XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão
De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

INFLUÊNCIA DA SEPARAÇÃO PRÉVIA DO ESCOAMENTO NA SIMULAÇÃO COM O MODELO SWAT PARA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRINHO (SC).

Tássia Mattos Brighenti [1] & Nadia Bernardi Bonumá [2]*

Resumo – O escoamento de base é um componente importante na modelagem hidrológica, pois está diretamente relacionado com o armazenamento e descarga de águas subterrâneas. O uso de filtros digitais para a separação dos escoamentos tem sido recomendado, pois são técnicas digitais e automáticas de fácil reprodução. O objetivo deste trabalho é a aplicação do filtro automático de Arnold et al. (1995) nos dados da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (SC), para a separação dos escoamentos superficial e de base. Calculando assim a constante de recessão (ALPHA_BF) e buscando o aperfeiçoamento das simulações realizadas com o modelo SWAT. O resultado da substituição desta constante, não causou grandes modificações no ajuste das vazões mais baixas (valor de ALPHA_BF de 0,048 para 0,0609). A análise de sensibilidade dos parâmetros (feita apenas para os que envolvem os processos de simulação de águas subterrâneas) aponta uma justificativa para tal resultado. O ALPHA_BF não é um dos parâmetros mais sensíveis para bacia hidrográfica do Rio Negrinho, quando o período envolve dados diários, esclarecendo o fato de sua modificação não causar mudanças significativas nos resultados, induzindo a necessidade de modificação dos outros parâmetros envolvidos, para simulações eficientes.

Palavras-Chave – Filtros digitais automáticos; modelagem hidrológica; constante de recessão.

BASE FLOW PRIOR SEPARATION INFLUENCE IN SWAT MODEL SIMULATION IN RIO NEGRINHO BASIN, SOUTHERN BRAZIL.

Abstract – Base flow is an important component in hydrological modeling, because it's directly related to the storage and groundwater discharge. Recursive digital filters of hydrographs are a base flow separation method that can easily be automated, and has been recommended for providing reproducible results. This work objective is the application of Arnold et al. (1995) automatic *Base Flow Filter*, in Rio Negrinho basin, Santa Catarina State, for surface and base flow separation. In order to calculate the recession constant (ALPHA_BF) and improve SWAT model simulations. The replacement of recession constant didn't cause major changes in the low flow setting (0.048 to 0.0609). The parameter sensitivity is a justification for such a result, the ALPHA_BF is not one of the most sensitive parameters for Rio Negrinho basin, when the period involves daily data, clarifying the fact that the modification does not cause significant results changes, inducing the modification need of other parameters for an efficient simulation.

Keywords – Automatic digital filters; hydrological modeling; recession constant.

INTRODUÇÃO

O escoamento/vazão de base é um importante componente da vazão total, e é proveniente do escoamento/armazenamento subterrâneo. Durante a estação seca, a vazão é composta basicamente

[1] Doutoranda do programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina; tassiabrighenti@hotmail.com
[2] Professora do departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina; nadia.bonuma@ufsc.br

por essa descarga. O escoamento de base pode ser obtido por varias técnicas de separação de escoamentos, por exemplo: medições em campo, técnicas manuais de separação do hidrograma ou equações matemáticas (Smakhtin, 2001). Para a técnica de separação por equacionamento matemático, diversos métodos também são encontrados: Arnold et al. (1995); Eckhardt (2005); Chapman (1999); Muller et al. (2003); entre outros.

Arnold et al. (1995) propõem o filtro automático digital recursivo, o *Base Flow Filter*, para a separação dos escoamentos. A equação utilizada no filtro é a proposta por Lyne e Hollick (1979) e testada por Nathan e McMahon (1990). A técnica consiste na separação da vazão por sinais de baixa e alta frequência por meio do filtro automático, onde os sinais de baixa frequência representam o escoamento de base. O filtro não apresenta bases físicas, porém é objetivo e facilmente reproduzível (Arnold et al., 1995). A fim de testar a eficiência do filtro, o autor aplicou em dados já utilizados em outras técnicas (e.g. White e Sloto (1990), Rutledge e Daniel (1994) e o PART model (1993)) e comprovou a eficácia do filtro.

