

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/8: 1497-1513
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

APLICAÇÃO DE SÉRIE TEMPORAL MÍNIMA PARA SIMULAÇÃO DE VAZÕES EM BACIA EXPERIMENTAL DO CERRADO

Use of Minimum Time Series for Streamflow Simulation in an Experimental Basin of the Cerrado Biome

Kássia Batista de Castro¹, Henrique Llacer Roig¹, Jorge Enoch Furquim Werneck Lima² & Sara Ferrigo³

**¹Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IG**

Campus Darcy Ribeiro, CEP 70.910-900 Brasília, DF
kassiabcastro@gmail.com, roig@unb.br

²Embrapa Cerrados

Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados - CPAC
BR 020 km 18, CEP 73310-970 Planaltina, DF
jorge.werneck-lima@embrapa.br

**³Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT**

Campus Darcy Ribeiro, CEP 70.910-900 Brasília, DF
saraferri@gmail.com

*Recebido em 10 de Agosto, 2015/ Aceito em 23 de Março, 2016
Received on August 10, 2015/ Accepted on March 23, 2016*

RESUMO

Grande parte das bacias hidrográficas experimentais implantadas no âmbito de projetos de pesquisa, tem duração de apenas dois ou três anos, limitando os primeiros estudos hidrológicos ao uso de séries temporais mínimas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e discutir os riscos inerentes à utilização de curtas séries temporais em estudos de simulação de vazões, mesmo em uma bacia agrícola intensamente caracterizada e monitorada no bioma Cerrado. O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental do Alto Rio Jardim- BEARJ (105 km²), situada no Distrito Federal. Utilizaram-se para tanto dados de uma estação fluviográfica instalada no exutório da bacia, quatro estações pluviográficas, uma estação climatológica, cinquenta poços piezométricos e cinquenta e quatro perfis de solos. O trabalho foi desenvolvido com o uso do SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Na busca de um período crítico para a análise, foram selecionados dois anos consecutivos de dados com totais anuais de precipitação similares na bacia, em torno de 1.100 mm, porém, com distribuição temporal diferenciada ao longo dos meses. O primeiro ano de dados foi utilizado para a calibração manual do modelo, obtendo-se índice de Nash e Sutcliffe igual a 0,60, considerado satisfatório. Os dados do segundo ano da série de vazões diárias foram utilizados na tentativa de validação do modelo, o que não foi alcançado, sendo o índice de Nash e Sutcliffe negativo, igual a -0,84. Os resultados indicam que, mesmo

sendo a bacia bem caracterizada e monitorada, a existência de uma série histórica pequena e com grande variação do regime hidrológico mensal pode inviabilizar a validação do modelo gerado.

Palavras-chave: SWAT, Modelagem Hidrológica, Bacias Representativas, Hidrometria.

ABSTRACT

Great part of the experimental basins is usually implemented in the context of research projects with only two or three years, forcing the first hydrological studies in these areas to be developed with short and limited time series. The objective of this study was evaluate and discuss risks involved in using short time series in streamflow simulation studies, even in an intensely characterized and monitored agricultural basin in the Cerrado biome. The study was conducted at the Upper Jardim Experimental River Basin – BEARJ (105 km²), located in the Federal District, Brazil. Data from a streamflow station installed in the source basin, four rainfall gauge stations, one climatological station, fifty piezometric wells and fifty-four soil profiles were used. The study was conducted using the SWAT (Soil Water Assessment Tool). Seeking for a critical period for the analysis, there was selected two consecutive years of data with similar annual total precipitation, around 1,100 mm, but with different temporal distribution over the months. The first year of daily streamflow data was used for manual calibration of the model, resulting in a satisfactory Nash and Sutcliffe index equal to 0.60. Data from the second year was used in an attempt to validate the model, what was not achieved. In this case, the Nash Sutcliffe index was negative, equal to -0.84. The results indicate that even working with a well-characterized and monitored basin, the use of a short time series and with great variation in the hydrological regime during the study period can derail the validation of the generated model.

Keywords: SWAT, Hydrologic Modeling, Representative Catchments, Hydrometry.

1. INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado ocupa cerca de 24% do território brasileiro e responde por grande parte da produção agrícola nacional. Além disso, recobre a região do Planalto Central Brasileiro, zona central e de elevada altitude em relação às demais regiões do país. Neste cenário, o Cerrado desempenha papel fundamental na produção e distribuição de recursos hídricos para oito das doze grandes regiões hidrográficas brasileiras (LIMA & SILVA, 2007).

Diante do acelerado processo de ocupação da terra e das dimensões do Cerrado, o entendimento e a avaliação das relações entre as formas de uso e ocupação do solo e os recursos hídricos torna-se um passo importante para o processo de gestão e planejamento dos recursos hídricos.

Visando buscar este entendimento, neste e em outros biomas, vários estudos tem sido desenvolvido em bacias consideradas representativas, que refletem as características físicas e hidrológicas de uma determinada região, com diferentes estágios de uso e ocupação da terra. Estas bacias, quando se encontram bem instrumentadas, de modo a permitir o monitoramento intensivo e a modelagem dos recursos hídricos, são conhecidas na literatura como Bacias Experimentais (ZAKIA, 1998; SAGARA, 2001; SILVA, 2004; BARROS &

BOWDEN, 2008; SILVIA 2014; EMBRAPA, 2015).

Assim, o Distrito Federal, inserido na região central do Brasil e no bioma Cerrado, tem vivenciado um intenso processo de mudança do uso da terra (MENEZES *et al.*, 2012), o que levou à implantação de diversas bacias experimentais mantidas por várias Redes de pesquisa, como, por exemplo: Estudos hidrológicos e sedimentológicos em bacias experimentais e representativas do semiárido e cerrado (MONTENEGRO *et al.*, 2014, 2015) e Monitoramento de recursos hídricos superficiais (MCTI/ FINEP CT-HIDRO 01/2013). Dentre estas bacias estudadas por estas REDES podemos destacar: a do Córrego Capetinga (LIMA *et al.*, 2001); do Alto Rio Jardim (LIMA *et al.*, 2008); do Capão Comprido (LOPES, *et al.*, 2010); do Pípiripau (SALLES *et al.*, 2012); do Sarandi (LIMA *et al.*, 2013) e; do Lago Descoberto (FERRIGO, 2014).

Os pesquisadores envolvidos no estudo hidrológico dessas bacias trabalham dentro dos preceitos estabelecidos pela Política Nacional de Recurso Hídricos (PNRH 1 e 2). Estas políticas estabeleceram, após uma ampla análise dos modelos hidrológicos existentes e visando a compatibilização dos dados, bem como a comparação de resultados, a utilização do modelo SWAT (Soil and Water Assessment

Tool) como ferramenta de uso comum nessas áreas experimentais. Deve-se destacar que o SWAT foi escolhido por várias REDES de monitoramento hidrológico como ferramenta de análise e vem sendo cada vez mais utilizado no Brasil (GARBOSSA *et al.*, 2011; BRESSIANE *et al.*, 2015).

O SWAT é uma ferramenta de modelagem hidrológica que possibilita a simulação da vazão, do fluxo de sedimentos e da qualidade da água em bacias hidrográficas (SRINIVASAN & ARNOLD, 1994). Por ser um modelo que representa diferentes processos hidrológicos, contínuo no tempo e no qual os parâmetros podem ser inseridos e avaliados de forma espacializada, o SWAT se apresenta como uma ferramenta interessante para a avaliação de impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos (GASSMAN *et al.*, 2007).

Em áreas de Cerrado, são recentes as aplicações do modelo SWAT (FERRIGO *et al.*, 2013; SALLES *et al.*, 2012; STRAUCH *et al.*, 2012, 2013), contudo, em nenhuma das bacias estudadas existe uma caracterização tão detalhada com relação às características hidrológicas do solo como a bacia experimental do Alto Rio Jardim, onde estão disponíveis 54 perfis com a caracterização físico-química e hidrológica dos solos em diferentes profundidades, e cerca de 50 poços piezométricos permitindo uma melhor avaliação dos processos de infiltração, recarga e geração de fluxo de base (LIMA, 2010). Entre os principais objetivos da utilização de bacias tão bem caracterizadas e monitoradas estão a busca pelo avanço do conhecimento sobre o comportamento hidrológico e a representação dos processos hidrológicos existentes. Essas áreas também possibilitam o desenvolvimento ou a avaliação, teste e ajuste de modelos hidrológicos, respeitando-se a base conceitual e física dos fenômenos estudados. Sem isso, os riscos e incertezas envolvidos no uso de modelos hidrológicos na avaliação de cenários, como os de mudança do uso da terra e do clima, podem inviabilizar a aplicação dessas importantes ferramentas.

