

SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA E DO RESERVATÓRIO DE ABASTECIMENTO DO RIBEIRÃO JOÃO LEITE, UTILIZANDO O MODELO SWAT

*HYDROSEDIMENTOLOGICAL SIMULATION OF THE JOÃO LEITE STREAM WATERSHED
AND SUPPLY RESERVOIR USING THE SWAT MODEL*

**Wellington Nunes de OLIVEIRA¹, Hugo José RIBEIRO¹, Nilson Clementino FERREIRA¹,
Rubens Vilar SIQUEIRA², Victor Tomaz de OLIVEIRA³**

¹Universidade Federal de Goiás. Avenida Universitária, Quadra 86, Lote Área 1488 - Setor Leste Universitário, Goiânia - GO, PPG em Ciências Ambientais. E-mails: wellington.wno@gmail.com; hgribeirogeo@gmail.com; nclferreira@gmail.com

²Instituto Unificado de Ensino Superior Objetivo. Avenida T-2, Número 1.993 - St. Bueno, Goiânia - GO.
E-mail: rubens.villar@gmail.com

³Instituto Federal Goiano - Campus Urutaí. Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km-2,5 - Zona Rural, Urutaí - GO.
E-mail: vto.professor@gmail.com

Introdução
Materiais, métodos e técnicas
 Caracterização da área de estudo
 Construção da base de dados
 Simulação de cenários
Resultados e discussões
 Distribuição espacial da estimativa de produção de sedimentos na bacia em diferentes cenários
 Estimativa de produção e aporte de sedimentos no reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite
Considerações finais
Referências

RESUMO - A análise do uso e cobertura do solo é uma das etapas fundamentais para realização do planejamento estratégico de conservação e manejo de uma bacia hidrográfica. Este trabalho tem por objetivo analisar a paisagem da Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite localizada no estado de Goiás a noroeste da cidade de Goiânia, utilizando ferramentas de geoprocessamento como Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto com intuito de fornecer subsídios para gerar um diagnóstico ambiental da mesma. Esse estudo possibilitou ainda a avaliação de diferentes cenários na estimativa de produção de sedimentos na bacia e no reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite utilizando o modelo hidrossedimentológico SWAT, o qual demonstrou que dentre os cenários propostos o cenário contendo a vegetação nativa como uso e cobertura do solo predominante apresentou um menor valor na estimativa da produção de sedimentos na bacia, enquanto o atual uso da bacia apresentou o maior valor.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Cenários. Produção de Sedimentos. SWAT.

ABSTRACT - The use and land cover analysis is one of the fundamental steps for performing the strategic planning of a watershed conservation. This study aims to analyze the landscape of Ribeirão João Leite Watershed located in the state of Goiás northwest of the Goiânia city, using geoprocessing tools as Geographic Information System (GIS) and Remote Sensing in order to provide input to generate an environmental diagnosis of the same. This study also permitted an evaluation of different scenarios in estimating sediment production in the reservoir supply and Ribeirão João Leite watershed using the hydrosedimentological SWAT model, which showed that among the proposed scenarios the backdrop of native vegetation as land use and cover the predominant soil showed a lower value in the estimation of sediment production in the watershed, while the current watershed use presented the highest value.

Keywords: Geoprocessing. Scenarios. Sediment Production. SWAT.

INTRODUÇÃO

Considerando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento, faz-se necessário compreender os processos que direta ou indiretamente estão relacionados ao seu comportamento hídrico, o que constitui uma importante etapa no gerenciamento ambiental. Um destes processos é o ciclo hidrossedimentológico, e envolve as fases de remoção, transporte e deposição de material particulado. De acordo com Santos et al. (2001), o transporte de sedimentos pelos rios é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, e que fornecem material

que, por sua vez, depende da energia do fluxo para ser transportado. A combinação dessas variáveis, fornecimento de material e energia do fluxo, resulta em um fenômeno com grande variação no tempo e no espaço.

Nesse contexto, a avaliação da distribuição da produção de sedimentos na Bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite (BHJL) pode servir de respaldo, tanto para fins de diagnóstico, quanto para o planejamento de ações voltadas para o manejo e o monitoramento, considerando o controle das formas de crescimento e de ocupação da porção da bacia hidrográfica com

interferência significativa no curso hídrico e, sobretudo, por se tratar de uma bacia com um de seus principais usos o abastecimento urbano se faz necessário um estudo detalhado desse fenômeno na mesma.

Para tanto, as modelagens matemáticas e computacionais têm sido amplamente desenvolvidas e aplicadas dentro de cenários locais e regionais. Especificamente para os casos em que se deseja realizar o estudo sobre produção de sedimentos. Os modelos matemáticos (ferramentas que integram uma série de informações locais como solo, clima, topografia, cobertura vegetal, dentre outros) têm sido largamente utilizado, tendo

como uma das principais vantagens a possibilidade de se investigar diversos cenários e suas consequências, servindo como uma importante ferramenta de planejamento (Silva et al., 2004).

Diante disso, este trabalho tem o objetivo de utilizar o modelo hidrossedimentológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) acoplado com SIG (Sistemas de Informações Geográficas) para estimar, mesmo que de forma preliminar, a produção de sedimentos ao longo da BHJL considerando diferentes cenários de uso e cobertura do solo, de maneira que a aplicação dessa ferramenta possa ser cogitada, sobretudo para fins de planejamento e gestão da bacia.

MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite ocupa 766,8 km² entre as latitudes 16° 13' e 16° 39' Sul e longitudes 48° 57' e 49° 11' Oeste, estando localizada a nordeste de Goiânia (Figura 1). O Ribeirão João Leite é formado pelos córregos Jurubatuba e Pedreira, e faz parte do complexo Hidrográfico da Bacia do Paraná e após percorrer cerca de 85 km deságua no Rio Meia Ponte. Seu curso principal e afluentes percorrem os municípios de Ouro Verde, Campo Limpo, Anápolis, Goianápolis, Teresópolis de Goiás, Nerópolis e Goiânia, os quais são responsáveis por parte do abastecimento de água da capital juntamente com as captações feitas no Rio Meia Ponte e Córrego Samambaia (Santos et al., 2010).

De acordo com a Saneago (2009) a barragem do Ribeirão João Leite está situada junto ao morro do Bálamo e Lindeira no Parque Estadual denominado Altamiro Moura Pacheco (PEAMP), distando 6,5 km a montante da capital do estado de Goiás. O volume total do reservatório é de 129 hm³, sendo o volume útil de 117 hm³ e o volume morto de 12 hm³. O reservatório apresenta conformação alongada com extensão de 15 km e largura média em torno de 800 m. Possui 3 captações para o abastecimento e uma para descarga. Até o ano de 2025, a barragem deverá atender aproximadamente 2.300.000 habitantes ou 98% da população estimada para a data.

A BHJL constitui uma Área de Proteção Ambiental (APA) estabelecida pelo Decreto Nº 5.704, de 27 de dezembro de 2002 e engloba uma unidade de conservação permanente do PEAMP de 4.123 ha, mas dividido em duas áreas por um trecho da BR-153/GO-060 (Figura 1).

Construção da base de dados

Para construção da base de dados necessária para a realização da modelagem da bacia, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação – MDE, o qual segundo Ferrigo (2011) representa o relevo de forma real, e assegura a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo assim, a consistência hidrológica do processo de simulação. Nesse caso foram utilizados dados de relevo com resolução espacial de 30 metros, produzidos no âmbito do Projeto TOPODATA, que realizou uma série de processamento de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Esse MDE serviu como base para delimitação da bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite assim como dado de entrada essencial para o modelo ArcSWAT.

Para o mapeamento do uso e cobertura do solo na bacia foram adquiridas por meio do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) imagens do satélite Landsat-5 sensor TM (*Thematic Mapper*) com 30 metros de resolução espacial (órbita/ponto 222/71). As imagens adquiridas foram datadas do ano de 2011 as quais foram registradas (georreferenciadas) utilizando a base de dados do mosaico *Geocover* que disponibiliza imagens obtidas no ano 2000 pelo sensor ETM+, que está a bordo do satélite Landsat-7.

