ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT

Raina Santos Ferreira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

¹ Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro Departamento de Geografia (GEA), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Asa Norte, Brasília – DF. rainasanfer@gmail.com (autor correspondente). ² Professor adjunto da Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro Departamento de Geografia (GEA), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Asa Norte, Brasília – DF. rogeriouagoda@unb.br.

Artigo recebido em 28/11/2016 e aceito em 19/02/2016

RESUMO

A degradação dos recursos naturais tem crescido nas últimas décadas como resultado da ampliação da ocupação da terra pelo homem. A modelagem hídrica vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação dos processos hídricos e para compreender os impactos no meio ambiente, advindos, principalmente, das alterações feitas no uso da terra. Com base nessa premissa, esse trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na predição da simulação do balanço hídrico na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF. Para a realização da modelagem diária foi utilizado um período de 11 anos de dados, de 2004 a 2014. Índices de desempenho foram aplicados aos resultados do modelo gerando os seguintes números para a avaliação da simulação diária de vazão sem a calibração: Nash-Sutcliffe (ENS) = -1,50 e Índice de correlação(R²) = 0,60; e, para os resultados diários calibrados: Nash-Sutcliffe (ENS) = 0,53 e Índice de correlação(R²) = 0,63. Com relação a simulação de balanço hídrico na bacia estudada, tanto no período sem a calibração como pós calibração, o modelo apresentou uma clara tendência em superestimar as variáveis vazão nos períodos chuvosos e subestimá-las na época de estiagem, com dificuldade em simular a evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de base. Essa dificuldade do modelo com relação a simulação da vazão e do balanço hídrico provavelmente se deve ao fato de que o banco de dados utilizado no modelo SWAT é voltado para característica de solos de áreas temperadas que possuem característica totalmente diferentes dos solos do Cerrado.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, modelagem, simulação hidrológica, balanço hídrico.

Analysis of hydrological balance in Gama watershed, Distrito Federal/ Brazil, using SWAT model

ABSTRACT

The degradation of natural resources, including soil and water, has grown in recent decades as a result of the expansion of land occupation by the man. The hydrological modeling is becoming an important tool for the assessment of water processes and to understand the impacts on the environment, arising mainly from changes made in land use. Based on this premise, SWAT model (*Soil and Water Assessment Tool*) was used for simulation of streamflow yield in Gama watershed, Federal District/Brazil. First was created a database of hydrological and physiographic data required for modeling. To perform the daily modeling was used a period of 11 years (2004-2014). Efficiency coefficients were applied to the models' results generating the following numbers for streamflow simulation without calibration (daily step): Nash - Sutcliffe (ENS) = -1,50 and correlation index (R²) = 0,60; and for calibrated daily results: (daily step) ENS = 0,53 and R²= 0,63. Regarding the hydrological balance simulation in the study area, both in the period without calibration and post calibration, the model showed a clear tendency to overestimate the variable flow in rainy periods and underestimate it in the dry season, with difficulty simulate evapotranspiration, runoff and base flow in the studied basin. The model difficulty in simulation of flow and water balance is probably due to the fact that the database used in the SWAT model is facing feature of temperate areas of soils that have totally different characteristic of Cerrado soils.

Keywords: watershed, modeling, hydrological simulation, hydrological balance.

Introdução

A degradação dos recursos naturais, dentre eles solo e água, tem crescido nas últimas

décadas como resultado da ampliação da ocupação da terra pelo homem. A água é um

recurso natural indispensável à origem e manutenção da vida, está associada as mais diversificadas demandas humanas como uso doméstico, agrícola, industrial, comercial, científico, alimentício, hospitalar, turístico, para navegação, pesca, lazer, abastecimento energético e também para a condução e tratamento do esgoto (Castro, 2013).

O desequilíbrio entre a demanda e a disponibilidade de água tem levado à necessidade de se desenvolver uma gestão dos recursos hídricos mais eficientes. Para Setti (2001) os problemas de escassez hídrica no Brasil decorrem, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas, como, por exemplo, por processos erosivos, lançamento de efluente ou defensivo agrícola.

Devido a esse desequilíbrio, começam a surgir conflitos entre os diferentes setores, tornando-se fundamental uma gestão que integre os diferentes usuários e que garanta, com vistas ao desenvolvimento sustentável, a disponibilidade do recurso para toda a sociedade.

Todo o conjunto de ações voltadas para um gerenciamento mais racional de recursos naturais, pode ser maximizado quando a escala de planejamento é a bacia hidrográfica, pois é possível contemplar os aspectos e processos relacionados com a calha fluvial e os relativos ao uso e ocupação da terra (Uzeika, 2009). Segundo Silva (2010), para garantir a oferta de água com qualidade e quantidade compatíveis aos diversos usos, não se pode dispensar instrumentos que possibilitem o entendimento dos fenômenos físicos que ocorrem numa bacia hidrográfica, principalmente, aqueles que ajudem no entendimento da dinâmica de vazão, qualidade da água e do ciclo hidrológico da bacia.