Uma grande dificuldade em relação ao uso de bacias experimentais está no fato de que, grande parte delas é implantada e operada no âmbito de projetos de pesquisa com duração

de apenas dois ou três anos. Dessa forma, é freqüente a existência de bacias experimentais com diferentes níveis e intensidades de dados, com séries temporais descontínuas ou mesmo com falhas em decorrência da falta de uma estrutura adequada à execução de trabalho tão relevante. Portanto, torna-se importante o conhecimento sobre potencialidades e limitações de estudos hidrológicos sob essas condições de disponibilidade de dados para que se possa avançar no aproveitamento desses esforços.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e discutir riscos inerentes à utilização de curtas séries temporais em estudos de simulação de vazões, mesmo em uma bacia com características físicas conhecidas de forma detalhada e com intenso monitoramento dos processos hidrológicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão será apresentada sucintamente a caracterização fisiográfica da bacia do alto rio Jardim, importante para a compreensão dos processos físicos envolvidos no ciclo hidrológico. Assim como as formas de obtenção dos dados de entrada e definição dos parâmetros utilizados e ainda os programas e procedimentos adotados para a simulação hidrológica.

2.1 Área de estudo

A bacia experimental do alto rio Jardim (BEARJ) está localizada entre as coordenadas UTM 8.261.982,8 e 8.244.719,5S e 216.293,4 e 226.613,2W, e encontra-se na porção leste do Distrito Federal, inserida na Bacia do Rio Preto, que é afluente do Rio Paracatu, importante tributário da margem esquerda do Rio São Francisco (Figura 1).

A área de drenagem total da BEARJ é de 104,86 km², dividida em duas sub-bacias, a do córrego Estanislau, com 49,71 km², e a do rio Jardim, com 55,15 km² (LIMA, 2010).

O clima na bacia do alto Jardim é caracterizado por um verão chuvoso e inverno seco. Os meses chuvosos compreendem o período de outubro a março e a estação seca se prolonga desde o mês de abril até o mês setembro. A precipitação média anual na área varia entre 1.000 e 1.700 mm. Na estação chuvosa ocorre 90% do total anual de pluviosidade, com o mês de janeiro apresentando o maior índice pluviométrico, cerca

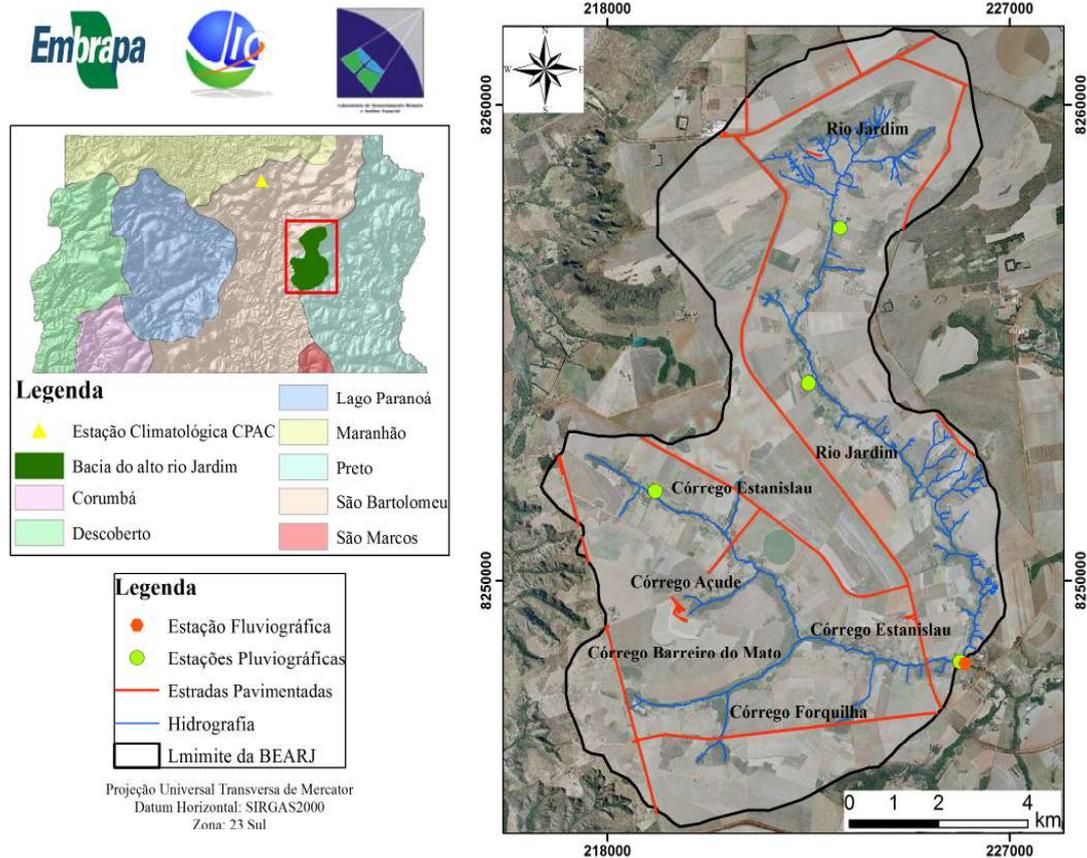


Fig.1 - Localização da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim onde é possível verificar a distribuição das estações pluviográficas, fluviográfica e climatológica.

de 240 mm. Na estação seca, a média mensal da pluviosidade não ultrapassa os 60 mm (GODOY & LOPES-ASSAD, 2002).

De acordo com o mapeamento desenvolvido por Campos & Freitas Silva (1998) a bacia do alto rio Jardim se desenvolveu sobre as rochas metassedimentares do Grupo Paranoá, enquanto que a geomorfologia predominante é de terrenos planos (53% da área) e suave ondulados (43%), principalmente na parte oeste da bacia e nas áreas de interflúvios (GODOY & LOPES-ASSAD, 2002).

A maior parte da BEARJ é composta por Latossolos (76,38%), 16,68% é constituída de Cambissolos e o restante é dividido entre as classes Plintossolo (2,54%), Gleissolo (2,41%), Neossolo Quartzarênico (2,09%) e, ainda, uma pequena parcela (0,24%) de Afloramentos de Rocha (adaptado de REATTO *et al.*, 2000).

Com a ocupação da bacia pelas atividades agrícolas e pecuárias o seu cenário natural foi sendo gradativamente substituído. Atualmente a bacia possui quase que a totalidade de seus usos voltados para a agricultura, restando apenas

pequenas porções de cerrado, campo e matas de galeria margeando o curso dos rios (FROTA, 2006).

2.2 O modelo SWAT

O SWAT é um modelo em escala de bacia hidrográfica desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA/ARS). O modelo foi criado para prever o impacto de práticas de manejo do solo e agroquímicos na produção de sedimentos e na quantidade e qualidade da água em bacias hidrográficas complexas e não monitoradas, com diferentes solos e condições de uso da terra (ARNOLD *et al.*, 2000). O modelo permite realizar simulações de: escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, derretimento de neve (não se aplica a este caso) e fluxo na rede de drenagem. Além disso, é possível realizar análise do impacto de reservatórios, do ciclo hidrossedimentológico, de aspectos climáticos, bem como de nutrientes, pesticidas, bactérias, e práticas agrícolas na qualidade das águas (NEITSCH *et al.*, 2005; DHAR &

MAZUMDAR, 2009, LI *et al.*, 2009).

Inúmeros trabalhos já foram produzidos utilizando o SWAT em diferentes localidades e para diversas aplicações, como por exemplo, Gassman *et al.* (2014), Babbar-Sebens *et al.* (2015), Bieger *et al.* (2015), Guzman *et al.* (2015) e Winchell *et al.* (2015). No Brasil o modelo também vem sendo largamente empregado como observado nos trabalhos de Bonumá *et al.* (2014), Rodrigues *et al.* (2014), Bressiani *et al.* (2015), Creech *et al.* (2015) e Fukunaga *et al.* (2015).

