

Sensibilidade do Modelo Distribuído Hidrológico da Biosfera às propriedades hídricas do solo em uma pequena bacia de cerrado.

Sensibility of Distributed Biosphere-Hydrological Model to hydraulic soil properties for a small basin of woodland savanna.

Roilan Hernández Valdés¹, Jônatan Dupont Tatsch¹, Osvaldo Machado Rodrigues Cabral², Humberto Riveiro da Rocha³, Emilia Maria dos Santos Brasílio³, Guilherme Goergen¹, Felipe Rafael Theodorovitz Mendoza,¹ André Fogliarini Parcianello¹, Carolina Kannenberg¹

¹Universidade Federal de Santa Maria-RS
roylanhv@gmail.com; jdtatsch@gmail.com; guilherme.goergen@gmail.com; lipetheo.mendoza@hotmail.com; decofog@hotmail.com; carolinakannenberg@gmail.com

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
osvaldomrcabral@gmail.com

³Universidade de São Paulo-SP
humberto.rocha@iag.usp.br; emilia.brasilio@gmail.com

Resumo

A modelagem dos processos hidrológicos que ocorrem na escala de bacias hidrográficas permite caracterizar a disponibilidade de água nela, para o qual se precisa de um modelo físico que represente adequadamente a topografia, vegetação e características do solo. Contudo as variáveis que fornecem as forçantes atmosféricas demandam a maior exatidão possível e os modelos mostram-se sensíveis a elas, principalmente a precipitação, a qual é a principal entrada na modelagem hidrológica. Este estudo está focado na avaliação da sensibilidade a quatro parâmetros físicos do solo na modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Córrego Paulicéia, SP, Brasil, com o modelo DBHM. O período de estudo abrange os anos 2009-2014, foram utilizados os mapas do solo da FAO para a caracterização física do solo da bacia e os dados de vegetação do MODIS (LAI e FPAR). A área da bacia é de 11.94 km² e foi discretizada em uma grade de 500 m de resolução espacial. Foi utilizado uma configuração básica no modelo DBHM que permitisse determinar a influência desses parâmetros nos resultados do conteúdo de água na camada superficial até 1 m. Mostra-se maior retenção da água no solo para altos valores do parâmetro de Campbell, potencial matricial e porosidade; a sensibilidade à condutividade hidráulica depende da relação com os acumulados diários da precipitação.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, modelo hidrológico, DBHM, precipitação.

Abstract

For modeling of hydrologic processes that occur on the scale of watersheds to characterize the availability of water in it, you need a physical model that can represent the topography, vegetation and soil characteristics. On the other hand, the variables that provide atmospheric forcing require great accuracy and models are sensitive to them mainly to rainfall, it is the main input in hydrological modeling. This study focuses on evaluation of four physical parameters of soil in hydrologic modeling in Giant Foot basin, SP, Brazil with DBHM model. The study period covers the years 2009-2014, FAO's soil maps were used for the physical characterization of the basin, and the MODIS for vegetation data (LAI and FPAR). Domain of 500 m for spatial resolution in a basin area of 11.94 km². Was used a basic configuration that let determine the influence of soil parameters in the water content results for the surface layer up to 1 m. It shows higher water retention in the soil to high values of the Campbell parameter, matric potential and porosity; sensitivity to hydraulic conductivity depends on the relationship with the daily accumulated rainfall.

Keywords: basin, hydrological model, DBHM, precipitation.

1 Introdução

Os modelos hidrológicos são amplamente utilizados na caracterização dos impactos naturais e perturbações antropogênicas do ciclo hidrológico na escala de bacias hidrográficas. A disponibilidade de conjuntos de dados com maior resolução espacial favoreceu o desenvolvimento de modelos espacialmente distribuídos que representam os processos biogeofísicos e biogeoquímicos na superfície e sua interação com atmosfera.

A análise dos processos hidrológicos permitem caracterizar o ciclo hidrológico a partir das variáveis de entrada (ex. precipitação), saída (ex. evapotranspiração e vazão) e armazenamento (ex. umidade do solo e do aquífero) da água em uma bacia hidrográfica. Contudo a escolha de um modelo deve considerar a sensibilidade do mesmo às características da região de interesse.

