Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Utilizando o Modelo SWAT

Filipe Otávio Passos¹, Benedito Cláudio da Silva², Fernando das Graças Braga da Silva³

¹Doutorando em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Campus Professor José Rodrigues Seabra, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho, 37500903, Itajubá-MG. (35)984466230. lip_pas@hotmail.com (autor correspondente). ²Dr. Professor adjunto do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Campus Professor José Rodrigues Seabra, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho, 37500903, Itajubá-MG. (35)36291449. silvabenedito@gmail.com. ³Dr. Professor associado III, Universidade Federal de Itajubá, Campus Professor José Rodrigues Seabra, Avenida BPS, 1303 – Pinheirinho, 37500903, Itajubá-MG. (35)36291485. fbraga.silva@gmail.com.

Artigo submetido em 06/03/2020 e aceite em 01/04/2021

RESUMO

Diversos processos naturais podem causar mudanças nos fluxos hidrológicos dentro de bacias hidrográficas, sendo estas ainda mais afetadas devido a ações antrópicas que mudem as suas características físicas, principalmente, o tipo e o uso do solo. Neste contexto, este trabalho realiza uma análise do impacto nas vazões de uma bacia hidrográfica de pequena escala (Ribeirão José Pereira) devido a mudanças no uso e ocupação do solo, utilizando o modelo distribuído Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Foram gerados cinco cenários de uso e ocupação do solo, que foram idealizados a partir de características observadas na bacia ou de tendências futuras de ocupação, a saber, o cenário do estado atual, de manejo do solo, de recuperação das áreas de preservação permanente (APPs) de margens de rios, de substituição total por floresta e de crescimento urbano. Os resultados indicam que o modelo SWAT pode ser utilizado na simulação das componentes hidrológicas de bacias hidrográficas de pequeno porte, e ainda que o manejo agrícola e o reflorestamento da bacia são mais eficientes na diminuição do escoamento superficial do que a recuperação das APPs, chegando a uma diminuição de aproximadamente 40% nas vazões máximas simuladas.

Palavras-chave: modelagem hidrológica, chuva x vazão, Swat, uso e ocupação do solo.

Impact Assessment of Changes in Land Use and Management on the Losses of the Water Source of the José Pereira Stream, Using the SWAT Model

ABSTRACT

Several natural processes can cause changes in hydrological flows within hydrographic basins, which are even more affected due to anthropic actions that change their physical characteristics, mainly, the type and use of the soil. In this context, this work carries out an analysis of the impact on the flows of a small-scale hydrographic basin (River José Pereira) due to changes in land use and occupation, using the distributed model Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Five land use and occupation scenarios were generated, which were designed based on characteristics observed in the basin or future occupation trends, namely, the current state scenario, soil management, recovery of permanent preservation areas (APPs) of river banks, total replacement by forest and urban growth. The results indicate that the SWAT model can be used in the simulation of the hydrological components of small hydrographic basins, and that agricultural management and reforestation of the basin are more efficient in reducing runoff than the recovery of APPs, reaching a decrease of approximately 40% in the maximum simulated flows.

Keywords: hydrological modeling, rainfall, SWAT, land use and occupation.

Introdução

O crescimento populacional e a ocupação desordenada principalmente em grandes cidades provocam uma preocupante situação de uso e ocupação do solo, no que diz respeito a alterações que possam causar mudanças nos fluxos hidrológicos e maior incidência de enchentes e inundações.

Segundo Takeda (2013) o uso e ocupação do solo é o conjunto das atividades e práticas de uma sociedade sobre uma aglomeração urbana ou rural, combinadas com seus padrões ou tipos de assentamentos, do ponto de vista da regulação espacial. Pode-se dizer que o uso do solo é a representação da sociedade naquele determinado local e a ocupação do solo, por sua vez, é a

maneira pela qual a edificação pode ocupar o terreno, ou seja, é uma combinação de um tipo de atividade e de um tipo de assentamento.

De acordo com Dupasa et al. (2015) e Fia et al. (2015) o uso inadequado do solo vem acarretando diversos problemas ambientais, tais como, o comprometimento de fontes e mananciais de água, degradação de habitats naturais, erosão, enchentes e assoreamento do solo. Estes estão diretamente ligados a um mau gerenciamento do espaço que, por estar desprovido de algum critério técnico ou projeto ambiental, tal como um zoneamento do solo, não respeitam a capacidade de suporte da natureza.

Rennó e Soares (2000) citam que na natureza, a manutenção dos recursos hídricos, no que diz respeito ao regime de vazão dos cursos d'água e da qualidade de água, depende de uma relação íntima que existe entre a cobertura vegetal e a água. Moreira et al. (2015) enfatizam que o uso do solo, que inclui a vegetação e as atividades antropogênicas, afetam a disponibilidade hídrica.

Este equilíbrio dinâmico vem sendo constantemente alterado pelo homem através do desmatamento, expansão da agricultura, abertura de estradas, urbanização e vários outros processos de transformação da paisagem que alteram o ciclo da água.

Nesse contexto a simulação de cenários e previsão de possíveis impactos relacionados a mudanças no uso e ocupação dos solos, se torna bastante relevante. Com isso a utilização de modelos hidrológicos aparece como uma importante ferramenta de gestão de bacias hidrográficas, devido a sua rapidez de obtenção de resultados, principalmente, quando estes são associados a sistemas de informações geográficas (SIGs), permitindo a simulação para locais remotos (Sousa et al., 2018).

Segundo Marinho Filho et al. (2012) através da aplicação de princípios teóricos e conceituais, os modelos hidrológicos são capazes de reproduzir os fenômenos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes anteriormente desconhecidos ou não quantificados.

