

TRANSFERÊNCIA ESPAÇO-TEMPORAL DE PARÂMETROS NO MODELO SWAT

Ana Clara Lazzari Franco^{1*} & Debora Yumi de Oliveira² & Nadia Bernardi Bonumá³

Resumo – O grau de discretização espacial utilizado em uma modelagem hidrológica afeta as necessidades de processamento computacional. Deve-se, portanto, procurar um equilíbrio entre a discretização necessária à qualidade dos resultados da simulação e os requisitos de processamento computacional. Similarmente, a calibração de parâmetros em escalas temporais mais refinadas pode elevar as necessidades de processamento devido ao aumento do volume de dados. O presente estudo avaliou os impactos da transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais e temporais, utilizando o modelo SWAT aplicado à bacia do rio Iguaçu. Duas escalas de discretização temporal (diária e mensal) e três escalas de discretização espacial foram consideradas. O modelo foi calibrado em escala mensal com uma discretização espacial intermediária, e avaliada a possibilidade de transferência dos parâmetros para simulação diária com as três diferentes escalas de discretização espacial. A transferência de parâmetros entre escalas temporais, mantendo-se a mesma discretização espacial, exibiu resultados de desempenho e incertezas satisfatórios. O aumento na discretização espacial do modelo levou à depreciação no seu desempenho, enquanto a sua diminuição foi capaz de apresentar resultados similares àqueles obtidos com a discretização espacial utilizada na calibração.

Palavras-Chave – Discretização espacial, *Kling-Gupta Efficiency* (KGE)

PARAMETERS TIME AND SPACE TRANSFERABILITY FOR SWAT MODEL

Abstract – The level of spatial discretization used for hydrologic modelling affects the computational processing requirements. Therefore, one must pursue a balance between the spatial discretization that it is needed for the quality of the simulation results and the computational processing requirements. Similarly, finer time scales can raise processing requirements due to the higher data volume. This study aims to investigate parameter time and spatial transferability, by using the SWAT model applied to the Iguaçu river basin. Three spatial discretization configurations and two different time steps (daily and monthly) were considered. SWAT model was calibrated on monthly time step, using an average spatial discretization, and validated on daily time step, for the three different spatial scales. When the spatial discretization is maintained, the daily simulation shows reasonable streamflow performance and uncertainty. Higher spatial discretization led to poorer model performance, while the lower discretization led to results similar to those obtained by the calibration configuration.

Keywords – Spatial discretization, *Kling-Gupta Efficiency* (KGE)

¹Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, anaclaralfranco@gmail.com

² Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, debora.ydo@gmail.com

³Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, nadia.bonuma@ufsc.br

INTRODUÇÃO

Recentemente, modelos hidrológicos complexos, como o SWAT, vêm sendo cada vez mais utilizados no apoio à gestão dos recursos hídricos (YEN *et al.*, 2016). A calibração destes modelos é sempre indispensável (TROY *et al.*, 2008). A validação dos modelos é realizada no intuito de demonstrar sua capacidade de simulação em condições diferentes daquelas utilizadas para sua calibração, verificando os resultados da simulação com uma série de dados independente (ARNOLD *et al.*, 2012). Comumente, a calibração e a validação dos modelos hidrológicos são realizadas segundo a metodologia *Split-Sample Test* de Klemeš (1986), transferindo parâmetros calibrados em um intervalo de dados para outro intervalo, na mesma bacia, mantendo-se a escala espacial e temporal utilizada na calibração. A transferência de parâmetros entre escalas temporais e/ou espaciais diferentes daquelas utilizadas na calibração ainda é pouco compreendida (DAGGUPATI *et al.*, 2015).

Modelos hidrológicos semi-distribuídos, como o SWAT, dividem a bacia hidrográfica em subbacias para propósitos de modelagem. O grau de discretização espacial do modelo fica, então, relacionado ao número de subbacias. Um grande número de subbacias leva ao aumento da necessidade de processamento computacional, mas um número muito pequeno de subbacias pode afetar os resultados da simulação (JHA *et al.*, 2004). Portanto, deve-se procurar um balanço entre os requisitos de processamento e a necessidade de discretização espacial.