A forma mais efetiva de avaliar o desempenho dos modelos e amenizar as incertezas inerentes ao processo é através do ajuste dos parâmetros a partir da calibração do modelo. Nesse estudo empregou-se o Modelo Distribuído Hidrológico Biosférico (DBHM) Tang (2006) para avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros que definem as propriedades hidráulicas do solo na simulação da umidade numa pequena bacia hidrográfica com vegetação predominante de cerrado *sensu-stricto*.

2 Materiais e métodos

O estudo foi realizado na Bacia Hidrográfica do Córrego Paulicéia (BHCP), cuja área de drenagem abrange grande parte da Gleba Pé de Gigante (PdG), localizada no Parque Vassununga, Instituto Florestal/Secretaria do Meio Ambiente/São Paulo Batalha et al. (2001); da Rocha et al. (2002) utilizando o DBHM. A bacia do Córrego Paulicéia tem sido amplamente estudada Batalha et al. (2001); da Rocha et al. (2002); Cabral et al. (2015) por ser uma das reservas com maior área contígua de cerrado *sensu-stricto*. O solo da região é arenoso (87% da composição média é areia) a condutividade hidráulica é aproximadamente 300 mm/h e porosidade relativamente baixa (39%) Cabral et al. (2015).

O período de simulação foram os anos desde 2009 até 2014. Os dados meteorológicos e de umidade do solo foram obtidos na área experimental equipada com uma torre micrometeorológica Cabral et al. (2015) situada na cabeceira norte da bacia. A localização geográfica do vertedor (21,65 LS e 47,64 LW) foi usada para delimitação da bacia, cuja área de captação à montante totalizou 11,94 km² Figura 1.



Figura 1: Delimitação topográfica da bacia hidrográfica do Córrego Paulicéia. A localização do exutório é destacada em amarelo e da torre micrometeorológica em verde. O exutório coincide com o posto de medida de vazão.

2.1 Modelo DBHM

O DBHM é o acoplamento do modelo SiB2 (Sellers et al., 1996) de interação superfície-biosfera-atmosfera com o modelo hidrológico GBHM (Yang, 1998; Yang et al., 1998). A combinação de ambos permite melhor representação dos fluxos hidrológicos, energéticos e de carbono entre a superfície e a atmosfera (Wang et al., 2009). O SiB2 resolve as trocas de energia e água considerando a fenologia da vegetação e a distribuição do total de água na superfície e no solo. O GBHM determina os escoamentos produzidos na propagação da água na bacia sobre a superfície, através da subsuperfície e na interação aquífero-rio (Tang, 2006).

Este sistema inclui dados de satélite para descrever o estado e a fenologia da vegetação, o que permite a representação das mudanças da vegetação em curta escala temporal, permitindo avaliar as características do ciclo hidrológico inter sazonal.

O Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDET) é usado na descrição das características geomorfológicas das bacias, determinando topografia, geometria da bacia, redes de drenagem, declividade e direção do fluxo, o que melhora a representação dos processos de acumulação dos escoamento no solo e na superfície.

