

## INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO TEMPORAL DOS DADOS NA CALIBRAÇÃO DE UM MODELO HIDROLÓGICO CONCEITUAL

*Paula Cunha David<sup>1\*</sup> & Debora Yumi de Oliveira<sup>2</sup> & Pedro Luiz Borges Chaffe<sup>3</sup>*

**Resumo** – Mecanismos que transformam a precipitação em escoamento acontecem com diferentes dinâmicas e escalas de tempo características, variando de minutos a centenas de anos. Os parâmetros de um modelo hidrológico requerem, portanto, diferentes resoluções temporais dos dados de chuva-vazão para serem corretamente estimados. Este trabalho avaliou a calibração e validação do modelo hidrológico conceitual HYMOD. Os dados de precipitação e vazão foram agrupados em resoluções temporais de 10 min, 30 min, 1, 3 e 6 horas. A calibração foi feita para períodos seco e úmido, considerando duas funções de verossimilhança diferentes: uma que considera os erros com distribuição gaussiana, homocedásticos e independentes; e outra que considera que os erros são gaussianos, heterocedásticos e independentes. A análise dos resultados foi realizada utilizando três métricas: confiabilidade, precisão e viés volumétrico. Os resultados mostraram que as resoluções temporais de 3 e 6 horas possuem maior confiabilidade, porém a precisão é muito parecida com as demais resoluções. Quanto às funções de verossimilhança, a que considera os erros heterocedásticos apresentou resultados melhores para as três métricas. Ainda, a calibração do período úmido é nitidamente melhor, mostrando a necessidade de modelos mais robustos para a modelagem de períodos secos.

**Palavras-Chave** – modelagem hidrológica, resolução temporal, calibração.

## THE INFLUENCE OF TEMPORAL DATA RESOLUTION ON A CONCEPTUAL HYDROLOGICAL MODEL

**Abstract** - Mechanisms that transform rainfall into runoff occur with different dynamics and characteristic time scales, ranging from minutes to hundreds of years. The parameters of a hydrological model therefore require different temporal resolutions of the rainfall-runoff data to be correctly estimated. This work evaluated the calibration and validation of the conceptual hydrological model HYMOD. The precipitation and streamflow data were aggregated in temporal resolutions of 10 min, 30 min, 1, 3 and 6 hours. Calibration was made for a dry period and a wet one, considering two different likelihood functions: one which considers errors with gaussian distribution, homoscedastic and independent; and another which considers errors to be gaussian, heteroscedastic and independent. Results were analyzed using three metrics: reliability, precision and volumetric bias. It was shown that the temporal resolutions of 3 and 6 hours have greater reliability; however, the precision is very similar to the other resolutions. As for the likelihood functions, the one with heteroscedastic errors presented better results for the three metrics. Also, Calibration of the wet period is clearly better, showing the need for more robust models for dry periods.

**Keywords** – hydrological modeling, temporal resolution, calibration.

<sup>1</sup> Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, paulacunhadavid@gmail.com

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, debora.ydo@gmail.com

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pedro.chaffe@ufsc.br

\* Autora Correspondente

## INTRODUÇÃO

Modelos hidrológicos de chuva-vazão são amplamente utilizados para representar os diversos processos que ocorrem com a água na natureza, seja o escoamento superficial, subterrâneo, interceptação, entre outros. Geralmente os modelos possuem parâmetros que não podem ser medidos diretamente em campo ou obtidos por estimativa prévia. Por isso, é feita a calibração dos parâmetros a partir de dados históricos de chuva e vazão, que consiste em encontrar o melhor conjunto de parâmetros para aquela bacia hidrográfica. Assim, com estes parâmetros, é possível fazer simulações de eventos hidrológicos fora do período histórico utilizado para a calibração (BEVEN, 2012). Porém, para um modelo ser útil em simulações, os valores dos parâmetros devem refletir corretamente as propriedades invariantes dos componentes do sistema que eles representam (VRUGT *et al.*, 2008).

A transformação da precipitação em escoamento inclui diversos processos, com várias dinâmicas e escalas de tempo características, variando de minutos a centenas de anos (BLÖSCHL; SIVAPALAN, 1995). Enquanto o tempo de resposta do escoamento subterrâneo é lento, a resposta do escoamento superficial é rápida. Os parâmetros do modelo requerem, portanto, diferentes resoluções temporais dos dados de chuva-vazão para serem corretamente estimados.

