

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE COMO PRIMEIRO PASSO PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA: ESTUDO DE CASO DO O MODELO SWAT

*Tássia Mattos Brighenti*¹ & Nadia Bernardi Bonumá² & Pedro Luiz Borges Chaffe³ & Fernando Grison⁴ & Masato Kobiyama⁵*

Resumo – Em modelos hidrológicos como o SWAT, a quantidade de parâmetros existentes é um assunto bastante discutido. A análise de sensibilidade é um passo fundamental para compreensão da influência dos parâmetros no comportamento do modelo, e tem o papel de diminuí-los quando processo de calibração é necessário. O objetivo do estudo é aplicar a Análise de Sensibilidade Global ao modelo SWAT, e reduzir parâmetros necessários para compreensão dos processos que influenciam a vazão na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres. Para a identificação do comportamento da bacia nas escalas espacial e temporal, o conjunto de três bacias embutidas e três funções objetivo, (Nash-Sutcliffe, Nash-Sutcliffe Modificado e Kling-Gupta Efficiency) foram utilizados. Existe um conjunto de seis parâmetros que se apresentam sensíveis, independente da abordagem realizada. Estes estão relacionados ao processo de escoamento superficial; ao canal principal do rio (e.g. condutividade hidráulica efetiva e coeficiente de *Manning*); e ao comportamento subterrâneo da água (e.g. capacidade do aquífero raso). Cada função prioriza uma parte diferente do hidrograma. Neste estudo essa hipótese foi confirmada com o processo de calibração.

Palavras-Chave – análise de sensibilidade, funções objetivo, SWAT.

SENSITIVITY ANALYSIS AS THE FIRST STEP FOR HYDROLOGICAL MODELING: A SWAT MODEL CASE STUDY

Abstract – In hydrological models like SWAT, the quantity of used parameters is a frequently-discussed subject. Sensitivity analysis is a fundamental step in understanding the parameters' influence on model behavior, and has role to decrease the number of parameters when calibration process is required. The aim of the study is to apply a Global Sensitivity Analysis to the SWAT model, and to reduce the parameters necessary for understanding the dominant parameters that influence the Rio dos Bugres basin discharge. For basin behavior identification in the spatial and temporal scales, three nested basins and three objective functions (Nash-Sutcliffe, Nash-Sutcliffe Modificado and Kling-Gupta Efficiency) were used. Six parameters are always sensitive in the basin. These are related to the surface runoff process; the main channel (e.g. effective hydraulic conductivity, coefficient of Manning); and the groundwater behavior (e.g. shallow aquifer capacity). Each objective function prioritizes a different part of the hydrograph. In this study, this hypothesis was confirmed with the calibration process.

Keywords – sensitivity analysis, objective function, SWAT.

¹ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA). tassibrighenti@hotmail.com

² Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS). nadia.bonuma@ufsc.br

³ Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS). pedro.chaffe@ufsc.br

³ Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS); Chapecó; Engenharia Ambiental e Sanitária. fernando.grison@uffs.edu.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS); Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). masato.kobiyama@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A utilização da modelagem hidrológica tem sido uma prática muito comum adotada pelos hidrólogos. Isso porque as análises dos processos hidrológicos são de grande complexidade e a aplicação dessa ferramenta tende a facilitar a compreensão desses fenômenos. Todos os modelos hidrológicos têm parâmetros que devem ser calibrados para representar às condições das bacias hidrográficas às quais estão sendo aplicados. Os diferentes aspectos da resposta hidrológica das bacias hidrográficas podem ser identificados a partir da análise de sensibilidade do modelo juntamente com múltiplas funções objetivo (Guse *et al.*, 2017, Wang *et al.*, 2013). Wang *et al.* (2013) afirmam que apenas um número reduzido de parâmetros é responsável pela maior parte das modificações causadas nas saídas de modelos super parametrizados, e que o restante dos parâmetros pode permanecer com os valores *default*, sem causar grandes impactos nas métricas de avaliação. Visto que, trabalhar com tantos parâmetros pode ser desnecessário, reduzi-los a um número de real influência é importante. A grande quantidade de parâmetros no modelo SWAT proposto por Arnold *et al.*, (2012) é um ponto amplamente discutido na literatura (Gassman *et al.*, 2007 e Arnold *et al.*, 2012), trinta e três são os parâmetros descritos no manual do modelo que de alguma forma influenciam a estimativa das vazões. Alguns dos problemas de grande quantidade de parâmetros do SWAT podem ser resolvidos usando métodos de análise de sensibilidade e disponibilizando-os no *software* SWAT-CUP, o que facilita o processo para os usuários do modelo (Van Griensven e Bauwens, 2003; Abbaspour *et al.*, 2004).