A modelagem hídrica vem se tornando uma ferramenta importante para a avaliação dos processos hídricos. Pode-se usar a modelagem nos estudos de avaliação ambiental, para conjecturar cenários futuros, estimar a magnitude das alterações a serem causadas pelas atividades estabelecidas ou outras a serem desenvolvidas.

Tendo como base essa conjuntura, o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) destaca-se com seu amplo uso no mundo (Gassman et al., 2007), e mesmo no Brasil com diversas pesquisas que aplicam o modelo SWAT para simulação de bacias hidrográficas em diferentes regiões e com diferentes objetivos, como é o caso dos trabalhos feitos por Lino (2009), Durães et al. (2011), Salles (2012), Bonumá et al. (2013), Castro (2013), Ferrigo (2014), Carvalho (2014), dentre outros. O SWAT

é um modelo matemático de domínio público desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, em conjunto com a Universidade A&M do Texas – TAMU (Arnold et al., 1994). O SWAT exige informações físicas sobre a bacia e os principais dados de entrada do modelo incluem propriedades do clima, hidrologia, temperatura, nutrientes, sedimentos, pesticidas e manejo solo. Tais especificidades permitem simular diferentes processos físicos na bacia hidrográfica (evaporação, infiltração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo), com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso e manejo do solo em bacias hidrográficas não monitoradas.

O modelo SWAT distingue os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica em duas partes. A primeira é a fase terrestre do ciclo hidrológico e a segunda é a fase aquática. Segundo Neitsch et al. (2005), a fase terrestre do ciclo hidrológico é baseada na equação do balanço hídrico, que é a força responsável por tudo que ocorre na bacia hidrográfica e na fase aquática estão os processos que se referem ao movimento da água e sedimentos através da rede hídrica, do ponto de lançamento até o exutório da bacia.

É possível observar na literatura a tendência dos trabalhos feitos utilizando o modelo SWAT de dar maior ênfase à fase aquática da modelagem, que seria no caso, a simulação e calibração de vazão e sedimento, deixando de lado a simulação do balanço hídrico (fase terrestre). Porém é importante lembrar que a calibração dos dois dados é essencial para o bom funcionamento do modelo SWAT, pois é a partir da análise de ambos que é possível perceber os erros e os acertos do modelo. Dentro desse contexto, foi analisado o desempenho do modelo SWAT na predição do balanço hídrico na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama/DF.

Atualmente nessa bacia o Grupo de pesquisas bem desenvolvendo trabalhos de monitoramento de chuva, carga líquida e carga sólida em diversos pontos. O trabalho vem no sentido de testar a confiabilidade do modelo para uma bacia densamente monitorada de cerrado, centrando-se na melhoria da entrada de características de solo. Futuramente o estudo desses parâmetros pode facilitar o uso dos modelos para bacias que possuam um menor monitoramento ou falhas nas séries históricas.

Área de trabalho

A área de estudo deste trabalho é a bacia hidrográfica do ribeirão do Gama, que tem sua foz no lago Paranoá, a sudoeste deste, fazendo parte

da bacia do Paraná, estando situada entre os paralelos 15°50'16" latitude S e os meridianos 47°50'48" longitude WGr. A bacia do Gama está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Gama e Cabeça do Veado. Parte da bacia do Gama também é ocupada por outras unidades de conservação, sendo elas a Reserva Ecológica e Científica da Fazenda Água Limpa - Universidade de Brasília; a Estação Ecológica do Instituto

Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE; e a Reserva Biológica do Jardim Botânico. Além das Áreas de Proteção Ambiental, a bacia dispõe de áreas de ocupação urbana: Núcleo Bandeirante, Lago Sul e Park Way, quadras 15,16,18,19,20,21 e 23, com diferentes graus de consolidação urbana; áreas agrícolas: Núcleo Rural Vargem Bonita e Núcleo Rural Córrego Onça (Figura 1).

Figura 1. Localização espacial da bacia do ribeirão do Gama com as estações utilizadas no trabalho.

O clima predominante na região, segundo o sistema de classificação da Köppen, é o Tropical de Savana (CWA), com índices pluviométricos variando em torno de 1500 mm.ano¹. Com relação ao clima, a bacia do Gama possui média anual da temperatura é de 22,2 °C e de precipitação é de 1.281 mm, segundo os dados obtidos da Estação Climatológica da Reserva Ecológica do IBGE no período de 1985 a 2005. São identificados dois períodos climáticos bem distintos (típicos da

região de Cerrado), chuvoso e quente (de outubro a abril, com média de 250mm em dezembro) e outro frio e seco (de maio a setembro, com média de 9mm em junho) caracterizam esse clima definidas: No período de maio a setembro a umidade relativa do ar não ultrapassa os 70%, com a mínima ocorrendo no mês de agosto entorno de 47%.