Melsen *et al.* (2016) sugere que os parâmetros devem ser facilmente transferidos de escalas temporais finas para escalas temporais maiores, pois estas são simplesmente a integração de passos de tempo menores. Kumar e Merwade (2009) ressaltam que o efeito da discretização espacial, isto é, o número de subbacias, sobre a sensibilidade e incertezas dos parâmetros é capaz de trazer informações que levem a maior confiabilidade nos resultados dos modelos. Em Gong *et al.* (2010) relatou-se que o melhor desempenho do modelo SWAT não foi atingido pela simulação com maior discretização espacial, mas sim através de uma discretização espacial moderada.

Troy *et al.* (2008) examinaram os efeitos da transferência de parâmetros calibrados para escalas temporais e espaciais mais finas do que as utilizadas para calibração do modelo, para o modelo VIC, em 1.130 pequenas bacias. Os autores concluíram que a transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais causou maiores impactos no desempenho do modelo do que entre diferentes escalas temporais. Contrariamente, em Melsen *et al.* (2016) foram encontrados resultados opostos para o mesmo modelo, obtendo melhores resultados com a transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais do que entre diferentes escalas temporais. Utilizando o modelo SWAT em uma bacia hidrográfica com área de drenagem de 28.330 km², Daggupati *et al.* (2015) também observaram maior facilidade de transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais do que entre escalas temporais.

O objetivo do presente estudo foi avaliar os impactos da transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais e temporais, utilizando o modelo SWAT aplicado à bacia do rio Iguaçu. Duas escalas de discretização temporal (diária e mensal) e três escalas de discretização espacial foram consideradas. O modelo foi calibrado em escala mensal com uma discretização espacial intermediária, e avaliada a possibilidade de transferência dos parâmetros para simulação diária com as três diferentes escalas de discretização espacial. Os resultados da calibração e validação do modelo foram avaliados em termos de desempenho e incertezas das estimativas de vazão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia do rio Iguaçu abrange uma área total de 67.445 km², dos quais 65.720 km² estão localizados em território brasileiro, nos estados de Santa Catarina e Paraná, e o restante em território argentino. A área modelada no presente estudo engloba 63.884 km² da bacia, localizados inteiramente em território brasileiro (Figura 1). A bacia do rio Iguaçu contribui de maneira importante para a geração de energia hidrelétrica no Brasil, com algumas das maiores centrais hidrelétricas do país (ANEEL, 2002). As cinco maiores hidrelétricas instaladas na bacia do rio Iguaçu somam juntas 6.556 MW (MACHADO, 2012).