Na modelagem hidrológica a análise de sensibilidade é definida como uma função que investiga as variações nas saídas do modelo de acordo com as mudanças nos parâmetros (Wang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2015). Existem dois tipos de análise de sensibilidade a serem consideradas: a) *one-at-a-time* que mostra a sensibilidade de um parâmetro quando todos os outros são mantidos constantes; b) Análise de Sensibilidade Global, que possui capacidade de avaliar a influência dos parâmetros em toda sua gama de variação, incorporando o fator de incerteza sob essa variação, enquanto todos os parâmetros são modificados ao mesmo tempo (Wang *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2015). Abebe *et al.* (2010), Guse *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2013) concluem que análise de sensibilidade é capaz de encontrar um grupo dominante de parâmetros que influencia a geração de vazão; que a sensibilidade dos parâmetros pode variar de acordo com a abordagem utilizada, ou seja, quando analisado em escala espacial e temporal; e que existe uma necessidade do uso de diferentes funções objetivo para que haja uma calibração eficiente do modelo.

O presente trabalho teve o objetivo de aplicar a Análise de Sensibilidade Global ao modelo SWAT como forma de reduzir os parâmetros necessários para simulação dos processos que influenciam a vazão de uma bacia hidrográfica. A análise foi realizada nas escalas espacial e temporal, sendo a análise espacial feita a partir de três bacias embutidas e a temporal em função do intervalo de tempo dos dados de precipitação.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo é formada pela bacia hidrográfica do Rio dos Bugres e por duas bacias embutidas. O exutório é nomeado como RB01 (64 km²), as outras duas bacias como RB10 (11 km²) e RB11 (7 km²). As bacias estão localizadas, no município de Rio Negrinho/SC (Figura 1). O período de monitoramento dos dados de chuva foi de 2011 a 2014 para uma resolução temporal de 10 min, acumulados para 30 min, 60 min e um dia. Para os dados de vazão, a resolução utilizada foi

de um dia, variando de 2011 a 2014 para o ponto RB01, e 2011 a 2013 para os pontos RB10 e RB11. Estes dados, juntamente com as curvas-chave para cada bacia são provenientes de Grison, (2013). Também utilizou-se os dados meteorológicos diários, fornecidos pela EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina).



Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres e dos pontos que marcam o exutório das bacias RB01, RB10 e RB 11.

Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

A fase terrestre do ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseada na equação do balanço hídrico. Os valores de evapotranspiração foram calculados dentro do modelo pelo método de Penman-Montieh. A interceptação depende do índice de área foliar (LAI). Embora o modelo permita utilizar camadas múltiplas de solo, o presente estudo considerou o solo de apenas uma camada. O escoamento superficial é calculado pelo método Curva-Número (CN) para dados diários de chuva e Green-Ampt (GA) para dados sub-diários, a propagação do fluxo no canal usando o método de Muskingum. As variações na altura do lençol freático são baseadas: na recarga, no fluxo, e na produção do sistema de águas subterrâneas (Neitsch *et al.*, 2011).

Análise de sensibilidade

Em geral, todas as técnicas de análises de sensibilidade globais são projetadas para explorar o comportamento do modelo no intervalo de seus parâmetros, para isso algoritmos de amostragem são necessários. Para o SWAT, utilizou-se algoritmo SUFI2, onde a sensibilidade dos parâmetros é determinada por um sistema de regressão múltipla, e pelo método de amostragem aleatória Hipercubo Latino (LHS) com base em van Griensven *et al.*, (2006), Song *et al.*, (2015), e Wang *et al.*, (2013).