Em termos geológicos, segundo Freitas-Silva e Campos (1998), essa área é caracterizada

pela presença de rochas do Grupo Paranoá (Idade Meso/Neoproterozóica) especificamente pelas unidades Ardósia (concentrada na porção noroeste da bacia) e Metarritmito Arenoso (concentrado na porção sudeste da bacia, e em todas as cabeceiras), sendo que o canal principal do Gama, drena no contato entre essas duas litologias. Uma pequena parte ainda é composta por quartzito médio no extremo sudeste de bacia, porém, em todas as cabeceiras são encontradas lentes de quartzito médio no interior do metarritmito.

Em relação à formação pedológica da região, segundo Reatto (2004), tem-se o predomínio do Latossolo Vermelho nos topos e do Latossolo Vermelho-Amarelo nas encostas e em menor escala de predominância há o Cambissolo nas áreas de escarpas. Já nas proximidades dos canais de drenagem situam-se os Gleissolos, uma vez que estão associados à presença de água.

Material e métodos

O modelo utilizado para a simulação foi o SWAT versão 2012 e para a calibração do modelo foi usado o SWAT-CUP 5.1.6.2, (SWAT *Calibration and Uncertainty Programs*). O modelo SWAT requer uma série de informações sobre a bacia estudada para o seu funcionamento, que incluem aspectos hidrológicos, mapa de classe de solo, uso do solo, Modelo Digital de Elevação (MDE), dados referentes ao clima, entre outros. O componente hidrológico do modelo inclui sub-rotinas do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral subsuperficial, fluxo de retorno do aquífero raso e evapotranspiração (Neitsch et al., 2005).

O modelo digital de elevação (Figura 2a) é o primeiro dado de entrada requerido pelo modelo e ele foi gerado a partir da altimetria, pontos cotados e hidrografia da Terracap de 2010 na escala de 1:10.000. O modelo de elevação foi feito através da ferramenta *Topo To Raster* e também foi utilizado a ferramenta *Fill Sink* do *ArcHydro* para o preenchimento das depressões e retirados os picos do MDE. Após inserir o MDE, o modelo SWAT delimita a bacia e subdivide automática ou manualmente as sub-bacias. A partir do delineamento automático baseado no MDE, foram definidas 23 sub-bacias (tendo como área mínima 300 hectares).

O mapa de solos (Figura 2b) utilizado, foi elaborado pela EMBRAPA no ano de 2004 na escala 1:100.000 (Reatto, 2004). O SWAT requer uma série de dados acerca das características físicas dos solos, tais como: classificação do solo ou nome dado a cada classe; número de horizontes a serem considerados por classe de solo; grupo

hidrológico do solo (A, B, C e D); profundidade máxima das raízes (mm); profundidade de cada horizonte (mm); densidade do solo (g/cm³); capacidade de armazenamento de água do solo (mm/mm); condutividade hidráulica saturada (mm/hr); conteúdo de carbono orgânico do solo (%); porcentagem de argila no solo (%); porcentagem de silte no solo (%); porcentagem de areia no solo (%); porcentagem de cascalho no solo (%) e erodibilidade do solo (t.m².hr/m³.t.cm) (Neitsch et al., 2005). Todos esses parâmetros foram retirados do estudo feito por Lima et al. (2013) para a realização deste trabalho, exceto os dados de porcentagem de silte, argila, areia e cascalho do solo, que foram extraídos dos trabalhos de Barbosa (2009) e Rodolfo et al. (2015) realizados na bacia do ribeirão do Gama. Importante lembrar que no modelo SWAT só é possível escolher o grupo hidrológico do solo (A, B, C e D), não sendo possível mudar as características de cada grupo.

O mapa de uso do solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Gama (Figura 2c) foi digitalizado manualmente por meio do software ArcGIS 10.2.2 na escala de 1:10.000. A confecção dos polígonos foi realizada sobre a ortofotocarta de 2010 com resolução espacial de 1 metro disponibilizada pela Terracap. O mapa de uso do solo foi classificado em 12 classes: Cerrado (38,35%), Campo (31,08%), Mata Galeria (5,44%), Murundus/Áreas Alagáveis (2,59%), Pasto (4,38%), Hortefruti (4,30%), Solo Exposto/Vias não Pavimentadas (1,44%), Vias Pavimentadas (2,45%), Área de Baixa Densidade Urbana (1,99%), Área de Média Densidade Urbana (6,78%), Área de Alta Densidade Urbana (1,04%) e Água (0,16%). A escolha das classificações utilizada neste trabalho foi feita com base da compatibilidade existente no uso da solo da bacia estudado com o banco de dado do modelo SWAT.