De acordo com Alvarenga et al. (2018) e Louzada e Ribeiro (2019) os modelos hidrológicos tem sido cada vez mais usados porque ajudam a entender os impactos de mudanças no uso e ocupação do solo e de mudanças climáticas.

Segundo Blainski, Acosta e Nogueira (2017) os modelos hidrológicos atendem a necessidade de compreensão dos processos que controlam o movimento da água e sedimentos, e seus impactos sobre a disponibilidade e qualidade

da água, e se consolidaram como importante ferramenta de representação desses processos com alto potencial para a simulação de cenários de mudanças climáticas, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas em diferentes escalas espaciais e temporais.

Muitos modelos têm sido utilizados por diversos autores para os mais variados objetivos, conforme pode ser facilmente encontrado na literatura. Dentre estes autores podem ser citados Cargnelutti et al. (2017) com a utilização do modelo hidrológico Kineros2, Andrade, Ribeiro e Lima (2016) com o modelo Dinâmica EGO, Dias (2015) com o modelo ABC, Mendes (2016) e Mendes, Cecílio e Zanetti (2017) e com o modelo DHSVM, Siqueira et al. (2016) com o modelo HEC-RAS, Correia, Ribeiro e Baptista (2015) com o modelo HEC-HMS, Caldeira (2016) com o modelo LASH, Martins, Silva e Pons (2019) com o Modelo MGB, entre outros.

Como pode se verificar existe uma gama muito grande de modelos hidrológicos que possuem características variadas sendo utilizados para inúmeras finalidades de investigação de parâmetros hidrológicos.

Atualmente o modelo SWAT tem sido um dos mais utilizados na modelagem hidrológica de bacias hidrográficas, principalmente na simulação de cenários de uso e ocupação dos solos auxiliando na tomada de decisões de gestores de bacias hidrográficas.

Pode-se destacar alguns autores que fazem uso dessa importante ferramenta como Antunes (2015), Wagner et al. (2015), Serpa et al. (2015), Lin et al. (2015), Ghoraba (2015), Rodrigues et al. (2015), Caetano e Casaroli (2016), Correia (2016), Silva (2016), Lopes et al. (2016), Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016), Blainski, Acosta e Nogueira (2017), Andrade et al. (2017), Teixeira (2017), Silva e Cota (2019), entre muitos outros.

O modelo SWAT foi desenvolvido em 1996 pelo Agricultural Research Service (USDA) e pelo Texas A&M University. É um modelo matemático de parâmetro distribuído, o qual permite que diferentes processos físicos sejam simulados em bacias hidrográficas com o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água em bacias hidrográficas agrícolas (Frade, 2019).

O modelo opera em passo de tempo diário, ou subdiário e simula longos períodos, para computar os efeitos de diferentes cenários de manejo. Os resultados mais importantes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos,

temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola.

O SWAT foi desenvolvido para quantificar o impacto das práticas de gestão dos solos em grandes bacias hidrográficas e que pode simular os seguintes componentes: escoamento superficial, fluxo de retorno, percolação, evapotranspiração, o crescimento das culturas e irrigação, o fluxo de águas subterrâneas, nutrientes e pesticidas (Winchell et al., 2013).

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação do comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira, de pequena escala, sujeita a alterações de uso e ocupação do solo. O trecho baixo da bacia apresenta ocupação urbana, com tendência de expansão e já apresenta problemas de inundação. Portanto, os resultados podem contribuir para o planejamento de ocupação na bacia, para que os danos causados por enchentes e inundações, que são frequentes na região, possam ser entendidos e para que ações possam ser realizadas no intuito de minimizar os danos.

Material e métodos

Bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira (BHRJP)

A bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira está totalmente inserida no município de Itajubá, que se encontra no sul do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 22°23'45.25'' a 22°27'6.41'' de latitude Sul e 45°27'2.84'' a

45°20'57.33'' de longitude Oeste, sendo pertencente à bacia hidrográfica do rio Sapucaí e esta por sua vez é uma das bacias formadoras da bacia do rio Grande. A Figura 1 apresenta a delimitação e a hidrografia e Figura 2 a caracterização topográfica da BHRJP com a hidrografia principal.

A BHRJP apresenta área aproximada de 40 km² e nasce na zona rural de Itajubá na Reserva Biológica da Serra dos Toledos, o que lhe concede fortes declividades em seu trecho inicial, cruza os bairros da região central de Itajubá, onde ocorrem frequentes inundações (Figura 3), devido a baixas declividades da região e características desse trecho do ribeirão que potencializam o extravasamento de sua calha, e deságua no rio Sapucaí.

Seguindo a classificação climática de Köppen-Geiger, a bacia do Ribeirão José Pereira apresenta as duas variações do Clima Tropical de Altitude (CW), o tipo Cwa, predominante em grande parte da área, e Cwb, restrito a uma pequena porção noroeste da bacia. O clima pode ser descrito como mesotérmico (C), no qual a temperatura média do mês mais frio está entre -3°C e 18°C, com chuvas de verão (w) e verões quentes no tipo Cwa (mês mais quente com média igual ou superior a 22°C), e brandos no tipo Cwb, média do mês mais quente inferior a 22°C (Flauzino, 2012).

Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira.

Figura 2. Recorte do modelo numérico do terreno para a bacia hidrográfica do Ribeirão José Pereira.

Figura 3. Inundação na área urbana devido à cheia do ribeirão José Pereira (fev/2020).