Foi adquirida também uma imagem do ano de 2009 obtida pelo sensor PRISM, a bordo do satélite japonês ALOS, com 2,5 metros de resolução espacial (a qual foi utilizada como base para vetorização da drenagem da bacia). Esta imagem foi disponibilizada pela então Secretaria Estadual de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás - SEMARH-GO (atual SECIMA).

A elaboração do mapa de uso e cobertura do

solo possibilitou mapear cinco diferentes tipos de uso e cobertura do solo presentes na área em estudo: agricultura, pastagem, perímetro urbano e

remanescentes de vegetação nativa. Esse mapa serviu como dado de entrada do modelo SWAT (Figura 2).

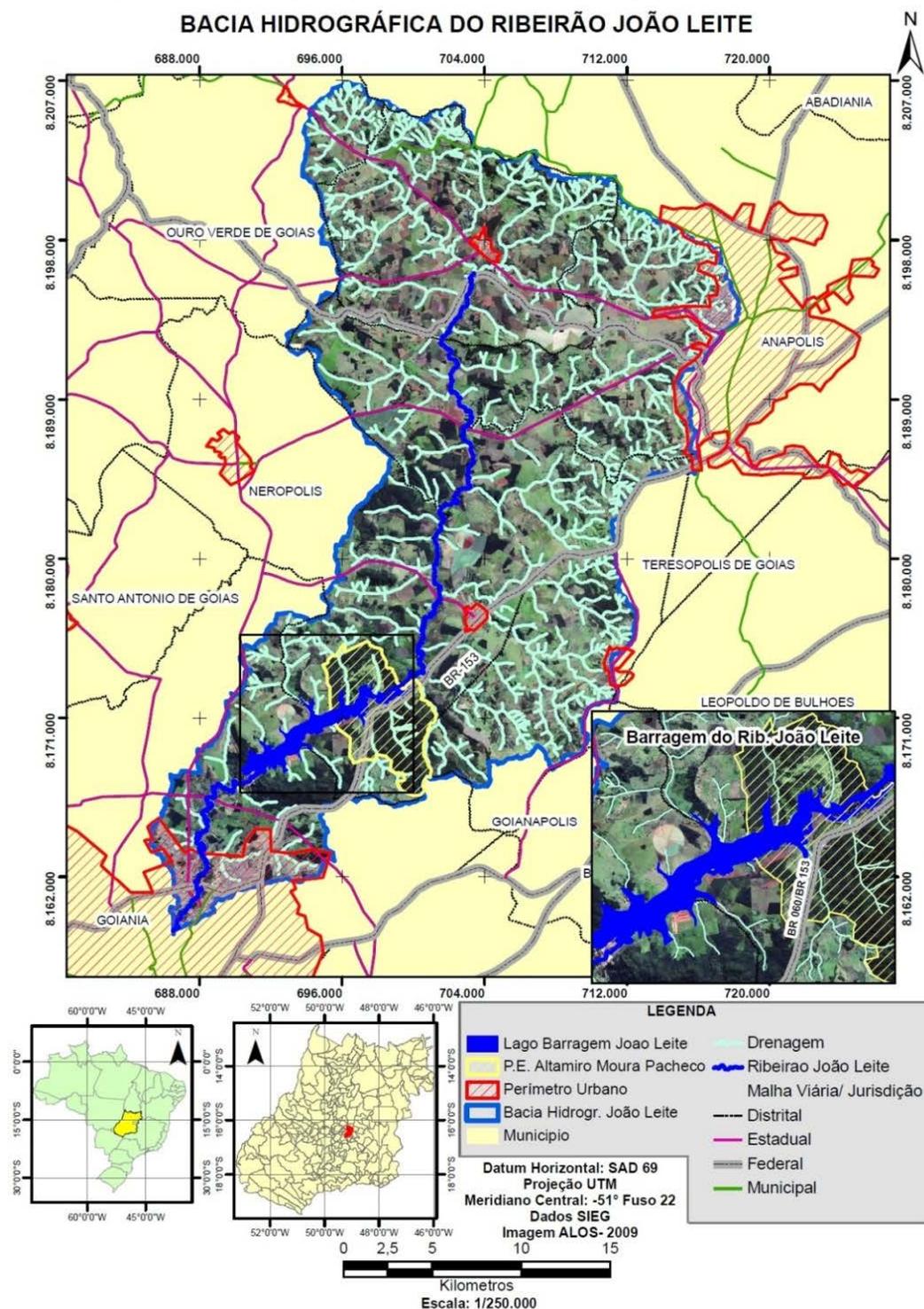


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite.

Foram realizadas algumas adaptações no mapa de uso e cobertura do solo de modo a utilizar diretamente o banco de dados já existente na interface do ArcSWAT.

Nesse caso fez-se uma analogia direta desses usos e da cobertura vegetal existente nesse mesmo banco de dados: Perímetro Urbano (URML), Pastagem (PAST), Agricultura (AGRL) e Rema-

nescentes (FRSE). Assim como proposto por Baldissera (2005) a classe “Hidrologia” representada nesse caso em sua maioria pela área do reservatório de água do Ribeirão João Leite e pequenas áreas isoladas foram substituídas pela classe “Remanescentes”, a qual se encontrava bastante presente antes da formação do reservatório. Como o reservatório não foi considerado na

modelagem por falta de dados suficientes para a sua caracterização, assim como as limitações do modelo SWAT para esse tipo de procedimento optou-se pela reclassificação dessas áreas. A reclassificação do uso e cobertura do solo da bacia foi realizada diretamente pelo ArcGIS.

Para a entrada de dados de solos no modelo foi

utilizado um mapa digital de solos, elaborado na escala 1:100.000, produzido a partir da digitalização dos mapas de solos do projeto RADAM-BRASIL, no âmbito projeto de determinação de áreas prioritárias para unidades de preservação. O mapa de solos foi obtido a partir do site do Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás - SIEG.