Carvalho (2010) utilizou o modelo SWAT para estimar a produção de sedimentos na sub-bacia do Ribeirão Rodeador, uma das sete sub-bacias contribuintes ao lago do Descoberto - DF. Os resultados deste estudo demonstraram que o modelo utilizado sem calibração não foi capaz de reproduzir a produção de sedimentos na Sub-Bacia Hidrográfica de forma satisfatória, tendo subestimado os valores finais. Para a estimativa de fatores como escoamento superficial, produção de água e evapotranspiração o modelo apresentou melhor desempenho.

Para a sub-bacia do Córrego Capão Cumprido, contribuinte da bacia do Rio Descoberto, Ferrigo *et al.* (2012) realizou a simulação da carga de sedimentos calibrado apenas pelos dados de vazão, através do SWAT, para um período de vinte e um anos, usando para a calibração da vazão os anos de 2000 a 2005, utilizando os dados médios mensais, obteve para essa análise um ENS de 0.69. A validação da modelagem foi efetuada para os anos 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, com índice de Nash e Sutcliffe respectivamente de 0.84, 0.55 e 0.81.

Salles *et al.* (2012) aplicou o modelo para a bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau, para a simulação da vazão na bacia, o modelo foi calibrado manualmente, em relação à vazão média mensal observada em um período de dez anos (1989 a 1998) e depois validado com uma série independente (1999 a 2008). Após a calibração do modelo os resultados obtidos indicaram um bom ajuste entre a vazão média mensal simulada pelo modelo SWAT e os dados observados. A simulação da vazão média mensal também foi satisfatória no período selecionado para validação do modelo com índice de Nash e Sutcliffe (ENS) de 0,79.

Diante de estudos promissores com a utilização do modelo SWAT em diversos locais

do mundo, esse modelo torna-se um suporte para resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (UZEIKA *et al.*, 2012).

2.3 Dados de entrada do modelo

Os dados espaciais de entrada para realizar as simulações utilizando o modelo SWAT são: o MDE (Modelo Digital de Elevação), o mapa de uso e cobertura da terra e o mapa de solos. No caso deste trabalho, foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- MDE gerado por Castro (2013) com o uso do algoritmo ANUDEM (HUTCHINSON, 1989, HUTCHINSON *et al.*, 2011). A partir de dados planialtimétricos, na escala 1:10.000 (TERRACAP, 2010);
- Mapa de uso e cobertura do solo na escala 1:10.000 elaborado através da interpretação visual das ortofotos com resolução espacial de 1 metro (TERRACAP, 2010; CASTRO, 2013);
- Mapa de solos na escala 1:50.000 da Bacia do Rio Jardim (REATTO *et al.*, 2000).

Os parâmetros de solo provem de 54 perfis espalhados por toda a bacia, com amostragem pontual em três profundidades (15, 60 e nível do lençol freático) obtidos durante o desenvolvimento da REDE “Estudos hidrológicos e sedimentológicos em bacias experimentais e representativas do semiárido e cerrado” (MCT/FINEP/CT-Hidro 01/2010) onde o detalhamento metodológico e da parametrização podem ser encontrados em Lima (2010). Os dados referentes às características físicas do solo são discretizados no modelo por camada de solo, dessa forma, a base de dados foi construída com três camadas de solos, com os intervalos de 0-30 cm, de 30-100 cm e de 100-350 cm, sendo as duas primeiras fixas para todos os tipos de solos e a terceira variável de acordo com cada classe de solo conforme apresentado por Castro (2013).

Em razão da dificuldade de coleta de amostras abaixo de 100 cm de profundidade, apenas os dados de condutividade hidráulica saturada possuem dados coletados em campo correspondentes a terceira camada, pois estes dados provem dos poços piezométricos. Para os demais parâmetros foram utilizados os valores

dos dados coletados referentes ao segundo nível de profundidade.

As classes hidrológicas do solo foram agrupadas conforme Sartori *et al.* (2005a). Para o cálculo do escoamento superficial foi utilizado o método Curva número (NRCS, 1997). Dessa forma, para as classes de uso da terra, sempre que possível, foram alterados os valores de Curva Número (CN) de acordo com dados referentes às condições brasileiras, adaptados dos trabalhos de Setzer & Porto (1979), Sartori *et al.* (2005b) e Lima (2009).

Na busca da melhor condição de estudo (maior número de parâmetros monitorados de entrada versus dados extraídos da literatura) para verificação do impacto de pequenas séries hidrológicas históricas buscou-se estabelecer o período onde todas as estações estavam em operação e que apresentassem variações significativas das médias mensais.

Deste modo, definiu-se que a série histórica de precipitação a ser utilizada para realizar a simulação hidrológica na BEARJ seria aquela compreendida no período de 01/07/2006 a 30/06/2008. Neste caso, trabalhou-se com dados de precipitação diária de quatro estações pluviográficas com medições a cada 0,2 mm instaladas na bacia de estudo (Figura 1).

Os dados de vazão diária utilizadas para este estudo foram obtidos do trabalho de Lima (2010), correspondente à estação (Jardim Jusante - estação não cadastrada no sistema da ANA) localizada no exutório da bacia. Os dados climáticos diários (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação) provem da estação meteorológica da Embrapa Cerrados (Estação CPAC-Principal), localizada a cerca de 30 km da área de estudo (Figura 1).

2.4 Processo de modelagem

Para este trabalho foi simulado apenas o primeiro módulo (chuva-vazão) presente no SWAT, que abrange a estimativa das várias etapas do ciclo hidrológico: evapotranspiração, escoamento superficial, fluxo lateral e subterrâneo, infiltração, percolação, capilaridade, recarga e vazão.

Para que o modelo possa simular as condições iniciais da bacia e assim minimizar discordâncias entre valores simulados e observados foi necessário realizar o aquecimento

do modelo (warm up). Para isso é necessário destinar uma parte da série temporal para a simulação, a qual não foi considerada nas análises subsequentes (ANDRADE, 2011).

Assim, como a série temporal utilizada neste estudo é limitada a dois anos de dados o ano de 01/07/2006 a 30/06/2007 foi replicado três vezes, representando três anos na simulação, seguindo procedimento adotado por Oliveira *et al.* (2006), Lima (2010) e Carvalho Neto *et al.* (2011).

Como a bacia experimental do alto rio Jardim tem uma excelente base de dados de entrada requerida pelo SWAT, inicialmente, efetuou-se a simulação da vazão diária para o primeiro ano de dados para verificação ou confirmação da necessidade de ajuste dos parâmetros do modelo.

A análise de sensibilidade, realizada para identificar os parâmetros mais significativos na modelagem, foi efetuada por meio do método Latin Hypercube One Factor at a Time (LH-OAT), disponível no modelo SWAT. Este método combina a robustez da amostragem Hipercubo Latino, que assegura que a gama completa dos parâmetros foram sujeitas a amostragem, com a precisão do método OAT, assegurando que as alterações na saída de cada execução do modelo podem ser atribuídas ao parâmetro que foi alterado sem haver ambigüidades (GRIENSVEN *et al.*, 2006). Para mais informações sobre o funcionamento do método consultar Neitsch *et al.* (2005).

Os intervalos de variação dos valores dos parâmetros utilizados neste trabalho foram definidos, sempre que possível, com base em dados obtidos pelo monitoramento da bacia, buscando deste modo a manutenção da base física do modelo. A avaliação dos parâmetros mais sensíveis foi realizada de acordo com Lenhart *et al.* (2002) e Moriasi *et al.* (2007).

O período destinado para a calibração foi de 01/07/2006 a 30/06/2007. O processo de calibração se deu de forma manual, onde cada parâmetro foi sendo alterado na busca da aproximação entre a vazão simulada e a observada, de modo que as alterações se aproximassem, também, os valores de referência para o balanço hídrico.

Para avaliar a eficiência das simulações foi utilizado o índice de Nash e Sutcliffe (1970)

conforme equação 1.

$$ENS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{med,obs})^2} \right] \quad (1)$$

em que:

y_i^{obs} é a vazão observada; y_i^{sim} é a vazão simulada e; $y_{med,obs}$ é a média da vazão observada.