Dados climáticos e hidrológicos

Dentre os dados de entrada do modelo SWAT são necessários dados climáticos, com séries históricas em intervalos de tempo subdiário, diário ou mensal. Neste trabalho são utilizados Passos, F. O.; Silva, B. C.; Silva, F. G. B.

dados diários de precipitação, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar, para os anos de 2010 a 2016, medidos pela estação meteorológica do Centro de Previsão e Estudos de Tempo e Clima de Minas

Gerais (CEPreMG), localizada no interior do Campus da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), conforme apresentado na Figura 4.

Devido a maior altitude na região de nascentes da bacia, constatou-se que a precipitação da estação CEPreMG não é representativa de toda a bacia, uma vez que se localiza próximo de sua foz. Dessa forma,

adicionou-se o posto pluviométrico 02245088 (Maria da Fé) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (Figura 4). Apesar de estar localizado fora da bacia, este posto está em uma altitude similar à porção mais elevada da bacia e é representativo do regime de chuva nessa região.

Figura 4. Localização dos postos de clima e de vazão.

Os dados de vazão foram obtidos de um posto fluviométrico no ribeirão José Pereira, dentro da área urbana de Itajubá, em frente ao Campus da UNIFEI (Figura 5).

A instalação e operação deste posto foram realizadas dentro do escopo do projeto de pesquisa ao qual este trabalho está vinculado.

Figura 5. Posicionamento da estação fluviométrica. Fonte: Google Earth (2020).

Dados fisiográficos

O mapa de solos na escala 1:25.000, utilizado no trabalho é proveniente de um estudo realizado por Lima (2012). De acordo com a autora, a bacia do ribeirão José Pereira possui oito unidades de mapeamento, considerando a classe do solo e sua posição no relevo, conforme apresentado na Figura 6.

Lima (2012) determinou que os Cambissolos Háplicos ocupam 26% da área, predominando no relevo montanhoso. Os Gleissolos ocupam 7% da bacia, localizados nas baixadas, onde se formam zonas de acúmulo de água. Condicionando aos solos características hidromórficas, os Latossolos predominaram no relevo plano-ondulado, principalmente nos topos de morros, ocupando 6% da área. Os Argissolos constituíram a classe de solo dominante na bacia, representando 56% da área, ocupando o relevo ondulado e forte ondulado.

Para o uso e ocupação do solo foi utilizado no trabalho o mapa proveniente do estudo realizado por Flauzino (2012). De acordo com o mapeamento de realizado pela autora as

pastagens representam a forma de uso predominante na área de estudo, sendo aproximadamente, 50% da área. As matas ocupam cerca de 40%, dos quais, aproximadamente metade são os remanescentes de Mata Atlântica protegida pela reserva biológica da Serra dos Toledos.

A urbanização que engloba parte central da cidade de Itajubá representa 6,5% da área. O solo exposto que ocupa 1,10% da bacia, é representado pelas estradas vicinais, áreas de empréstimo, área de estrada pavimentada (trecho da rodovia estadual MGC-383) que corta a bacia e, indiretamente, divide a área urbana da rural. A classe água abrange lagos e lagoas distribuídas, sendo que grande parte é utilizada para piscicultura, conforme apresentado na Figura 7.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno foi obtido junto ao site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agrícola (Embrapa), Brasil em Relevo, com resolução espacial de 90 metros. Para a manipulação dos mapas e as simulações com o SWAT foi utilizado o ArcGis 10.2 licenciado para a UNIFEI.

Figura 6. Mapa de solos da bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira. Fonte: Lima, 2012.

Figura 7. Uso e ocupação na bacia do ribeirão José Pereira. Fonte: Flauzino, 2012.

Descrição da modelagem no SWAT

De acordo com Pimentel (2017) e Frade (2019) os componentes do ciclo hidrológico no modelo SWAT é obtido a partir da equação do balanço hídrico, conforme Equação [1]:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R - Q_{surf} - ET - P - Q_{lat} - Q_{gw}) \quad \text{Equação [1]}$$

Onde:

SW_t = quantidade final de água no solo (mm);
 SW_0 = quantidade inicial de água no solo (mm);
 R = precipitação (mm);

Passos, F. O.; Silva, B. C.; Silva, F. G. B.

Q_{surf} = escoamento superficial (mm);

ET = evapotranspiração (mm);

P = percolação de água da camada simulada para a camada inferior (mm);

Q_{lat} = escoamento lateral (mm);

Q_{gw} = água que retorna ao curso d'água devido ao escoamento subsuperficial (mm).

O modelo SWAT estima o escoamento através do método da Curva Número (SCS – CN), que foi o selecionado como método de simulação, ou modelo Green Ampt (Pereira et al. 2014).

De acordo com Pereira et al. (2014) para estimar a evapotranspiração real (ET), o modelo calcula separadamente a transpiração da planta e a evaporação da água no solo, sendo a transpiração estimada pela correção da evapotranspiração potencial para condições de déficits de pressão e depois para o conteúdo de água no solo. A evapotranspiração potencial é obtida pelo método de Penman-Monteith. O fluxo de água subterrânea é estimado separando os reservatórios subterrâneos rasos e profundos onde a contribuição do reservatório raso é considerada no balanço hídrico e o reservatório profundo como perda no sistema.

Cenários de Uso e Ocupação do Solo

Foram definidos cinco cenários de uso e ocupação do solo, construídos a partir da condição atual da bacia, dos planos de desenvolvimento do município de Itajubá e da legislação ambiental atual. São os seguintes cenários:

Cenário 1 - Bacia Hidrográfica com os usos identificados por Flauzino (2012), representando o estado atual, com as pastagens degradadas, ou seja, em más condições, característica deste uso, mencionada pela autora.

Cenário 2 - Mesmas condições de uso e ocupação do solo do cenário anterior, prevendo o manejo agrícola e posterior recuperação da pastagem degradada, tendo como resultado pastagens em boas condições.

