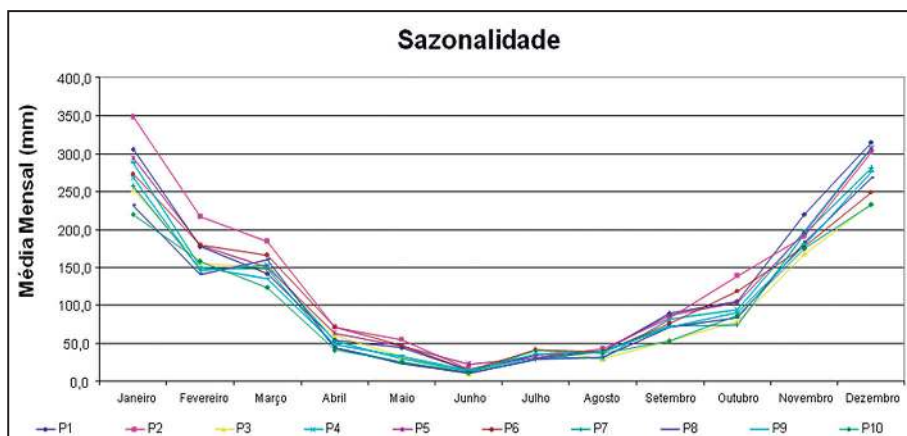


Figura 3 Sazonalidade da bacia.

Str	K2t	Capc	K
1.600,00	3,45	6,07	6

Tabela 2 Parâmetros médios da fase de calibração.

Os coeficientes utilizados para verificar a eficiência da fase de calibração podem ser observados da Tabela 3. Observa-se que o coeficiente de eficiência não variou, atingindo o valor 1,75 em ambas as fases de calibração. O teste do sinal (*Sign Test*), que mostra a tendência do modelo em superestimar ou subestimar vazões, apresentou variabilidade média, na primeira fase obteve-se um valor muito próximo a -4 e na segunda, obteve-se um valor a próximo a -6, o que caracteriza uma pequena tendência da modelagem em subestimar as vazões calculadas.

Data	C. Eficiência	Sign Test	Erro R.Q.
Junho 1991 a maio 1996	1,75	-4,30	2,94
Junho 1996 a Maio 2001	1,75	-5,7	3,13

Tabela 3 Valores da eficiência do modelo na fase de calibração; o erro relativo quadrático; (Erro R.Q.) foi baixo e atingiu um valor próximo a 3.

A Figura 4 apresenta os gráficos de vazão calculada e vazão observada no primeiro período de calibração (1991-1996), e observa-se que as vazões calculada e observada seguem a mesma tendência, havendo poucos picos onde a vazão calculada não acompanha a tendência da vazão real.

A Figura 5 apresenta os gráficos de vazão calculada e vazão observada no segundo período de calibração da bacia (1996-2001), onde observa-se que existe uma similaridade de tendência, mas existem trechos notáveis de disparidades.

Na Tabela 4 estão os valores de eficiência encontrados na fase de validação entre 2001 e 2009. Pode-se observar que a validação com a chuva observada apresentou maior coeficiente de eficiência, atingindo o valor 1,6. Enquanto a validação com a chuva do modelo apresentou o menor coeficiente, atingindo um valor próximo a 0,3. Após a remoção de viés, a previsão de vazões utilizando atingiu uma eficiência de 1,35, o que representa um aumento de 350%.