O modelo SWAT possui uma base de dados própria para diferentes classes de uso da terra, porém os dados são referentes às bacias estudadas nos Estados Unidos, que em grande parte dos casos, não se adequam a outras realidades. Como o modelo SWAT exige um grande número de informações acerca das classes de uso e não existe a disponibilidade de todos esses dados para a grande maioria das bacias brasileiras, foi necessário realizar uma adaptação dos tipos de usos empregados na bacia com as classes presentes no banco de dados do SWAT. As principais adaptações foram realizadas nos valores de CN2 (Curva Número na condição II), em que foi feita uma análise dos valores disponíveis na própria base de dados do SWAT e

os encontrados nos estudos de Satori (2004), Salles (2012) e Castro (2013).

Após inserir o MDE, mapa de solo e uso de solo, foram definidas as unidades de resposta hidrológica (HRU's). As HRU's são unidades que representam combinações de características comuns de solo, uso de solo e declividade dentro de cada sub-bacia (Neitsch et al., 2005). O usuário pode definir a quantidade de classes (no máximo cinco classes) de declividade e o valor de intervalo de cada classe. Para a bacia do Gama foram adotadas três classes de declividade: 0% a 8%, de 8% a 20% e de 20% até o valor limite (99,99%). Foram escolhidas essas classes com base no trabalho feito por Ferrigo (2014), na qual foi utilizada a classificação de Uberti et al. (1991).

Foram estabelecidas três classes de declividade: (1) de 0 a 8%, incluindo as classes de relevo plano e suavemente ondulado; (2) de 8 a 20%, representando a classe de relevo ondulado; e (3) acima de 20%.

O modelo também possui três opções para a geração das HRU's, a primeira leva em consideração a combinação entre os tipos de solos, usos e declividades dominantes, a segunda utiliza a HRU dominante e a terceira opção considera múltiplas HRU's (Winchell et al., 2010). Para este estudo, optou-se pela definição de múltiplas HRU's, porém sem eliminar nenhuma combinação possível em nenhum dos níveis de sensibilidade (Figura 2d).

Figura 1. a) Modelo digital de elevação da bacia do gama; b) Mapa de uso do solo de 2010 da bacia do Gama (com base na ortofotocarta de 2010 disponibilizada pela Terracap); c) Mapa pedológico da bacia do Gama, extraído de Reatto (2004); d) Mapa de HRU's da bacia do Gama.

A série histórica de dados climáticos utilizados para realizar a simulação hidrológica na bacia do Gama abrange o período de 01/01/2001 a 31/12/2014 (14 anos). Os dados climáticos necessários ao modelo são dados diários

referentes a precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento. Esses dados são provenientes das estações meteorológicas da Fazenda Água Limpa, IBGE (Instituto de

geografia e estatística) e ICEA (Instituto de controle do espaço aéreo), que se encontram dentro da bacia estudada. Como as estações meteorológica do ICEA e do IBGE não trabalham com dados de radiação solar, foi usado a série da estação meteorológica da Fazenda Água Limpa-FAL para completar os dados (figura 1). Também foi utilizada a estação Área Alfa da CAEB para dados apenas referentes à precipitação. O processamento do modelo SWAT também requer que sejam definidos valores estatisticamente representativos das séries temporais das estações meteorológicas utilizadas com relação aos dados mensais de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade, velocidade do vento, precipitação máxima em 30 minutos e radiação solar. Os dados estatísticos foram obtidos a partir de um macro do programa *Microsoft Excel* chamado *WSN Excel Macro*, disponibilizada no próprio site do SWAT.

Os dados de vazão foram obtidos junto a CAESB e são dados diários do período de 2001 a 2014. Os dados de vazão não são inseridos no SWAT, mas apenas para calibrar o modelo, que no caso desse estudo foi feito no SWAT CUP (calibração automática). Tendo como base os dados disponíveis de vazão e de clima (14 anos de dados), foi feita a divisão dos períodos usados na simulação (Tabela 1).

Tabela 1. Separação os períodos utilizados para a simulação no modelo SWAT.

Período	Utilização
01/01/2001 a 31/12/2003	Aquecimento
01/01/2004 a 31/12/2012	Calibração
01/01/2012 a 31/12/2014	Validação

Para avaliar a eficiência das simulações neste estudo, foram utilizados o índice de Nash e Sutcliffe (ENS) e o coeficiente de determinação (R^2). Há diversos outros testes estatísticos que podem ser usados para mensurar a qualidade das simulações hidrológicas, como a razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR), percentual de tendência (PBIAS) e o índice de Nash e Sutcliffe alterado, que considera a vazão média mensal inter-anual (COEA), etc. O índice de Nash e Sutcliffe é largamente utilizado na análise de modelos

hidrológicos. O índice varia entre $-\infty$ a 1, sendo que valores próximos a um indicam um ajuste ótimo e, quanto menor o ENS, pior é a simulação. Green e Van Griensven (2006) consideraram que para uma calibração com dados diários, valores de ENS superiores a 0,4 e R^2 superiores a 0,5 são considerados satisfatórios para a simulação.