Para a verificação do modelo, a simulação da vazão foi efetuada para o período de 01/07/2007 a 30/06/2008, usando os mesmos

valores dos parâmetros obtidos no processo de calibração. O mesmo teste de eficiência foi utilizado para avaliar se o SWAT, com os parâmetros alterados na calibração, foi capaz de representar a vazão diária gerada na bacia de forma satisfatória.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da simulação da vazão diária no exutório da BEARJ sem qualquer procedimento de calibração, utilizando valores dos parâmetros iniciais extraídos do monitoramento da bacia, são apresentados na Figura 2.

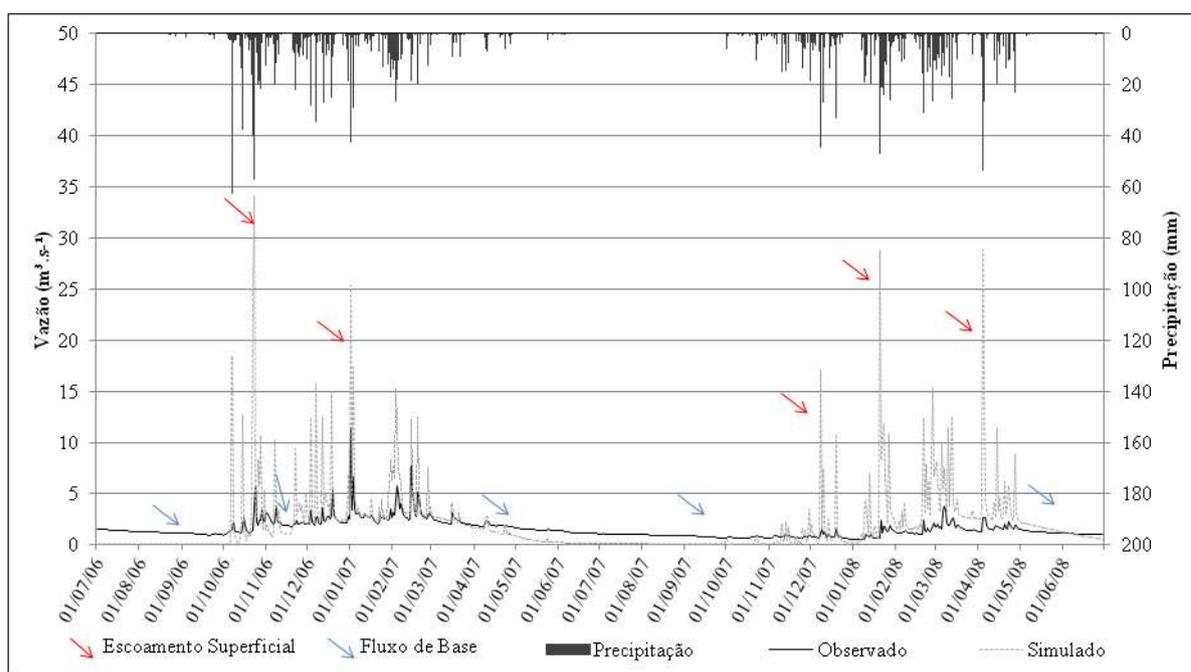


Fig. 2 – Séries diárias de precipitação média e vazão observadas e vazão simulada utilizando o SWAT sem calibração para a Estação Jardim Jusante (ponto exutório da BEARJ), onde é possível perceber que o SWAT subestimou o fluxo de base (setas azuis) e superestimou os eventos de escoamento superficial (setas vermelhas).

O gráfico da Figura 2 apresenta a relação entre os eventos de chuva (precipitação média observada) e sua resposta para a vazão no exutório da bacia (estação Jardim Jusante) onde podem ser observadas a vazão simulada (linha pontilhada) e a vazão observada (linha contínua). Assim, os picos apresentados no gráfico (setas vermelhas, Figura 2) representam o escoamento superficial, que tem uma rápida resposta, por outro lado o fluxo de base (setas azuis) por apresentar uma resposta lenta, uma vez que é proveniente da água que percola pelo

solo até alcançar o curso d’água, é representado no gráfico (Figura 2) por meio dos valores mais baixos e com pouca variação.

Dessa forma, foi possível verificar que na simulação inicial, sem calibração, de um modo geral o modelo respondeu aos eventos de chuva, porém, os picos de vazão, foram superestimados, enquanto o fluxo de base foi subestimado (Figura 2). No caso, a vazão simulada variou de zero a 34,0 m³s-1, quando os valores observados no período foram de 0,46 até 12,0 m³s-1.

O índice de Nash e Sutcliffe (ENS) para o resultado desta primeira simulação (Figura 2) foi de -10,81, indicando que, sem calibração, neste caso, o modelo não foi capaz de representar as vazões observadas de forma satisfatória. Green e Griesven (2008) consideraram que para uma calibração com dados diários valores de ENS superiores a 0,4 são considerados satisfatórios para a simulação.

Analisando-se os dados a respeito do ciclo hidrológico resultantes da simulação com o SWAT, serão analisados aqui três fatores de maior relevância e que possuem estudos para discussão (evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de base), verificou-se que, do total médio anual precipitado na bacia neste período de dois anos (1.113,8 mm) 40,2% foi convertido em evapotranspiração, 32,2% em escoamento superficial e 23,3% em fluxo de base.

Comparando-se estes resultados com os medidos por Lima (2010), 70,0%, 3,0% e 26,0%, respectivamente, verificou-se que os resultados da simulação subestimaram a evapotranspiração e superestimaram o escoamento superficial na bacia. Em relação ao fluxo de base, os valores simulados e observados foram próximos. Essa diferença entre os valores simulados pelo modelo e os dados levantados por Lima (2010) se deve a falta de calibração do modelo, o que é comum em trabalhos dessa natureza como, por exemplo, em Sarmento (2010) e Salles *et al.* (2012).

Esses resultados indicam que mesmo utilizando grande quantidade de dados e conhecimentos sobre as características físicas da bacia, ainda existe a necessidade de calibração de parâmetros do modelo na busca por um melhor ajuste entre os dados de vazão observados e simulados no exutório da bacia.

O ajuste dos parâmetros foi realizado em etapas, de modo que as alterações atendessem aos valores de referência do balanço hídrico medidos na bacia e representassem de maneira satisfatória a vazão diária em seu exutório. Os parâmetros foram ajustados considerando sempre a base conceitual e física da bacia e dos fenômenos analisados, para que dessa forma a simulação retratasse de maneira mais fiel possível a realidade, essa abordagem é extremamente importante, uma vez que, os dados podem ser alterados até se obter um resultados satisfatório,

porém esse resultado pode não estar de acordo com a situação real presente na área de estudo.

Existem três métodos no SWAT para definir a alteração dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos respeitando as características da bacia em análise, a substituição direta, onde o modelo altera o valor diretamente, por adição, em que um valor constante é adicionado no valor inicial do parâmetro e por multiplicação, onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial por porcentagem.

Os parâmetros modificados na calibração, definidos com base na análise de sensibilidade do modelo e nos resultados referentes aos fluxos hidrológicos na bacia, bem como o método e o intervalo de variação dos dados utilizados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Variação dos valores (iniciais e finais) para os parâmetros utilizados na calibração e o método de variação

Parâmetro	Intervalo de Variação	Valor Inicial	Valor Final
CN2	-20 até 10 (%)	Variável por classe	0,8
ALPHA-BF	0,0 até 0,3	0,048	0,1
SURLAG	0,0 até 0,5	4	0,01
SOL-K	-97 até 2000 (%)	Variável por classe	0,5
CANMX	0,0 até 20	0	15
RCHRG-DP	0,0 até 0,5	0,05	0,02
ESCO	0,0 até 1,0	0,95	0,01
GW-DELAY	-5 até 30	31	180
GW-QMN	-1000,0 até 1000,0	0	-1

CN2 – (valor adimensional) Curva Número para condições úmidas; ALPHA-BF (dias)- Constante de recessão do fluxo de base; SURLAG (horas) - Coeficiente de retardo do escoamento superficial; SOL-K (mm/hr) - Condutividade hidráulica saturada do solo; CANMX (mm H₂O) - Armazenamento máximo do dossel; RCHRG-DP - (valor adimensional) Fração de água percolada para o aquífero profundo; ESCO (mm H₂O) - Fator de compensação de evaporação do solo; GW-DELAY (dias) - Tempo de retardo da água subterrânea; GW-QMN (mm H₂O) - Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície.