Cenário 3 - Substituição dos usos identificados por Flauzino (2012) para a bacia hidrográfica por floresta mista, a partir do reflorestamento. O objetivo é a comparação entre os cenários mesmo que, isto seja algo impossível de ocorrer.

Cenário 4 - Recuperação das APPs de margens de rios, baseada no Novo Código Florestal, onde foi definido que para rios com largura inferior a 10 metros, a faixa marginal deve ser de 30 metros.

Cenário 5 - Crescimento urbano, tendência observada na área da bacia após a transferência da prefeitura para dentro da bacia, sendo limitado por topos de morros e principalmente pela Rodovia Itajubá - Maria da Fé e a Reserva Biológica da Serra dos Toledos. Substituição de pastagem, solo exposto e agricultura, por urbanização de baixa a média densidade.

Ajuste do modelo Hidrológico

A calibração do modelo hidrológico foi realizada de forma manual para toda a bacia do ribeirão José Pereira, através de dados observados e simulados para o período de 01/12/2014 a 20/07/2016. Para realizar a análise da qualidade do ajuste de calibração foram utilizados diferentes coeficientes de eficiência, tais como:

Erro médio absoluto

$$EMA = Média (ABS (\frac{Q_{obs} - Q_{cal}}{Q_{obs}}) * 100) \quad \text{Equação [2]}$$

Onde:

EMA = erro médio absoluto;

Q_{obs} = vazão observada;

Q_{cal} = vazão simulada pelo modelo.

Diferença média absoluta da curva de permanência

$$DMACP = \bar{X} (ABS (\frac{Q_{obs[\%]} - Q_{cal[\%]}}{Q_{obs[\%]}}) * 100) \quad \text{Equação [3]}$$

Onde:

DMACP = diferença média absoluta da curva de permanência;

$\bar{X}$ = média;

$Q_{obs[\%]}$ = vazão observada para determinada frequência da curva de permanência de vazões observadas;

$Q_{cal[\%]}$ = vazão simulada para determinada frequência da curva de permanência de vazões simuladas.

Coefficiente Nash Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_m)^2} \quad \text{Equação [4]}$$

Coefficiente Nash Sutcliffe dos Logaritmos

$$NSlog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(QC_i) - \log(QO_m))^2} \quad \text{Equação [5]}$$

Onde:

QC_i = vazão calculada no tempo i ;

QO_i = vazão observada no tempo i ;

QO_m = vazão observada média;

n = número de intervalo de tempo.

Para a calibração foi realizado apenas o processo manual diretamente no modelo utilizando a ferramenta de calibração com a alteração dos parâmetros mais sensíveis, Tempo de Fluxo da Água Subterrânea (GW_DELAY) e Condutividade Hidráulica Saturada (SOL_K), além de outros parâmetros menos sensíveis, mas que auxiliaram no processo de calibração como o Coeficiente de Manning para o canal (CH_N2), Água do Aquífero Profundo que Retorna ao Canal (GWQMN) e Fator de Crescimento da Cultura (EPCO), até se encontrar um valor considerado satisfatório dos coeficientes de ajuste citados anteriormente.

Para a calibração foi utilizado todo o período com vazões observadas do posto fluviométrico de 16/07/2014 a 13/07/2016. O período adotado de aquecimento do modelo, ou *warm up*, foi de 01/01/2010 a 31/12/2011. E o período simulado para comparação dos cenários foi o de 01/01/2012 a 20/07/2016.

Vale salientar que a série de vazões observadas apresentava falhas em alguns dias

isoladamente e em dias subsequentes, com 79 dias no maior período, devido a falhas no sensor de nível.

Resultados e Discussão

Calibração e ajuste do modelo SWAT

Os parâmetros alterados para o processo de calibração manual são mostrados na Tabela 1, que apresenta o nome do parâmetro, o valor inicial e o novo valor do parâmetro, sendo que o GW_DELAY e o SOL_K são considerados neste trabalho como os mais sensíveis e que geraram melhores resultados no ajuste do modelo. Os valores foram atingidos pelo processo de tentativa e erro, até alcançar o melhor ajuste dos coeficientes de eficiência calculados a partir das Equações [2], [3], [4] e [5].

Tabela 1. Valores iniciais e alterados de parâmetros calibrados.

Parâmetro	Valor Inicial	Novo valor
CH_N2	0.014	0.040
GW_DELAY	31	360.00
GWQMN	1000	500.00
EPCO	0.95	1.00
SOL_K Argissolo	293.01 (inserido)	50.00

SOL_K Cambissolo	12.5 (inserido)	6.25
SOL_K Latossolo Vermelho	90 (inserido)	22.50
SOL_K Solo Urbano	500.0	250.0

Após a mudança desses parâmetros, ou seja, realizada a calibração, pode ser feita uma simulação para a situação atual da bacia hidrográfica para o período de 16/07/2014 a 13/07/2016.

A Figura 8 apresenta tais resultados onde se observa alguns problemas entre as vazões simuladas e observadas, principalmente com alguns picos superestimados pelo modelo. Porém considera-se o ajuste satisfatório, para a comparação entre os cenários.

Além disso, a figura apresenta a precipitação observada para o período de calibração, e dela se observa que nas vazões simuladas os picos parecem responder aos picos observados na precipitação, e não somente os valores máximos, mas também na média e nos mínimos.

Figura 8. Calibração realizada e simulação da situação atual.

Os valores dos parâmetros de ajuste de calibração calculados pelas Equações [2], [3], [4] e [5], respectivamente, são então apresentados na Tabela 2, onde novamente se considera que estes são adequados para este trabalho.