Resultados e discussão

Visualmente já é possível observar que o modelo SWAT não conseguiu simular a vazão da bacia estudada de forma satisfatória. Percebe-se, pela a análise da figura acima, que há uma tendência de o modelo superestimar as vazões nos períodos de chuva e subestimar na época de estiagem. Nota-se, assim, um erro mais expressivo nas vazões mais baixas (nos períodos de estiagem), o que evidencia a dificuldade do modelo de simular o movimento da água subterrânea. Esse comportamento foi relatado em outros estudos feitos no Cerrado com o SWAT, como os trabalhos de Salles (2012), Ferrigo (2014) e Carvalho (2014). Obteve-se, para essa primeira simulação sem calibração, um valor da função objetivo de Nash-Sutcliffe (ENS) de ENS - 1.50 e com um R^2 igual 0,62 para a simulação diária. Os resultados do ENS indicam que o SWAT não foi capaz de simular satisfatoriamente a vazão quando utilizada sem calibração.

A Figura 3 mostra a comparação da vazão diária observada e a vazão diária simulada no modelo SWAT, no período de 01/01/2004 e 31/12/2012 sem calibração.

Com base na análise dos valores do modelo SWAT e do trabalho de Mesquita (2015) realizado na bacia do ribeirão do Gama, verificou-se que a origem do problema do comportamento da vazão, é gerada pela superestimativa do escoamento superficial. Mesquita (2015), constatou, com base em monitoramento direto de escoamento em microplots em cinco diferentes usos, que o escoamento só ultrapassou os 10% quando medido diretamente nos solos expostos. A média para condições vegetadas foi em torno de 3% de escoamento. Lima (2010) corrobora essa informação, constatando a partir de estudos da hidrografia, que o escoamento superficial não deve ultrapassar 3% do total precipitado (Tabela 2).

Figura 3. Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada diária sem a calibração.

Tabela 3. Resultado do Balanço hídrico anual efetuado em pequenas bacias não urbanizadas do Distrito Federal (DF). Modificado de Lima (2010)

Referência	Silva e Oliveira (1999)		Lima (2000)		Lima (2010)	
Ano hidrológico	1996/1997		1998/1999		2007/2008	
Bacia hidrográfica	Capetinga, DF		Capetinga, DF		Alto Jardim, DF	
Área da bacia (km ²)	10,00		10,00		104,86	
Variável	mm.ano ⁻¹	%	mm.ano ⁻¹	%	mm.ano ⁻¹	%
Precipitação	1744,00	100,00	1058,73	100,00	1100,00	100,00
Escoamento superficial	52,50	3,01	15,08	1,42	32,33	2,94
Escoamento de base	444,00	25,46	284,39	26,86	289,89	26,35
Escoamento total	496,50	28,47	299,47	28,29	322,22	29,29
Variação da lâmina de água no solo	0,00*	0,00*	-71,77	-6,78	0,00*	0,00*
Evapotranspiração real	1247,50	71,53	831,03	78,49	777,78	70,71

*valor não-medido

No ciclo hidrológico representado na Figura 4, pode-se observar que a evapotranspiração compõe cerca de 575,8 mm, o escoamento superficial 170,43 mm, o fluxo lateral 96,58 mm, a percolação 555,29 mm, o fluxo de base 502,92 mm, a recarga para o aquífero

profundo 27,76 e ascensão capilar do aquífero raso 24,48 mm. O CN (curva-número) médio para a bacia ficou em torno de 51,35. Com base nos estudos da Tabela 2, pode-se dizer que o modelo superestimou o fluxo de base e o escoamento superficial para as condições de cerrado.

Figura 4. Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2004 a 2014 (dados não calibrados). Todas as unidades em mm.

Visto as dificuldades do modelo em simular a vazão, verificou-se a necessidade de realizar a calibração do modelo, para que a simulação da vazão pudesse representar satisfatoriamente os dados observados. Antes de executar a calibração do modelo, foi feita uma análise de sensibilidade com base em outros trabalhos feitos no Cerrado com o uso do modelo SWAT, para, assim, identificar quais parâmetros eram mais significativos para a modelagem com o objetivo de simplificar e guiar o processo de calibração dos dados.

Segundo Arnold et al. (2012), o primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para uma bacia hidrográfica. Para racionalizar o processo de calibração, foi feita uma pesquisa com base em outros trabalhos feitos no Cerrado com o modelo SWAT com objetivo de identificar quais parâmetros são mais comumente apontados como sendo de grande influência. Após fazer essa revisão da literatura, foram extraídos de alguns trabalhos os parâmetros mais sensíveis, para assim, facilitar a próxima etapa do trabalho, a de calibração. Dessa forma, para esse estudo, foram

selecionados 14 parâmetros e após fazer o uso do SWAT CUP para a análise de sensibilidade de calibração, os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram (por ordem de sensibilidade): ESCO (Fator de compensação da evaporação do), GW_DEALY (intervalo de tempo para a recarga do aquífero), SOL_AWC (Capacidade de água disponível na camada de solo), CN2 (Curva Número na condição II), SHALLST (Altura inicial da água do aquífero raso), GWQMN (Profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado pelo canal), DEEPST (Altura inicial da água no aquífero profundo), GW_REVAP (Coeficiente "revap" de água subterrânea), CH_K2 (Condutividade hidráulica efetiva do canal principal), REVAPMN (Coeficiente "revap" de água subterrânea), SURLAG (Coeficiente de atraso do escoamento superficial), SOL_BD (Densidade aparente do solo), ALPHA_BF (Constante de recessão do fluxo de base) e CH_N2 (Coeficiente de rugosidade de Manning).