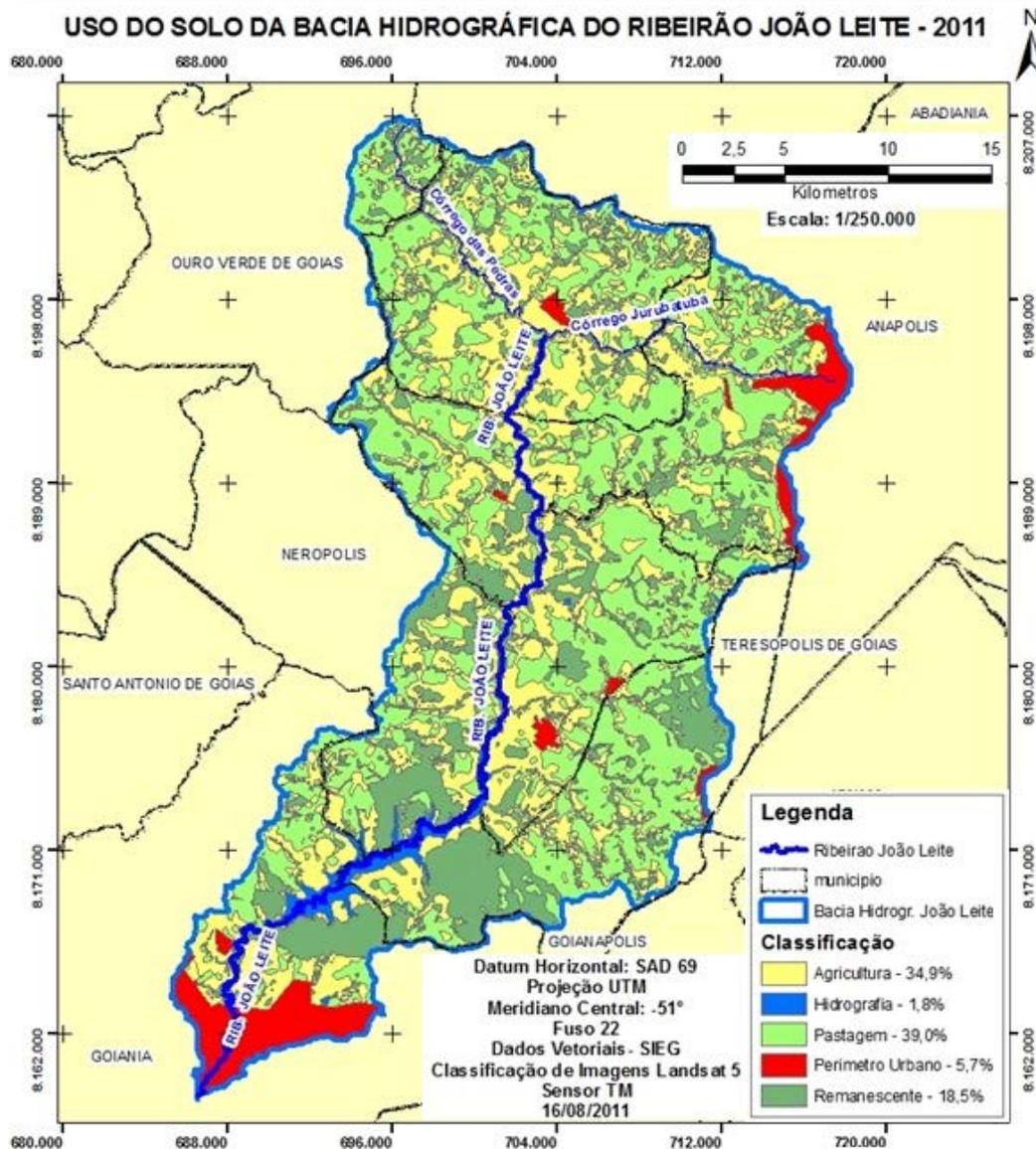


Figura 2 - Uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite.

Para relacionar as classes de solo existentes na bacia com o banco de dados de solos do SWAT, foi necessário adicionar as características físicas dos solos exigidas pelo modelo, dentre elas o grupos de saturação ou hidrológico (HYDGRP), profundidade máxima de solo que a raiz alcança (SOL_ZMX), porosidade (ANION_EXCL), profundidade da camada (SOL_Z), densidade aparente (SOL_BD), capacidade de água disponível no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada (SOL_K), erodibilidade (USLE_K), albedo, (relativo à parcela da radiação solar que é refletida ao atingir a superfície do solo, considerando sua

cobertura vegetal) (SOL_ALB), conteúdo de carbono orgânico (SOL_CBN), e, porcentagem de argila, silte, areia e seixo. Tais características e atributos exigidos pelo modelo SWAT não se encontraram disponíveis para os solos existentes na área objeto, exigindo desta maneira, uma adaptação com a utilização de dados de classes pedológicas similares obtidos do Levantamento Pedológico Semi-detalhado do Projeto Jequitai/MG – CODEVASF/ces (1977), área também de Cerrado, adaptados por Baldissera (2005) e do levantamento de solos do estado de São Paulo, por Bertoni & Lombardi Neto (1990).

Cada tipo de solo encontrado na BHJL foi reclassificado, de acordo com o grupo hidrológico que mais se identificava com as classes de solos predominantes encontradas na bacia (Figura 3), e que foram inseridas diretamente no banco de dados do modelo:

Argissolo (PVA), Latossolo (Lve), Gleissolo (Gj) e Cambissolo (Cx). Com isso a parametrização dos dados de solos da BHJL foi realizada com base na literatura devido aos recursos financeiros exigidos para análises realizadas em campo.

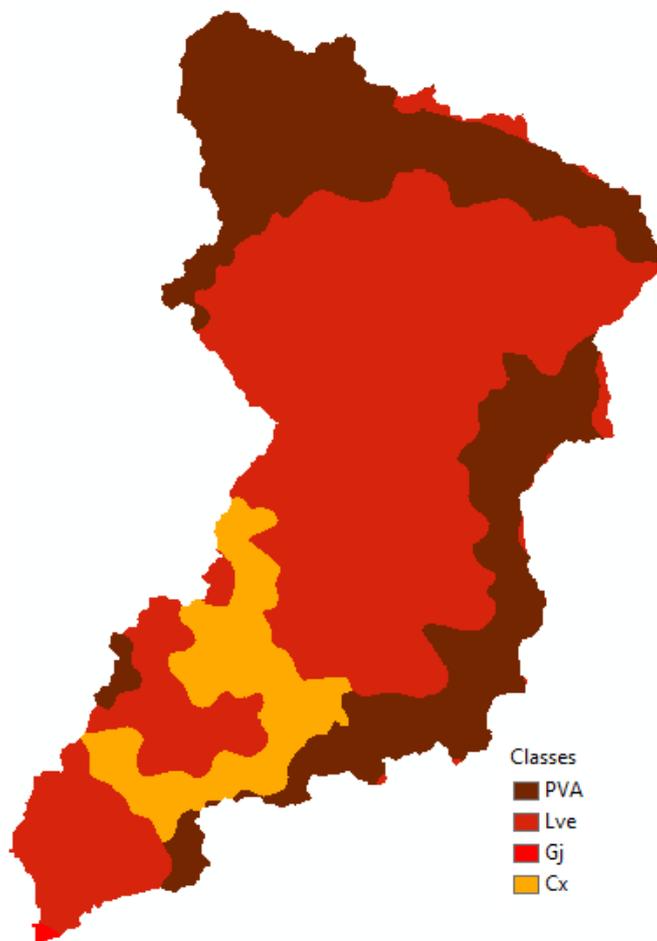


Figura 3 - Solos reclassificados.

Para a alimentação do modelo em relação aos dados climáticos, os mesmos se dividem em dois tipos: dados diários e dados mensais. Os dados diários utilizados foram médias diárias ou somas diárias relacionadas aos seguintes fatores: precipitação, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa do ar. Os dados mensais utilizados são médias (do respectivo mês), referentes a todos os anos simulados.

As variáveis climáticas solicitadas pelo modelo são: localização geográfica da estação, altitude, número de anos dos dados acumulados, média mensal de temperatura máxima diária (TMPMX), média mensal de temperatura mínima diária (TMPMN), desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX), desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN), média mensal da precipitação total (PCPMM), desvio padrão para a precipitação diária do mês (PCPSTD), probabilidade de dias

úmidos seguidos de dias secos para o determinado mês (PR_W1), probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o determinado mês (PR_W2), média mensal de dias de precipitação (PCPD), valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês (RAINHHMX), média de radiação solar diária para um determinado mês (SOLARAV), média diária do ponto de orvalho para determinado mês (DEWPT), média diária da velocidade do vento para determinado mês (WNDV).

A estação meteorológica utilizada dista 1,7 quilômetros da BHJL, e foi utilizada para fornecimento dos dados requisitados pelo modelo. Os dados foram disponibilizados pela Estação Climática (83423) do município de Goiânia, com elevação de 741,48 metros operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A escolha dessa estação se deu primeiramente por sua distância da área de estudo e por disponibilizar uma série de

dados históricos diários, superiores a 10 anos.

Além da estação do INMET, dentro dos limites e nas proximidades da BHJL existem cinco estações pluviométricas (Agronomia-UFG, Anápolis, Goianápolis, Jaraguá e Ouro Verde), porém suas séries de dados estão fora do intervalo ou da quantidade mínima de dados exigidos pelo modelo.

No caso, para esse estudo foi adotada uma série

de 20 anos (Figura 4) e de acordo com os autores Verburg et al. (2002) e Pontes & Fernandes (2002), para a obtenção de resultados confiáveis, a escolha das estações devem seguir dois critérios. O primeiro é que as séries de dados pluviométricos das estações devem ser superiores a 10 anos, exigência também do modelo, e o segundo critério, que as estações se situem na mesma isozone.