A correta identificação de parâmetros que descrevem diferentes componentes de resposta de vazão depende da resolução temporal dos dados de entrada para a calibração. Parâmetros que descrevem processos lentos possuem menor sensibilidade, mantendo-se constantes entre as resoluções temporais, enquanto os parâmetros que descrevem a resposta rápida possuem alta sensibilidade (KAVETSKI *et al.*, 2011). Diferentes resoluções temporais podem influenciar de maneira diferente cada parâmetro a ser estimado, sendo que uma alta resolução dos dados de chuva e vazão permite, geralmente, uma melhor performance do modelo (LITTLEWOOD; CROKE, 2008; WANG *et al.*, 2009; KAVETSKI *et al.*, 2011). Bacias pequenas tipicamente apresentam respostas mais rápidas à precipitação e, portanto, requerem resoluções maiores do que bacias grandes. Um passo de tempo diário poderia resultar em uma pior representação dos picos de vazão e do tempo de pico (FICCHI *et al.*, 2016).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a calibração e validação de um modelo hidrológico conceitual HYMOD para uma bacia experimental florestal em Santa Catarina. Foram usados dados de precipitação e vazão com diferentes resoluções temporais, variando de 10 minutos a 6 horas, em um período total de três meses. A calibração foi feita com duas funções de verossimilhança diferentes, uma vez que o uso de uma função de verossimilhança mais adequada estabiliza, e muitas vezes reduz as dependências da resolução temporal (KAVETSKI *et al.*, 2011).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

O modelo HYMOD foi aplicado na bacia experimental do Rio Saci, no município de Rio Negrinho, localizada na região norte do estado de Santa Catarina. A bacia possui uma área de aproximadamente 10,2 ha. A vegetação consiste em reflorestamento de pinus, com 8,7 ha; e vegetação nativa, com 1,5 ha e principalmente como mata ciliar (CHAFFE, 2009; SANTOS 2009). A vazão foi medida por um sistema de monitoramento do nível d'água no rio, com uma calha Parshall, vertedor triangular, sensor de nível e régua linimétrica, e transformado através da curva-chave (CHAFFE, 2009; SANTOS 2009). A série de vazão vai de 23/08/2008 até 17/11/2008, com resolução temporal de 10 minutos. A evapotranspiração potencial diária foi calculada com dados da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Rio

Negrinho. Utilizou-se o método de Penman modificado com os dados de temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação.

### Modelo HYMOD

O HYMOD (BOYLE, 2000) é um modelo hidrológico de chuva-vazão conceitual baseado no princípio da distribuição de probabilidade da capacidade de armazenamento do solo de Moore (1985). Ou seja, a variação da distribuição da capacidade de armazenamento da bacia é calculada a partir de funções de distribuição de probabilidade, conforme a função de distribuição:

$$F = 1 - \left(1 - \frac{S_m}{S_{m,máx}}\right)^{b_{exp}} \quad (1)$$

na qual  $S_{m,máx}$  é a capacidade máxima de armazenamento na bacia e  $b_{exp}$  controla o grau de variabilidade espacial da capacidade de armazenamento.

O modelo considera a bacia hidrográfica como um conjunto de pontos discretos, sendo que cada um possui uma capacidade de armazenamento de água calculado a partir desta distribuição de probabilidade, não considerando as características físicas da bacia. A chuva que ultrapassa a capacidade máxima de escoamento é dividida entre três tanques de fluxo rápido em série (que representam o escoamento superficial) e um tanque de fluxo lento, que representa o escoamento subterrâneo. Estes tanques são considerados reservatórios lineares. O modelo possui cinco parâmetros a serem calibrados: capacidade máxima de armazenamento na bacia hidrográfica ( $S_{m,máx}$ ); grau de variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo ( $b_{exp}$ ); fator de distribuição do fluxo entre as duas séries de tanques ( $\alpha$ ); o tempo de residência dos três tanques rápidos ( $R_f$ ); e o tempo de residência do tanque lento ( $R_s$ ) (Figura 1).