O *Soil and Water Assessment Tool* (Arnold et al., 1998) é um modelo hidrológico baseado na simulação da transformação dos processos chuva-vazão. A grande aplicabilidade do modelo caracteriza-o como uma ferramenta flexível, podendo ser utilizado para simular uma variedade de situações em bacias hidrográficas (e.g. cálculo de vazões, escoamento de base, produção de sedimentos e nutrientes) (Gassman et al., 2007). O modelo utiliza a abordagem linear de um reservatório (aquífero não confinado/rasos) para simular o escoamento de base, tendo como um dos parâmetros para o cálculo a constante de recessão (ALPHA_BF). Esta constante é um parâmetro muito utilizado no processo de adequação e calibração do modelo SWAT para bacias hidrográficas (Cibin et al., 2010; Arnold et al., 2012; Muleta, 2012; Zhang et al., 2015).

O objetivo deste trabalho é a aplicação do filtro automático de Arnold et al. (1995) aos dados de vazão da bacia hidrográfica do Rio Negrinho, e posterior cálculo da constante de recessão (ALPHA_BF). Com o intuito de modificar essa constante nas simulações realizadas com o SWAT, e aperfeiçoar os resultados gerados.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN) foi escolhida como área de aplicação desde estudo, por ser uma bacia monitorada, com presença de dados de nível desde 2002 e de pontos de monitoramento de chuva, próximos a bacia, desde 1974. A BHRN está localizada na região do Alto Rio Negro, norte do estado de Santa Catarina, entre municípios de Rio Negrinho e São Bento do Sul, com uma área de 198,5 km² (Figura 1). A bacia é importante para o município de Rio Negrinho, pois é responsável pelo abastecimento de água da cidade.

O clima da região (segundo a classificação de Köeppen) é temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verões frescos (Cfb). A temperatura média anual varia entre 15,5 a 17,0°C. A precipitação anual média é de 1720 mm, com máxima e mínima de 2500 e 1082 mm, respectivamente e umidade relativa do ar variando entre 80% a 86,2% (EPAGRI/CIRAM, 2014). Na BHRN o tipo de solo Cambissolo é predominante em quase toda sua extensão (98,6%), apresentando apenas uma pequena porção de Gleissolos (1,4%) nas nascentes da parte oeste da bacia (Figura 1B). A bacia é caracterizada pela presença de Floresta Ombrófila Mista (60%), reflorestamento de pinus (14%), agricultura (9%), e área urbana (5%) (Figura 1C).

Dados Hidrológicos

Os dados meteorológicos (unidade relativa, radiação, temperatura e velocidade do vento e chuva) foram obtidos junto a EPAGRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de

Santa Catarina). Os dados pluviométricos dos três pontos de monitoramento (Corredeiras, Campo Alegre, Rio Novo), foram obtidos no site do HidroWeb. Os dados de nível utilizados, para posterior obtenção dos dados de vazão, foram obtidos também no site do HidroWeb. Para a entrada no modelo, as quatro estações de chuva (Figura 1A) foram interpoladas previamente pelo método da Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa. Para o cálculo da constante de recessão foram utilizados dados diários de 2002 a 2013, para a simulação dentro do SWAT foram utilizados os dados diários de 2003 a 2012 e um período de aquecimento do modelo de quatro anos.