Dados	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
PCPMM	8,1	8,7	8,8	4,1	1,0	0,4	0,0	0,4	1,7	5,1	7,7	9,0
PCPSTD	2,7	2,3	3,3	2,5	0,8	0,6	0,1	0,6	1,3	2,9	1,7	2,8
PCPD	19,1	19,3	18,1	10,9	3,1	1,7	0,4	1,5	6,6	14,0	16,7	21,2
RAINHHMX	17,8	19,6	20,1	15,0	6,4	3,7	0,4	3,4	7,0	15,0	16,6	20,9
PCPSKW	0,6	0,8	0,5	0,3	0,8	2,7	2,6	1,9	0,7	0,8	0,1	1,0
WNDVAV	1,0	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9
TMPMX	30,4	30,8	30,8	31,2	30,1	29,9	30,6	32,6	33,6	32,6	30,8	30,2
TMPSTDMX	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	1,0	0,8	0,9	1,6	1,5	0,8	0,8
TMPMN	20,1	19,9	19,9	19,3	16,9	15,1	14,3	16,3	19,0	20,0	20,0	20,1
TMPSTDMN	1,4	1,3	1,2	1,3	1,7	2,2	1,8	1,8	1,4	1,4	1,3	1,3
DEWPT	19,8	19,7	19,7	17,9	14,9	12,9	11,2	10,5	13,6	17,1	18,9	19,8
SOLARAV	14,5	14,8	14,2	13,5	11,2	9,8	9,8	11,2	13,0	14,6	14,2	13,7
PR_W1	0,4	0,6	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6
PR_W2	0,8	0,7	0,8	0,6	0,3	0,4	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,8

Figura 4 - Parâmetros climáticos calculados a partir dos dados da estação meteorológica de Goiânia-GO. PCPMM: Precipitação média (mm); PCPSTD: Desvio padrão da precipitação (mm); PCPD: Número de dias de precipitação (dias); RAINHHMX: Precipitação máxima de 0,5 horas (mm); PCPSKW: Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima; WNDVAV: Velocidade do vento ($m s^{-1}$); TMPMX: Temperatura máxima ($^{\circ}C$); TMPSTDMX: Desvio padrão da temperatura máxima ($^{\circ}C$); TMPMN: Temperatura mínima ($^{\circ}C$); TMPSTDMN: Desvio padrão da temperatura mínima ($^{\circ}C$); SOLARAV: Radiação solar ($MJ m^{-2} dia^{-1}$); DEWPT: Temperatura no ponto de orvalho ($^{\circ}C$); PR_W1: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos (%); e PR_W2: Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos (%).

Os valores calculados foram inseridos diretamente no banco de dados do programa, a partir da interface gráfica do ArcSWAT para a realização das simulações.

Simulação de Cenários

A etapa seguinte foi a simulação de cenários, dentre as vantagens da utilização de modelos matemáticos, uma das mais importantes se refere a elaboração de cenários, ou seja, a possibilidade de alterar as configurações dos parâmetros de entrada do modelo no intuito de gerar novos conjuntos de condições virtuais, as quais

permitem, de antemão, a visualização das consequências geradas por determinado grupo de fatores hipotéticos. Para a simulação foi realizada para o período de 1992 a 2012, porém, foram utilizados somente os resultados gerados pela simulação do último ano. Os demais anos foram utilizados como um histórico de dados para um melhor funcionamento do modelo. Os cenários desenvolvidos no presente trabalho, em relação à produção de sedimentos, tiveram as seguintes configurações, conforme apresentado na figura 5.

	Paisagem
Cenário 1	Uso e cobertura do solo atual (URML/AGRL/FRSE/PAST)
Cenário 2	Uso e cobertura do solo obedecendo ao Código Florestal Brasileiro (Áreas de Preservação Permanente - APP's preservadas)
Cenário 3	Uso e cobertura do solo, contendo APP's mais restritivas (200 metros) e preservadas;
Cenário 4	Uso e cobertura do solo, contendo agricultura genérica (ocupação hipotética da bacia com Agricultura - AGRL)
Cenário 5	Uso e cobertura do solo, contendo pastagem (ocupação hipotética da bacia com Pastagem - PAST)
Cenário 6	Uso original do solo (ocupação hipotética da bacia com Vegetação Nativa - FRSE)

Figura 5 - Cenários utilizados na modelagem.

Segundo Carvalho Neto (2011), em trabalhos preliminares, realizou-se um teste no qual o modelo SWAT foi submetido a um mesmo ano de eventos de precipitação, repetidos sete vezes. Assim foi verificado que o modelo se comporta de forma bastante discrepante no primeiro ano de simulação, para geração do escoamento superficial e produção de sedimentos, o segundo ano apresenta resultados intermediários enquanto que os demais anos possuem seus resultados oscilando em um

intervalo bem definido. A razão para tais resultados permanece ainda não totalmente conhecida, podendo ser consequência do processo de crescimento dos vegetais e/ou variação da umidade na zona radicular. Desta forma, ficou evidenciada a necessidade do uso de um período de aquecimento, conforme a repetição citada. Portanto para esse trabalho foram utilizados os três primeiros anos (1989, 1990 e 1991) para o aquecimento do modelo (Figura 6).

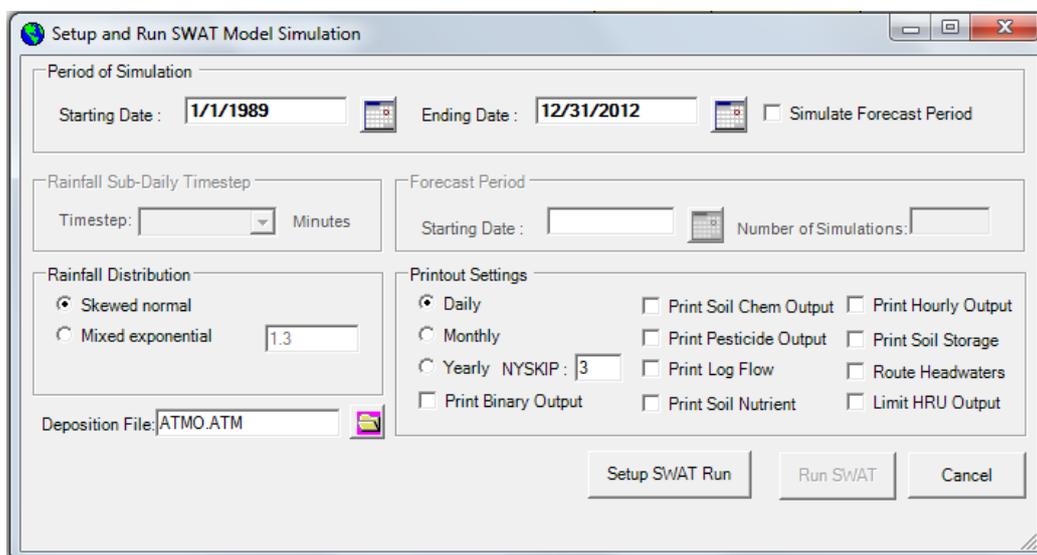


Figura 6 - Janela de simulação no ArcSWAT com definição do período de aquecimento do modelo.

Após a simulação foi realizada a análise de sensibilidade, a qual é um instrumento para previsão dos parâmetros que possuem maior impacto sobre as simulações hidrossedimentológicas, elaborados diretamente pelos modelos ArcSWAT (NEITSCH *et al.*, 2005, p.426). Para tal, o modelo utiliza a combinação do *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor – At-a-Time* (OAT). O LH utiliza o Método de Monte Carlo permitindo uma análise mais robusta na sensibilidade, pois requer um grande número de variáveis associadas (Neitsch *et al.*, 2005).

Com o resultado da análise de sensibilidade é possível determinar quais parâmetros são mais influentes no modelo, permitindo dessa forma descobrir quais deles são mais propícios à calibração para a melhora da resposta do modelo.

A calibração é uma ferramenta que permite ao usuário editar o desempenho global das variáveis de entrada do modelo (Sammons & Neitsch, 2000). Segundo Arnold *et al.* (2000) o primeiro passo de uma calibração tradicional é dividir os valores em duas séries temporais, sendo uma usada para calibração e outra para validação. Um passo importante na calibração e validação é a definição das variáveis que serão utilizadas e a série histórica

disponível. No caso, para esse estudo foi adquirida uma série de dados observados de vazão referentes ao intervalo de 1992 a 2007 (sendo 1992 a 1999 para calibração e de 2000 a 2007 para validação do modelo) disponibilizada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, cujos dados são oriundos da estação Captação João Leite - código 60642000.