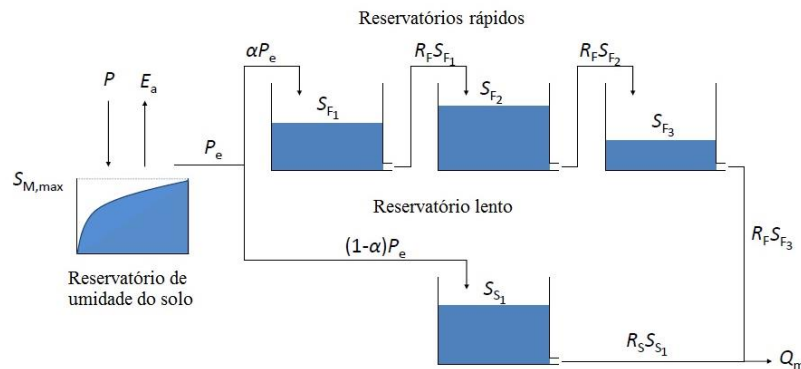


Figura 1 – Esquema do modelo hidrológico conceitual HYMOD.

### Calibração do Modelo e o *Differential evolution adaptive Metropolis* – DREAM

O algoritmo de calibração *Differential evolution adaptive Metropolis* – DREAM (VRUGT *et al.*, 2008; 2009) é um amostrador *Monte Carlo Markov Chain* (MCMC) que utiliza evolução diferencial com algoritmos genéticos para a evolução da população, com o critério de Metropolis para decidir quais pontos candidatos devem ser aceitos. O DREAM executa várias cadeias diferentes simultaneamente para a exploração global, e ajusta automaticamente a escala e a orientação da distribuição da proposta usando a evolução diferencial. Para este trabalho utilizou-se uma adaptação, o DREAM<sub>(ZS)</sub> (LALOY; VRUGT, 2012), que gera pontos candidatos de um arquivo de estados passados, em vez da posição atual das cadeias. Os valores iniciais dos parâmetros foram amostrados de uma distribuição uniforme (Tabela 1). O modelo HYMOD foi calibrado considerando-se duas funções de verossimilhança diferentes: uma que considera que os resíduos possuem uma distribuição gaussiana, são homocedásticos e independentes (L1); e outra que considera uma distribuição gaussiana e heterocedástica, a *Generalized Likelihood function* (L2)

(SCHOUPS; VRUGT, 2010). Para a calibração dividiu-se a série de dados em duas – seca e úmida, sendo ambas calibradas e validadas com os parâmetros da outra. Ainda, os dados foram agrupados e calibrados para resoluções temporais de 10 min, 30 min, 1h, 3h e 6 horas.

Tabela 1. Intervalos dos parâmetros do modelo HYMOD utilizados como informação prévia na calibração.

| Parâmetro   | Descrição   | Intervalo |        | Unidade        |
|-------------|---|-----------|--------|----------------|
|             |   | Mínimo    | Máximo |                |
| $S_{m,máx}$ | Capacidade máxima de armazenamento                              | 1,000     | 500,00 | mm             |
| $b_{exp}$   | Grau de variabilidade espacial da capacidade de umidade do solo | 0,100     | 2,00   | -              |
| $\alpha$    | Fator de distribuição do fluxo entre as duas séries de tanques  | 0,100     | 0,99   | -              |
| $R_f$       | Tempo de residência dos tanques rápidos                         | 0,001     | 0,10   | passo de tempo |
| $R_s$       | Tempo de residência do tanque lento                             | 0,100     | 0,99   | passo de tempo |

A performance da calibração foi avaliada utilizando três métricas: confiabilidade, que quantifica a porcentagem dos dados observados de vazão que estão dentro do intervalo de incerteza (SMITH, 2010); a precisão, que é espessura do intervalo de incerteza (P); e viés volumétrico, que é o erro do balanço hídrico para todo o período simulado (MCINERNEY *et al.*, 2017). Este último foi calculado apenas para o conjunto de parâmetros que maximizava a função de verossimilhança. Para os dois últimos o desempenho ideal é o mais próximo de zero.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A calibração do modelo foi melhor no período úmido do que no período seco, para ambas as funções de verossimilhança (Figura 2). No geral, modelos conceituais têm uma melhor performance em períodos úmidos do que em secos (SCHOUPS; VRUGT, 2010). O modelo não foi capaz de simular um longo período de vazões baixas e poucos eventos de precipitação (começo do período seco), mesmo considerando-se condições iniciais diferentes. Na calibração com a função de verossimilhança L1 as altas vazões ficaram de fora da faixa de incerteza, enquanto que a incerteza foi superestimada para valores baixos de vazão. Os picos foram melhores representados pela faixa de incerteza obtida com a utilização da L2.