Como pode ser observado na Tabela 1, os valores iniciais para alguns parâmetros estão fora do intervalo de variação determinado, isso ocorre, pois o intervalo de variação foi definido considerando as características físicas da bacia, já os valores iniciais foram estipulados levando em consideração a região onde o SWAT foi desenvolvido, tal fato reafirma a necessidade de realizar a calibração/verificação da modelagem.

Considerando que o modelo SWAT trabalha como se fosse um conjunto de reservatórios que operam em sequência, onde o primeiro alimenta o segundo e assim sucessivamente, buscou-se primeiro adequar os valores para evapotranspiração e o escoamento superficial, para isso alterou-se o parâmetro CANMX, que controla a retirada da água do sistema por interceptação pelas plantas e conseqüentemente altera a evapotranspiração. Neste caso o objetivo da mudança foi aumentar a evapotranspiração aumentando o valor deste parâmetro. Depois se alterou o parâmetro CN2, curva número para a condição antecedente II, de forma a diminuir o escoamento superficial e, por conseguinte aumentar a infiltração, alterou-se também o SURLAG, coeficiente de retardo do escoamento superficial, uma vez que a bacia possui um tempo de resposta rápido para o escoamento superficial.

Uma vez ajustados estes parâmetros foram modificados os valores dos parâmetros que influenciam na rotina de água no solo e de água subterrânea. Primeiro alterou-se o valor de SOL-K, condutividade hidráulica do solo, visando um aumento da água para as camadas mais baixas do perfil de solo, controlando assim o aumento da água disponível para a percolação e para o fluxo de base. Com uma maior quantidade de água nas camadas mais profundas do solo, alterou-se o valor do parâmetro ESCO, fator de compensação de evaporação do solo, para aumentar a demanda evaporativa do solo pelas camadas inferiores. Posteriormente, foram modificados os parâmetros GW-QMN, limite entre a profundidade de água entre o aquífero raso e a superfície, GW-DELAY, tempo de retardo da água subterrânea e ALPHA-BF, constante de recessão do fluxo de base, todos ligados à água subterrânea, o primeiro foi alterado para ajustar a profundidade da água entre o aquífero raso e a superfície, o segundo foi modificado em virtude

da bacia ter uma resposta mais lenta da água subterrânea para a descarga no rio e último foi modificado para aumentar o volume de água no fluxo de base, buscando-se, principalmente, elevar a vazão mínima nos períodos de estiagem. O último parâmetro modificado foi o RCHRG-DP, fração de água percolada, este foi modificado para que menos água do fluxo de base ficasse disponível para a recarga do aquífero.

Os valores finais dos parâmetros obtidos no período de calibração foram empregados no processo de busca pela verificação do modelo. Os resultados obtidos nos períodos de calibração e verificação do modelo são apresentados na Figura 3.

Na Figura 3, observa-se de forma mais clara a diferença entre as séries temporais dos dois anos avaliados. Outro ponto que chama a atenção é que para o período de calibração 2006/2007 as principais precipitações ocorreram em outubro (figuras 2 e 3) e nos meses de dezembro e janeiro os valores foram menores.

Comparando-se os resultados apresentados nas figuras 2 e 3, verifica-se que, após a calibração, houve uma melhora significativa do ajuste do fluxo de base, principalmente, no período de seca, onde os dados simulados chegavam à zero (setas azuis, Figura 3). A vazão mínima alcançada pelo modelo depois de calibrado para esse período foi de $0,62 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto os dados observados apresentam valor mínimo de $0,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

No caso dos valores de pico de vazão, após a calibração observou-se uma redução considerável dos valores extremos simulados (Figura 3), quando comparados à simulação anterior, sem calibração (Figura 2), melhorando consideravelmente o ajuste dos resultados do modelo aos dados observados. O valor mais alto observado na série de vazão chegou a $11,48 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto a vazão máxima simulada, após a calibração, atingiu $7,70 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Antes da calibração este valor simulado era de $34,19 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Como se observa na Figura 3, no período de verificação do modelo os dados simulados apresentaram uma boa aderência aos dados observados até o mês de janeiro de 2008. Os dados de vazão durante o período de chuva, quase sempre, foram superestimados pelo modelo neste período de verificação.

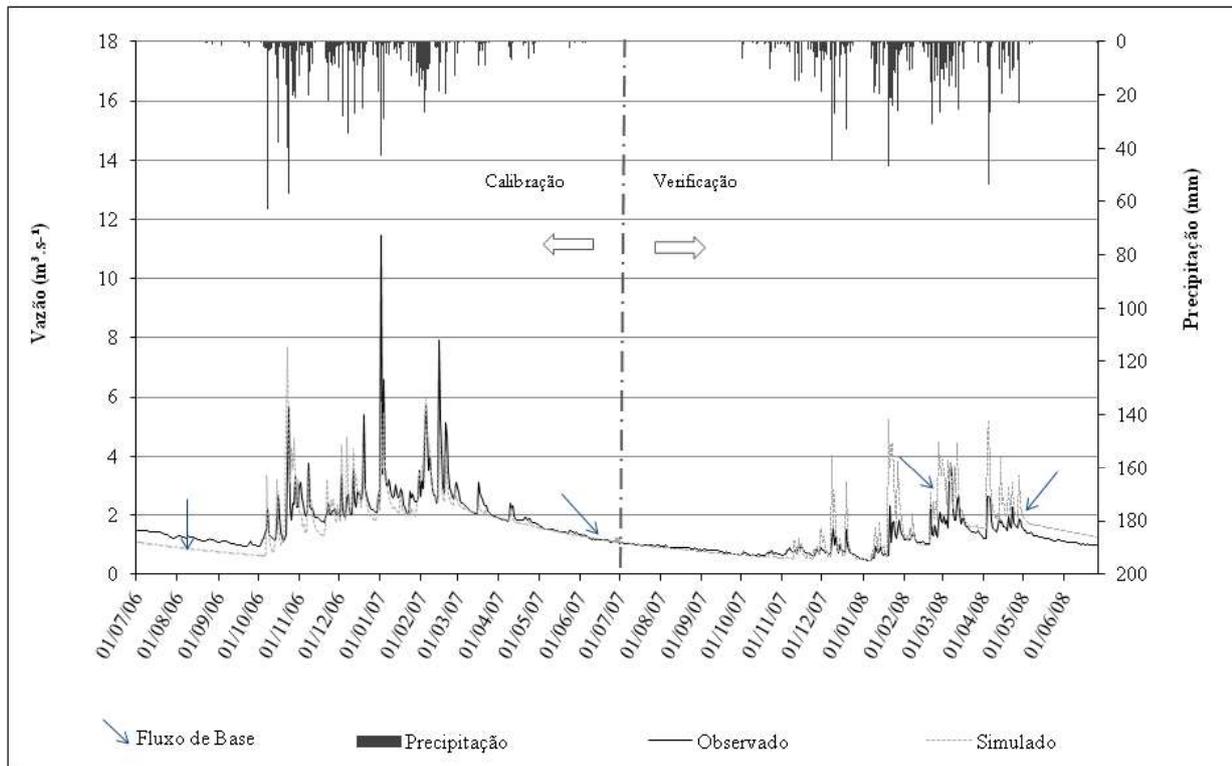


Fig. 3 - Séries diárias de precipitação média e vazão observadas e vazão simulada pelo SWAT, na Estação Jardim Jusante (ponto exutório da BEARJ), após processo de modificação dos parâmetros (calibração) para o período 01/07/2006 a 30/06/2007 e verificação para o período 01/07/2007 a 30/06/2008. As setas azuis apontam o fluxo de base.

Em relação ao fluxo de base, de julho de 2007 até março de 2008, o modelo apresentou resultados satisfatórios, mostrando uma boa aderência em relação aos dados observados, contudo, nos últimos quatro meses de simulação o modelo não conseguiu retornar mais o fluxo de base para valores próximos aos observados depois dos picos de vazão (setas azuis, Figura 3), superestimando estes valores. O que provavelmente está relacionado com a diferença no regime de vazão de um ano para outro, onde podemos observar no gráfico (Figura 3) que os picos de vazão observada no primeiro ano foram de maior magnitude em relação ao segundo ano.