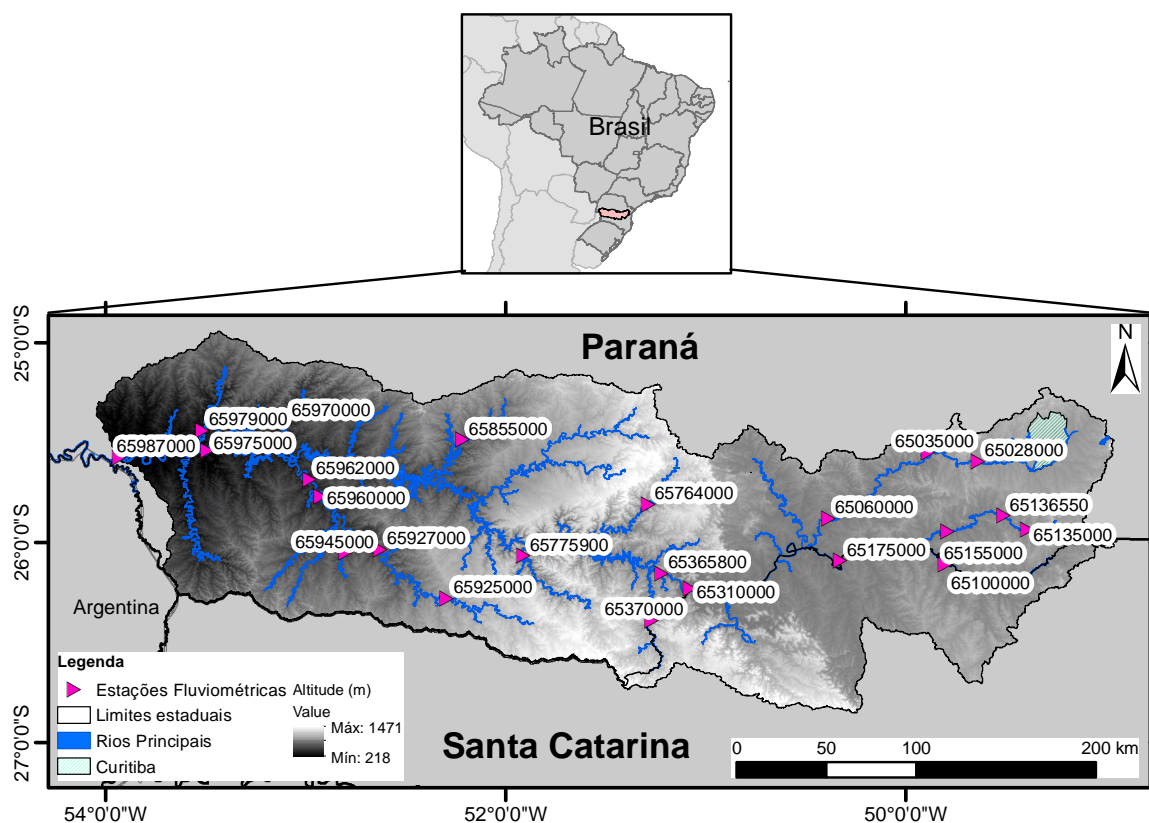


Figura 1: Localização da bacia do rio Iguaçu e estações fluviométricas utilizadas no estudo.

O Modelo SWAT

O SWAT é um modelo baseado no equacionamento físico do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica e foi originalmente desenvolvido com o intuito de investigar os impactos do uso do solo e da aplicação de compostos químicos agrícolas nos recursos hídricos, erosão e produção de sedimentos (ARNOLD *et al.*, 2012). O SWAT é um modelo de domínio público (código aberto) e atualmente possui interfaces disponíveis para os softwares ArcGIS, MapWindow e QuantumGIS (DILE *et al.*, 2016), disponíveis no site oficial do projeto [<http://swat.tamu.edu/>].

A discretização espacial do SWAT é variável e pode ser ajustada pelo usuário. O modo padrão de simulação é semi-distribuído, definindo-se as HRUs (*Hydrologic Response Units*), que são as unidades de simulação dentro das subbacias. O modelo SWAT delimita a bacia e suas subbacias de acordo com o modelo digital de terreno. A rede de drenagem e o número de subbacias são definidos segundo a área mínima de contribuição (AMC) para geração de cursos d'água, estabelecida pelo usuário. As subbacias são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), agrupando células que possuem uma mesma declividade, tipo de solo e uso do solo.

O modelo SWAT foi aplicado à bacia do rio Iguaçu por meio de sua interface com o QuatumGIS (DILE *et al.*, 2016). A análise do desempenho e incertezas das estimativas de vazão do SWAT foi realizada em três configurações, com diferentes discretizações espaciais: configuração I, com 177 subbacias, geradas com AMC de 200 km²; configuração II, com 365 subbacias, geradas a partir de uma AMC de 100 km² (discretização espacial intermediária) e utilizada para calibração do modelo; configuração III, com 684 subbacias, geradas com uma AMC de 50 km².

O SWAT-CUP

O SWAT-CUP (SWAT Calibration Uncertainty Procedure) é um software desenvolvido para auxiliar os usuários do SWAT na calibração do modelo e possui cinco diferentes procedimentos de calibração, entre os quais, o SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting - version 2*) (ABBASPOUR *et al.*, 2007). A calibração com o SUFI-2 é realizada através de sucessivas iterações, com o mesmo número de simulações cada. A cada iteração o intervalo de valores dos parâmetros calibrados é reduzido, sempre centralizado no conjunto que obteve o melhor valor para a função objetivo. O número de iterações e de simulações é definido pelo usuário. No SUFI-2 as incertezas das estimativas são comunicadas através de dois indicadores estatísticos: o fator-p e o fator-r. O fator-p indica a porcentagem de dados observados que é englobada pelo envelope de simulações resultantes da iteração. O fator-p varia de 0 a 1, onde 1 corresponde a 100% dos dados observados. O fator-r indica a espessura do envelope de simulações, isto é, a incerteza dos resultados da iteração. Um modelo está calibrado quando se atinge um equilíbrio entre ambos fatores, englobando parcela razoável dos dados observados, com um nível de incertezas aceitável. Para Abbaspour (2015), valores acima de 0,70 para o fator-p e abaixo de 1,50 para o fator-r indicam uma calibração aceitável de vazão.