Tabela 2. Indicadores de calibração.

Indicador	Valor Atual [%]
-----------	-----------------

EMA	36.63
DMACP	12.76
NS	0.45
NSlog	0.53

Analisando os parâmetros de ajuste utilizados verifica-se que EMA se encontra bastante elevado já a DMACP está próximo de 10% podendo ser considerado um bom ajuste. Para os coeficientes de eficiência Nash e Nash log os valores indicam um ajuste satisfatório da calibração.

O coeficiente Nash Sutcliffe está relacionado com as vazões máximas, ou seja, os picos do hidrograma e neles estão os principais problemas dessa calibração, por isso o valor do coeficiente não é tão elevado, porém, satisfatório.

Já o coeficiente Nash Sutcliffe dos logaritmos se relaciona com as vazões mínimas que apresentam alguns descolamentos entre o observado e o simulado, conforme Figura 8, porém são melhores representados pelo modelo com essa calibração e apresentam valores maiores que o Nash, e também são considerados satisfatórios.

Para justificar a utilização desse ajuste de calibração além dos resultados dos coeficientes de eficiência, pode-se ter como referência o estudo realizado por Niraulam, Meixner e Norman (2015) utilizando o modelo SWAT, onde criaram cenários de mudanças do uso do solo e climáticas, e utilizaram para comparar as mudanças relativas e absolutas no escoamento, o modelo sem calibração (UC), com calibração de saída única (OC) e o modelo espacialmente calibrado (SC).

Os resultados indicaram claramente que as alterações relativas devido às mudanças climáticas previstas com o cenário UC e OC não foram significativamente diferentes daquela prevista com o modelo SC e que a calibração foi considerada menos importante, se o objetivo é apenas comparar entre vários cenários de uso e ocupação do solo. Os autores ainda citam que o modelo tem sido utilizado em um modo não calibrado, para eliminar o viés potencial causado pela otimização de parâmetros para modelagem do escoamento.

A curva de permanência para as vazões observadas e simuladas pode, então, ser apresentada na Figura 9, onde pode ser observada uma boa correlação com exceção das vazões de baixa ocorrência, ou seja, vazões mais altas, fato já observado e citado anteriormente, sobre a Figura 8.

Esse fato está relacionado ao ajuste da calibração, conforme pode ser notado pelo coeficiente de eficiência Nash, valor de 0.45, pois este está associado aos valores máximos simulados. Portanto parece existir uma limitação das vazões simuladas pelo modelo SWAT, provavelmente associada à qualidade dos dados de entrada fornecidos ao modelo, ou ainda a qualidade dos dados de vazão observada, uma vez que a curva-chave foi obtida sinteticamente com período curto de observação do nível d'água.

Figura 9. Curva de permanência de vazões observadas e simuladas.

As Figuras 8 e 9 mostram que as pastagens degradadas encontradas na bacia hidrográfica, alteram de maneira significativa os fluxos hidrológicos. As vazões máximas simuladas são de aproximadamente, 18 m³/s, sendo que a vazão observada máxima é de

aproximadamente 8 m³/s. No geral, as vazões de pico simuladas são maiores do que as observadas.

Segundo Blainski et al. (2011) e Nascimento et al. (2019) o aumento médio de vazão pode ser atribuído à redução da infiltração de água no solo, oriunda do selamento superficial

ocasionado pelo impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície do solo.

Em seus resultados, Koumrouyan (2015) concluiu que cenários de cobertura mais degradados tiveram um aumento de vazão um pouco mais rápida, em decorrência de precipitação, do que os cenários mais preservados.

Com isso, a degradação da pastagem, pode ter sido a causa de tal efeito sobre as vazões máximas observados no hidrograma, ou seja, o aumento das vazões devido à impermeabilização dos solos e consequente redução da infiltração.

Cenário 2: manejo da pastagem - O cenário do manejo da pastagem foi considerado necessário, uma vez que, conforme citado anteriormente, a pastagem encontrada na bacia se apresenta em más condições. Sendo assim, o intuito da criação desse cenário foi o de verificar qual a influência nas vazões, da recuperação da pastagem degradada, através de práticas de manejo adequadas do solo.

Então tendo como base as entradas iniciais para a calibração realizada, mesmos mapas de uso do solo, de solo e de declividades, tendo como período de simulação e de aquecimento os mesmos do cenário anterior, novas mudanças do parâmetro CN2 foram realizadas para os seguintes valores mostrados na Tabela 3, correspondentes às pastagens em boas condições, ou seja, é considerado que após o manejo

adequado da pastagem, ela se recupere por completo.

Tabela 3. Valores de CN2 substituídos no calibrador manual para o cenário 2. Fonte: Tucci, 2007.

Solo	Grupo hidrológico	CN2
Latossolo vermelho	A	6
Cambissolo	C	70
Argissolo	B	35

Após o resultado simulado ser considerado aceitável, comparações entre as vazões do cenário Atual e as vazões simuladas para esse novo cenário, onde ocorreu o manejo da pastagem, foram realizadas e os resultados apontam para uma diminuição significativa nas vazões de pico do hidrograma, conforme apresentado na Figura 10.

Os resultados mostram reduções significativas nas vazões desse novo cenário, o que pode significar minimização dos efeitos decorrentes de enchentes e inundações na bacia, caso ocorra à recuperação das pastagens.

Figura 10. Comparação do cenário atual e cenário de manejo agrícola (pastagem em boas condições).

Cenário 3: área ocupada por floresta - O cenário de área da bacia hidrográfica ocupada por floresta é simulado fazendo uma mudança no banco de dados de uso e ocupação do solo. Onde área da

bacia que inicialmente se apresenta com sete diferentes usos e ocupação do solo, passam a ter apenas o uso florestas mistas.