Ainda no período de verificação, o valor mínimo obtido para a vazão simulada depois da calibração do modelo foi de $0,44 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto que para a vazão de pico, o valor máximo encontrado na modelagem atingiu $5,22 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Em relação aos dados observados neste período a vazão variou entre $0,46$ e $3,79 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

A Figura 4 apresenta os valores obtidos a partir da simulação para o ciclo hidrológico depois da calibração e verificação dos parâmetros.

De acordo com a Figura 4, parte do valor precipitado contribui para a infiltração de água no solo, evaporação e transpiração e escoamento superficial. Do valor que infiltra no solo parte dessa água vai para o fluxo lateral, outra parte para a percolação para o aquífero raso, parte para o fluxo de base e outra quantia contribui para a capilaridade. O fluxo lateral é somado ao escoamento superficial e dessa forma é obtido o valor total para o escoamento superficial. Do valor disponível para a percolação parte da água vai para o aquífero profundo e o restante para o fluxo de base. O valor disponível para capilaridade retorna para a evaporação e transpiração.

Dessa forma, serão discutidos os valores da evapotranspiração (evaporação/transpiração), fluxo de base e escoamento superficial para os dois anos modelados. Para o período da calibração do total precipitado ($1.124,3 \text{ mm}$) $51,2\%$ ($576,1 \text{ mm}$) foi convertido em evapotranspiração, $31,5\%$ ($354,5 \text{ mm}$) em fluxo de base e $17,1\%$ ($192,7 \text{ mm}$) em escoamento superficial. Já para o período de verificação esses valores foram de

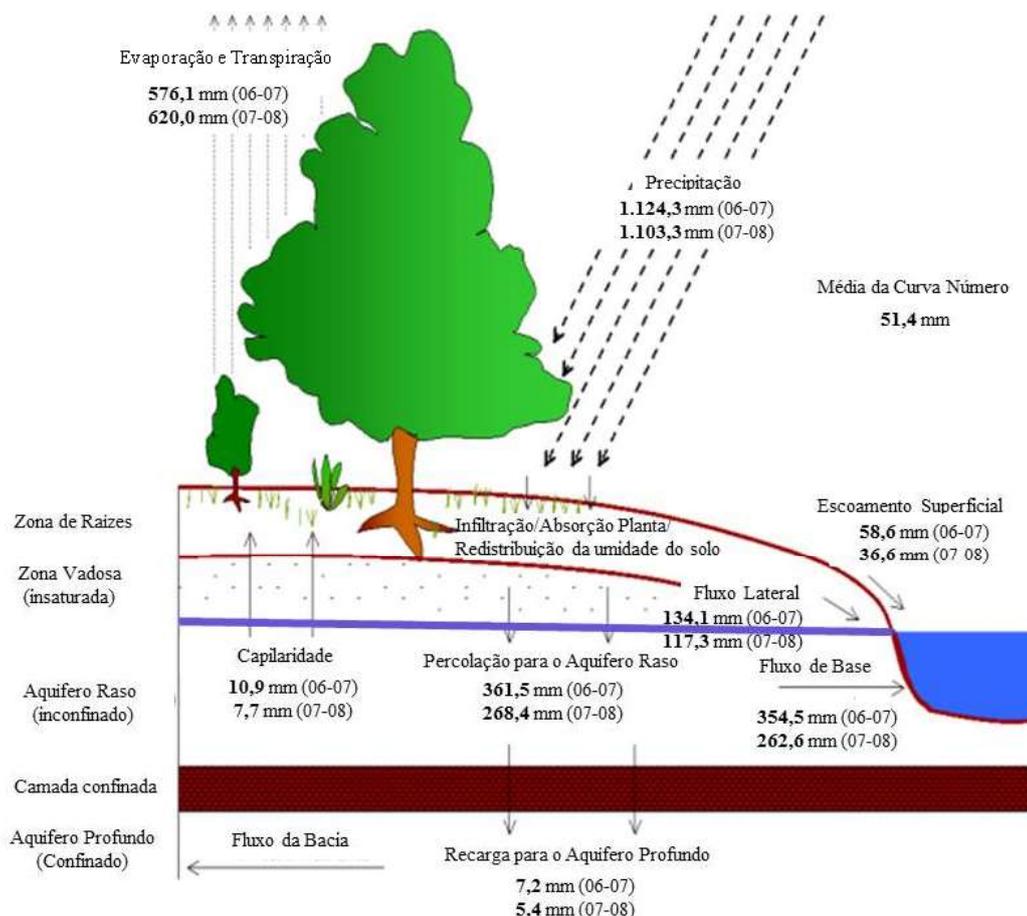


Fig. 4 - Valores simulados pelo SWAT para os componentes do ciclo hidrológico da BEARJ, após processo de calibração e verificação correspondente aos anos de 2006-2007 e 2007-2008 respectivamente.

56,2% (620 mm), 23,8% (262,6 mm) e 13,9% (153,9 mm) respectivamente (Figura 4).

Comparando-se estes resultados com os medidos por Lima (2010), de 70,0%, 26,0% e 3,0% respectivamente para evapotranspiração, fluxo de base e escoamento superficial, verificou-se que os resultados da simulação após processo de calibração e verificação apresentam de uma maneira geral uma melhora significativa, principalmente em relação ao escoamento superficial, porém continuam subestimando a evapotranspiração e superestimando o escoamento superficial na bacia. Em relação ao fluxo de base, os valores se aproximaram dos medidos por Lima (2010).

Em relação aos valores obtidos no primeiro e segundo anos observa-se que o ano 2007/2008 apresenta valores mais próximos aos obtidos por Lima (2010), havendo um aumento de 5% em relação ao ano anterior para a evapotranspiração e redução de 3,2% no escoamento superficial e 7,7% para o fluxo de base. Observa-se, portanto,

que o processo de calibração aproximou os resultados simulados em relação aos fluxos do ciclo hidrológico (evapotranspiração, fluxo de base e escoamento superficial), contudo, ainda não o suficiente para considerar o modelo verificado, devido a superestimativa do escoamento superficial e a subestimativa da evapotranspiração.

No período de calibração obteve-se um valor de 0,60 para o ENS, considerado satisfatório para o caso de uma modelagem com dados diários de vazão (GREEN & GRIESVEN, 2008; WU & CHEN, 2009), contudo, no período de verificação o valor de ENS foi negativo, igual a -0,84, como índice ENS tem um peso maior para as maiores valores de vazões o fato dos picos de vazão terem sido superestimados pelo modelo justifica o valor negativo.

Por meio do valor obtido pelo ENS e da avaliação visual do gráfico apresentado na Figura 3, é possível observar que, mesmo após o processo de calibração, os dados simulados na

verificação não possuem a mesma aproximação entre a vazão simulada e a observada, quando comparada ao período de calibração.

Destaca-se que a redução do valor de ENS entre os períodos de calibração e verificação é algo esperado, como também verificado nos trabalhos de Durães *et al.* (2011), Lelis *et al.* (2012) e Strauch *et al.* (2012), entretanto, não com uma diferença tão significativa.

A evidente piora observada entre os resultados obtidos nos períodos de calibração (2006-2007) e de verificação (2007-2008) pode estar relacionada ao diferente regime das vazões destes dois anos hidrológicos, como pode ser observado nas Figuras 3 e 4, uma vez que, de acordo com Lima (2010) e análises visuais de

imagens de satélite, não se verificaram mudanças significativas na bacia em relação ao uso da terra e da água nesse período.

Apesar dos dois anos analisados possuírem médias anuais de pluviosidade bastante similares, denota-se uma diferença significativa na intensidade da precipitação e uma divergência nos meses mais chuvosos (Figura 5). Destaca-se o mês de outubro de 2006, em que a precipitação foi muito superior do que a ocorrida no mesmo mês em 2007. Nos meses subsequentes, novembro e dezembro, as chuvas do primeiro ano também foram maiores do que as do segundo. Por outro lado, no final do período chuvoso, o segundo ano teve mais chuvas nos meses de março e abril.