Segundo Arnold *et al.* (2012), os indicadores estatísticos mais comumente utilizados na calibração e avaliação de desempenho do modelo SWAT são o coeficiente de determinação (R²) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS). O coeficiente R² varia de 0 a 1, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe assume valores entre -∞ e 1. Para ambos o valor 1 indica correlação perfeita. A função KGE (Kling-Gupta Efficiency) foi apresentada em Gupta *et al.* (2009), e se baseia na decomposição do coeficiente Nash-Sutcliffe e do Erro Quadrático Médio. Os termos que compõem o índice KGE representam a correlação, a tendência do modelo (BIAS) e uma medida de variabilidade relativa entre os valores observados e simulados. A função KGE é dada por:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{s}{\sigma} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad (3)$$

onde, r é o coeficiente de correlação linear entre O e S e σ_o e σ_s são o desvio padrão dos valores observados e simulados, respectivamente. Similar ao NS, os valores de KGE variam de -∞ a 1, sendo 1 a correlação perfeita.

Calibração e validação

Para a calibração e validações do modelo, foram utilizados os dados de 23 estações fluviométricas dentro da bacia do rio Iguaçu (Figura 1). O exutório da bacia, definido pela estação fluviométrica de Porto Capanema, está localizado a 80 km do reservatório da hidrelétrica Salto Caxias. Para as validações em escala diária foram utilizados dados de vazão diária naturalizada da estação de Salto Caxias, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) (ONS, 2016).

O SWAT-CUP foi utilizado para calibrar o modelo, através do método SUFI-2. A função objetivo utilizada na calibração foi o índice KGE. O valor da função objetivo foi definido pela média aritmética de todas as 23 estações fluviométricas situadas na bacia. A calibração foi executada com duas iterações sucessivas, com 500 simulações cada. Somente a configuração II, com uma discretização espacial intermediária, foi utilizada para calibração do modelo. A calibração do modelo foi realizada somente em escala mensal, com dados de vazão, utilizando o período compreendido entre os anos de 2006 a 2009. Todas as simulações foram precedidas de dois anos de aquecimento do modelo.

O modelo foi validado em diferentes escalas temporais e espaciais. Para a configuração II (365 subbacias), utilizada na calibração, a validação foi realizada em escala mensal para o período de 2002 a 2005, e em escala diária para períodos de 2002 a 2005 e de 2006 a 2009, separadamente. Para as configurações I (684 subbacias) e III (177 subbacias) o modelo foi validado somente em escala diária, para o período de 2002 a 2005, analisando simultaneamente a transferência de parâmetros entre escalas espaciais e temporais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo foi calibrado somente para a configuração II (365 subbacias). Os resultados da calibração e das validações para esta discretização espacial indicaram bom desempenho médio do modelo (Tabela 1). Para a mesma discretização espacial, a validação diária do modelo apresentou resultados satisfatórios (Tabela 1), sugerindo que a transferência temporal dos parâmetros, mantendo-se a escala espacial, é possível. O desempenho médio, isto é, a média dos valores das 23 estações fluviométricas, da melhor simulação diária é inferior ao desempenho das respectivas simulações mensais (Tabela 1). Boa parte das 23 estações fluviométricas analisadas atingiram valores aceitáveis para o fator-p (acima de 0,70) e o fator-r (abaixo de 1,50) para as simulações mensais e diárias (Figura 2). Os fatores p e r das 23 localidades analisadas apontam para um discreto aumento de incertezas em escala diária, comparada à simulação mensal (Figura 2). O valor médio dos fatores p e r se mantém bastante similar para ambos períodos e escalas temporais (Tabela 1).