Para calibrar automaticamente o modelo, foi elaborada uma tabela no formato texto (*.txt) contendo o ano, dia e vazão, que foi adicionado ao SWAT por meio da interface ArcSWAT. Para a calibração automática o modelo utiliza o método *X²- Suffled Complex Evolution Method Algorithms* – SCE-UA. No SCE-UA as variáveis são otimizadas usando o critério de otimização global a partir de dados de entrada que compõem a calibração do modelo. O SCE combina a sistemática evolução dos dados de saída em direção a melhoria global compatível com os dados medidos.

Para avaliar a eficiência do ArcSWAT utiliza-se o Coeficiente de Nash-Sutcliffe – COE, podendo variar desde menos infinito até 1, sendo 1 o indicativo de simulação perfeita do evento simulado. O COE é calculado por:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Obs} + Q_i^{Sim})^2}$$

Equação 1

onde, Q_i^{Obs} é a vazão observada; Q_i^{Sim} é a vazão simulada; Q_i é a média da vazão observada; e n é o número de eventos.

Além do Coeficiente de Nash-Sutcliffe outra forma de avaliação de eficiência do modelo é a análise estatística baseada no cálculo do desvio do

evento analisado, o qual é a medida da habilidade do modelo para simular valores observados. Quanto menor o valor de D_V , melhor o ajuste, com 0,0 representando uma simulação perfeita do evento observado.

$$D_V[\%] = \frac{E - E^*}{E} * 100$$

Equação 2

onde, E é o evento observado no período analisado e E^* é evento simulado no período.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pela aplicação do modelo SWAT, demonstrados a seguir, são referentes à produção de sedimentos na BHJL e nas sub-unidades de estudo. Também são apresentadas simulações de cenários propostos para exemplificar o modelo e verificar a produção de sedimentos, comparando os resultados obtidos com o cenário atual.

A subdivisão adotada para a BHJL foi a de 23 sub-bacias (Figura 7). Para adoção desse número foram desconsideradas sub-bacias cujas áreas eram inferiores a 15 km², nesse caso as mesmas

foram incorporadas nas sub-bacias vizinhas, com exceção da sub-bacia número 23 cuja delimitação juntamente com as sub-bacias 21 e 22 não foram consideradas na modelagem por estarem a jusante do reservatório. A determinação desse valor mínimo atribuído às áreas se deu com base no manual do SWAT, onde existe a recomendação de tentar manter um valor de áreas aproximadas entre as sub-bacias, por outro lado evitando a redução da quantidade das mesmas, pois o nível de discretização da bacia ajuda a compreender melhor o resultado da modelagem.

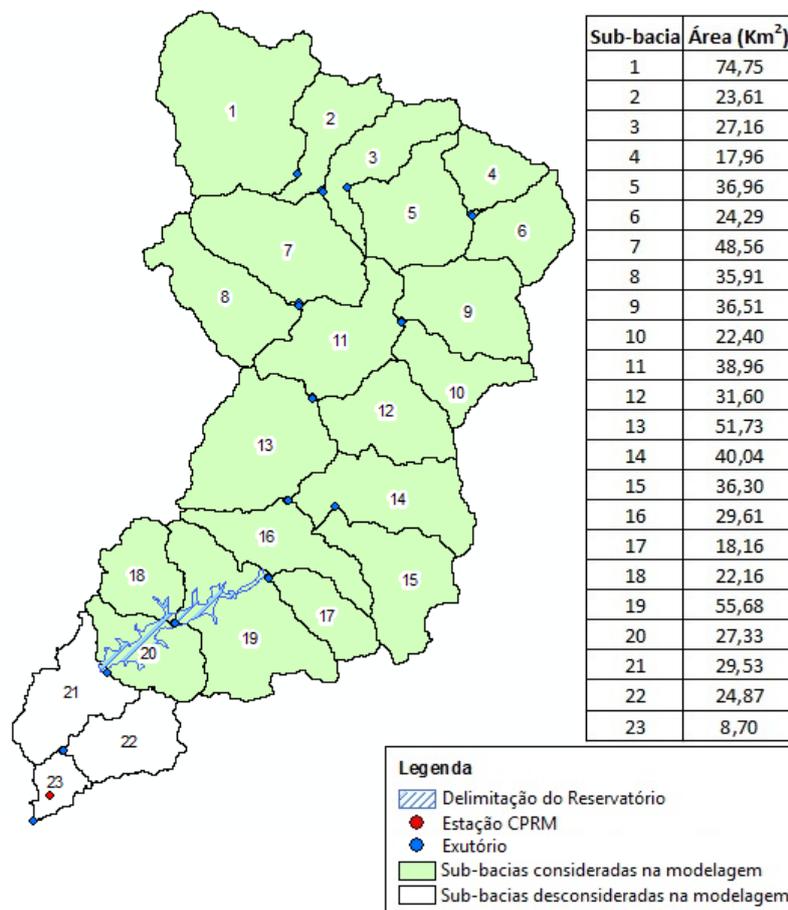


Figura 7. Delimitação das Sub-bacias da bacia do Ribeirão João Leite.

Após a delimitação das 23 sub-bacias e inserção de 20 anos de dados climáticos para a alimentação do modelo, foram simulados o escoamento

superficial e aporte de sedimentos na bacia. Após a primeira simulação das vazões mensais (1992-2012), sem calibração prévia, chegou-se a

resultados de saída que não condiziam com a realidade. O modelo superestimou fortemente as vazões máximas, o que pode ser notado por meio

da comparação com as vazões observadas pela estação fluviométrica da CPRM (1992-2007) conforme é apresentado na figura 8.

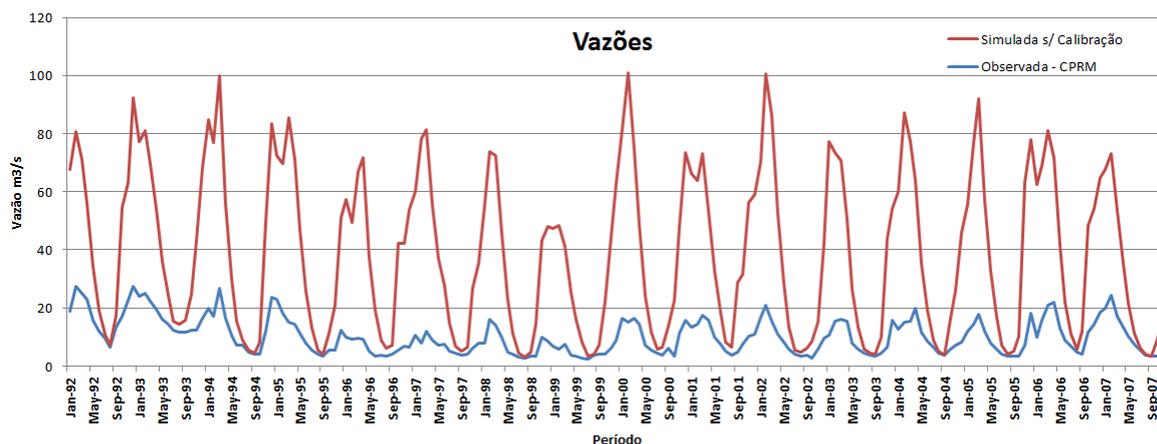


Figura 8. Comparativo entre vazões simuladas (sem calibração) e observadas entre 1992 e 2007.

Como o resultado da primeira simulação não foi satisfatório, com a finalidade de calibrar o modelo realizou-se inicialmente a análise de sensibilidade para 27 parâmetros do modelo SWAT, totalizando 270 simulações. Os efeitos finais da variação dos parâmetros foram hierarquizados por ordem de influência e estão apresentados na figura 9. A descrição dos parâmetros foi baseada no manual do SWAT (Neitsch et al., 2005).

Cada parâmetro tem um valor no *ranking* definido após a análise. Um menor valor no *ranking* indica uma maior influência do parâmetro sobre o resultado final da simulação

para determinada variável, neste caso, a vazão. Variáveis com *ranking* cujo valor é de 27 não exercem nenhuma influência sobre o valor final do parâmetro analisado.

Ressaltando que por não existir uma estação de monitoramento hidrossedimentológico na BHJL, o ordenamento das variáveis referentes a produção de sedimentos e a calibração das mesmas não foi realizada devido a inexistência de dados observados.

Com base no ordenamento dos parâmetros fornecidos pela análise de sensibilidade, e com o manual do SWAT foram realizados ajustes nos parâmetros apresentados na figura 10.