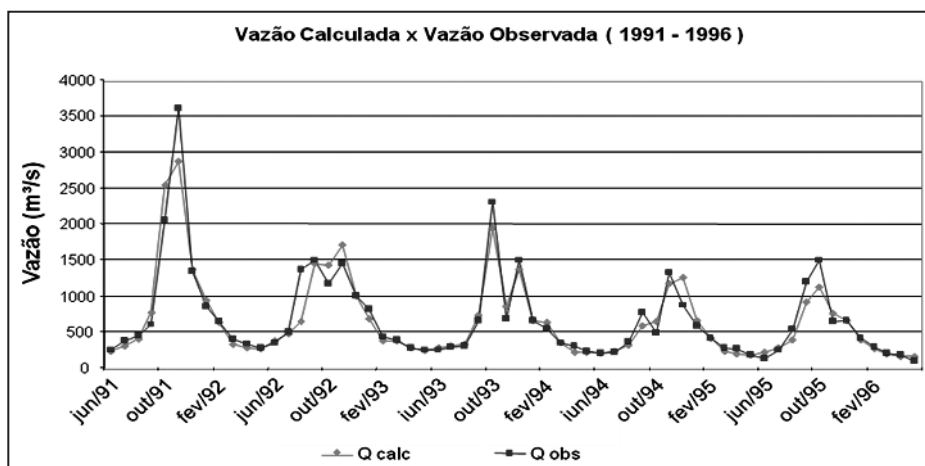
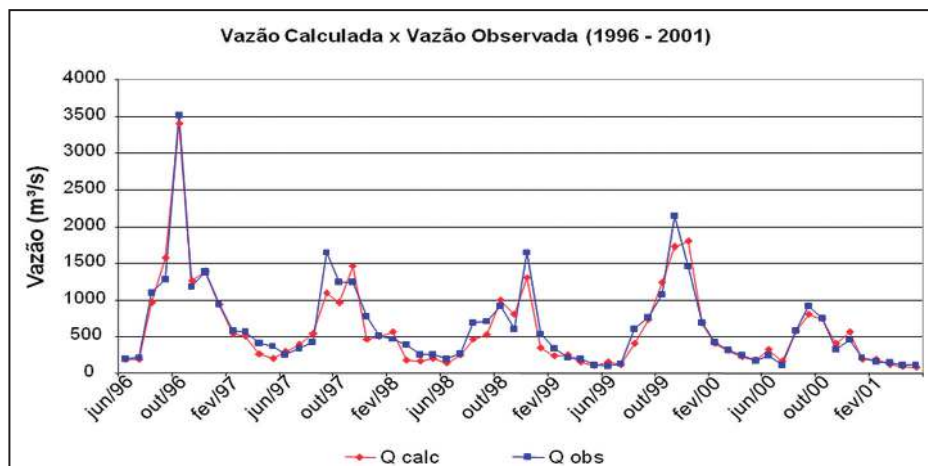


Figura 4 Etapa de Calibração: Hidrograma das Vazões Observadas e Calculadas (junho de 1991 a maio de 1996).



Figura 5 Etapa de Calibração: Hidrograma das Vazões Observadas e Calculadas (junho de 1996 a maio de 2001).



Entrada	C. Eficiência	Teste de Sinal	Erro R.Q.
Chuva Observada	1,61	-8,83	8,47
Chuva RegCM	0,26	-35,65	37,32
Chuva após Remoção de Viés	1,35	-8,18	13,69

Tabela 4 Valores da eficiência do modelo na fase de validação

No teste do sinal, as vazões calculadas a partir da chuva observada e da chuva prevista após a remoção de viés apresentaram um bom coeficiente, atingindo os valores de -8,8 e -8,2, respectivamente. Observa-se também que todas simulações realizadas apresentaram valores negativos de teste de sinal, o que indica que todas as modelagens SMAP da bacia têm tendência em subestimar as vazões calculadas.

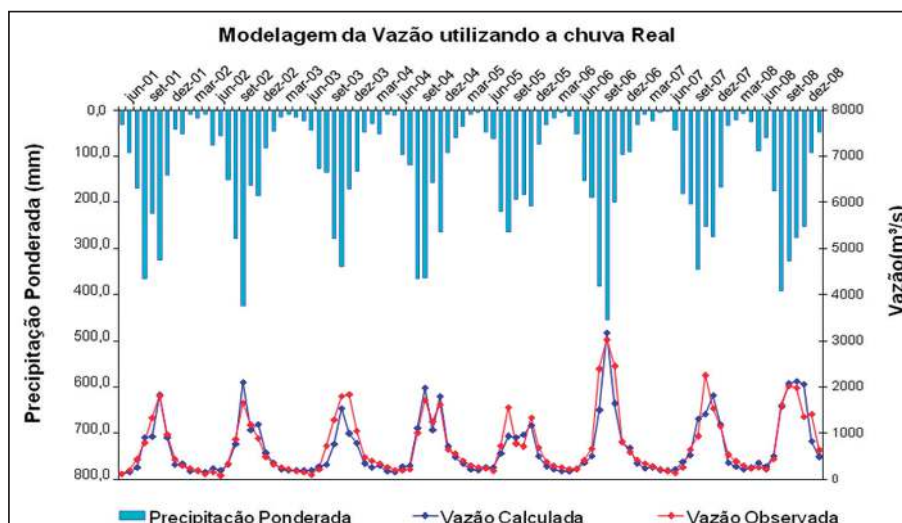
Quanto ao erro quadrático, o melhor resultado obtido foi para a chuva observada, que atingiu