Na Figura 4 e na Figura 5 as subbacias estão ordenadas segundo o código da ANA (Agência Nacional das Águas), em ordem crescente, da esquerda para a direita, ou seja, da cabeceira em direção ao exutório. A Figura 4 apresenta a distribuição dos índices de desempenho (KGE) de cada uma das subbacias, definidas pelas 23 estações fluviométricas, para as 500 simulações da calibração e validações da configuração II. Ao avaliar todos os índices de desempenho das 500 simulações de cada uma das localidades, observa-se uma maior amplitude de valores para as estimativas do modelo em escala diária (Figura 4). É maior, também, a amplitude dos valores para as subbacias de cabeceira, a qual ficou evidenciada em escala diária e com o aumento da discretização espacial (Figura 4 e Figura 5). Apesar desse aumento na amplitude de valores, o fator-r não aponta para aumento de incertezas com o aumento da discretização espacial (Tabela 2).

A validação diária para as três configurações de discretização espacial consideradas exibe valores aceitáveis para os fatores p e r para a maior parte das subbacias analisadas (Figura 3). A configuração III, com a menor discretização espacial, apresentou desempenho médio bastante similar à configuração II (Tabela 2). Porém, a configuração I, com a maior discretização espacial, exibe desempenho médio inferior (Tabela 2). Os diferentes valores encontrados para os indicadores de desempenho (KGE, R^2 , NS) de cada configuração analisada sugerem que a sensibilidade do modelo aos parâmetros calibrados pode ser dependente da discretização espacial adotada.

A depreciação no desempenho da simulação diária com a maior discretização espacial (configuração I) é maior para as subbacias de cabeceira (Figura 5). Este comportamento pode ser reflexo de uma maior sensibilidade das subbacias de cabeceira aos parâmetros calibrados. Para o exutório (código 65987000) e a estação Salto Caxias (código 65975000) o desempenho da simulação apresenta melhoria de acordo com a diminuição da discretização espacial (Figura 5).

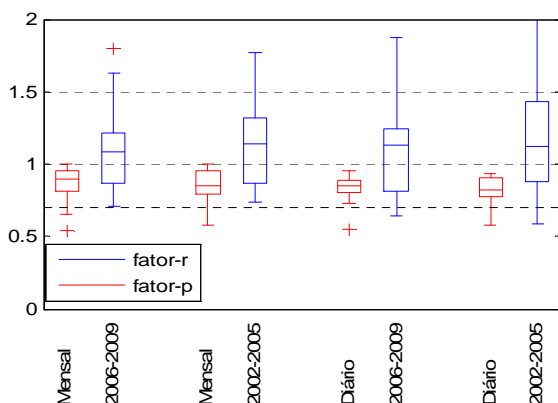


Figura 2: Fatores p e r das 23 estações fluviométricas, para a configuração II, de acordo com o intervalo de simulação. *

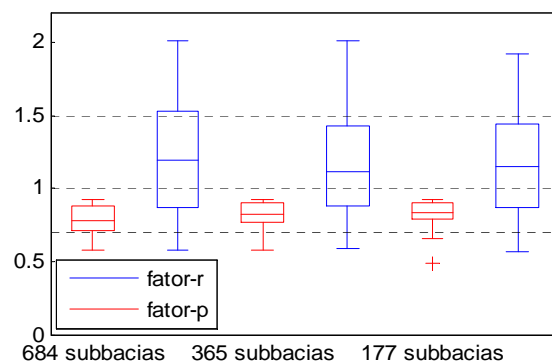


Figura 3: Fatores p e r para a validação diária do período de 2002-2005, de acordo com a discretização espacial. *