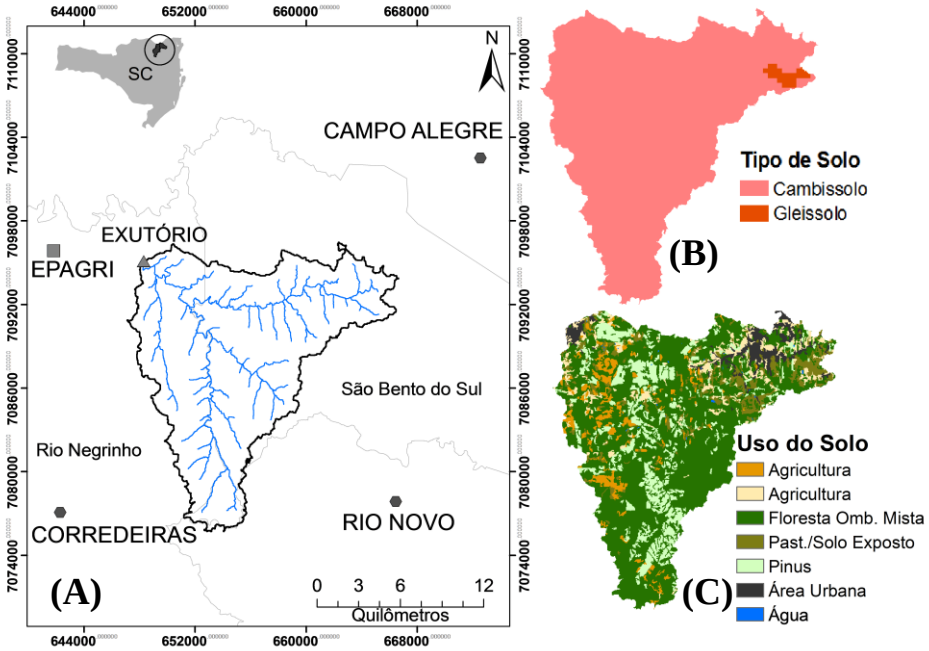

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN) e pontos de monitoramento (A), tipo de solo (B) e uso do solo (C).

SWAT (Águas Subterrâneas)

O modelo simula dois tipos de aquíferos em cada sub-bacia. O primeiro, um aquífero não confinado (raso); o segundo, do tipo profundo confinado. O balanço hídrico de aquíferos rasos é representado pela equação:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (1)$$

onde, $aq_{sh,i}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero em um dia i (mmH_2O); $aq_{sh,i-1}$ é a quantidade de água armazenada no aquífero no dia anterior (mmH_2O); $w_{rchr,sh}$ é a quantidade de água que entra no aquífero raso no dia i (mmH_2O); Q_{gw} é a vazão subterrânea, ou escoamento de base, no canal principal no dia i; w_{revap} é a quantidade de água que retorna da zona vadosa (mmH_2O); $w_{pump,sh}$ é a quantidade de água que vai do aquífero para superfície.

A constante de recessão (ALPHA_BF) é um índice que avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga. Seu valor deve ser entre 0 e 1, onde valores próximos de 0 são representativos de locais com resposta lenta às recargas, e valores próximos a 1 indicam

ambientes muito sensíveis a recarga. É um parâmetro de entrada do modelo, e possui valor *defaut* de 0,048. A constante é encontrada dentro do modelo SWAT, na equação:

$$\frac{dQ_{gw}}{dt} = 10 * \frac{K_{sat}}{\mu * L_{gw}^2} * \left(w_{rchrg,sh} - Q_{gw}\right) = \alpha_{gw} * \left(w_{rchrg,sh} - Q_{gw}\right) \quad (2)$$

onde, K_{sat} é a condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia); μ é a produção de água do aquífero raso (m/m); L_{gw} é a distância entre a crista até o sistema de águas subterrâneas para o canal principal (m); α_{gw} é a constante de recessão.

Filtro Automático de Separação dos Escoamentos

Automated Base Flow Filter - Arnold et al. (1995)

Neste filtro, a vazão é separada em duas partes: escoamento superficial e escoamento de base, utilizando-se da ferramenta automática de separação de escoamentos proposta por Arnold et al, (1995) o método matemático *Automated Base Flow Filter*. A equação utilizada pelo autor é a proposta por Lyne e Hollick (1979) e testada por Nathan e McMahon (1990):

$$q_t = \frac{\beta q_{t-1} + (1+\beta)}{2}(Q_t - Q_{t-1}) \quad (3)$$

onde, q_t é o valor filtrado da vazão no tempo *t* (m³/s); β é um parâmetro constante do filtro (0,925); e Q_t é a vazão no tempo *t* (m³/s).