O *ranking* da sensibilidade dos parâmetros é definido a partir da avaliação de dois coeficientes: o índice *t-test* e o teste de hipótese *p-value* (teste de distribuição de Student). O *t-test* é obtido pela divisão do coeficiente do parâmetro encontrado na análise de regressão múltipla pelo erro padrão. Quando esse coeficiente tem diferença em relação ao erro padrão, seu valor é diferente de zero, o que significa sensibilidade no parâmetro. O problema de se avaliar apenas este índice, é

que não existe um limite de corte padrão, para definir os parâmetros mais sensíveis. O *p-value* é o coeficiente responsável para realizar o corte. Um *p-value* baixo ($<0,05$) indica que pode-se rejeitar a hipótese nula. Com um *p-value* de 0,05 há apenas uma chance de 5% que os resultados teriam surgido em uma distribuição aleatória, ou seja, tem probabilidade de 95% de a variável causar modificações. Baseado na análise de sensibilidade pode-se observar que diferentes parâmetros influenciam diferentes partes do hidrograma (Abbaspour *et al.*, 2004, Me *et al.*, 2015).

A investigação da análise de sensibilidade em torno do modelo SWAT foi apresentada nas escalas temporais e espaciais. Para a escala temporal, o modelo recebeu três resoluções diferentes dos dados de entrada de chuva: 10 min, 30 min e 60 min, os quais foram utilizados separadamente para as simulações. Após a realização da análise de sensibilidade global, identificou-se o conjunto de parâmetros sensível a cada um desses passos de tempo. Para a investigação em escala espacial foi utilizado o conjunto de bacias embutidas (RB01, RB10 e RB11); onde cada bacia foi analisada separadamente e em conjunto (o processo se faz utilizando os dados das três bacias para mesma simulação). Buscou-se em fim, entender padrões comportamentais, facilitando os procedimentos de modelagem a serem realizados posteriormente, como calibração e diagnóstico da bacia hidrográfica de Rio dos Bugres.

Funções objetivo

Neste trabalho três funções objetivo foram utilizadas: Nash-Sutcliffe (NS); Nash-Sutcliffe Modificado (MNS); e Kling-Gupta Efficiency (KGE). Cada função objetivo gera um intervalo diferente de valores de parâmetros, visto que a aproximação é feita por diferentes equações. A escolha foi baseada em formulações as quais possuem diferentes prioridades, recomendações e uso difundido em literatura. A formulação do NS indica prioridade aos valores mais altos da amostra observada, o MNS é mais sensível aos valores mais baixos. (Asadzadeh *et al.*, 2016, Guse *et al.*, 2017, Magand *et al.*, 2015). O KGE vem como alternativa de uma função objetivo que não prioriza partes separadas do hidrograma, sendo que no processo de calibração todas as partes (altas, médias e baixas) têm mesmo peso (Dams *et al.*, 2015, Gupta *et al.*, 2009, Krause & Boyle, 2005). Essa três formulações apresentam mesmo intervalo de avaliação (1 a menos infinito), e mesma variação para valores simulados aceitáveis ($\geq 0,5$).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{mean})^2} \quad (1)$$

$$MNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^p}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{mean})^p} \quad (2)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (3)$$

onde, Q_i^{obs} é a vazão observada; Q_i^{sim} é a vazão simulada; Q_i^{mean} é a vazão média; α é a razão de variabilidade entre o desvio padrão dos valores medidos e simulados; r é o coeficiente de correlação; e β é a relação entre os valores médios simulados e observados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os resultados de *t-test*. Dos 33 parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade, 23 apresentam-se sensíveis em pelo menos uma das simulações, o *p-value* ($\leq 0,05$)

foi o valor utilizado para o corte dos parâmetros. Esses 23 parâmetros são encontrados na Figura 2, a qual apresenta o valor do módulo de t -test para cada função objetivo. Detalhes do significado de cada parâmetro e suas nomenclaturas encontram-se em Neitsch *et al.* (2011).