Obviamente essa é uma situação impossível de ocorrer, uma vez que, a bacia já se encontra com parte urbanizada e com outros usos. Porém, julgou-se interessante gerar esse cenário para se observar os resultados da bacia em seu estado original e para efeito de comparação dos diferentes cenários simulados para a bacia.

Os resultados mostrados apresentaram mudanças nas vazões, como era de se esperar, os picos diminuíram, conforme apresentado na Figura 11.

Na literatura, Pimentel (2017) simulou o cenário de crescimento ou expansão de florestas, encontrou o mesmo comportamento das vazões.

Segundo Viola et al. (2014), a capacidade de infiltração no solo junto com a profundidade do sistema radicular afeta o fluxo de base.

Como a cobertura florestal tem um sistema radicular mais profundo do que os demais usos do solo encontrados na bacia hidrográfica, isso permite que a água seja retirada de maiores profundidades, afetando a disponibilidade de água para manter as vazões de base. E, ainda, o aumento da interceptação e consequente aumento da evapotranspiração corroboram para diminuição das vazões e, portanto, para a validação desses resultados.

Figura 11. Comparação do cenário atual e cenário de reflorestamento (área de 100% floresta).

Cenário 4: área de preservação permanente - Esse cenário é simulado, levando-se em consideração as APPs de margens de rios, tendo como base o Novo Código Florestal que indica que, para rios com largura inferior a 10 metros, deve ser respeitada a mata ciliar com largura mínima de 30 metros de cada lado. Então foi gerado um *buffer* com essa espessura em toda drenagem da bacia, sendo associado ao mapa inicial de uso e ocupação do solo.

A comparação entre as vazões do cenário atual e as vazões simuladas para o cenário das APPs foi realizada e os resultados apontam para uma diminuição nas vazões de pico do hidrograma. Porém, tal alteração não afetou tão drasticamente os resultados, embora tenha

diminuído, mostrando, então, a influência nas vazões da bacia do desmatamento devido à urbanização, como pode ser observado na Figura 12.

Contudo, os cenários de recuperação da pastagem e o cenário de reflorestamento se mostram mais efetivos na redução das vazões de pico do que o cenário das APPs.

Os valores das vazões simuladas na média foram reduzidos, conforme pode ser observado. Algo também encontrado pelos autores Sousa, Filho e Coelho (2015) para o cenário das APPs que apresentou os menores valores nos picos por consequência de maiores volumes interceptados e infiltrados.

Figura 12. Comparação do cenário atual e cenário das APPs de margens de rios.

Cenário 5: crescimento urbano - Nesse último cenário, será simulado um aumento na mancha urbana na bacia do ribeirão José Pereira, onde áreas inicialmente com pastagem, solo exposto, agricultura, floresta e água são substituídos pelo uso urbano.

A comparação entre as vazões do cenário atual e as vazões simuladas para o cenário de crescimento urbano foi realizada e os resultados mostram que a vazão de pico por vezes, superam as vazões do cenário atual, conforme pode ser visto na Figura 13.

Fato este esperado, uma vez que, com a urbanização, novas áreas passam a serem impermeáveis, com a presença de telhados, ruas,

passeios, garagens, e outras estruturas de concreto, favorecendo o escoamento superficial em decorrência da diminuição da infiltração da água no solo.

De acordo com Rosa (2017) o crescimento urbano contribui para a diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial, o que contribui em um decréscimo das vazões de base e aumento dos picos. Em contrapartida, observa-se comportamento oposto em locais sem presença de núcleos urbanos. Algo totalmente de acordo com a situação observada nesse cenário e que evidencia a importância de medidas serem tomadas caso ocorra à expansão da urbanização na área em estudo.

Figura 13. Comparação do cenário atual e do cenário de crescimento urbano.

Para efeito de visualização, a Figura 14 apresenta uma comparação das curvas de permanência dos cinco cenários estudados onde se verifica que em todos eles as vazões com até 92% de permanência são bastante aderentes (curvas coincidentes) e que as principais diferenças ocorrem realmente nas vazões de pico, de baixa ocorrência, conforme já citado nas discussões anteriores sobre as figuras com a comparação dos hidrogramas.

O modelo SWAT parece apresentar certa dificuldade em simular as vazões máximas. Já para vazões intermediárias e mínimas as simulações parecem ter uma melhor representação pelo modelo. Acredita-se que esse possa ser um efeito do tamanho da bacia hidrográfica em estudo associado à qualidade dos dados de entrada utilizados e seus efeitos no ajuste da calibração.

Figura 14. Comparação das curvas de permanência dos cenários estudados

Conclusões

Inicialmente pode-se concluir que o modelo SWAT, embora seja um modelo desenvolvido para características de bacias dos Estados Unidos, pode ser aplicado ao Brasil e, também a bacias hidrográficas de pequena escala.

Embora a calibração realizada não tenha sido muito exigente, os resultados simulados, quando comparados ao observado e ao cenário da situação atual, na média, parecem estar de acordo.

O cenário da situação atual sugere a necessidade de ações na bacia para que as vazões sejam reduzidas, uma vez que, os efeitos são potencializados na área urbana, podendo gerar prejuízos materiais, aos moradores, comerciantes e para a Universidade Federal de Itajubá.

A simulação do cenário de pastagem em boas condições, ou seja, de manejo agrícola, indica que essa seria uma possível solução do problema citado anteriormente.

O cenário de troca de toda área da bacia por floresta acaba servindo mais de comparação com os demais, uma vez que o reflorestamento de toda área seria impossível. Porém indica que o manejo da pastagem pode ser mais adequado e que possa ser um bom ponto de partida para a redução das vazões.