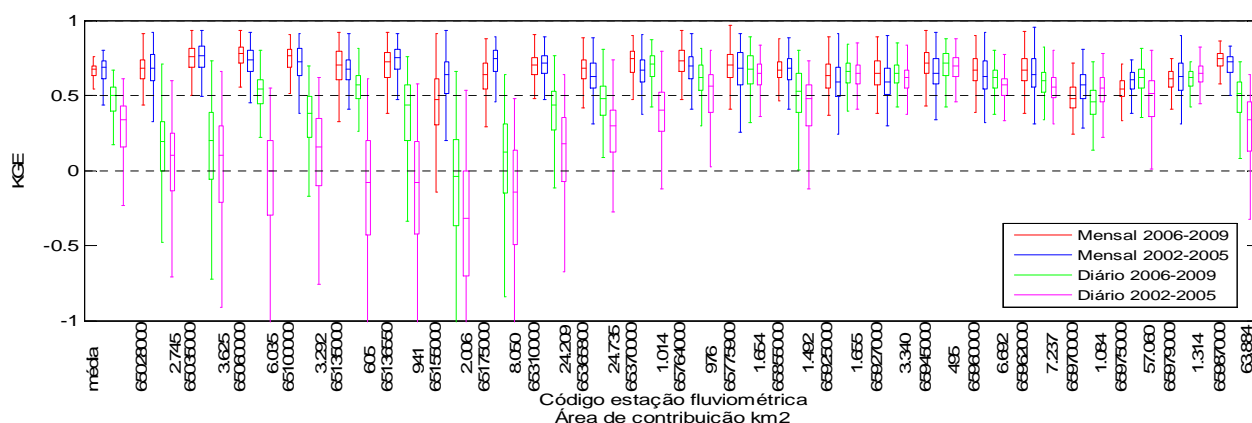


Figura 4: Índices de desempenho (KGE) para as simulações da calibração e validação do modelo na configuração II. Os outliers não estão indicados na figura por questões de visualização. *

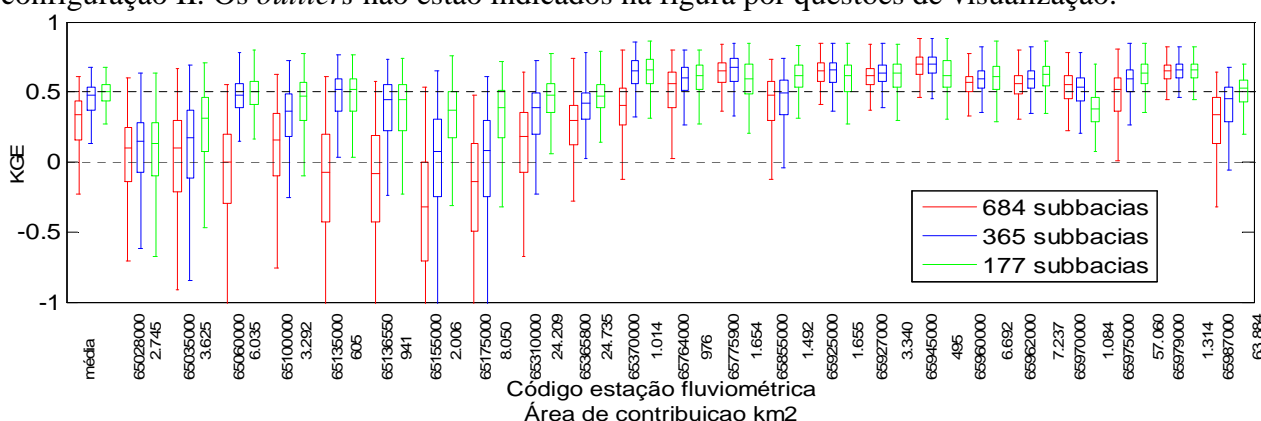


Figura 5: Índices de desempenho (KGE) para as simulações da validação do modelo em escala diária para o período de 2002-2005. Os *outliers* não estão indicados na figura por questões de visualização. *

*Os gráficos box-plot indicam: a mediana (percentil 50) com o traço central; os quartis Q1 (percentil 25) e Q3 (percentil 75), que englobam 50% dos dados, através da caixa; os valores correspondentes a $Q1-1,5IQR$ e $Q3+1,5IQR$ pelas hastes, onde IQR é o intervalo interquartil ($IQR=Q3-Q1$); e os pontos observados fora destes limites são considerados outliers e indicados através de sinais "+".

Tabela 1: Índices de desempenho e incertezas do modelo aplicado à configuração II (365 subbacias).

	Intervalo	Fator-p	Fator-r	R ²	NS	KGE
Mensal	2006-2009 (calibração)	0,86	1,08	0,81	0,72	0,76
	2002-2005	0,84	1,15	0,83	0,77	0,80
Diário	2006-2009	0,82	1,11	0,62	0,49	0,67
	2002-2005	0,81	1,21	0,61	0,47	0,68

Tabela 2: Índices de desempenho e incertezas das validações do modelo em escala diária para o intervalo de 2002 a 2005.