As distribuições posteriores dos parâmetros do modelo HYMOD apresentaram valores diferentes para cada função de verossimilhança para todas as resoluções temporais analisadas (Figura 3). Ainda, observa-se uma maior dispersão dos valores dos parâmetros com a função L2, enquanto com a L1 a distribuição está mais concentrada. Uma vez que as premissas da função L1 e L2 não são atendidas – os resíduos não são gaussianos nem independentes (resultados não mostrados) – existe uma limitação quanto ao uso dos valores dos parâmetros encontrados (KAVETSKI *et al.*, 2011).

A confiabilidade foi calculada variando o intervalo de incerteza de 50 a 100%; quanto mais próxima do valor do intervalo considerado, melhor a calibração. Para o período úmido, tanto a função de verossimilhança L1 quanto a L2 superestimaram a faixa de incerteza, sendo que a L1 superestimou mais que a L2 (Figura 5). Em ambos os casos as resoluções temporais de 3 e 6 horas foram as que mais se aproximaram do valor do intervalo de incerteza considerado, sendo que para intervalos de incerteza maiores de 80% estas resoluções apresentaram os melhores resultados. Para o período seco, a faixa de incerteza foi superestimada considerando um intervalo de incerteza maior de 80%, e subestimada considerando um intervalo menor para as duas funções de verossimilhança. A precisão (espessura do intervalo de incerteza) foi maior com a função de verossimilhança L1, de forma mais significativa para o período úmido, no qual foi 0.54, considerando uma resolução temporal de 10 min, enquanto que para a L2 foi de 0.17. O período seco apresentou resultados



piores para as duas funções de verossimilhança, tendo a L1 resultados piores que a L2. Quanto ao viés volumétrico, este foi maior no período seco do que no úmido para todas as resoluções temporais e para as duas funções de verossimilhança (Figura 6). No período úmido, a função L2 apresentou resultados piores do que a L1 para todas as resoluções temporais, enquanto o inverso ocorreu no período seco. O viés volumétrico aumentou conforme aumentou a resolução temporal, chegando a um aumento de 69% para o período úmido com a L2 e com 72% para a L1. Já no período seco o viés volumétrico manteve-se mais estável entre as resoluções temporais.