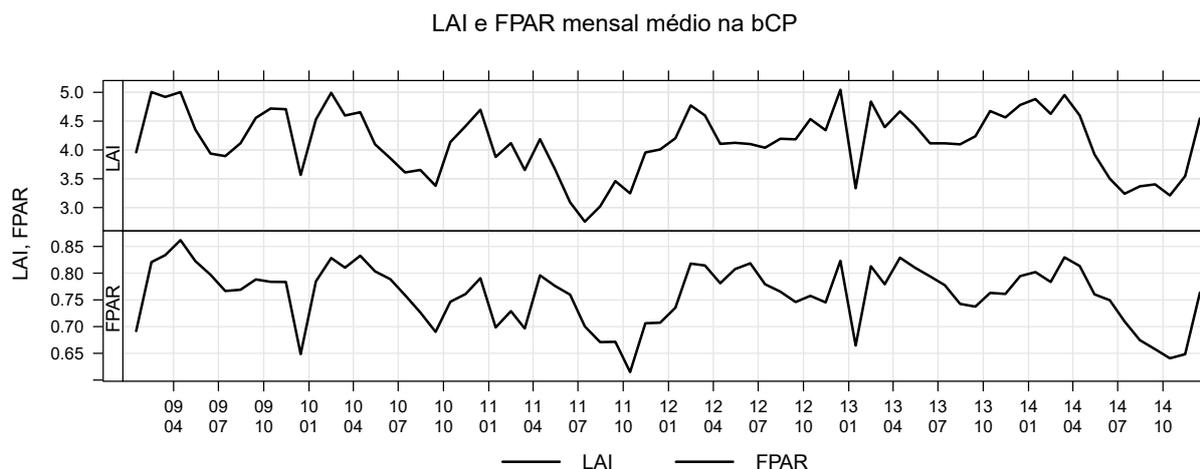


Figura 2: Série de LAI e FPAR mensal médio na bCP

2.2 Dados de entrada

Para a determinação do domínio espacial da BHCP foi utilizado o MDET do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (Farr, 2007) com resolução horizontal de 90 m e o procedimento de *upscaling* das direções de fluxo (Paz, 2008) para a discretização em células regularmente espaçadas de 500 m. A altitude do terreno varia entre 600 e 720 m.

O índice de área foliar (LAI) e fração de radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) para cada célula da bCP foram determinados a partir dos dados de satélite MODIS produto MCD15A2 o qual contém bandas de LAI e FPAR. Determinou-se o valor máximo mensal para eliminar o efeito da nebulosidade, inicialmente a resolução espacial é de 1 km sendo linearmente interpolado para 500 m. Na Figura 2 observe-se a série para ambas variáveis no período.

Foram usados como forçantes do DBHM os dados meteorológicos diários de estações hidrometeorológicas do INMET localizadas na região ao redor da BHCP, junto com o conjunto de dados observados na torre micrometeorológica (Cabral et al., 2015) localizada no trecho mais a montante da BHCP. Também foram utilizados os dados de precipitação observada no vertedor. As variáveis foram interpolados para a grade usando o método ponderada pelo inverso da distância das estações vizinhas a cada célula do domínio da grade do modelo.

Os dados diários de precipitação interpolados são internamente desagregados para escala de tempo horária segundo a desagregação proposta por Tatsch, 2015 (não publicado); na qual faz uma distribuição simétrica tipo gaussiana ao redor da hora de máxima intensidade de precipitação, através da divisão em classes do total diário. As variáveis atmosféricas restantes possuem desagregações específicas.

2.3 Configuração e delineamento das simulações

A BHCP considerou-se com solo e vegetação uniforme, a vegetação definida como cerrado segundo os parâmetros definidos e utilizados por (Tatsch, 2011); profundidade total do solo de 2,5 m (dividido em três (3) camadas: 0,0-0,02; 0,02-1,5; 1,5-2,5 m), altura do topo e da base do dossel de 7,0 e 1,0 m, respectivamente, com fração de cobertura do dossel de 0,98.

O grau de saturação do solo foi inicializado com a média observada para o mês de janeiro para as três camadas de simulação: 0,44; 0,37 e 0,37 (ordem crescente de profundidade).

As dimensões do canal do córrego foram prescritas como 0,5 (1) m para largura e 0,5 (1) m de profundidade para afluentes (o rio principal).

Foram definidas quatro configurações para avaliar a sensibilidade do modelo aos parâmetros: **b**, expoente da curva de retenção de água no solo, inversamente relacionado ao índice de distribuição do tamanho de poros (Campbell, 1974); Ψ_s potencial matricial de saturação, θ_s porosidade do solo, K_s condutividade hidráulica de saturação. Para cada um desses parâmetros definiram-se três valores: alto, intermediário e baixo.