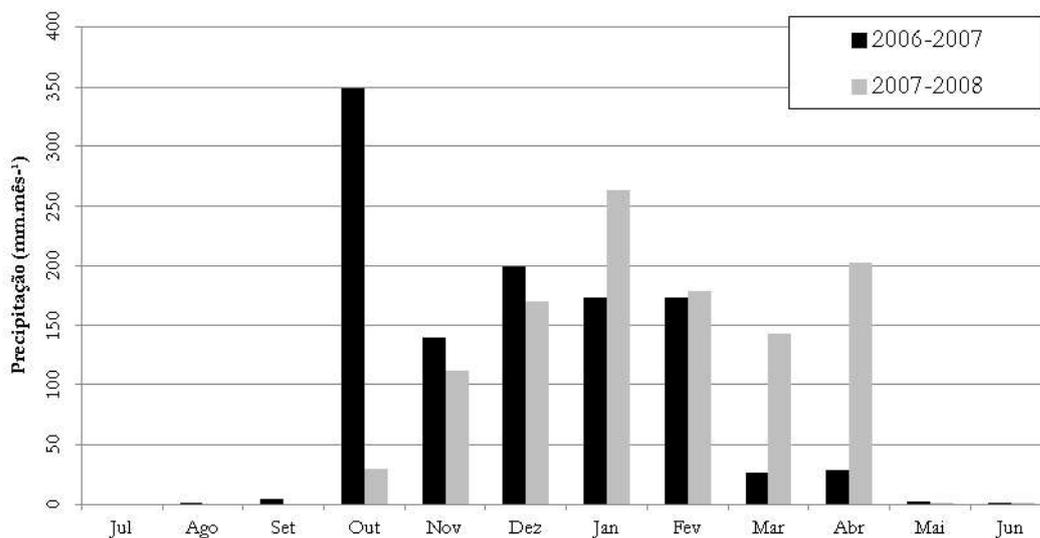


Fig. 5 - Precipitação média mensal na BEARJ nos anos hidrológicos 2006-2007 e 2007-2008.

Em termos hidrológicos, a concentração das precipitações no início do período chuvoso do primeiro ano indica um favorecimento a um ambiente mais úmido, com maior recarga e escoamento superficial do que o segundo ano. No entanto, o regime de chuva tardio no segundo ano teve como consequência menor recarga e menor escoamento superficial, ou seja, menos excedente de água para a geração de vazão.

O valor médio das vazões observadas para o primeiro ano foi de $1,96 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto do segundo ano, foi de $1,08 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, 55% da vazão média observada no primeiro ano. O valor máximo da vazão para o período de calibração chegou a $11,49 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto no ano de

verificação esse valor não ultrapassa $4,00 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Ainda, o valor mínimo observado para o primeiro ano foi de $0,92 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, enquanto para o segundo foi de $0,46 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a metade do ano anterior.

Strauch *et al.*, (2013), trabalhando com dados hidrológicos levantados entre 2004 e 2009, também verificaram o mesmo comportamento diferenciado do regime de vazões para o ano hidrológico 2007-2008 na Bacia do Ribeirão Pípiripau, que fica a apenas 10 km da BEARJ. Esses autores também aplicaram o SWAT para a modelagem da vazão diária na bacia, porém, mesmo encontrando dificuldades em simular as vazões para o período de 2007-2008, por

trabalharem com uma série temporal maior (6 anos – 2004 a 2009), obtiveram valores satisfatórios para o ENS, já que este contemplou toda a série, tanto para o período de calibração quanto o de verificação do modelo.

Destaca-se que o índice de Nash e Sutcliffe é uma estatística que representa a magnitude residual da variância dos dados simulados em relação à variância dos dados observados, em uma relação do quadrado dos resíduos, assim, erros nas maiores vazões geram uma piora significativa em seus valores (KRAUSE *et al.*, 2005; SCHAEFLI & GUPTA, 2007), como verificado, neste caso, no período de verificação do modelo.

Cabe ressaltar também que, neste estudo, grande parte dos dados utilizados na caracterização do meio, principalmente aqueles referentes aos parâmetros de solo, tiveram como base levantamentos em campo, porém, os dados relacionados ao uso da terra foram aproximações realizadas utilizando-se como referência a própria base de dados (default) disponíveis no SWAT, o que pode ter imposto limitações aos resultados.

4. CONCLUSÕES

O SWAT foi calibrado de forma satisfatória, contudo, este resultado não foi verificado para um período posterior, sendo os valores de Nash e Sutcliffe para esses dois períodos de modelagem iguais a 0,60 e -0,84, respectivamente. A modelagem mostrou boa representatividade para o fluxo de base para o período de junho de 2007 a janeiro de 2008, e conseguiu, mesmo que superestimando a vazão, seguir a tendência da vazão observada.

Com relação ao ciclo hidrológico simulado, o SWAT foi capaz de representar de forma satisfatória o fluxo de base médio anual para a bacia, no entanto se verificou uma tendência de subestimativa da evapotranspiração e superestimativa do escoamento superficial, tanto no período de calibração quanto no período de verificação.

Os resultados demonstram a dificuldade e o risco envolvido em trabalhos de modelagem hidrológica com o uso de curtas séries de dados. Mesmo sendo a bacia bem caracterizada e monitorada, a existência de assimetrias e diferenças significativas no regime de chuvas e,

por consequência, de vazões, pode inviabilizar a verificação de modelos hidrológicos quando se possui uma série curta de dados para a realização do estudo.

Dessa forma, recomenda-se que os organismos de apoio à de pesquisa, bem como as empresas de projetos e instituições de gestão ambiental e de recursos hídricos considerem tais limitações em suas ações.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de mestrado para o primeiro autor. Ao MCT/FINEP/CT-Hidro, pelo apoio financeiro do Projeto REHIDRO 1830 - Estudos Hidrológicos e Sedimentológicos em Bacias Experimentais e Representativas do Semiárido e do Cerrado. Ao CNPq, pelo apoio financeiro do Projeto SWAT Cerrado - Geração de Valores de Referência de Parâmetros do Modelo SWAT Adequados ao Bioma Cerrado. À Embrapa Cerrados pela disponibilização de dados e apoio às campanhas. Ao laboratório de Sensoriamento Remoto e Análise Espacial (LSRAE) do IG/UnB pela disponibilização da infraestrutura computacional e à ESRI pela disponibilização do Pacote de ferramentas que compõem a Família ArcGis 10 por intermédio do contrato N° 2011 MLK 8733 e a IMAGEM pelo apoio e viabilidade da concretização do termo de uso entre o IG e a ESRI e pelo suporte aos softwares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, M. A. **Simulação hidrológica numa bacia representativa dos latossolos na região Alto do Rio Grande**. 2011. 102p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v. 227, p. 21-40, 2000.
- BABBAR-SEBENS, M.; MUKHOPADHYAY, S.; SINGH, V. B.; PIEMONTI, A. D. A web-based software tool for participatory optimization of conservation practices in watersheds. **Environmental Modelling &**

Software, v. 69, p. 111-127, 2015.

BARROS, A. P.; BOWDEN, G. J. Toward long-lead operational forecasts of drought: An experimental study in the Murray-Darling River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 357, n. 3-4, p. 349-367, 2008.

BIEGER, K.; RATHJENS, H.; ALLEN, P.; ARNOLD, J. Development and Evaluation of Bankfull Hydraulic Geometry Relationships for the Physiographic Regions of the United States. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 51, p. 842-858, 2015.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; MINELLA J. P.; ALLEN, P. M. Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. **Journal of Environment Quality**, v. 43, n. 1, p. 55-66, 2014.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agriculture and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.

CAMPOS, J. E. G.; FREITAS-SILVA, F. H. **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**, Brasília, v. 4, p. 1-87, 1998.

CARVALHO, F. **Utilização do modelo SWAT para estimativa da produção de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica contribuinte ao lago do Descoberto-DF**. 2010. 60p. Monografia (Especialização em Geoprocessamento e Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDEs, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo SWAT. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 5, p. 48-58, 2011.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 2013. 122p. Dissertação (Mestrado em Geociências)

- Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CREECH, C. T.; SIQUEIRA, R. B.; SELEGEAN, S. J.; MILLER, C. Anthropogenic impacts to the sediment budget of the São Francisco River navigation channel using SWAT. **International Journal of Agriculture and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 140-157, 2015.