um erro de aproximadamente 8,5. No entanto, as simulações de vazão utilizando a chuva modelo apresentaram um resultado próximo a 40, sendo o mais desfavorável. Após a remoção de viés, reduziu-se o erro da simulação em mais de 60%, passando ao valor de 13,7.

Através da Figura 6, observa-se que a vazão calculada a partir dos dados da chuva real segue a mesma tendência da vazão observada, mas existem pontos onde a modelagem subestima a vazão calculada e pontos onde a modelagem a superestima.

A Figura 7 ilustra o hidrograma da vazão calculada a partir da chuva do RegCM e o hidrograma da vazão observada, onde observa-se que a vazão calculada na simulação utilizando a chuva do modelo possui valores muito menores que a vazão observada, apesar de apresentar também uma sazonalidade.

Figura 6 Etapa de Validação – Chuva Real – Hidrograma das Vazões Observadas e Calculadas (junho de 2001 a maio de 2009).



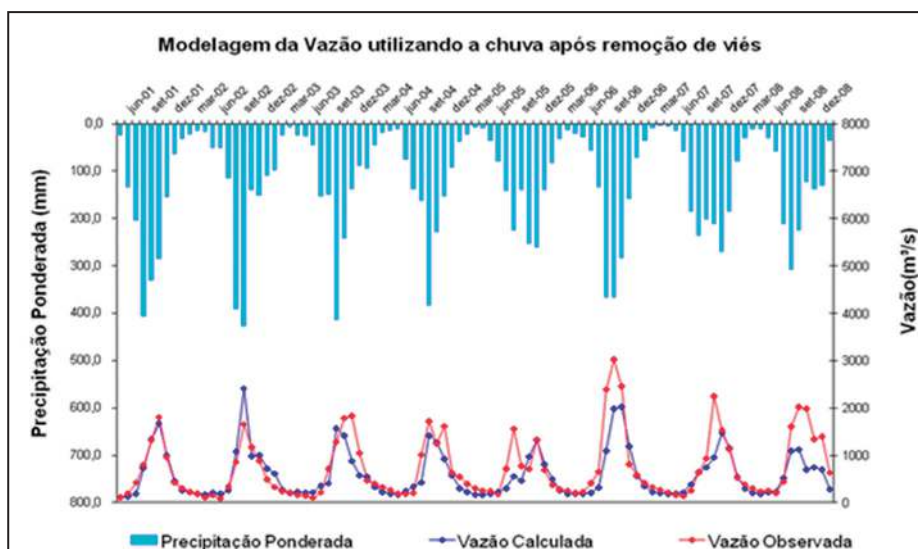


Figura 7 Etapa de Validação – Chuva com Remoção de Viés: Hidrograma das Vazões Observadas e Calculadas (junho de 2001 a maio de 2009).

As MLTs da vazão observada, da vazão calculada através da chuva real, da vazão calculada com a chuva do modelo RegCM e da vazão calculada após a remoção de viés para a bacia podem ser observadas na Tabela 5.

Observa-se que os melhores valores encontrados são sempre os da vazão calculada a partir da simulação feita com a chuva observada. Os menores valores de MLT correspondem à vazão calculada a partir da simulação com a chuva do modelo RegCM. Nos meses de julho, agosto e setembro são encontrados os menores valores de MLT e nos meses de janeiro, fevereiro e março são os que possuem MLT mais elevada.

A representação gráfica destas vazões médias mensais pode ser encontrada na Figura 8. Destaca-se que as vazões médias mensais calculadas pelo modelo SMAP tanto com a chuva observada quanto com a chuva prevista pelo RegCM após a remoção de viés, se assemelham muito as vazões observadas médias do período, tanto em relação a sua intensidade quanto em relação a sua variabilidade sazonal. Já as vazões calculadas pelo SMAP com a previsão de precipitação do modelo RegCM sem tratamento estatístico conseguem reproduzir somente a sazonalidade das vazões observadas, apresentando, no entanto, valores médios mensais muito inferiores aos observados no período de estudo.