Esses parâmetros estão relacionados nas equações empíricas das propriedades hidráulicas do solo Campbell (1974):

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (1)$$

onde K é a condutividade hidráulica real do solo que depende da umidade (θ). Clapp e Hornberg (1978) propuseram a relação equivalente para o potencial matricial (Ψ) em função da umidade do solo:

Tabela 1: Propriedades morfológicas da vegetação na parametrização do modelo de superfície.

Variável	Propriedades morfológicas	Unidade	Cerrado
z2	Altura do topo do dossel	m	7
z1	Altura da base do dossel	m	1
zc	Altura da inflexão da densidade de área foliar	m	3
vcover	Fração de cobertura do dossel	-	0,98
chil	Fator de distribuição de ângulo de folha	-	0,25
leafw	Espessura foliar	m	0,03
leafl	Comprimento foliar	m	0,5
sodep	Profundidade total do solo	m	2,5
rootd	Profundidade das raízes	m	1,5

Tabela 2: Simulações com variações do parâmetro b , mantendo os demais parâmetros constantes.

Simulação	K_s	b	$ \Psi_s $	θ_s
B1	300	1	0,12	0,39
B2	300	7	0,12	0,39
B3	300	14	0,12	0,39

Tabela 3: Simulações com variações do potencial matricial de saturação, mantendo os demais parâmetros variáveis.

Simulação	K_s	b	$ \Psi_s $	θ_s
PM1	300	4	0,01	0,39
PM2	300	4	0,30	0,39
PM3	300	4	0,80	0,39

Tabela 4: Simulações com variações da porosidade, mantendo os demais parâmetros variáveis.

Simulação	K_s	b	$ \Psi_s $	θ_s
P1	300	4	0,12	0,30
P2	300	4	0,12	0,60
P3	300	4	0,12	0,90

Tabela 5: Simulações com variações da condutividade hidráulica de saturação, mantendo os demais parâmetros variáveis.

Simulação	K_s	b	$ \Psi_s $	θ_s
K1	30	4	0,12	0,39
K2	30	4	0,12	0,39
K3	300	4	0,12	0,39

3 Resultados

3.1 Parâmetro b

Na Figura 3, mostra-se o conteúdo de água na camada superficial de espessura um metro, a melhor representação é dada pelo valor mais baixo (linha azul) do b , o qual subestima em 12% o conteúdo médio de água em relação ao observado.

Notou-se que na diferença de seis no valor do parâmetro b entre a simulação B1 ($b=1$) e B2 ($b=7$), é 3,77 vezes maior o armazenamento, logo similar variação do b entre a simulação B2 ($b=7$) e simulação B3 ($b=14$) previu aumento de 1,2 vezes, mostrando que não tem relação linear o aumento do parâmetro com a previsão do armazenamento da água.

É significativa a retenção de água no solo para diferentes valores de b , mas a amplitude da variação sazonal é aproximadamente constante. Os máximos e mínimos sempre ocorreram em fase. A condutividade hidráulica efetiva $K(\theta)$ 1 decresce exponencialmente com o aumento de b na vez que o potencial matricial $\Psi(\theta)$ 2

Os valores específicos para cada parâmetro são mostrados nas Tabelas 2,3,4,5. Outros parâmetros foram definidos seguindo valores calibrados para a Bacia Mogi-Guaçu (Tatsch, 2011) da qual a BHCP é uma sub-bacia.

A análise de sensibilidade do DBHM em relação aos parâmetros foi realizada por meio da comparação do conteúdo de água no solo para cada subconjunto de simulações.

Os parâmetros utilizados na descrição da vegetação da bCP são mostrados na Tabela 1, mostra-se só os parâmetros correspondentes ao tipo de vegetação classificado *broadleaf-deciduous trees* ou árvores com perda das folhas sazonalmente.