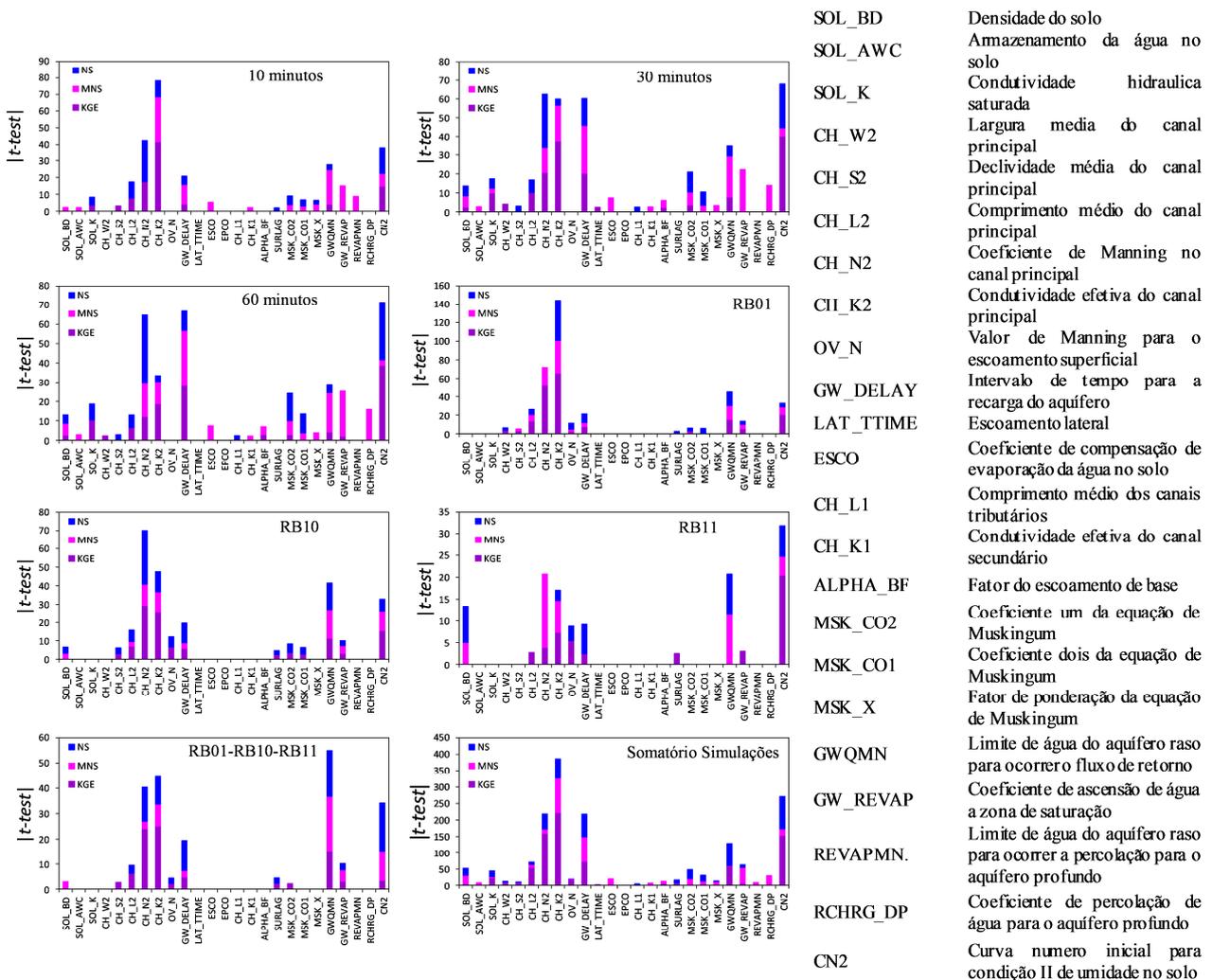


Figura 2 – Representação gráfica do t -test em módulo, para todas as simulações realizadas para Análise de Sensibilidade Global, na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres.

Os parâmetros CN2, CH_K2, CH_N2, CH_L2, GW_DELAY e GWQMN são sensíveis em todas as simulações, tanto diárias quanto sub-diárias, porém apenas o CN2 e CH_K2 são sensíveis a todas as funções objetivo. Os parâmetros SOL_AWC; SOL_K; LAT_TIME; ESCO; CH_L1; MSK_X; ALPHA_BF; e RCHRG_DP são sensíveis apenas com o uso de dados sub-diários, já o OV_N aparece sensível apenas para entrada de dados diários. Quando as simulações são separadas em entrada diária (RB01, RB10, RB11 e RB01-10-11) e sub-diária (10 minutos, 30 minutos e 60 minutos) existe uma quantidade maior de parâmetros sensíveis quando a escala de tempo sub-diária é utilizada. Ou seja, pode-se concluir simplificada, que esses parâmetros dominam o processo de geração de vazão na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres, tanto na escala temporal quanto espacial.