O desvio padrão das MLTs da bacia pode ser observado na Tabela 6. A partir dela, nota-se que os menores valores de desvio foram encontrados nos valores de MLT calculados a partir da simulação com a chuva prevista diretamente do modelo RegCM.

Os valores mais elevados de desvio padrão das MLTs são observados nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. E os menores valores são encontrados nos meses de julho, agosto e setembro.

Vazão (m³/s)	Q_obs	Q_cal_Real	Q_cal_Mod	Q_cal_Rem
Jan	1593,3	1654,8	640,9	1384,3
Fev	1678,2	1455,7	644,8	1253,4
Mar	1291,3	1344,6	406,5	1069,6
Abr	803,4	698,1	227,8	696,2
Mai	451,9	372,9	148,9	428,8
Jun	325,8	245,4	111,6	262,9
Jul	266,1	221,8	93,9	197,1
Ago	210,0	191,2	87,2	192,3
Set	190,1	214,2	90,8	186,6
Out	191,4	237,2	106,2	208,9
Nov	410,2	387,1	178,2	336,2
Dez	1199,3	954,0	415,2	757,6
<b>Série Total</b>	<b>732,1</b>	<b>679,1</b>	<b>268,0</b>	<b>592,9</b>

Tabela 5 Valores de MLT da bacia; Q\_obs= Vazão observada; Q\_cal\_Real = Vazão calculada com a chuva real; Q\_cal\_Mod= Vazão calculada com a chuva do modelo; Q\_cal\_Rem= Vazão calculada com a remoção de viés.

Ao analisar o desvio padrão da série de dez anos de vazão, observa-se que a vazão calculada a partir da chuva modelo apresentou o menor valor de desvio padrão, enquanto a vazão real (observada) da bacia apresentou o maior índice de desvio. Os desvios padrões das simulações feitas após a remoção de viés da previsão de precipitação se aproximaram mais daqueles simulados com a precipitação real, mostrando que para que a variabilidade das vazões simuladas seja mais próxima da variabilidade da série histórica, é necessário um tratamento estatístico nas previsões de precipitação.

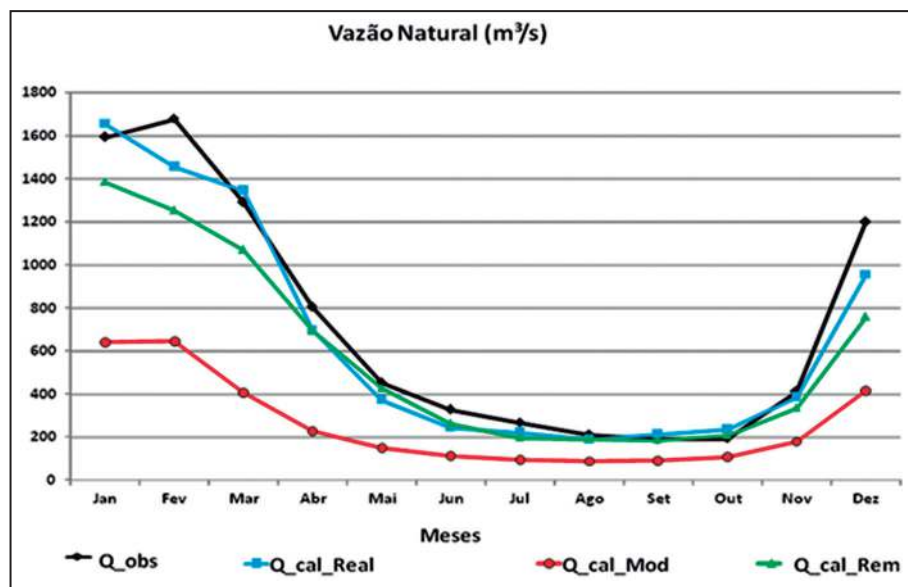


Figura 8  
 Variabilidade sazonal das vazões médias mensais calculadas com o modelo SMAP versus as vazões médias mensais observadas na UHe Três Marias no período de 2001 a 2009.