O cenário das APPs de margens de rios parece não surtir tanto efeito sobre as vazões, simulando algo muito próximo ao que é simulado no cenário atual. Isso pode ser atribuído ao pequeno aumento percentual de 7,21% da classe e porque a ocorrência das APPs foi principalmente em áreas antes ocupadas por pastagem e floresta e não em áreas urbanizadas. Espera-se que se essa troca fosse feita em locais urbanizados os efeitos sobre as vazões seriam potencializados.

Já para o cenário de crescimento urbano, as vazões simuladas se apresentam bastante elevadas e em alguns períodos as vazões são superiores às vazões simuladas para a situação atual. Portanto, os resultados mostram que os efeitos de uma mudança de 8,8% da área da bacia, troca dos demais usos para urbanização, teriam consequências graves nas vazões e no extravasamento da calha do ribeirão na área central da cidade de Itajubá.

O que se observa nos resultados é que se a tendência de crescimento urbano ocorrer, e nada for feito para a redução das vazões, o problema com as inundações tendem a continuar e até se agravar na bacia hidrográfica do ribeirão José Pereira, podendo conferir prejuízos aos municípios e a Universidade Federal de Itajubá.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também a Universidade Federal de Itajubá por todo o suporte acadêmico e estrutural para a realização do estudo e a FINEP pelo financiamento do projeto RHIMA.

Referências

- Alvarenga, L.A.; Mello, C.R.; Colombo, A.; Chou, S.C.; Cuartas, L.A.; Viola, M.R., 2018. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. *American Journal of Climate Change*, 7, 355-366.
- Andrade, M.P.; Ribeiro, C.B. M.; Lima, R.N.S., 2016. Modelagem dinâmica da mudança do uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir de imagens MODIS e um modelo de sub-regiões. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 965 – 978.
- Andrade, C.W.L.; Montenegro, S.M.G.L.; Lima, J.R.S.; Montenegro, A.A.A.; Magalhães, A.G., 2017. Modelagem hidrológica sob mudanças na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica no Nordeste do Brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 2, 239-248.
- Antunes, T.A., 2015. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT. Dissertação (Mestrado). Lages, UDESC.
- Blainski, E.; Silveira, F.A.; Conceição, G.; Garbossa, L.H.P.; Vianna, L.F.N., 2011. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. *Revista Agropecuária Catarinense* 24, 65 – 70.
- Blainski, E.; Acosta, E.; Nogueira, P.C.P., 2017. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. *Revista Ambiente e Água* 12, 226 – 237.
- Brighenti, T.; Bonumá, N.; Chaffe, P.L.B., 2016. Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21, 53 – 64.
- Caetano, J.M.; Casaroli, D., 2016. Tendências dos modelos hidrológicos integrados aos sistemas de informações geográficas a partir da cienciometria. *Revista Comunicata Scientiae* 7, 406 - 414.
- Caldeira, T.L., 2016. Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): Aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), Pelotas, UFPel.
- Cargnelutti, J.; Galina, V.; Kaviski, E.; Gramani, L.M.; Lobeiro, A.M., 2017. Simulação do escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Aquidauana usando o método do reticulado de Boltzmann. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, XXII simpósio brasileiro de recursos hídricos – Florianópolis, SC.
- Correia, T.P., 2016. Aplicação do modelo Swat para simulação de cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Jucu. Dissertação (Mestrado). Jerônimo Monteiro, UFES.
- Correia, E.F.G.; Ribeiro, G.P.; Baptista, A.C., 2016. Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. *Revista Brasileira de Cartografia* 67, 1183 - 1202.
- Dias, V.S., 2015. Uso de modelo hidrológico em bacia hidrográfica urbana para previsão de enchentes. Estudo de caso: Microbacia do Córrego Jataí - Uberlândia/MG. Dissertação (Mestrado). Uberlândia, UFU.
- Dupasa, R.; Delmasc, M.; Doriozd, J.M.; Garniere, J.; Moatarf, F.; Gascuel-Odouxa, C., 2015. Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk. *Ecological Indicators* 48, 396-407.
- Fia, R.; Tadeu, H.C.; Menezes, J.P.C.; Fia, F.R.L.; Oliveira, L.F.C., 2015. Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 267 – 275.
- Flauzino, B.K., 2012. Degradação do solo pela erosão hídrica e Capacidade de uso em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.
- Frade, T.G., 2019. Modelagem hidrológica utilizando os dados de precipitação PERSIANN-CDR e o modelo Swat para a bacia do rio Piancó – PB. Monografia (Graduação). João Pessoa, FPB.
- Ghoraba, S.M., 2015. Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and SWAT model. *Alexandria Engineering Journal* 54, 583 – 594.
- Google Earth. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>. Acesso: 05 nov. 2020.
- Koumrouyan, A., 2015. Desenvolvimento de cenários de cobertura da terra em uma bacia de mesoescala na mata Atlântica e análise de respostas hidrológicas simuladas pelo modelo DHSVM. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE.