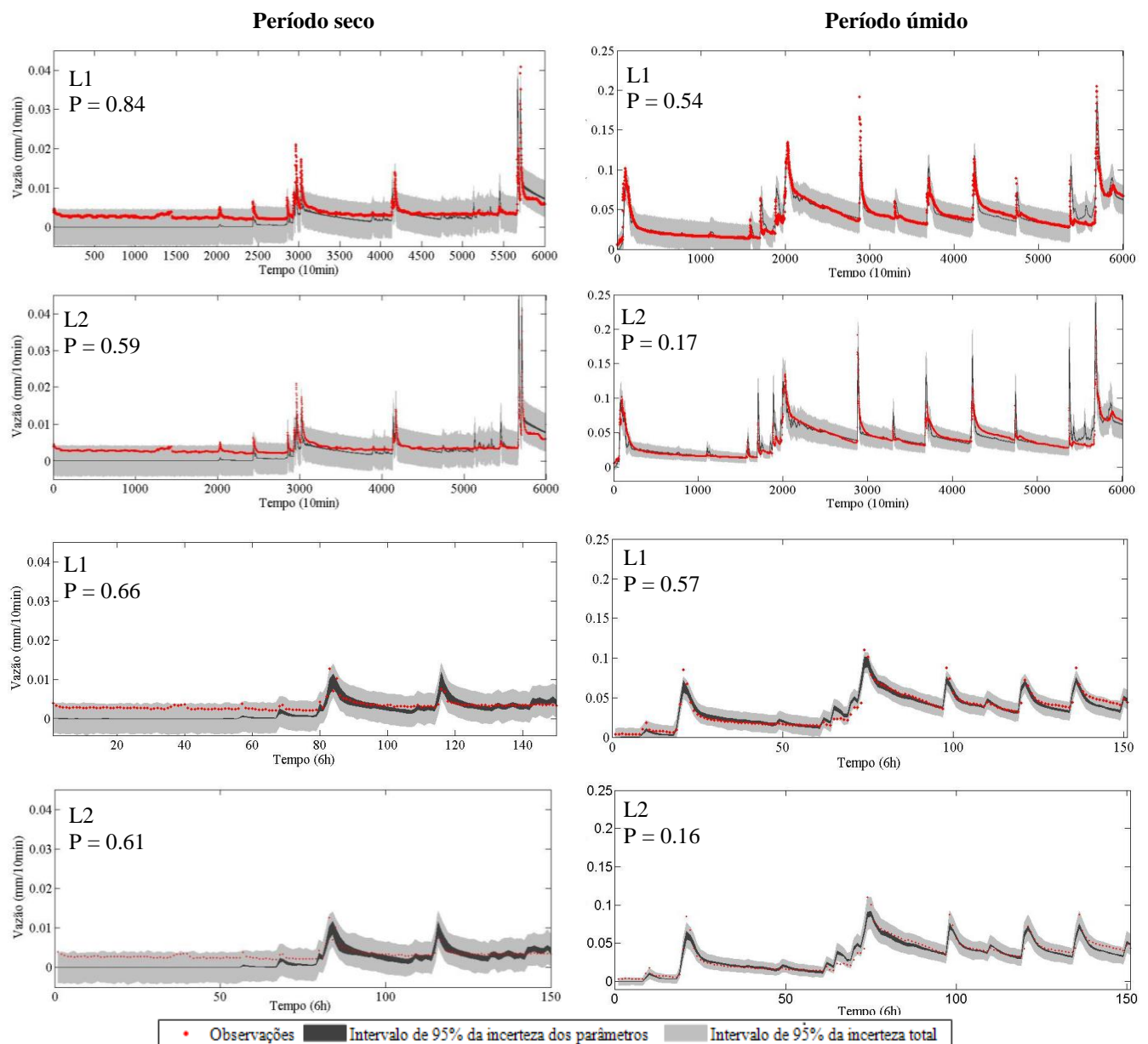


Figura 2 – Resultados da calibração e incerteza das simulações da vazão para as resoluções temporais de 10 minutos (duas primeiras linhas) e 6 horas (duas últimas linhas) com as funções de verossimilhança L1 e L2 (demais resoluções temporais não mostradas) para períodos seco (esquerda) e úmido (direita). Série de dados observados (pontos vermelhos), faixa de 95% de incerteza total (cinza claro) e faixa de 95% de incerteza relacionada aos parâmetros (cinza escuro).