Ranking	Parâmetro	Descrição
1	Esco	Fator de compensação da evaporação do solo
2	Sol_Awc	Capacidade de água disponível (mm H ₂ O / mm solo)
3	Cn2	Valor do curva número inicial do Soil Conesevation Service
4	Sol_Z	Profundidade do solo (mm)
5	Blai	Índice máximo de área foliar
6	Canmx	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)
7	Gw_Revap	Coefficiente de re-evaporação da água subterrânea
8	Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/ano)
9	Epc0	Fator de compensação da retirada das plantas
10	Alpha_Bf	Fator alfa do fluxo de base (dias)
11	Ch_N2	Coefficiente de Manning do canal principal
12	Gwqmn	Concentração de nitrato na água subterrânea contribuinte (mgN/L)
13	Slope	Declividade média mais acentuada (mm/m)
14	Sol_Alb	Albedo do solo
15	Sol_K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
16	Gw_Delay	Retardo do escoamento subterrâneo
17	Surlag	Tempo de retardo do escoamento superficial
18	Revapmn	Profundidade de água limite no aquífero raso (mm)
19	Biomix	Eficiência da mistura biológica
27	Slsbbsn	Comprimento da declividade média (m)
27	Timp	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve

Figura 9 - Descrição dos parâmetros e *ranking* de cada uma das variáveis após a realização da Análise de Sensibilidade do modelo SWAT.

Parâmetros	Esco	SOL_AWC				Cn2	Alpha_Bf
		Cx	Gj	Lve	PVA		
Originais	1	0,18	0,8	0,1	0,1	10	0
Ajustados	0,0896	0,04	0,04	0,04	0,04	17,767	0,0322

Figura 10 - Ajuste dos parâmetros posterior a calibração.

Além de ser o parâmetro que mais influenciou na modelagem de acordo com o resultado da análise de sensibilidade, a variável ESCO é recomendada pelo manual do SWAT proposto por Neitsch et al. (2005) para ser alterada no processo de calibração. Segundo o manual, essa variável possui índice mínimo igual a “zero” e máximo de “um”, sendo que, quanto mais próximo de “zero”, há um aumento na evapotranspiração no perfil do solo, e no caso de diminuição da ESCO, ocorre à relação inversa.

A alteração da variável SOL_AWC para os horizontes superficiais de todos os solos da área de estudo possibilitou um aumento significativo no aumento da percolação da água no perfil do solo, aumentando o fluxo subterrâneo da bacia.

A alteração do CN2 também contribuiu para o aumento da percolação, o aumento dessa contri-

buição da água subterrânea e a minimização do escoamento superficial possibilita para a bacia um acréscimo na disponibilidade hídrica durante o período seco, minimizando a escassez hídrica.

E o último parâmetro ajustado, o Alpha_Bf foi alterado seguindo as especificações do manual do SWAT, o qual apresenta que para calibrar o modelo de forma a abaixar o valor da vazão líquida simulada, corrigindo dessa forma possíveis deslocamentos nas curvas de vazão observada e simulada é necessário na maioria dos casos aumentar o valor desse parâmetro ao máximo, porém nesse caso o valor adotado no ajuste já apresentou um resultado satisfatório.

Após o processo de calibração foi realizado um comparativo entre as vazões mensais (1992-1999) observadas e ajustadas conforme apresentado na figura 11.

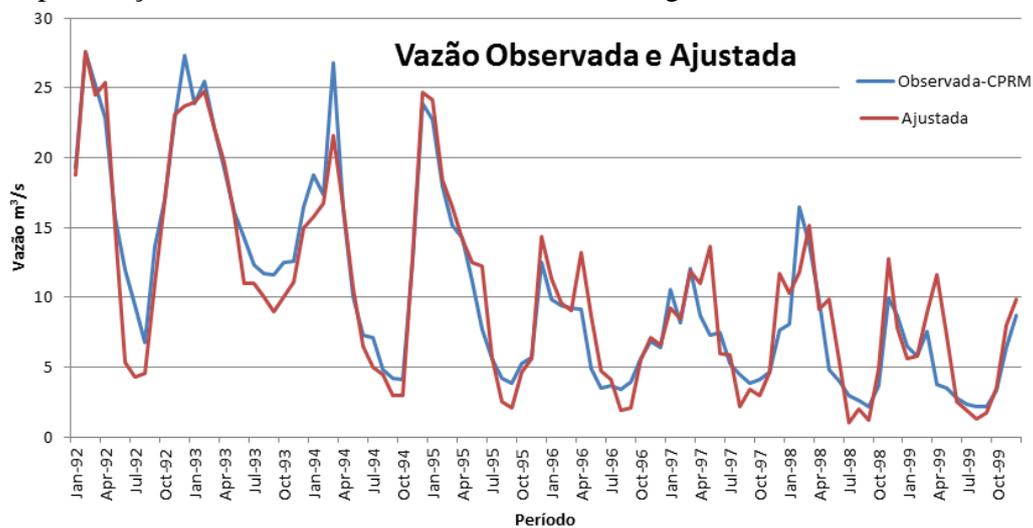


Figura 11 - Dados plotados de vazão observada e vazão ajustada após a calibração.

Visualmente nota-se que o resultado da calibração apresentou um razoável ajuste referentes as vazões máximas e mínimas. Porém para determinar o desempenho do modelo, se faz necessário a utilização de critérios estatísticos para essa avaliação, nesse caso o Coeficiente de Nash-Sutcliffe ou COE, o Dv (%) que é o desvio observado entre o evento observado e o simulado e também a correlação entre os mesmos.

Após ajuste dos dados o COE atingiu o valor de 0,723 que indica um bom ajuste dos dados, pois de acordo com Marchioro (2008) um COE acima de 0,7 demonstra que a calibração foi satisfatória. O resultado da estimativa do Dv (%)

foi de 3,26 e a correlação entre os eventos apresentou o valor de 0,52.

O COE também foi aplicado no intervalo de dados de vazão destinados a validação do modelo (2000 a 2007) onde o mesmo atingiu o valor de 0,706 conforme apresentado na figura 12.

Distribuição espacial da estimativa de produção de sedimentos na bacia em diferentes cenários

A estimativa de produção de sedimentos na BHJL apresentou diferentes resultados de acordo com a mudança do uso e cobertura do solo adotado para cada cenário proposto nesse estudo, os resultados são apresentados nas figuras 13 e 14.

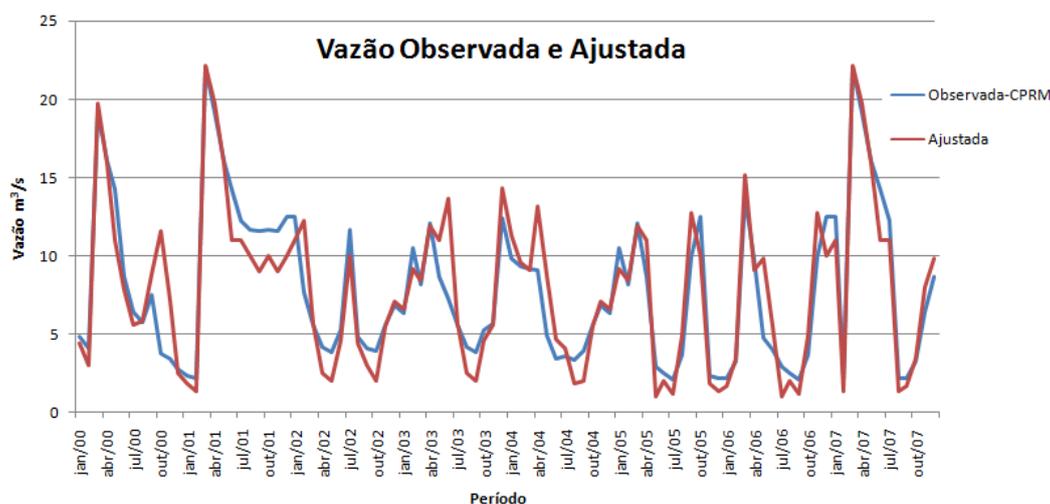


Figura 12 - Dados plotados de vazão observada e vazão ajustada após a calibração (validação).