Para os dados de chuva de 10 min, 30 min e 60 min utiliza-se a equação de infiltração de Green-Ampt para o cálculo do escoamento superficial; para as três sub-bacias com entrada de dados diários, utiliza-se o método Curva Número. Essa é a única diferença no equacionamento dos

processos. A correlação entre as funções objetivo foi feita para cada procedimento de análise de sensibilidade (Figura 3). Para os tempos de 30 e 60 min os três indicadores (MNS, NS, KGE) não apresentam correlação, para a bacia RB01 as funções também não apresentam correlação, porém a variação do KGE é menor que a dos outros dois coeficientes. As formulações que apresentam correlação entre as três funções são: sub-diário para 10 min; e diário para RB11. Na RB10 o KGE teve correlação com as duas funções correspondentes (MNS e NS), já estas duas, entre elas, não tiveram correlação. Quando a análise de sensibilidade global foi feita para as três bacias simultaneamente, a correlação foi observada somente entre as funções MNS e NS.

A curva de probabilidade de excedência (escala logarítmica) é apresentada na Figura 4, para as vazões calibradas para as bacias RB01, RB10 e RB11. Na Tabela 1 são apresentadas suas descrições estatísticas e duas métricas para avaliar a faixa de incerteza: o *p-factor* e o *r-factor*. O primeiro é referente à porcentagem de simulações que ficaram dentro da faixa e pode variar de 0 a 1, o segundo é referente à espessura, e pode variar de 0 a infinito. Segundo Abbaspour *et al.* (2004 e 2015), valores de *p-factor* acima de 0,70 e *r-factor* a baixo de 1,5 podem ser consideradas simulações satisfatórias.

A menor faixa de incerteza encontra-se na bacia RB01, porém são as bacias RB10 e RB11 que apresentam os melhores valores dos KGE, NS, e MNS. Quando se analisa separadamente os coeficientes estatísticos, o KGE gera a menor faixa de incerteza, e apresenta melhores resultados ($\geq 0,5$). Nas curvas observa-se que as funções objetivo obedeceram à hipótese inicial deste trabalho, ou seja, que cada uma tem uma prioridade. O MNS teve o melhor ajuste para as vazões mais baixas, sendo o único que não obteve zeros como valores para as vazões simuladas. O NS obteve um ajuste muito bom para o ponto RB01 e excelente para os pontos RB10 e RB11. O KGE apresentou problemas em simular as vazões mais baixas, porém apresenta bom ajuste para as médias e altas.

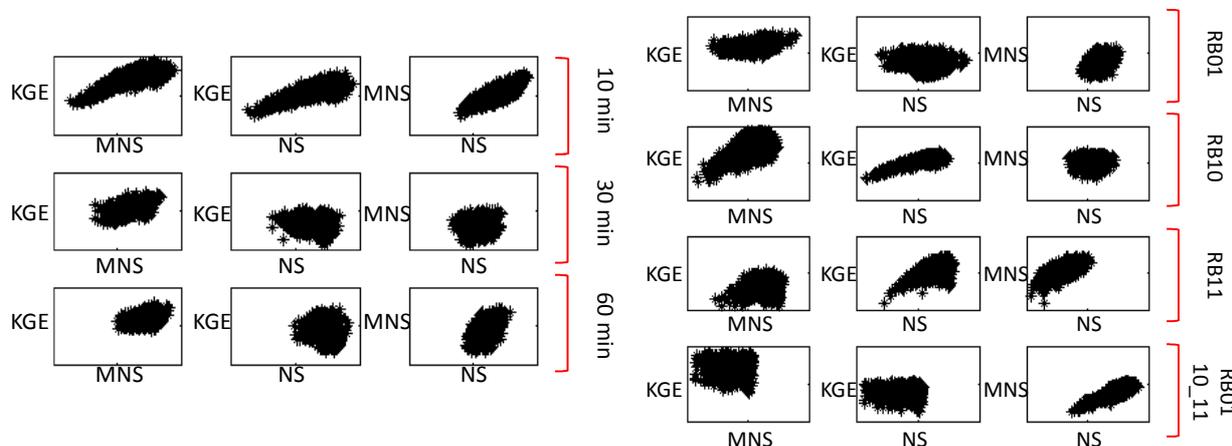


Figura 3 – Scatterplot das funções objetivo para cada uma das simulações realizadas para Análise de Sensibilidade Global para bacia hidrográfica de Rio dos Bugres.