O filtro é 'passado' pelos dados originais da vazão três vezes, em geral cada passo resulta em uma porcentagem menor do escoamento de base em relação à vazão. O escoamento de base (b_t) é dado por:

$$b_t = Q_t - q_t \quad (4)$$

Constante de Recessão

A constante ou coeficiente de recessão é a inclinação da reta de recessão de um hidrograma, sendo a parte do decaimento do fluxo quando a vazão é proveniente de fontes subterrâneas (Costa e Bacellar, 2009). Dentro do programa *Base Flow Filter* a constante de recessão é determinada pela equação:

$$\alpha = \frac{1}{N} * ln\left(\frac{Q_N}{Q_o}\right) \quad (5)$$

onde, *N* é o número de dias para o começo da recessão (dias); Q_N é o valor da vazão no dia *N* (mm); e Q_o é a vazão no início da recessão (mm).

Curva de Permanência

Curva de permanência é um método disponível na avaliação visual de vazões. Consiste na distribuição de vazões em um intervalo de tempo definido (e.g. diário, mensal e anual) que

representa a relação entre a magnitude e frequência com que essas vazões são igualadas ou superadas em um dado período. Neste trabalho a curva será apresentada em escala *log*, para facilitar a identificação das vazões de recessão (representativas do escoamento de base), e verificar a eficiência da aplicação do método de separação dos escoamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O filtro foi aplicado aos dados diários de vazão (2002 a 2013), para estimar o fator ALPHA_BF relativo à bacia de estudo, que é utilizado pelo SWAT para o cálculo do escoamento de base. O resultado final foi de um ALPHA_BF igual a 0,0609, o qual foi substituído e fixado para toda a bacia. Após as simulações, com e sem a modificação da constante de recessão, os dados de escoamento total, superficial e de base foram selecionados para as comparações realizadas neste estudo. A Figura 2 apresenta a curva de permanência (escala *log*) para as vazões totais, da simulação realizada no período de 2003 a 2012.

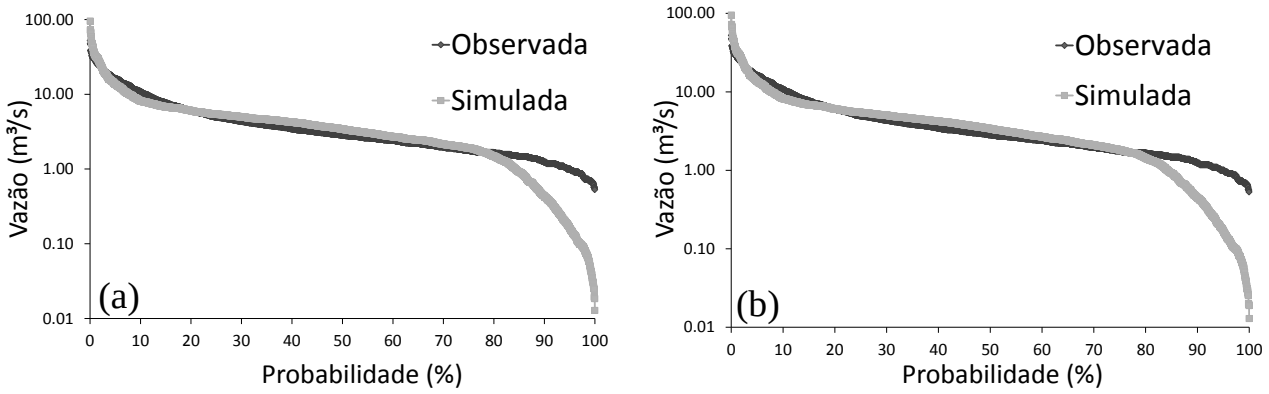

Figura 2 - Curva de permanência (escala *log*) das vazões diárias simuladas e observadas para bacia hidrográfica do Rio Negrinho, nos anos de 2003 a 2007. A Figura (a) representa a curva para os dados brutos; e a Figura (b) representa a curva para a simulação com a modificação do ALPHA_BF.

As duas curvas, mesmo com a modificação da constante de recessão, são muito similares. Entre algumas diferenças encontradas, estão os valores entre 70% e 80% de probabilidade de ocorrência. O erro dos dados simulados em relação aos observados é menor quando o filtro de separação dos escoamentos é aplicado, os dados brutos (Figura 1a) apresentam um erro médio de 5,5%, e os dados com a aplicação do filtro (Figura 1b) um erro médio de 1,6%. Outra tentativa de identificar as diferenças é analisando os volumes anuais de escoamento superficial e de base, apresentados na Tabela 1. Quando observamos os valores totais de vazão, às duas simulações apresentam uma pequena diferença, de no máximo 1%, o mesmo acontece com os resultados dos escoamentos superficial e de base.