Vazão (m³/s)	Q_obs	Q_cal_Real	Q_cal_Mod	Q_cal_Rem
Jan	662,7	774,3	331,6	588,5
Fev	550,6	383,3	352,9	411,3
Mar	348,4	446,6	156,7	226,4
Abr	328,4	241,9	59,0	203,6
Mai	108,1	66,7	39,5	131,1
Jun	64,9	46,3	30,7	38,3
Jul	46,9	40,8	30,2	15,5
Ago	49,2	28,3	27,6	17,9
Set	45,2	66,8	30,0	29,0
Out	93,6	57,8	63,2	33,4
Nov	180,5	109,2	116,9	90,1
Dez	566,9	409,4	332,9	278,8
<b>Série Total</b>	<b>647,2</b>	<b>616,6</b>	<b>274,4</b>	<b>492,6</b>

Tabela 6 Valores desvio padrão das vazões; Q\_obs= Vazão observada; Q\_cal\_Real = Vazão calculada com a chuva real; Q\_cal\_Mod= Vazão calculada com a chuva do modelo; Q\_cal\_Rem= Vazão calculada com a remoção de viés.

#### 4 Considerações Finais

A análise da precipitação mostrou que a bacia analisada possui sazonalidade marcante, com totais bastante elevados de precipitação durante o verão.

A modelagem SMAP utilizando a chuva real da bacia apresentou a melhor correlação entre a

vazão real e a calculada na validação dos dez anos. No entanto, a modelagem utilizando a chuva do RegCM apresentou índices baixos de eficiência, caracterizando-se novamente que a chuva do modelo RegCM não pode ser utilizada diretamente no modelo SMAP sem o devido tratamento prévio. Após a remoção de viés da previsão de precipitação, o modelo apresentou bons índices. E, apesar do coeficiente de eficiência ainda ser menor que o encontrado utilizando a chuva real, a remoção de viés proporcionou uma melhora considerável na eficiência da modelagem, aumentando o coeficiente de eficiência do modelo SMAP em mais de 350%.

Em relação à simulação das médias de longo termo e da variabilidade da série, observou-se que os valores de MLT simulados com a precipitação real se aproximaram dos valores de vazão observados na bacia, bem como os desvios padrões. No entanto, as MLTs de vazões calculadas com a precipitação prevista pelo modelo RegCM foram muito menores do que aquelas realmente observadas, tanto em nível mensal quanto em relação aos totais médios da série completa. Já com as simulações realizadas no modelo SMAP com a precipitação do modelo RegCM, após a remoção estatística de sua tendência de subestimativa da precipitação, os valores de MLT se aproximam mais daqueles observados e dos simulados com o modelo SMAP com a chuva real.

Este mesmo comportamento é observado com os desvios padrões das simulações, indicando que a variabilidade temporal da precipitação prevista por modelos climáticos é normalmente menor do que aquela realmente encontrada na natureza. Desta forma, para a utilização dos resultados deste

tipo de modelagem é necessário à aplicação de técnicas estatísticas ou dinâmicas (regionalização de modelos), que tornem os seus resultados, tanto em relação a sua média quanto a sua variabilidade, comparáveis com aqueles observados na natureza.

Sendo assim, acredita-se que este trabalho tenha sido mais um a fortalecer a necessidade de se avaliar os resultados de modelos climáticos antes de sua utilização, seja em estudos de previsões sazonais ou de mudanças climáticas. Os modelos climáticos apresentam potencial para a elaboração deste tipo de estudo, como foi observado nas simulações após a remoção do viés da previsão de precipitação, mas necessitam sempre de uma análise minuciosa de suas previsões em situações climáticas passadas e, portanto, conhecidas. Somente após este tipo de avaliação eles devem ser utilizados em prognósticos de mudanças climáticas.

## 5 Agradecimentos

Os desenvolvedores deste estudo gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte financeiro dado ao estudo a partir do Edital Universal processo N° 454397/2014-3.