Tabela 1 – Valores dos coeficientes estatísticos (KGE, NS, MNS) para toda série dos pontos RB01, RB10 e RB11 (calibrados) bem como as estatísticas para a faixa de incerteza (*p-factor* e *r-factor*).

	<i>p-factor</i>	<i>r-factor</i>	KGE	<i>p-factor</i>	<i>r-factor</i>	NS	<i>p-factor</i>	<i>r-factor</i>	MNS
RB01	0,75	0,43	0,47	0,82	0,46	0,37	0,86	0,47	0,44
RB10	0,85	0,58	0,72	0,90	0,67	0,63	0,91	0,67	0,45
RB11	0,92	0,68	0,79	0,87	0,60	0,68	0,89	0,65	0,48

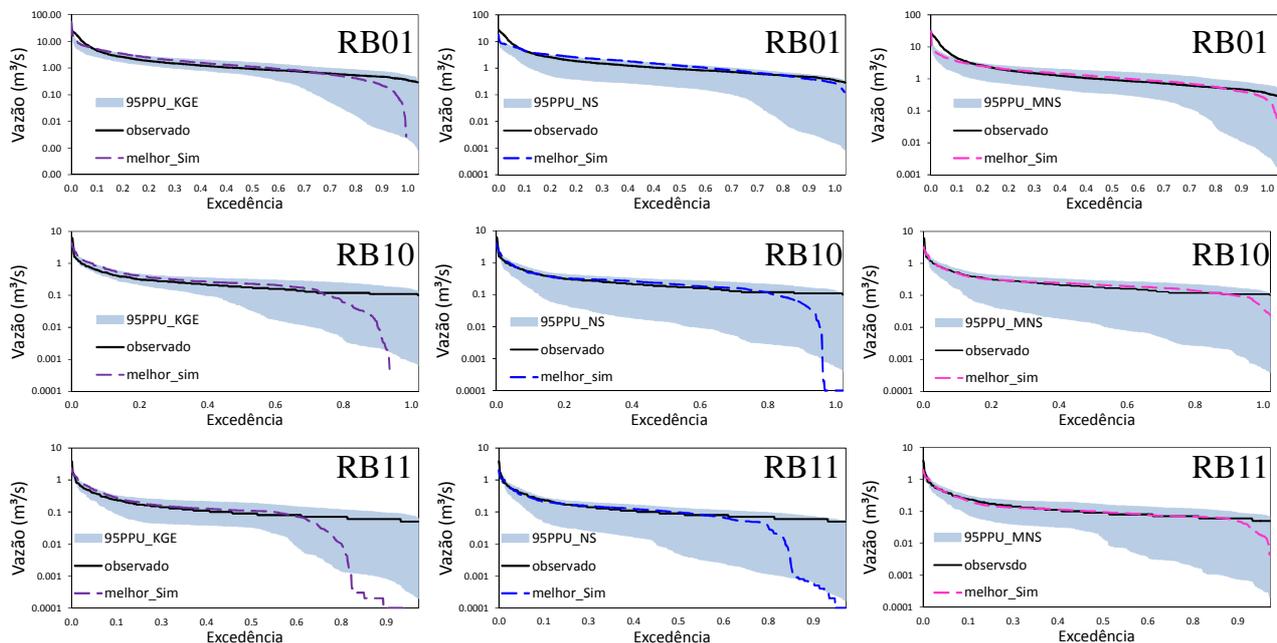


Figura 4 – Curva de probabilidade de excedência em escala logarítmica para as vazões calibradas para entrada de dados diários nos pontos RB01, RB10, RB11, para cada uma das funções objetivo. A linha preta representa as vazões observadas, em tracejados a melhor simulação para cada função objetivo (roxo – KGE; rosa – MNS; azul – NS) e a faixa em azul claro representa o envelope de incerteza das simulações.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para bacia hidrográfica de Rio dos Bugres são coerentes com os resultados encontrados por outros autores que avaliaram a análise de sensibilidade e o modelo SWAT. De maneira geral o presente estudo mostra que são necessárias múltiplas funções objetivo para identificação precisa dos parâmetros de um modelo. A conectividade entre os parâmetros do modelo e os critérios de desempenho variam nas escalas espaciais e temporais, ou seja, entre as bacias e entre as diferentes variações na estrada da chuva. A sensibilidade dos parâmetros vai depender do tipo de abordagem realizada, porém existe um conjunto de seis parâmetros (CN2, CH_K2, CH_N2, CH_L2, GW_DELAY e GWQMN) que é sempre sensível. Estes estão relacionados ao processo de escoamento superficial; ao canal principal (e.g. condutividade hidráulica e coeficiente de *Manning*); e ao comportamento subterrâneo da água. Podemos dizer de maneira simplificada, que esses parâmetros dominam o processo de vazão na bacia hidrográfica de Rio dos Bugres. Em relação às funções objetivo (KGE, NS, e MNS), elas obedecem à hipótese inicial deste trabalho, de que priorizam partes diferentes do hidrograma no processo de calibração. Para trabalhos futuros deve-se prosseguir com o processo de calibração e verificar se o conjunto de seis parâmetros realmente representa os processos na bacia.

AGRADECIMENTOS

Os autores a gradecem ao CNPq pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C., JOHNSON, C. A. & GENUCHTEN, M. T. VAN. (2004) Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zo. J.* 3(4), pp.1340.