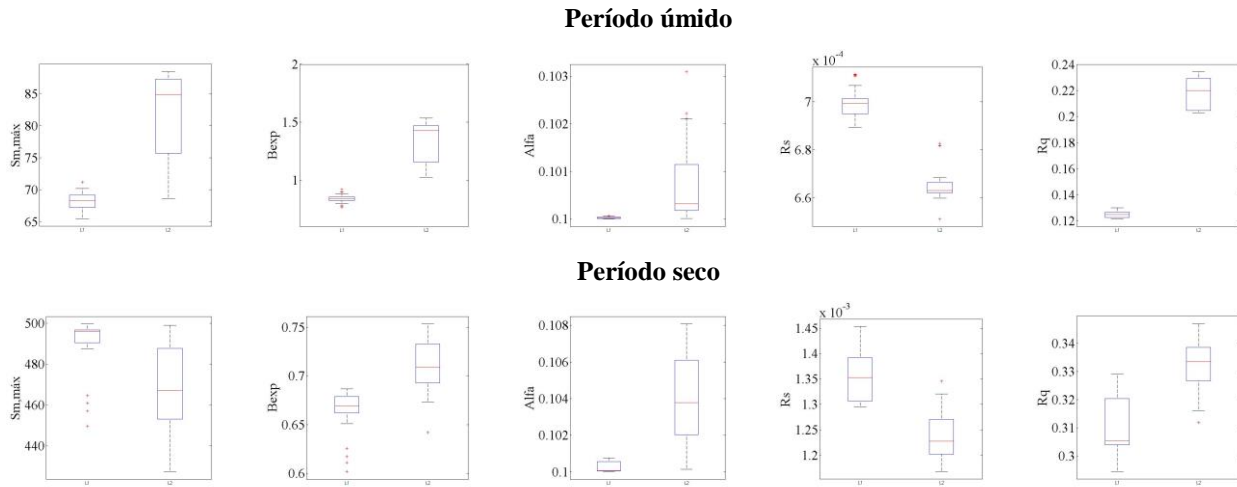


Figura 3 – Distribuição posterior dos parâmetros do modelo HYMOD para cada função de verossimilhança (L1 e L2) para os períodos úmido e seco para a resolução temporal de 10 minutos (demais resoluções não mostradas). Os diagramas de caixa foram feitos com os últimos 1.500 conjuntos de parâmetros gerados pelo algoritmo DREAM<sub>(ZS)</sub>.

A validação dos parâmetros do período úmido no período seco resultou em uma superestimativa da vazão, enquanto na validação no período úmido ocorreu uma subestimativa (Figura 4). Isso provavelmente se dá pelo fato que no período seco o parâmetro  $S_{m,max}$  varia entre 430 e 500 milímetros, para ambas funções de verossimilhança, enquanto no período úmido varia de 65 a 90 mm. Uma vez que esse parâmetro controla a quantidade de chuva efetiva e indiretamente o escoamento, ele é possivelmente o responsável por estes resultados.

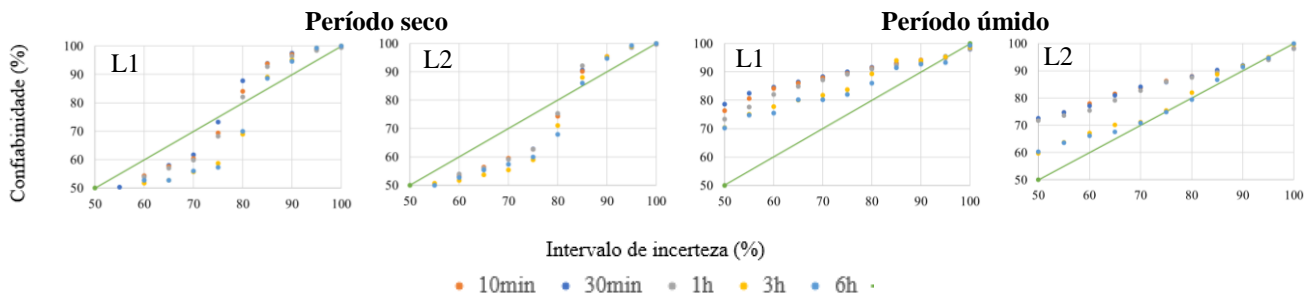


Figura 4 – Confiabilidade do intervalo de incerteza para as duas funções de verossimilhança (L1 e L2) para os períodos seco (esquerda) e úmido (direita) para as resoluções temporais de 10min, 30min, 1h, 3h e 6h. (Linha 1:1 apenas para referência).

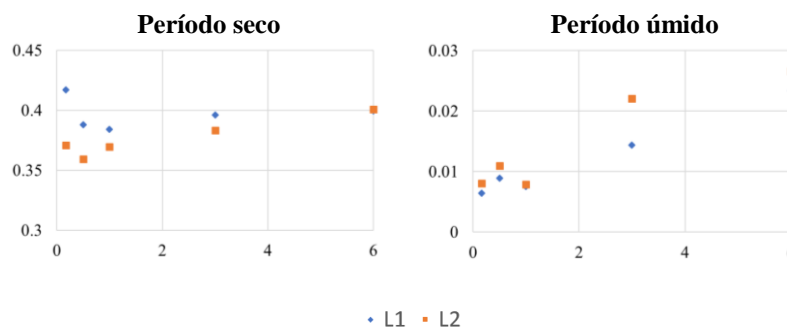


Figura 5 – Viés volumétrico calculado para os períodos seco (esquerda) e úmido (direita) com as duas funções de verossimilhança L1 e L2 para as resoluções temporais de 10min, 30min, 1h, 3h e 6h. Este índice foi calculado apenas para o conjunto de parâmetros que maximiza a função de verossimilhança.