$$\Psi(\theta) = \Psi_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (2)$$

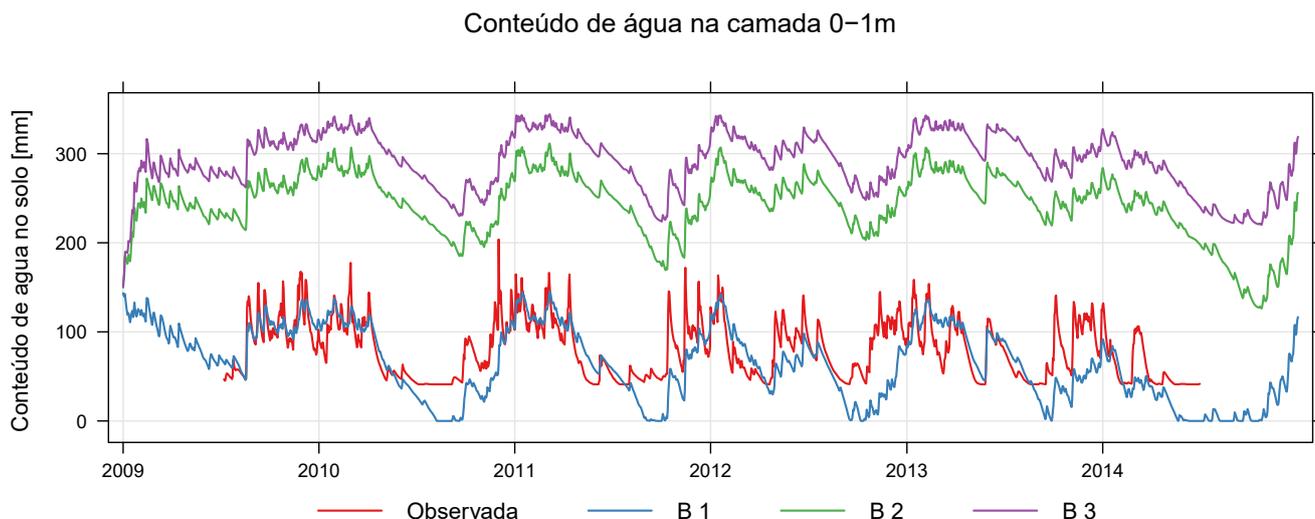


Figura 3: Variação diária do armazenamento de água na camada entre a superfície e 1m de profundidade, observado e os simulados pelo DBHM para diferentes variações do parâmetro *b* (ver Tabela 2).

aumenta com igual relação. Isto provoca que o solo seja menos (mais) condutivo e mais (menos) resistente à extração da água, para grau de saturação constante.

3.2 Potencial matricial

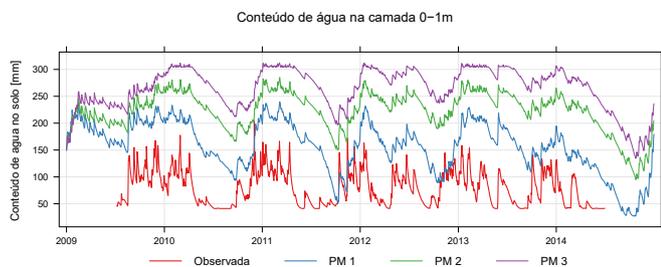


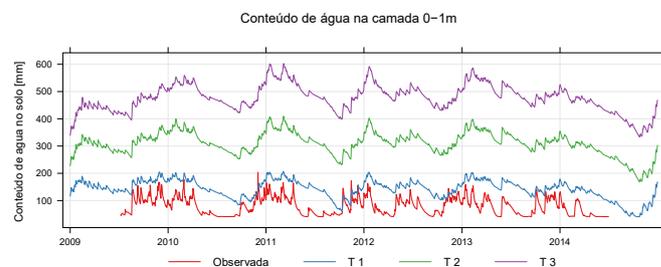
Figura 4: Variação diária do armazenamento de água na camada entre a superfície e 1m de profundidade observado e simulados pelo DBHM para diferentes variações do $|\Psi_s|$ (ver Tabela 3).

A resposta da umidade do solo simulada a esse parâmetro indica que quanto maior o potencial matricial, maior a retenção da água no solo Figura 4 e a drenagem da água acontece mais lentamente.