## 6 Referências

- Aitken, A.P. 1973. Assessing systematic errors inrainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 20: 121-136.
- Braga, R.S.; Cataldi, M. & Oliveira, H.C. 2009. Metodologia para Previsão de Vazões na Bacia do Rio Grande. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, Campo Grande, 2009, *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Bravo, J.M.; Allasia, D.G.; Collischonn, W; Tassi, R. & Meller, A. 2007. Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH I com fins educacionais. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo, 2007, *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Codevasf, Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Cadastro do Vale do São Francisco. Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br/>. Acesso em: agosto, 2011.
- Fernández Bou, A.S.; De Sá, R.V. & Cataldi, M. 2015. Flood forecasting in the upper Uruguay River basin. *Natural Hazards*, 79: 1239-1256.
- Giorgi, F.; Coppola, E.; Solmon, F.; Marioitti, L.; Sylla, M.B.; Bi, X.; Elguindi, N.; Diro, G.T.; Nair, V.; Giuliani, G.; Cozzini, S.; Guettler, I.; O'Brien, T.A.; Tawfik, A.B.; Shalapy, A.; Zakey, A.S.; Steiner, A.L.; Stordal, F.; Sloan, L.C. & Brankovic, C. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*, 52: 7-29.
- Grell, G.A.; Dudhia, J. & Stauffer, D.R. 1994. *Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Technical Report TN-398+STR. NCAR, Boulder, Colorado, 121p.
- Kiehl, J.T. & Gent, P.R. 2004. The Community Climate System Model, Version 2. *Journal of Climate*, 17: 3666-3682.
- Lopes, J.E.G.; Braga, B.P.F. & Conejo, J.G.L. 1982. *SMAP – A simplified hydrologic model, applied modelling in catchment hydrology*. Littleton, V.P. Singh.
- Lopes, J.E.G. 1999. *Manual do programa de simulação hidrológica SMAP*. 99p.
- Loveland, T.R.; Reed, B.C.; Brown, J.F.; Ohlen, D.O.; Zhu, Z.; Yang, L. & Merchant, J.W. 2000. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCOVER from 1-km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 303-330.
- Maidment, D.R. 1993. GIS and hydrologic modeling. In: GOODCHILD, M.F.; PARKS, B.O. & STEYAERT, L.T. (Eds.), *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, p. 147-167.
- Marengo, J.A.; Jones, R.; Alves, L.M. & Valverde, M.C. 2009a. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 15: 2241-2255.
- Marengo, J.A.; Ambrizzi, T.; Rocha, R.P.; Alves, L.M.; Cuadra, S.V.; Valverde, M.C.; Ferraz, S.E.T.; Torres, R.R. & Santos, D.C. 2009b. Future change of climate in South America in the late XXI Century: Intercomparison of scenarios from three regional climate models. *Climate Dynamics*, 35: 1073-1097.
- Marengo, J.A.; Nobre, C.A. & Chou, S.C. 2011. *Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido Sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia*. Relatório Técnico. São José dos Campos, INPE.
- Noronha, G.C. 2011. *Variação da Vazão Regularizada em Reservatórios em Função da Evolução do Volume Assoreado, Estudo de Caso: Lago de Juturnaiba, Estado do Rio de Janeiro*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense. Dissertação de Mestrado, 155p.
- Nuñez, M.N.; Solman, S.A. & Cabré, M.F. 2008. Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century. *Climate Dynamics*, 32(7-8): 1081-1095.
- Oleson, K.; Niu, G.-Y.; Yang, Z.-L.; Lawrence, D.M.; Thornton, P.E.; Lawrence, P.J.; Stöckli, R.; Dickinson, R.E.; Bonan, G.B.; Levis, S.; Dai, A. & Qian, T. 2008. Improvements to the community land model and their impact on the hydrological cycle. *Journal of Geophysical Research*, 113(G01021), doi:10.1029/2007JG000563.
- Pesquero, J.F.; Chou, S.C.; Nobre, C.A. & Marengo, J.A. 2010. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theoretical and Applied Climatology*, 99: 75-93.
- ONS, 2005 - Operador Nacional do Sistema Elétrico. *Revisão das Séries de Vazões Naturais nas Principais Bacias do SIN* – Relatório Executivo – Dezembro de 2005. Rio de Janeiro.
- Reynolds, R.W.; Rayner, N.A.; Smith, T.M.; Stokes, D.C. & Wang, W. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, 15: 1609-1625.
- Silva, L.P. 1990. *Calibração Automática de Modelos Tipo Chuva-Vazão Utilizando Técnicas de Suavização – Uma Aplicação ao Modelo SMAP-II*. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 155p.
- Simmons, A.; Uppala, S.; Dee, D. & Kobayashi, S. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *Newsletter*, 110: 25-35.