O modelo SWAT utiliza, além do ALPHA_BF, outros sete parâmetros de entrada para o cálculo do comportamento da água subterrânea. Visto que a modificação causada pelo filtro, no cálculo das vazões mais baixas não foi expressiva como esperado, foi realizada uma análise de sensibilidade, para os dados diários destes parâmetros, na bacia hidrográfica do Rio Negrinho, buscando uma justificativa para este resultado.

A análise de sensibilidade é um método que permite avaliar quanto os resultados dos modelos hidrológicos são sensíveis às suas variáveis ou parâmetros, de uma forma sistemática e livre da variação de erros. Este método pode identificar parâmetros que têm ou não uma influência significativa sobre as simulações (Mccuen e Snyder, 1986; van Griensven et al., 2006). A quantidade excessiva de parâmetros é um problema conhecido em modelos hidrológicos,

especialmente em modelos distribuídos e semi-distribuídos. Assim, métodos para reduzir o número de parâmetros, são importantes para a utilização eficaz destes modelos (van Griensven et al., 2006). O desconhecimento dos parâmetros mais sensíveis poderá ocasionar em resultados menos eficientes, e tempo gasto de forma desnecessária em ajustes nas simulações (Lenhart et al., 2002).

Tabela 1 - Médias anuais dos volumes de escoamento medidos (vazão total) e simulados (Vazão total, escoamento superficial e de base), tanto para os dados brutos (sem a modificação do ALPHA_BF), como para os dados com a aplicação do filtro automático.

			Vazão Total (mm)		**Escoamento Superficial (mm)**		**Escoamento de Base (mm)**	
Ano	**Chuva**	**Medido**	**Simulado**		**Simulado**		**Simulado**	
			Bruto	**Arnold**	**Bruto**	**Arnold**	**Bruto**	**Arnold**
2003	1240	487	595,60	595,99	146,45	146,45	450,84	450,87
2004	1525	461	805,04	806,09	234,34	234,34	572,39	573,45
2005	1901	722	1200,29	1198,22	418,84	418,84	783,40	781,33
2006	1096	256	458,50	462,51	136,00	136,00	323,58	327,59
2007	1777	533	1026,92	1028,19	361,89	361,89	666,85	668,18
2008	1755	776	1178,30	1180,03	325,45	325,45	854,86	856,59
2009	1743	822	948,34	951,87	359,72	359,72	590,39	593,91
2010	2212	1258	1564,80	1564,27	494,68	494,68	1072,65	1072,11
2011	2247	1068	1706,15	1698,15	543,47	543,47	1165,16	1157,15
2012	1741	766	1105,78	1106,91	359,73	359,73	747,98	749,11

A análise foi realizada dentro do próprio SWAT, somente para os parâmetros que estão envolvidos no cálculo dos processos de águas subterrâneas. O modelo utiliza o método *one-at-a-time* (Morris, 1991) para o cálculo da sensibilidade. A metodologia consiste na incorporação da sensibilidade local, cada execução tem apenas um parâmetro alterado por simulação, ou seja, a *one-at-a-time* mostra a sensibilidade de uma variável se todos os outros parâmetros permanecem constantes.

A Tabela 2 mostra os parâmetros envolvidos na análise em ordem de maior sensibilidade. O parâmetro considerado mais sensível é o coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (RCHRG_DP), sendo o ALPHA_BF apenas o quinto mais sensível para a bacia. Este fato pode justificar o porquê de sua alteração não ser tão significativa nas simulações. Levando assim, a necessidade da modificação dos outros parâmetros envolvidos para um bom ajuste do escoamento de base.

Tabela 2 – Parâmetros que regem os processos de comportamento da água no solo, suas descrições e pontuação na análise se sensibilidade.