- Lima, O. Distribuição de solos em catenas e mapeamento pedológico de sub-bacia hidrográfica piloto na região de Itajubá-MG. Dissertação (Mestrado). Itajubá, UNIFEI.
- Lin, B.; Chen, X.; Yao, H.; Chen, Y.; Liu, M.; Gao, L.; James, A., 2015. Analyses of land use change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. *Ecological Indicators* 58, 55 – 63.
- Lopes, T.R.; Zolin, C. A.; Mingoti, R.; Oliveira, R.F., 2016. Calibração e validação do modelo SWAT aplicado a uma sub-bacia do rio Teles Pires. In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO, 4, Brasília, DF. Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra: anais. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 144-151.
- Louzada, V.M.; Ribeiro, C.B.M., 2019 Impacts of land-use change on southeast Amazonia basin streamflow. *Revista Ambiente & Água*, 14, 2303, 2019.
- Marinho Filho, G.M.; Andrade, R.S.; Zukowski Júnior, J.C.; Magalhães Filho, L.N.L., 2012. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais* 6, 35 – 47.
- Martins, C.M.S.; Silva, B.C.; Pons, N.A.D., 2019. Estimativas de cheias em bacias hidrográficas com base em previsões de precipitação por conjunto. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 1713 - 1729.
- Mendes, H.A., 2016. Metodologia para calibração do modelo hidrológico DHSVM. Tese (Doutorado). Jerônimo Monteiro, UFES.
- Mendes, H.A.; Cecílio, R.A.; Zanetti, S.S., 2017. Nota técnica: ferramenta para calibração automática do modelo hidrológico DHSVM. *Revista Engenharia na Agricultura* 25, 272 – 282.
- Moreira, T.R.; Santos, A.R.; Dalfi, R.L.; Campos, R.F.; Santos, G.M.A.D.A.; Eugênio, F.C., 2015. Confronto do uso e ocupação da terra em APPs no Município de Muqui, ES. *Floresta e Ambiente*, 22, 141-152.
- Nascimento, R.J.A., Pereira de Oliveira, F., Santos, D., Moreira Beirigo, R., Megna Francisco, P.R.; Ramos de Almeida Nascimento, R., 2019. Selamento superficial e formação de crosta em solos representativos do Estado da Paraíba. *Colloquium Agrariae*, 15, 79-93.
- Niraulam, R.; Meixner, T.; Norman, L.M., 2015. Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. *Journal of Hydrology* 522, 439 – 451.
- Pereira, D.R.; Martinez, M.A.; Almeida, A.Q.; Pruski, F.F.; Silva, D.D.; Zonta, J.H., 2014. Hydrological simulation using swat model in headwater basin in southeast Brazil. *Engenharia Agrícola*, 34, 789-799.
- Pimentel, S. M., 2017. Modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu sob diferentes cenários de cobertura florestal. Dissertação (Mestrado). Jerônimo Monteiro, UFES.
- Rennó, C.D.; Soares, J.V., 2000. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Relatório técnico parcial. Cachoeira Paulista, INPE.
- Rodrigues, E.L.; Elmiro, M.A.T.; Jacobi, C.M.; Lamounier, W.L., 2015. Aplicação do modelo Swat na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. *Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal, Soc. & Nat.* 27, 485 - 500.
- Rosa, A.F., 2017. Os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico no município de Patrocínio – MG. Monografia (Graduação). Uberlândia, UFU.
- Serpa, D.; Nunes, J.P.; Santos, J.; Sampaio, E.; Jacinto, R.; Veiga, S.; Lima, J.C.; Moreira, M.; Corte-Real, J.; Keizer, J.J.; Abrantes, N., 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of The Total Environment* 538, 64–77.
- Silva, F.D.M., 2016. Aplicabilidade do modelo Swat na simulação de vazão em bacia hidrográfica do cerrado utilizando valores de parâmetros regionalizados. Dissertação (Mestrado). Brasília, UNB.
- Silva, L.; Cota, S.D.S., 2019. Derivação de parâmetros para o uso do modelo SWAT na estimativa de recarga subterrânea em um aquífero cárstico-fissural do semiárido brasileiro. *Revista Águas Subterrâneas* 33, 22 - 33.
- Siqueira, V.A.; Sorribas, M.V.; Bravo, J.M.; Collischonn, W.; Lisboa, A.M.V.; Trinidad, G.G.V., 2016. Atualização em tempo real do modelo HEC-RAS para previsão de vazões utilizando um algoritmo de otimização. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 21, 855-870.
- Sousa, J.S.; Filho, J.E.A.; Coelho, G., 2015. Influência da impermeabilização e das áreas de preservação permanente no volume do escoamento superficial e vazão de pico, na bacia do Córrego das Lajes – Uberaba, MG. *Revista Scientia Agraria (SA)*, 16, 53-75.
- Sousa, W.S.; Viana, J.F.S.; Silva, R.R.; irmão, R.A., 2018. Estimativa do balanço hídrico de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio

- Ipanema com o Modelo SWAT. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 3, 146-154.
- Takeda, T.O., 2013. Uso e ocupação do solo urbano.
Disponível:http://www.jurisway.org.br/v2/dhal.asp?id_dh=12363. Acesso: 17 de ago. 2016.
- Teixeira, L.F.C., 2017. Análise de Sensibilidade de Parâmetros do Modelo Hidrológico Swat em Função de Diferentes Características de Bacias Hidrográficas. Dissertação (Mestrado). Vitória, UFES.
- Viola, M.R. et al., 2014. Impacts of Land-use Changes on the Hydrology of the Grande River Basin Headwaters, Southeastern Brazil. *Water Resources Management* 28, 4537 – 4550.
- Wagner, P.D.; Bhallamudi, S.M.; Narasimhan, B.; Kantakumar, L.N.; Sudheer, K.P.; Kumar, S.; Schneider, K.; Fiener, P., 2015. Dynamic integration of land use changes in a hydrologic assessment of a rapidly developing Indian catchment. *Science of The Total Environment* 539, 153–164.
- Winchell, M.; Srinivasan, R.; Di Luzio, M.; Arnold, J., 2013. ARCSWAT INTERFACE FOR SWAT2012: USER'S GUID. Temple, USDA.