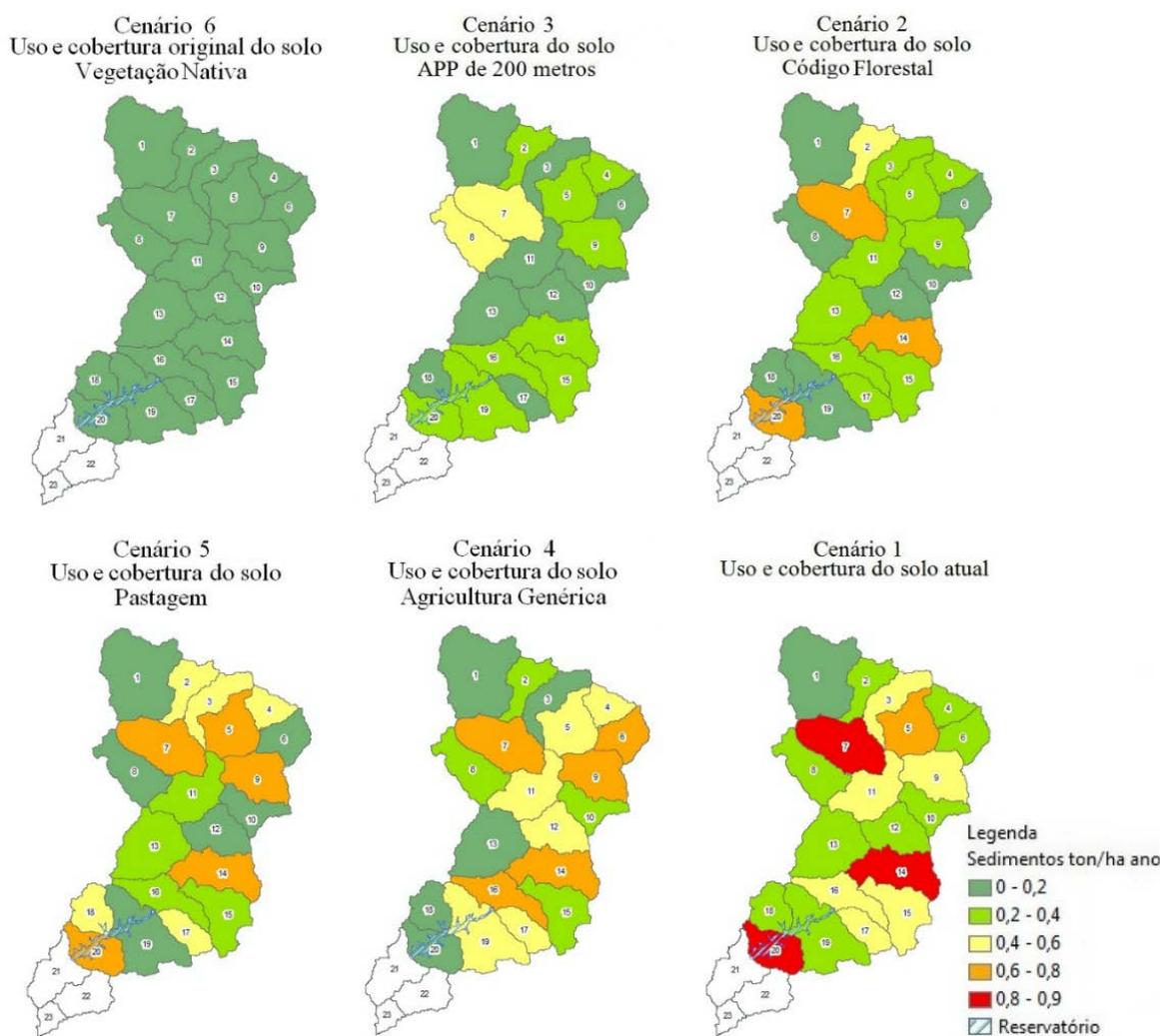


Figura 13 - Distribuição espacial geral da estimativa de produção de sedimentos na bacia para os cenários propostos.

No Cenário 1 - Paisagem com uso e cobertura do solo atual, considerou-se as condições atuais do uso e cobertura do solo (Perímetro urbano, Agricultura, Remanescentes de vegetação nativa e Pastagem) demonstrou que as sub-bacias 7 e 14 respectivamente localizadas nas regiões norte e central assim como a sub-bacia 20 localizada na região sul da BHJL apresentaram maiores índices

de produção de sedimentos.

No Cenário 2 - Paisagem com uso e cobertura do solo obedecendo ao Código Florestal Brasileiro e Áreas de Preservação Permanente - APP's preservadas, adotou-se a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012 o que demonstrou que assim como no cenário anterior (uso e cobertura atual do solo) as sub-bacias 7 e 14 respectivamente

Produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite - 2012						
Sub-bacia	Cenário 1 Uso do Solo Atual (ton/ha)	Cenário 2 Código Florestal (ton/ha)	Cenário 3 APP 200m (ton/ha)	Cenário 4 Agricultura (ton/ha)	Cenário 5 Pastagem (ton/ha)	Cenário 6 Vegetação Nativa (ton/ha)
1	0,19	0,14	0,10	0,25	0,22	0,07
2	0,32	0,45	0,31	0,37	0,59	0,13
3	0,51	0,33	0,23	0,23	0,41	0,11
4	0,37	0,33	0,28	0,46	0,47	0,13
5	0,63	0,39	0,30	0,55	0,75	0,13
6	0,27	0,17	0,21	0,65	0,24	0,10
7	0,88	0,72	0,44	0,66	0,70	0,16
8	0,33	0,20	0,54	0,40	0,20	0,07
9	0,54	0,33	0,26	0,69	0,76	0,13
10	0,34	0,22	0,15	0,31	0,25	0,10
11	0,45	0,30	0,25	0,55	0,35	0,02
12	0,32	0,22	0,13	0,60	0,12	0,08
13	0,33	0,28	0,15	0,14	0,39	0,09
14	0,88	0,61	0,34	0,73	0,73	0,15
15	0,42	0,33	0,26	0,29	0,28	0,13
16	0,48	0,36	0,29	0,61	0,33	0,14
17	0,46	0,33	0,18	0,53	0,58	0,11
18	0,37	0,25	0,17	0,13	0,42	0,09
19	0,31	0,22	0,39	0,55	0,12	0,09
20	0,84	0,61	0,33	0,23	0,76	0,13
média	0,46	0,34	0,27	0,45	0,43	0,11
mínimo	0,19	0,14	0,10	0,13	0,12	0,02
máximo	0,88	0,72	0,54	0,73	0,76	0,16

Figura 14 - Estimativa da produção de sedimentos para todos os cenários.

localizadas nas regiões norte e central, assim como a sub-bacia 20 localizada na região sul da BHJL apresentaram um maior valor da produção de sedimentos.

No Cenário 3 - Paisagem com uso e cobertura do solo contendo APP's mais restritivas (200 metros) e preservadas, foi realizada uma análise mais restritiva quanto a delimitação e preservação das APP's, para isso foi considerado o valor de 200 metros para essa delimitação a qual foi adotado com base na faixa de proteção no entorno do reservatório de abastecimento da BHJL. Considerando esse cenário as sub-bacias 7 e 8 ambas localizadas nas regiões central/norte da bacia apresentaram um maior valor da produção de sedimentos.

No Cenário 4 - Paisagem com Uso e cobertura do solo contendo Agricultura Genérica, adotou como uso e cobertura do solo o uso predominante da agricultura genérica (mantendo os perímetros urbanos) na bacia. As sub-bacias 14 e 16 localizadas na região central, assim como as sub-bacias 6 e 9 localizadas na região nordeste e a sub-bacia 7 na região noroeste da BHJL apresentaram um maior valor da produção de sedimentos. No Cenário 5- Paisagem com uso e cobertura do solo contendo Pastagem adotou

como uso predominante a pastagem (mantendo os perímetros urbanos) na bacia. Nesse cenário, cinco sub-bacias (7, 5, 9, 14 e 20) em diferentes regiões da bacia apresentaram um valor elevado na produção de sedimentos.