DHAR, S. & MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 2394-2406, 2009.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. **Cerne**, v. 17, p. 481-488, 2011.

EMBRAPA. **Projeto Monitoramento e caracterização quali-quantitativa dos recursos hídricos e sua relação com o uso da terra em bacias experimentais nos diferentes biomas brasileiros**. Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/204026/monitoramento-e-caracterizacao-quali-quantitativa-dos-recursos-hidricos-e-sua-relacao-com-o-uso-da-terra-em-bacias-experimentais-nos-diferentes-biomas-brasileiros>>. Acesso: 30 março 2016.

FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H. L.; KOIDE, S. Análise do modelo SWAT na simulação de produção de sedimentos quando calibrado unicamente para vazão em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 10., Foz do Iguaçu, 2012. **Anais**. 2012.

FERRIGO, S.; MINOTI, R.; ROIG, H. L.; KOIDE, S. Avaliação da utilização de diferentes métodos na calibração automática do modelo SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., Bento Gonçalves, 2013. **Anais**. 2013.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do lago Descoberto – DF**. 2014. 164p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade

de Brasília, Brasília, 2014.

FROTA, P. V. **Propostas para gestão integrada dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Jardim – DF**. 2006. 145p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

FUKUNAGA, D. C.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S.; OLIVEIRA, L. T.; CAIADO, M. A. C. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: International SWAT Conference & Workshops, 8., Toledo, 2011. **Anais**. 2011.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H. & ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **ASABE**, v. 50, p. 1211-1250, 2007.

GASSMAN, P. W.; SADEGHI, A. M.; SRINIVASAN, R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights. **Journal of Environment Quality**, v. 43, n. 1, p. 1-8, 2014.

GODOY, M. J. S. & LOPES-ASSAD, M. L. Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 685-694, 2002.

GREEN, C. H. & GRIENSVEN, A. V. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT 2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 422-434, 2008.

GRIENSVEN, A. V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006.

GUZMAN, J. A.; MORIASI, D. N.; GOWDA, P. H.; STEINER, J. L.; STARKS, P. J.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. A model

integration framework for linking SWAT and MODFLOW. **Environmental Modelling & Software**, v. 73, p. 103-116, 2015.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p. 211-232, 1989.

HUTCHINSON, M. F.; XU, T.; STEIN, J. A. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. In: HENGEL, T.; EVANS, I. S.; WILSON, J. P. & GOULD, M. (Eds). **Geomorphometry**. California: Redlands, 2011. p. 19-22.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, p. 89-97, 2005.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 623-634, 2012.

LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, p. 645-654, 2002.

LI, Z.; LIU, W.; ZHANG, X.; ZHENG, F. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 35-42, 2009.

LIMA, J. D. C. V. **Análise da ferramenta *arcCN runoff* na simulação de infiltração e escoamento superficial de água na microbacia hidrográfica do rio Capetinga - Distrito Federal**. 2009. 50p. Monografia (Especialização em Geoprocessamento e Análise Ambiental) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

LIMA, J. E. F. W. ; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n.1, p. 33-41, 2001.

LIMA, J. E. F. W. & SILVA, E. M. Estimativa da

- contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: Simpósio brasileiro de recursos hídricos, 17., São Paulo, 2007. **Anais**. 2007.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; KOIDE, S. Implantação de unidade de monitoramento intensivo para apoio a estudos hidrológicos em área de Cerrado: a Bacia Experimental do Alto Rio Jardim - DF. In: Simpósio de recursos hídricos do sul-sudeste, 2., Rio de Janeiro, 2008. **Anais**. 2008.
- LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado**. 2010. 312p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; AQUINO, F. G.; OLIVEIRA-FILHO, E. C.; SANO, E. E.; SILVA, F. D. M.. Assessing the use of erosion modeling to support payment for environmental services programs. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1258-1265, 2013.
- LOPES, G. R.; TAVORA, B. E.; SANTOS, R. M.; KOIDE, S. Estimativa do sedimento em suspensão transportado em um ano hidrológico na bacia do Capão Comprido, DF. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 9., Brasília, 2010, **Anais**. p. 1-13, 2010.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S.; LIMA, J. E. F. W.; KOIDE, S.; ARAGÃO, R.; SOUZA, C.; CRUZ, M. A. S. Hydrological studies in experimental and representative basins in Brazil: the experience of the REHIDRO network. In: Biennial Conference of Eurimediterranean Network of Experimental and Representative Basins, 15., Coimbra, 2014, **Anais**. p. 45-46, 2014.
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; LIMA, J. E. F. W.; KOIDE, S. Estudos hidrológicos e sedimentológicos em bacias experimentais e representativas dos biomas caatinga e cerrado. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21., Brasília, 2015, **Anais**. p. 1-8, 2015.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGER R. L.; HARMEL R. D.; VEITH, T. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **TransASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.
- MENEZES, P. H. B. J.; ROIG, H. L.; ALMEIDA, T.; NETO, G. B. S.; ISAIAS, F. B. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO PADRÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DO LAGO PARANOÁ - DF. **Estudos Geográficos (UNESP)**, v. 8, p. 88, 2012.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. J. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation - version 2005**. Texas USA, SERVICE, G-S. A. W. R. L. - A. R. 2005. 525p.
- NRCS. **Hydrology**. Washington, USA, National Engineering Handbooks, National Resources Conservation Service, USDA. 1997. 762p.
- OLIVEIRA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H.; KOKA, S.; AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of American Water Resources Association**, v. 42, p. 295-309, 2006.
- REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T.; CHAGAS, C.S.; MARTINS, E.S.; ANDAHUR, J.P.; GODOY, M.J. S.; ASSAD, M.L.C.L. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do rio Jardim - DF, escala 1:50.000**, Planaltina, v.18, p.1-63, 2000.
- RODRIGUES, D. B. B.; GUPTA, H. V.; MENDIONDO, E. M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. **Water Resources Research**, v. 50, p. 7187-7205, 2014.
- SAGARA, F. T. **Estudo hidrológico de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de general carneiro-PR, através de monitoramento e modelagem**. 2001. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

- SALLES, L. A.; CHAVES, H. M. L.; ROIG, H. L.; MENEZES, P. H. B. J. Análise de sensibilidade da simulação de variáveis hidrossedimentológicas com modelo chuva-vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau (DF/GO). In: Encontro nacional de engenharia de sedimentos, 10., Foz do Iguaçu, 2012. **Anais**. 2012.
- SARMENTO, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. 2010. 241p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 5-18, 2005a.
- SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos. Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 19-29, 2005b.
- SCHAEFLI, B. & GUPTA, H. V. Do Nash values have value?. **Hydrological Processes**, v. 21, p. 2075-2080, 2007.
- SETZER, J. & PORTO, R. L. L. **Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo, São Paulo**, v. 2, p. 81-104, 1979.
- SILVA, F. G. B.; MINOTI, R. T.; REIS, J. A. T.; TSUHAKO, E. M.; ANGELOTTI NETTO, A.; CESTANA, S. Simulação da produção de sedimentos em uma sub-bacia hidrográfica experimental com o modelo SWAT. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 6., Vitória, 2004, **Anais**. 2004.
- SILVIA, V. L. **Cana-de-açúcar em bacias hidrográficas experimentais irrigadas**. 2014. 43p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.
- SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Association**, v. 30, p. 453-462, 1994.
- STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**, v. 414-415, p. 413-424, 2012.
- STRAUCH, M.; LIMA, J. E. F. W.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. **Journal of Environmental Management**, v. 1, p. 1-13, 2013.
- TERRACAP. **Mapeamento do Distrito Federal**. Disponível em <<http://www.sedhab.df.gov.br/desen>
[volvimentourbano/gestaodainformacaourbanas/mapas.html](http://www.sedhab.df.gov.br/desen)>. Acesso: 15 setembro 2010.
- UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.2, p. 558-566, 2012.
- WINCHELL, M. F.; FOLLE, S.; MEALS, D.; MOORE, J.; SRINIVASAN, R.; HOWE, E. A. Using SWAT for sub-field identification of phosphorus critical source areas in a saturation excess runoff region. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, p. 844-862, 2015.
- WU, Y. & CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang River Basin in South China using SWAT. **Earth Science**, v. 3, p. 273-278, 2009.
- ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas**. 1998. 98p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.