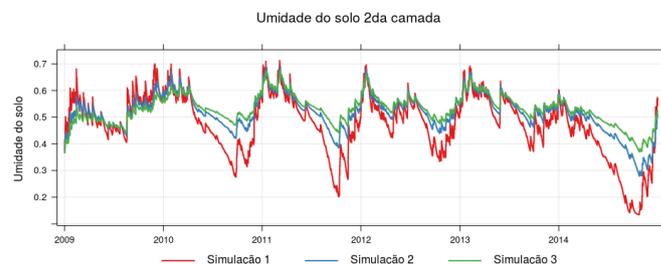
A simulação com baixo valor de potencial matricial (PM1) mostrou secamento mais pronunciado do solo o que favoreceu uma maior amplitude sazonal. O valor da amplitude média sazonal do conteúdo de água, foi de 120, 89 e 85 mm para as simulações PM1, PM2 e PM3 respectivamente. O solo da BHCP tem marcada diferença na umidade entre o verão e o inverno e foi melhor descrito por valores baixos de $|\Psi_s|$ (PM1).

3.3 Porosidade

A influência da porosidade está principalmente na capacidade de armazenamento do solo, os limiares (Tabela 4) coincidem com os utilizados por Chen et al. (2015); mas Cabral et al. (2015); propuseram para o solo da bacia o valor de $0,39 (m^3/m^3)$.



(a)



(b)

Figura 5: Variação diária do armazenamento de água na camada entre a superfície e 1m de profundidade observado e simulados pelo DBHM (a). Variação diária da umidade da camada 0,02-1m (b) para diferentes variações da porosidade. (ver Tabela 4).

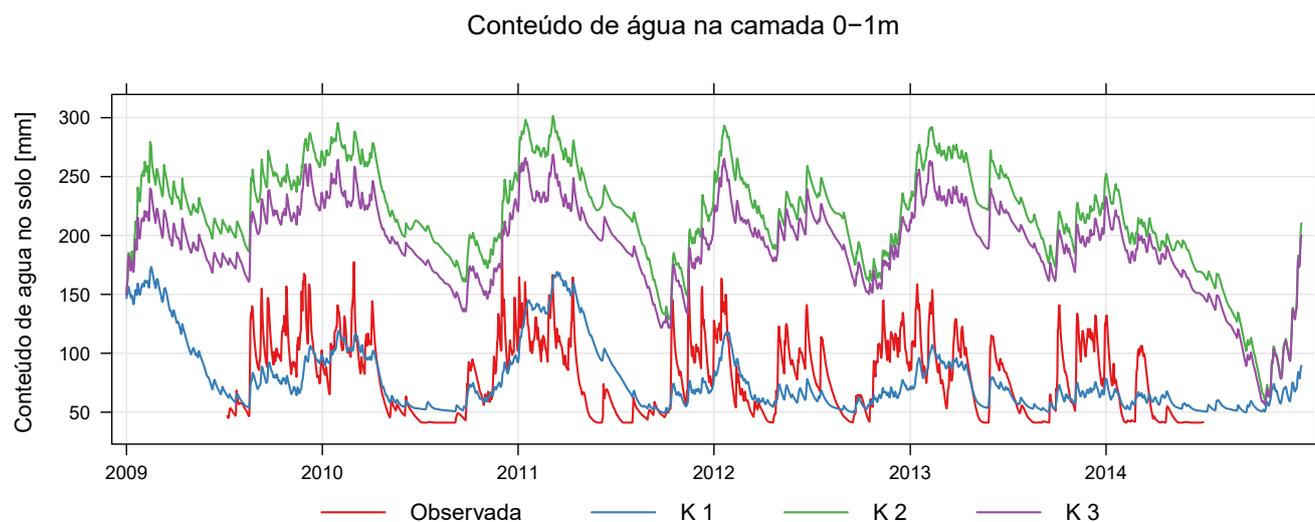


Figura 6: Variação diária do armazenamento de água na camada entre a superfície e 1m de profundidade observado e simulados pelo DBHM para diferentes variações do K_s (ver Tabela 5).

O resultado dessas configurações mostram linearidade entre o conteúdo de água médio (142, 309 e 475 mm) e a porosidade (0,3, 0,6, 0,9) (Figura 5), sendo a diferença de 166 mm para o aumento de 0,3 na porosidade.