	Número de subbacias	Fator-p	Fator-r	R ²	NS	KGE
Configuração I	177	0,82	1,21	0,62	0,52	0,66
Configuração II	365	0,81	1,21	0,61	0,47	0,68
Configuração III	684	0,78	1,24	0,52	0,32	0,60

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o impacto da transferência de parâmetros entre diferentes escalas espaciais e temporais, utilizando o modelo SWAT aplicado à bacia do rio Iguaçu. A transferência dos parâmetros calibrados em escala mensal para a simulação diária apresentou resultados satisfatórios de desempenho e incertezas, considerando o comportamento médio das subbacias e para o exutório. Comparado à configuração intermediária de discretização espacial, utilizada na calibração, o aumento da discretização espacial levou à depreciação no desempenho médio da bacia na simulação de vazão. A diminuição da discretização espacial, pelo contrário, apresentou melhoria no desempenho da simulação.

O desempenho da simulação foi inferior nas subbacias de cabeceira, sugerindo que estas se comportam de maneira diferente das demais subbacias e do exutório. Este comportamento é evidenciado com o aumento da discretização espacial e temporal.

Sugere-se um estudo mais aprofundado da transferência de parâmetros entre escalas temporais e espaciais distintas, considerando mais configurações de discretização espacial, a fim de confirmar os resultados obtidos neste estudo. Recomenda-se também calibrar o modelo em escala diária para comparar com os resultados obtidos pela validação com os parâmetros calibrados mensalmente.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao CNPq e a UFSC pelo apoio e financiamento das atividades de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs-A User Manual* Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; HAGHIGHAT, S.; YANG, J. (2007). SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT. *The fourth International SWAT conference*, p. 1596–1602.

ANEEL. (2002). *Atlas de energia elétrica do Brasil* Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil) - Brasília.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A. VAN; VANLIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. (2012). Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1491–1508.

DAGGUPATI, P.; YEN, H.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G.; KEITZER, C. S.; SOWA, S. P. (2015). Impact of model development, calibration and validation decisions on hydrological simulations in West Lake Erie Basin. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 26, p. 5307–5320, 30 dez.

DILE, Y. T.; DAGGUPATI, P.; GEORGE, C.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling and Software*, v. 85, p. 129–138.

GONG, Y.; SHEN, Z.; LIU, R.; WANG, X.; CHEN, T. (2010). Effect of watershed subdivision on swat modeling with consideration of parameter uncertainty. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 15, n. 12, p. 1070–1074.

GREEN, C.; VANGRIENSVEN, A. (2008). Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, n. 4, p. 422–434, abr.

GUPTA, H. V.; KLING, H.; YILMAZ, K. K.; MARTINEZ, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 377, n. 1–2, p. 80–91.

JHA, M.; GASSMAN, P. W.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. (2004). Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, and Nutrient Predictions. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 40, n. 3, p. 811–825.

KLEMEŠ, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, v. 31, n. 1, p. 13–24.

KUMAR, S.; MERWADE, V. (2009). Impact of watershed subdivision and soil data resolution on swat model calibration and parameter uncertainty. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 45, n. 5, p. 1179–1196.

MACHADO, B. P. (2012). Large Hydropower Plants of Brazil. In: *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier, v. 6p. 93–127.

MELSEN, L.; TEULING, A.; TORFS, P.; ZAPPA, M.; MIZUKAMI, N.; CLARK, M.; UIJLENHOET, R. (2016). Representation of spatial and temporal variability in large-domain hydrological models: Case study for a mesoscale pre-Alpine basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 6, p. 2207–2226.

ONS. (2016). *Atualização De Séries Históricas De Vazões – Período 1931 a 2015* Operador Nacional do Sistema Elétrico RE ONS 0181/2016, Novembro de 2016.

TROY, T. J.; WOOD, E. F.; SHEFFIELD, J. (2008). An efficient calibration method for continental-scale land surface modeling. *Water Resources Research*, v. 44, n. 9, p. 1–13.

YEN, H.; HOQUE, Y. M.; WANG, X.; HARMEL, R. D. (2016). Applications of Explicitly Incorporated/Post-Processing Measurement Uncertainty in Watershed Modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 52, n. 2, p. 523–540.