Parâmetro	**Descrição**	**Sensibilidade**
RCHRG_DP	Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm).	1
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água à zona de saturação.	2
GW_QMN	Limite de água no aquífero livre para ocorrer o escoamento de base (mm).	3
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias).	4
ALPHA_BF	Constante de recessão (dias).	5
REVAPMN	Limite de água no aquífero livre para ocorrer o retorno para o solo (mm).	6
GW_SPYLD	Produção de água do aquífero livre (m/m).	-

CONCLUSÃO

A importância das águas subterrâneas é quase intuitiva nos dias de hoje, seja por seu valor para o consumo humano, ou pela necessidade de entender todos os processos envolvidos em uma bacia hidrográfica. A separação da vazão total em escoamento superficial e de base é um dos passos no entendimento do comportamento das águas subterrâneas.

O objetivo deste estudo foi a aplicação de um filtro automático de separação de escoamentos (*Automated Base Flow Filter*, Arnold et al., 1995), para a determinação da constante de recessão e aperfeiçoamento de simulações realizadas com o modelo SWAT. O resultado final na substituição desta constante, não foi satisfatório como esperado (o valor da constante de recessão modificou de 0,048 para 0,0609), com uma diferença em torno de 1% no resultado final do escoamento de base anual. A análise de sensibilidade dos parâmetros (apenas para os que envolvem os processos de simulação de águas subterrâneas) aponta uma justificativa para tal resultado. O ALPHA_BF não é um dos parâmetros mais sensíveis para bacia hidrográfica do Rio Negrinho, esclarecendo o fato de sua modificação não causar maiores mudanças nos resultados. Indicando que estas poucas alterações podem estar melhor relacionadas com a sensibilidade do parâmetro, e não com a eficiência do filtro na separação dos escoamentos.

Este é apenas um processo inicial na utilização de modelos hidrológicos com finalidade de simulações de escoamentos. Aconselha-se, o ajuste dos outros parâmetros envolvidos, seja por medições em campo ou processo de calibração para um ajuste eficiente do modelo SWAT em simulações do escoamento de base.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. (1995). Automated baseflow separation and recession analysis techniques. Ground Water. 33 (6), pp.1010-1018.

ARNOLD. J. G.; SRINIVASAN. R.; MUTTIAH. R.S.; WILLIAMS. J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. Water Resour. Assoc. 34 (1), pp.73–89.

CHAPMAN, T. (1999). A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation. Hydrological Processes. 13, pp.701-714.

CIBIN, R.; SUDHEER, K.P.; CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. Hydrological Processes. v.24, n.9, p.1113-1148, 2010.

COSTA, F.M.; BACELLAR, L. A. P. (2009). Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir de fluxo de base. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 15, pp.173-183.

ECKHARDT, K. (2005). How to construct recursive digital filters for base flow separation. Hydrological Process. 19, pp. 507-5015.

EPAGRI/CIRAM. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina - Zoneamento

Agroecológico. Disponível em: < http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=88&Itemid=273 >. Acesso em: 18 de fevereiro de 2014.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 50 (4), pp.1211-1250.

LENHART. K.; ECKHARDT. N.; FOHRER; FREDE H.G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Physics and Chemistry of the Earth. v.27, pp.645–654.

LYNE, V.; HOLLICK, M. (1979). Stochastic time-variable raindfall runoff modeling. In: Hydrological and Water Resources Symposium, Berth, 1979, Proceedings. Australia, oo.89-92.

McCUEN, R.H.; SNYDER, W.M. (1986). Sensitivity analysis and Probabilistic Modeling. In: McCUEN, R.H.; SNYDER, W.M.Hydrologic modeling: statistical methods and applications. New York: Prentice Hall.

MORRIS, M.D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. Technometrics. v.33(2), pp.161-174.

MULETA, M. K. Improving model performance using season-based evaluation. Journal of Hydrologic Engineering. v.191, p.191-200, 2012.

MULLER, K.; DEURER, M.; HARTMANN, H.; BACH, M.; SPITELLER, M.; FREDE, H.G. (2003). Hydrological caraterization of pesticide loads using hydrograph separation at different scales in a German catchment. Journal of Hydrology. 273, pp.1-17.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. Water Resources Research. 26(7), pp.1465-1473.

SMAKHTIN, V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology. 240, pp. 147-186.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T. (2006). Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality Models, Water Science. & Technology. 53(1), pp.51–59.

ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, B. Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dryseasons.Ecological Modelling. v.301, p.54-61, 2015.