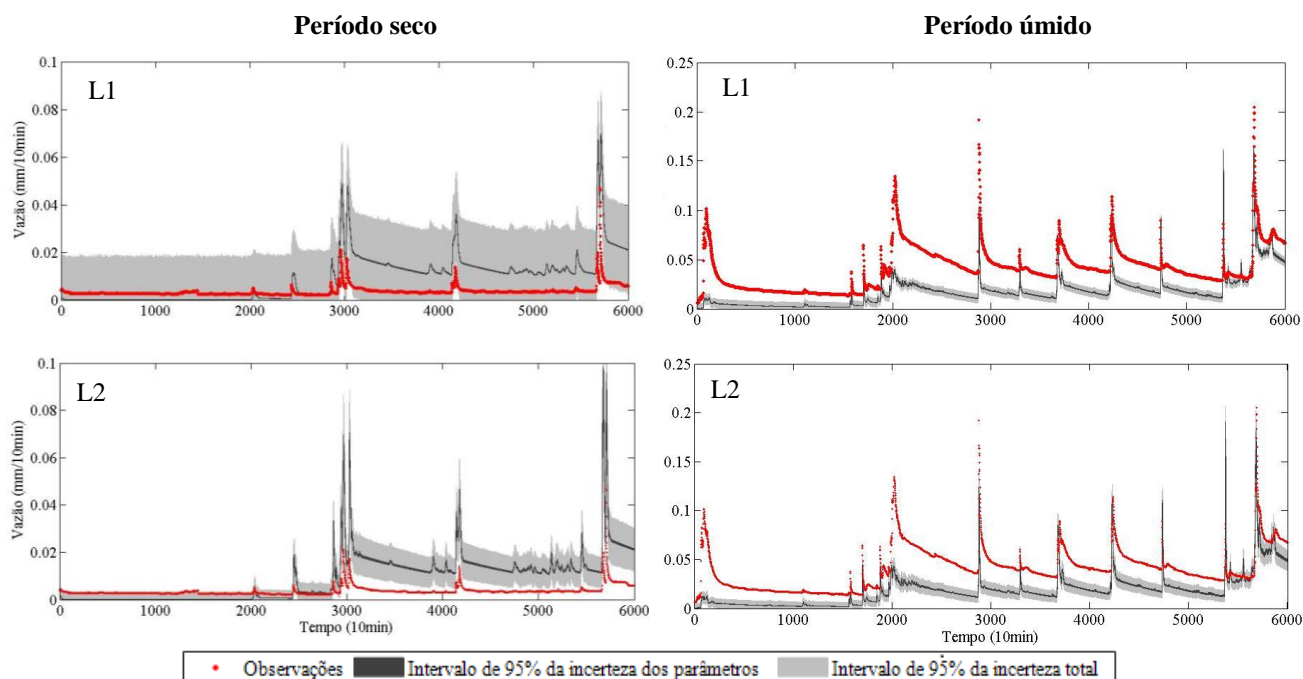


Figura 6 – Resultados da validação e incerteza das simulações da vazão para as resoluções temporais de 10 minutos com as funções de verossimilhança L1 e L2 (demais resoluções temporais não mostradas) para períodos seco (esquerda) e úmido (direita). Os parâmetros calibrados no período úmido foram validados no período seco e os calibrados no período seco validados no úmido. Série de dados observados (pontos vermelhos), faixa de 95% de incerteza total (cinza claro) e faixa de 95% de incerteza relacionada aos parâmetros (cinza escuro).

## CONCLUSÕES

Neste trabalho analisou-se a influência da resolução temporal dos dados na calibração e validação de um modelo hidrológico conceitual. Ainda, foi analisada a utilização de duas funções de verossimilhança na calibração. É importante que sejam consideradas as premissas da função de verossimilhança para a calibração, uma vez que as funções testadas apresentaram diferentes distribuições posteriores dos parâmetros.