A calibração automática dos 14 parâmetros escolhidos foi realizada para os anos hidrológicos correspondentes ao período de janeiro de 2004 a dezembro de 2012, onde foram

feitas 1000 interações dentro dos intervalos adotados na análise de sensibilidade.

O resultado da análise de sensibilidade global está representado na Figura 5. O *t-stat* demonstra o grau da sensibilidade dos parâmetros, onde, quanto maior for o seu valor absoluto, mais sensível é o parâmetro. Já o *P-Value*, indica a significância da sensibilidade dos parâmetros, em que valores próximos de zero apresentam maior significância na modelagem (Abbaspour, 2015). É

possível notar que os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade foram (por ordem de sensibilidade): ESCO, GW_DEALY, SOL_AWC, CN2, SHALLST, GWQMN, DEEPST, GW_REVAP, CH_K2, REVAPMN, SURLAG, SOL_BD, ALPHA_BF e CH_N2. Pela análise dos gráficos, percebe-se que os parâmetros ESCO e GW_DELAY tiveram comportamento amplamente dominante no processo.

Figura 5. Resultados da análise de sensibilidade para a variável vazão.

Após a calibração, foi possível perceber que o modelo conseguiu representar de forma mais satisfatória as vazões no período de estiagem, pois houve uma melhora no ajuste do fluxo de base (Figura 6). Os valores mais baixos apresentados pela vazão observada chegam a 0,35

m^3s^{-1} e para vazão estimada pelo modelo chegam a 0,06 m^3s^{-1} , enquanto que o valor para o mesmo período sem a calibração era de 0,016 m^3s^{-1} . Após a calibração a simulação apresentou um NS de 0,53 e um R^2 de 0,63.

Figura 6. Comparação entre vazão simulada pelo modelo SWAT e a vazão observada diária após a

calibração.

O resultado do balanço hídrico pós calibração apresentou os seguintes resultados, 753,7 mm do total da chuva foi convertido em evapotranspiração (53,54%), 84,1 mm em escoamento superficial (5,9%), 137,06 mm em fluxo lateral (9,73%), 431,56 mm em água disponível para percolação (30,65%), 301,18 mm em fluxo de base (21,39%), 94,4 mm em ascensão capilar do aquífero raso (6,7%), e 21,58 para a recarga do aquífero (1,53%) (Figura 7).

As representações do balanço hídrico com e sem calibração podem ser vistas na tabela abaixo a título de comparação (Tabela 3).

Após a etapa de calibração, é preciso testar o desempenho do modelo frente a uma série de dados que não tenham sido utilizados na calibração. Trata-se da validação do modelo, que tem o objetivo de avaliar a capacidade do SWAT em simular adequadamente as vazões da bacia estudada.

Figura 7. Balanço hídrico simulado pelo SWAT para o período de 2004 a 2014 (dados calibrados). Todas as unidades em mm.

Tabela 3 Comparação entre os valores de Balanço Hídrico não calibrado X calibrado de 2004 a 2014

Modelo	Não Calibrado		Calibrado	
Parâmetros	Unidade	Porcentagem	Unidade	Porcentagem
Evapotranspiração (mm)	575,8	41,09%	753,7	53,54%
escoamento superficial (mm)	170,43	12,2%	84,1	5,9%
fluxo lateral (mm)	96,58	6,89%	137,06	9,73%
percolação (mm)	555,29	39,6%	431,56	30,65%
fluxo de base (mm)	502,92	35,9%	301,18	21,39%
ascensão capilar (mm)	24,48	1,74%	94,4	6,7%
recarga do aquífero (mm)	27,76	1,98%	21,58	1,53%

A validação do modelo SWAT calibrado para a bacia do ribeirão do Gama foi feita diariamente durante os anos hidrológicos de 2013 a 2014. A validação alcançou os índices de desempenho de $ENS=0.57$ e $R^2=0.74$. O índice, mais uma vez, indicou que o SWAT foi capaz de

simular adequadamente as vazões da bacia. Como se esperava, permaneceram problemas específicos na simulação de picos nos períodos chuvosos, mas o comportamento geral da modelagem pode ser considerado satisfatório. A Figura 8 demonstra o período de validação.

Figura 8. Gráficos da validação diária da vazão (2013-2014).