- ABBASPOUR, K. C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H. & KLØVE, B. (2015) A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *J. Hydrol.* 524, pp. 733–752.
- ABEBE, N. A., OGDEN, F. L. & PRADHAN, N. R. (2010) Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation. *J. Hydrol.* 389(3–4), pp. 301–310.
- ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C. (2012) Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Asabe* 55(4), pp. 1491–1508.
- ASADZADEH, M., LEON, L., YANG, W. & BOSCH, D. (2016) One-day offset in daily hydrologic modeling: An exploration of the issue in automatic model calibration. *J. Hydrol.* 534, pp. 164–177.
- DAMS, J., NOSSENT, J., SENBETA, T. B., WILLEMS, P. & BATELAAN, O. (2015) Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. *J. Hydrol.* 529, pp. 1601–1616.
- GASSMAN, P. P. W., REYES, M. M. R., GREEN, C. C. H. & ARNOLD, J. J. G. (2007) The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASAE* 50(4), 1pp. 211–1250.
- GRIENSVEN, A. VAN & BAUWENS, W. (2003) Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resour. Res.* 39(12), pp.1–9.
- GRIENSVEN, A. VAN, MEIXNER, T., GRUNWALD, S., BISHOP, T., DILUZIO, M. & SRINIVASAN, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* 324(1–4), pp.10–23.
- GRISON, F. Estudo da Geometria Hidráulica do Rio dos Bugres, no Município de Rio Negrinho - SC. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (UFSC). Florianópolis, 242p. 2013.
- 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. *J. Hydrol.* 377(1–2), pp.80–91.
- GUSE, B., PFANNERSTILL, M., GAFUROV, A., KIESEL, J., LEHR, C. & FOHRER, N. (2017) Identifying the connective strength between model parameters and performance criteria. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* pp. 1–30.
- KRAUSE, P. & BOYLE, D. P. (2005) Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5(89), pp.89–97.
- MAGAND, C., DUCHARNE, A., MOINE, N. LE & BRIGODE, P. (2015) Parameter transferability under changing climate: case study with a land surface model in the Durance watershed, France. *Hydrol. Sci. J.*
- ME, W., ABELL, J. M. & HAMILTON, D. P. (2015) Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19(10), pp. 4127–4147.
- NEITSCH, S. ., ARNOLD, J. ., KINIRY, J. . & WILLIAMS, J. . (2011) Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resour. Inst.* Pg.1–647.
- SONG, X., ZHANG, J., ZHAN, C., XUAN, Y., YE, M. & XU, C. (2015) Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *J. Hydrol.* 523(225), pp. 739–757.
- WANG, J., LI, X., LU, L. & FANG, F. (2013) Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method. *Environ. Model. Softw.* 48, pp. 171–182.