O menor valor de porosidade tem a maior aproximação com a umidade do solo observada o que sugere valores mais representativos daquele solo. Na Figura 5 a queda da umidade do solo na estação seca é maior para menor valor de porosidade, apesar dos níveis de umidade no início da estação serem comparáveis.

3.4 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica define a taxa de infiltração da água na superfície do solo, além disso determina o fluxo de saída do escoamento nas camadas inferiores.

Na Figura 6, note-se como a simulação K1 ($K_s = 3 \text{ mm/h}$) tem menor conteúdo que K2 e K3, refletindo o fato de que infiltra pouca água. Contudo, nas simulações K2 e K3 há uma inversão no padrão mostrado pelos parâmetros previamente analisados.

A K2 retém mais água apesar da menor infiltração em comparação a K3. O que decorre ao fluxo de saída para camadas inferiores, dadas as mesmas condições de precipitação. Valores altos de condutividade hidráulica favorecem a maior recarga do aquífero.

4 Conclusões

Nesse estudo verificou-se alta sensibilidade do DBHM aos parâmetros hídricos do solo. O parâmetro b mostrou maior sensibilidade na simulação da umidade do solo

e interfere na capacidade de retenção da água no solo: menor retenção ocorre com a redução de b .

Baixos valores do potencial matricial simulam o secamento que acontece no período seco. A condutividade hidráulica controla a infiltração e recarga do aquífero, sendo mais sensível a valores de mesmo ordem de grandeza que a precipitação. A porosidade além de influenciar no total de água contida no solo, também regula a depleção da umidade do solo após eventos de precipitação, permitindo um secamento mais rápido quanto menor for seu valor.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERGS (Proj. 1988-2551/13-3), ao CNPQ (Proj. 461130/2014-9) e à CAPES pelo financiamento parcial do projeto e das bolsas. Agradecimentos à revisores, colaboradores e outras agências de fomento.

Referências

- Batalha, M., Mantovani, W., Mesquita Jr, H. N. d. (2001). Vegetation structure in cerrado physiognomies in South-Eastern Brazil. *Braz J Biol*, 61.
- Cabral, O., da Rocha, H., Gasch, J., Freitas, F., Ligoa, M. (2015). Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 22–40.
- Campbell, G. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sciences*, 117, 311–314.

- Chen, M., Willgoose, G., Saco, P. (2015). Evaluation of the hydrology of the ibis land surface model in a semi-arid catchment. *Hydrological Processes*, (29), 653–670.
- Clapp, R., Hornberg, G. (1978). Empirical equation for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14, 601–604.
- Farr, T. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *RevGeophys*, 45.
- Paz, A. (2008). *Modelo hidrológico distribuído MGB-IPH, ETAPA 1 de preparação das informações de entrada*. Porto Alegre, RS, Brasil.
- da Rocha, H., Freitas, H., Rosolem, R., Juárez, R., Tannus, R., Ligo, M., Cabral, O., Dias, M. (2002). Measurement of CO₂ over a woodland savanna (cerrado strictu sensu) in southeast of Brasil. *Biota Neotropica*, 2.
- Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., Collelo, G. D., Bounoua, L. (1996). A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs - Part I: model formulation. *J Clim*, pp. 676–705.
- Tang, Q. (2006). A distributed biosphere-hydrological model for continental scale river basins. Doutorado em filosofia, The University of Tokyo, Tokyo.
- Tatsch, J. (2011). Controle e uso da terra no clima e no regime hidrológico da bacia do rio mogi-guaçu. Doutorado em ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T., Bindlish, R., Yang, D. (2009). Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114, 2156–2202, URL <http://dx.doi.org/10.1029/2008JD010800>.
- Yang, D. (1998). Distributed hydrologic model using hillslope discretization based on catchment area function: Development and applications. Doutorado em filosofia, The University of Tokyo, Tokyo.
- Yang, D., Herath, S., Musiak, K. (1998). Development of a geomorphology-based hydrological model for large catchments. *Ann J Hydraul Eng, JSCE*(42), 169–174.