De uma forma geral, a resolução temporal não teve tanto impacto nos resultados. As resoluções temporais de 3 e 6 horas apresentaram uma melhor confiabilidade para o período úmido com as duas funções de verossimilhança, porém a precisão foi muito parecida com as demais resoluções. O viés volumétrico foi melhor para a função L2 em todas as resoluções, apresentando resultado pior para o período seco.

Os períodos úmido e seco apresentaram resultados bastante diferentes, sendo que o período seco apresentou resultados piores para todas as três métricas analisadas: confiabilidade; precisão; e viés volumétrico. Este resultado já era esperado, uma vez que modelos hidrológicos conceituais simulam melhor períodos úmidos. O baixo desempenho do modelo em simular um período com características diferentes do utilizado para identificação dos parâmetros demonstra a necessidade da utilização na calibração de uma série histórica maior, que englobe os dois estados da bacia (seco e úmido). Além disso, a grande incerteza associada aos resultados do período seco mesmo na calibração indica a necessidade de utilização de modelos que representem melhor os processos que ocorrem neste período.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- BEVEN, K.J. (2012). *Rainfall Runoff Modelling: The Primer*. 2. ed. Wiley-Blackwell, Chichester, 488 p.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. (1995). Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*. v.9, p. 251-290.
- BOYLE, D. P. (2000), *Multicriteria calibration of hydrological models*, Ph.D. dissertation, Dep. of Hydrol. and Water Resour., Univ. of Ariz., Tucson.
- CHAFFE, P.L.B.(2009). *Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em interceptação*. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- FICCHI, A.; PERRIN, C.; ANDRÉSSIAN, V. (2016). Impact of temporal resolution of inputs on hydrological model performance: Na analysis based on 2400 flood events. *Journal of Hydrology*.v.538, p. 454-470.
- KAVETSKI, D.; FENICIA, F.; CLARK, M. P.(2011). Impact of temporal data resolution on parameter inference and model identification in conceptual hydrological modeling: Insights from an experimental catchment. *Water Resour. Res.*, v. 47, n. 5, p. 1–25.
- LALOY, E.; J. A. VRUGT (2012), High-dimensional posterior exploration of hydrologic models using multiple-try DREAM(ZS) and high-performance computing, *Water Resour. Res.*, 48, W01526.
- LITTLEWOOD, I.G., CROKE, B.F.W. (2008). Data time-step dependency of conceptual rainfall-streamflow model parameters: an empirical study with implications for regionalisation. *Hydrol. Sci. J.* 53 (4), 685–695.
- MCINERNEY, D.; THYER, M.; KAVETSKI, D.; LERAT, J.; KUCZERA, G. (2017) Improving probabilistic prediction of daily streamflow by identifying Pareto optimal approaches for modeling heteroscedastic residual errors. *Water Resour. Res.*, v. 53, p. 2199–2239.
- MOORE, R. J. (1985), The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales, *Hydrol. Sci. J.*, 30(2), 273– 297.
- SANTOS, I. *Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica*. (2009) Florianópolis: UFSC/CFH/GCN. 167f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SCHOUPS, G.; VRUGT, J. A. (2010). A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors. *Water Resour. Res.*, v. 46, n. 10, p. 1–17.
- SMITH, T.; SHARMA, A.; MARSHALL, L.; MEHROTRA, R.; SISSON, S. (2010). Development of a formal likelihood function for improved Bayesian inference of ephemeral catchments. *Water Resour. Res.*, v. 46, n. 12, p. 1–11.
- VRUGT, J. A.; TER BRAAK, C. J. F.; CLARK, M. P.; HYMAN, J. M.; ROBINSON, B. A. (2008) Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resour. Res.*, v. 44, p. 1–52.
- VRUGT, J. A.; TER BRAAK, C. J. F.; DIKS, C. G. H.; ROBINSON, B. A.; HYMAN, J. M.; HIGDON, D (2009) Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomized Subspace Sampling. *Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, v. 10, n. 3, p. 273–290.
- WANG, Y., HE, B., TAKASE, K. (2009). Effects of temporal resolution on hydrological model parameters and its impact on prediction of river discharge. *Hydrol. Sci. J.* 54 (5), 886–898.