Em trabalhos feitos com a utilização do SWAT no Distrito Federal, Castro (2013) encontrou, para a bacia do Alto Jardim, valores em torno de 56% de evapotranspiração do total precipitado. Salles (2012), estudando a bacia do rio Pípiripau (DF), encontrou 49% do total evapotranspirado, enquanto Ferrigo (2014) também chegou ao mesmo valor de 49%. Neste trabalho, por sua vez, foi calculado que para a bacia do Gama, 53% do total precipitado é convertido em evapotranspiração.

Esse resultado semelhante aos demais trabalhos feitos no cerrado também se deve pelo fato de que os parâmetros sensíveis para a

calibração do modelo não envolvem parâmetros de clima, pois o modelo (SWAT-CUP) indicou que esses parâmetros não eram sensíveis, logo foram descartados no processo de calibração.

A partir das informações relativas a evapotranspiração é possível perceber a tendência do modelo de subestimar a evapotranspiração na simulação, pois, como já foi visto na Tabela 2, a evapotranspiração deveria ser de cerca de 70%. Como o valor da evapotranspiração foi subestimado no modelo, quer dizer que o sistema teve que trabalhar com uma maior quantidade de água existente. Logo, o valor que não evaporou

passou a ser utilizado para o escoamento superficial da bacia.

Assim, mesmo após a calibração, o escoamento ficou elevado, representando cerca de 5,9% do total precipitado. Apesar de o parâmetro de escoamento superficial ter sido ajustado, de forma a diminuí-lo na simulação, o modelo apresentou um elevado valor de escoamento, mesmo que, trabalhos feitos por Silva e Oliveira (1999), Lima (2000), Lima (2010), Brady e Weil (2010) e Mesquita (2014), demonstrem que esse valor não deveria ultrapassar 3%. Porém houve uma significativa melhora em relação ao escoamento superficial do ciclo hidrológico sem calibração, que era cerca de 12,2% do total precipitado. O problema do elevado valor do escoamento superficial se deve ao fato de o banco de dados de solo do modelo SWAT não conseguir simular bem os solos tropicais. Por exemplo, o Latossolo (que é solo com maior presença da bacia estudada) é argiloso, porém poroso e permeável, ou seja, o solo tem uma alta taxa de infiltração. Porém o modelo entende que, por esse ser argiloso, o Latossolo possui uma taxa de infiltração baixa, elevando, assim, o escoamento superficial na simulação.

No modelo SWAT, há a possibilidade de mudar diversos parâmetros do solo, porém no parâmetro do grupo hidrológico do solo só é possível selecionar o grupo (A, B, C e D), ainda sendo possível modificar as características de cada grupo, o que dificultou achar um que se encaixe com precisão nas características do solo do Cerrado.

Como o valor do escoamento superficial manteve-se elevado, o ajuste do fluxo de base também continuou com o problema da lenta resposta da água subterrânea para a descarga no rio na bacia estudada (visto que era um dos principais problemas encontrado na simulação do modelo sem a calibração). O valor do fluxo de base encontrado neste trabalho foi de 301,18 mm, ou seja, 21,3% do total precipitado, estando pouco abaixo do esperado, pois de acordo com trabalhos feitos por Silva e Oliveira (1999), Lima (2000) e Lima (2010), o fluxo de base é de cerca de 25%. Nota-se que o escoamento superficial elevado dificulta o abastecimento do fluxo de base, que, por sua vez, não alimentaria os rios na bacia estudada na época de estiagem. Ou seja, o problema inicial da evapotranspiração gera uma reação em cadeia no modelo SWAT, pois aumenta a quantidade de água que disponível no sistema causando problema nas simulações dos outros parâmetros, que também possuem deficiências iniciais para encontrar no modelo SWAT dados compatíveis com a realidade da

bacia. É preciso lembrar que o modelo foi desenvolvido para simulação em bacias rurais de regiões temperadas, por isso da dificuldade no modelo em simular os dados em bacias do Cerrado. Apesar de poder mudar diversos parâmetros no SWAT, ainda há uma carência e dificuldade para achar dados precisos para serem colocados no modelo, pois, como foi observado, o modelo trabalha com diversos dados e parâmetros.

É importante ter em mente que não é porque os dados de vazão estão com um bom índice de calibração que o modelo está funcionando corretamente. É a partir do funcionamento do balanço hídrico que é possível notar se o modelo está funcionando conforme a realidade da bacia, pois, com base em outros trabalhos feitos na área, é possível perceber se os parâmetros inseridos dentro do modelo são bons ou ruins, correspondem ou não à realidade, já que o modelo nos dá a possibilidade de visualizar o valor de cada parâmetro separadamente. Por isso é importante que ambos os dados sejam calibrados pelo usuário, pois ao tentar calibrar a vazão, muitas das vezes pode-se acabar forçando um resultado positivo que acabe gerando um balanço hídrico errôneo

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o modelo SWAT, após a calibração, foi capaz de simular de forma satisfatória tanto a vazão quando o balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama.