No Cenário 6 - Paisagem com uso e cobertura original do solo - ocupação hipotética da bacia com Vegetação Nativa o qual adotou como uso predominante a vegetação nativa na área total da bacia. Nesse cenário as sub-bacias 7 e 14 respectivamente localizadas nas regiões noroeste e sudeste da BHJL apresentaram os maiores valores.

Estimativa de produção e aporte de sedimentos no reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite

As fontes de poluição difusa também estão associadas ao processo de produção de sedimentos, pois os processos erosivos não incluem apenas o transporte de partículas de sedimentos, mas também transportam nutrientes e poluentes.

Associada às questões relacionadas à qualidade e disponibilidade de água, a degradação dos sistemas hídricos pode reduzir o volume e consequentemente o tempo de vida útil de reservatórios de abastecimento de água para

consumo, o que é um dos principais problemas causados pela deposição desses sedimentos.

Considerando o reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite como objeto de análise da estimativa de produção e aporte de sedimentos, foram consideradas as sub-bacias a montante do mesmo como áreas de contribuição direta para o mesmo, conforme apresentado na figura 15.

Conforme já citado posteriormente, a simulação da estimativa de produção de sedimentos foi realizada somente para o ano de 2012, os demais dados climáticos utilizados serviram como subsídios para a melhor resposta do modelo e também pelo fato do enchimento do reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite ter se iniciado no dia 18 de dezembro de 2009 o qual só atingiu sua cota máxima em 12 de janeiro de 2011.

De acordo como o quadro 7 o cenário

contendo como paisagem o uso e cobertura do solo atual da bacia considerando o somatório da produção média anual de sedimentos para as sub-bacias a montante do reservatório foi de 31.959 toneladas ao ano. Os cenários 2 e 3 que podem ser considerados como possivelmente empregáveis, considerando a aplicabilidade da legislação ambiental vigente e uma legislação mais restritiva, apresentam uma redução considerável de sedimentos recebidos diretamente no reservatório.

Nos demais cenários propostos existe uma oscilação dessa produção de sedimentos, e analisando o que talvez seria considerado como “cenário ideal”, o cenário contendo como paisagem o uso e cobertura do solo como vegetação nativa obteve o menor valor de produção de sedimentos dispostos no reservatório, cujo valor foi de 7.392 toneladas ao ano.

Sub-bacia	Cenário 1 Uso do Solo Atual (ton)	Cenário 2 Código Florestal (ton)	Cenário 3 APP 200m (ton)	Cenário 4 Agricultura (ton)	Cenário 5 Pastagem (ton)	Cenário 6 Vegetação Nativa (ton)
1	1.415	1.041	1.853	1.853	1.680	512
2	766	1.073	881	881	1.389	303
3	1.382	886	619	619	1.105	312
4	665	595	821	821	841	238
5	2.333	1.448	2.027	2.027	2.761	498
6	644	416	1.573	1.573	579	254
7	4.253	3.479	3.181	3.181	3.381	761
8	1.168	733	1.445	1.445	732	264
9	1.965	1.221	2.517	2.517	2.793	461
10	765	494	687	687	549	227
11	1.759	1.158	2.160	2.160	1.345	87
12	1.010	687	1.896	1.896	385	251
13	1.700	1.450	735	735	2.003	471
14	3.518	2.451	2.918	2.918	2.934	583
15	1.529	1.215	1.052	1.052	1.002	468
16	1.424	1.079	1.818	1.818	967	407
17	840	597	957	957	1.061	204
18	810	545	287	287	924	205
19	1.712	1.233	3.062	3.062	683	525
20	2.299	1.668	642	642	2.081	361
Σ	31.959	23.466	31.129	31.129	29.194	7.392

Figura 15 - Estimativa da produção de sedimentos das áreas de contribuição para o reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de compreender a produção de sedimentos, o presente trabalho simulou os processos hidrossedimentológicos na BHJL em diferentes cenários. O modelo SWAT junto a interface ArcSWAT geraram dados simulados que acompanharam os dados observados de

vazão. As simulações de vazão calibradas e validadas apresentaram valores aceitáveis com aplicação do Coeficiente de Nash-Sutcliffe – COE e nas correlações. O modelo SWAT também mostrou a sensibilidade da bacia às mudanças dos cenários de uso e cobertura do

solo, permitindo modelar a dinâmica hidrossedimentológica da mesma.

Quanto aos sedimentos, verifica-se que o presente trabalho careceu de informações referentes a sua produção, devido a inexistência de uma estação hidrossedimentológica na bacia. Isso impossibilitou a calibração e validação desses dados. Com isso a estimativa de produção de sedimentos não atingiu um nível de confiabilidade aceitável, porém a partir das simulações foi possível determinar as sub-bacias juntamente com as diferentes paisagens contidas nos cenários propostos, permitindo assim a espacialização e quantificação da produção de sedimentos na bacia e no reservatório de abastecimento do Ribeirão João Leite.

O estudo evidenciou a influência do uso e cobertura do solo no aumento da produção dos sedimentos na BHJL, que por sua grande importância para o abastecimento do município de Goiânia, necessita de um estreito controle quanto ao seu manejo, principalmente em relação

as atividades agropecuárias e a especulação imobiliária a montante do reservatório, o que pode impactar na qualidade de suas águas, e consequentemente no aumento dos custos de seu tratamento, e quanto ao carreamento de sedimentos resultantes dessas atividades, em sua vida útil.

Ainda sobre a área de estudo, tratando-se da modelagem pode-se considerar que um levantamento mais detalhado das características físicas da bacia seria de grande importância para melhor representação da sua produção de sedimentos permitindo assim uma simulação mais confiável em estudos futuros, a calibração por sub-bacia deveria ser considerada, pois poderia resultar em um melhor ajuste, e consequentemente nos resultados dos fatores simulados. Ainda assim a simulação possibilita, mesmo que de maneira grosseira, nortear a tomada de decisões por parte do poder público quanto a importância da preservação dessa bacia que é tão importante para população local.

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, v. 227, n. 1-4, p. 21-40, 2000.
- BALDISSERA, G.C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. Cuiabá, 144 p. 2005. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 355p. 1990.
- CARVALHO NETO, J.G. **Simulação hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Campina Grande, 218 p. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
- CODEVASF/CES – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco. **Levantamento semi-detalhado dos solos do Projeto Jequitai/MG**. 1977
- ESTADO DE GOIÁS, Decreto Nº 5.704, de 27 de dezembro de 2002, Área de Proteção Ambiental (APA) João Leite e dá outras providências. Conselho Estadual do Meio Ambiente, Goiânia, Goiás, 2002.
- FERRIGO, S. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de sedimentos na bacia do Córrego Capão Comprido no Distrito Federal**. Florianópolis-SC, 90p. 2011. Trabalho (Conclusão de Curso de Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Santa Catarina.
- MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense**. Rio de Janeiro, 197p. 2008. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005**. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 541p. 2005.
- PONTES, S.H.N. & FERNANDES, I. V. **Atualização do método das isozonas para a Região Amazônica**. São José dos Campos, 2002 In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA-ITA, 8 p. 2002.
- SAMMONS, N. & NEITSCH, S.L. **Util interface for SWAT2000 – User guide**. SERVICE, G.U.A.R.: 14 p. 2000.
- SANEAGO – Saneamento de Goiás S.A. **Projeto básico ambiental da barragem e do reservatório de regularização e acumulação do ribeirão João Leite em Goiânia Goiás – Brasil**. Relatório Técnico. Goiânia, Goiás, 2009.
- SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P.; OLIVEIRA, L.F. C. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, UAEA/UFCA. v.14, n.8, p.826-834, 2010
- SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. LACTEC, Curitiba-PR, 372 p. 2001.
- SILVA, A.M.; CAMARGO, P.B.; SCHULZ, H.E. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos-SP. 140, p. 2004.
- VERBURG, P.H.; SOEPBOER, W.; LIMPIADA, R.; ESPALDON, M.V.O.; SHARIFA, M.; VELDKAMP, A. Land use change modelling at the regional scale: the CLUES-S model. *Environmental Management*, v. 30, n. 3, p. 391-405, 2002.

Submetido em 3 de maio de 2019

Aceito para publicação em: 12 de agosto de 2021