Sem utilizar o recurso da calibração, o modelo apresenta uma clara tendência em superestimar as variáveis vazão nos períodos chuvosos e subestimá-las na época de estiagem, com dificuldade de simular a evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de base na bacia estudada.

Mesmo após a calibração, apesar da sensível melhora nos resultados da simulação, o modelo continuou com dificuldades de simular os parâmetros de evapotranspiração, escoamento superficial e fluxo de base. Os problemas na simulação se deve, provavelmente, ao fato de a evapotranspiração ser subestimada, o que resulta numa maior quantidade de água no sistema para a simulação dos outros parâmetros. Essa dificuldade do modelo com relação a simulação da vazão e do balanço hídrico provavelmente se deve ao fato de que o banco de dados utilizado no modelo SWAT ser voltada para característica de solos de áreas temperadas que possuem característica totalmente diferentes dos solos do Cerrado.

De acordo com as dificuldades observadas, recomenda-se para os estudos futuros a calibração do modelo por sub-bacia e a instalação de mais estações fluviométricas, que auxiliariam na melhora dos resultados por meio da calibração.

Referências

- Abbaspour, K.C., 2015. SWAT-CUP 2012: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah R.S., Williams, J. R., 1994. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34, 1-17.
- Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., Haney, E.B., Neitsch, S. L., 2012. Input/Output Documentation Version 2012. Texas Water Resources Institute, College Station.
- Barbosa, I.O., 2009. Relações Pedomorfogeológicas nas Chapadas elevadas do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33, 1373-1383.
- Bonumá, N.B., Rossi, C.G., Arnold, J. G., 2013. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. *Applied Engineering in Agriculture* 29, 189-200.
- Brady, N.C., Weil, R.R., 2010. *Elements of the Nature and Properties of Soils*, 3 ed. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Carvalho, F.H., 2014. Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Castro, K.B., 2013. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Durães, M.F., Mello, C.R., Naghettini, M., 2011. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. *Cerne* 17, 481-488.
- Ferrigo, S., 2014. Análise de consistência dos parâmetros do modelo swat obtidos por calibração automática – estudo de caso da bacia do lago descoberto - DF. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Freitas-Silva, F.H., Campos, J.E.G., 1998. Geologia do Distrito Federal, in: IEMA/SEMATEC/UnB. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília.
- Gassman, P. W., Reyes, C. H., Green, C. H., Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transaction ASABE* 50, 1211-1250.
- Green, C.H., Griensven, A.V., 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling and Software* 23, 422-434.
- Lima, I.E.F.W., 2000. Determinação e simulação da evapotranspiração de uma bacia hidrográfica do cerrado. Dissertação (Mestrado) Brasília, UnB.
- Lima, I.E.F.W., 2010. Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado. Tese (Doutorado). Brasília, UnB.
- Lima, J.E.F., Silva, E.M., Strauch, M., Lorz, C., 2013. Development of a soil database for applying SWAT model in a catchment of the Brazilian Savanna, Toulouse. *Book of Abstracts* 1, 1-1.
- Lino, J.F.L., 2009. Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia do Rio Preto (SC) com o Modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Florianópolis, UFSC.
- Mesquita, M., 2015. Mensuração de Perdas de Sedimentos por Escoamento Superficial em Encostas, em Diferentes Usos da Terra no Bioma Cerrado: Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Gama/DF. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Williams, J. R., 2005. Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple.
- Reatto, A., 2004. Mapa pedológico digital – SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Embrapa Cerrados, Planaltina.
- Rodolfo, J.F., Araújo, L.G., Souza, R.Q., Batista F.P.S., Oliveira, D.N.S., Lacerda, M.P.C., 2015. Relações Solo-Paisagem em Topossequências na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. *Nativa* 3, 27-35.
- Salles, L.A., 2012. Calibração e validação do modelo Swat para a predição de vazões na Bacia do Ribeirão Pípiripau. Dissertação (Mestrado). Brasília, UnB.
- Satori, A., 2004. Avaliação da classificação hidrológica do solo para determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos.

- Dissertação (Mestrado). Campinas, UNICAMP.
- Setti, A.A., 2001. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos, 2 ed. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília.
- Silva, L. R. S., 2010. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese (Doutorado). Brasília, UnB.
- Silva, C.L, Oliveira, C.A.S., 1999. Runoff measurement and prediction for a watershed under natural vegetation in central Brazil. *Revista brasileira de ciência do solo* 23, 695-701.
- Uberti, A.A.A., Bacic, I.L.Z., Panichi, J.A.V., Laus, N.J.A., Moser, J.M., Pundek, M., Carrião, S.L., 1991. Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina. Empasc-Emater, Florianópolis.
- Uzeika, T., 2009. Aplicabilidade do Modelo SWAT (SoilAndWaterAssesment Tool) na Simulação da Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre. UFRGS.
- Winchell I. M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., Arnold, J. G., 2010. ArcSWAT interface for SWAT2009 User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple.