

ESTIMATIVA DO BALANÇO SEDIMENTAR DA BACIA DO RIO TIJUCAS (SC-BRASIL) A PARTIR DA APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT

ESTIMATE OF SEDIMENT BUDGET OF THE TIJUCAS RIVER BASIN APPLYING SWAT HYDROLOGIC MODEL

Jean Berná Paim
jimmpaim@hotmail.com

João Thadeu de Menezes
thadeu@univali.br

Universidade do Vale do Itajaí
Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMar)
Laboratório de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto

RESUMO

Adotar uma bacia como uma unidade hidrológica para entender os processos físicos relacionados à produção de água e de sedimentos é importante, pois suas características (área, forma e relevo) podem determinar seu uso de maneira sustentável. O objetivo é testar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) na bacia hidrográfica do rio Tijucas para quantificar a produção de água e sedimentos. Concomitantemente a isso foram aplicadas técnicas de geoprocessamento juntamente com a criação de um banco de informações geográficas para auxiliar na descrição da região. Este banco inclui dados diários de precipitação e temperatura para a bacia hidrográfica, mapas de solo, uso e ocupação da terra, além do modelo digital de elevação (MDE) que combinados formam as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's). Séries temporais de vazão e sedimentos observados são importantes para calibrar e validar os parâmetros de saída do modelo. Após a calibração, a estação 102 apresentou um Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe - COE de 0.6, indicando um bom ajuste do modelo em representar os dados observados. Também foi elaborado um mapa de produção de sedimentos da BHRT, onde a média para os 10 anos de modelagem variou entre 0.5 ton/ha, chegando a 9.0 ton/ha em algumas microbacias.

Palavras-chave: SWAT, Bacia Hidrográfica, Rio Tijucas, Modelos Hidrológicos.

ABSTRACT

Adopt a basin as a hydrological unit to understand the physical processes related to the water and sediment production is important because its characteristics (area, shape and topography) can determine its use in a sustainable manner. This study is aim in the test of the applicability of hydrologic model SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) in the Tijucas River Basin to quantify the water and sediment production along it sub-basins. Together, geoprocessing techniques were applied with the creation of a database of geographical information to describe the region. On this database is included the daily precipitation an temperature data of the gauges distributed on the watershed, soil data, a land use map and the digital elevation model (DEM) to create the Hydrologic Response Units (HRU's). A time series with flow values and sediment concentration measured are very important to calibrate and validate the model output parameters. After the calibration of the initial results, the Flow Gauge number 102 presented a Nash and Sutcliffe Coefficient - COE = 0.6 indicating a good adjust of the model. The results were used to create a sediment production map for Tijucas River Basin, when the 10 years average ranged between 0.5 ton/ha and 9.0 ton/ha in some sub-basins.

Keywords: SWAT, HRU's, Tijucas River Basin, Hydrologic Model.

1. INTRODUÇÃO

É importante entender os processos que se relacionam direta ou indiretamente no comportamento de uma bacia hidrográfica, sendo que esta é uma etapa fundamental para agir de maneira eficiente no gerenciamento ambiental dos recursos disponibilizados por ela. A acelerada taxa de erosão do solo é amplamente reconhecida como um problema global.

A avaliação das perdas de solo é de fundamental importância na adoção de práticas que visam minimizar a sua degradação do solo, uma vez que o uso e ocupação das terras, juntamente com as características topográficas e climáticas irão determinar o balanço sedimentar da bacia hidrográfica (Martins *et al.*, 2003). Sabe-se que o transporte e deslocamento de grandes massas de sedimento ao longo da bacia podem alterar o ciclo hidrológico, a contribuição de sedimentos para o litoral, além de afetar o seu uso, conservação e gestão.

A realização de estudos direcionados a bacias hidrográficas tem a necessidade de compreender o funcionamento do balanço hídrico, dos processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água, sedimentos e nutrientes (Whitedead e Robinson, 1993). De acordo com Zakia (1998), a área de uma bacia influencia na quantidade de água que esta é capaz de produzir (deflúvio); o relevo e a forma regem a taxa e o regime desta produção de água, sendo fundamental nos processos de sedimentação e; o padrão de drenagem afeta a disponibilidade de sedimentos e a taxa de formação do deflúvio. Por estes motivos, grande parte das características físicas da bacia é controlada ou influenciada pela sua estrutura geológica.

Tucci (2001) descreve que os modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas cientificamente para melhor entender e representar o comportamento das bacias hidrográficas (escoamento superficial e subterrâneo) e prever condições para cenários diferentes dos que são observados.

De forma concomitante à aplicação da modelagem, é requerido o auxílio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), empregado na construção de um banco de dados georreferenciados para que se realize a manipulação e combinação dos

dados, além de outros tipos de análises (Alves, 1990).

Assim, o modelo SWAT – *Soil and Water Assessment Tool* - foi escolhido para realização da simulação da quantidade de água e sedimentos capaz de ser gerada ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Tijucas. O modelo SWAT acoplado ao SIG ArcGIS® da ESRI oferece uma simulação com parâmetros distribuídos e contínuos ao longo do tempo, possibilitando ainda configurar a bacia hidrográfica de maneira eficiente e flexível (Zhou e Fulcher, 1997).

O resultado gerará mapas temáticos que mostrarão a produção sedimentar ao longo das sub-bacias. Para isto, deverão ser consideradas suas características geológicas, climáticas e os diferentes usos e ocupação da terra.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Tijucas (BHRT) que ocupa uma área de aproximadamente 2840km² (Figura 1), distribuindo-se ao longo do Litoral Centro Norte do Estado de Santa Catarina. Abrange os municípios de Angelina, Canelinha, Leoberto Leal, Major Gercino, Nova Trento, Rancho Queimado, São João Batista e Tijucas.

Bacia hidrográfica da Região Hidrográfica Oito (RH8) situa-se dentro dos limites geográficos: 738.415m e 694.063m; 6.954.339m e 6.995.100m.

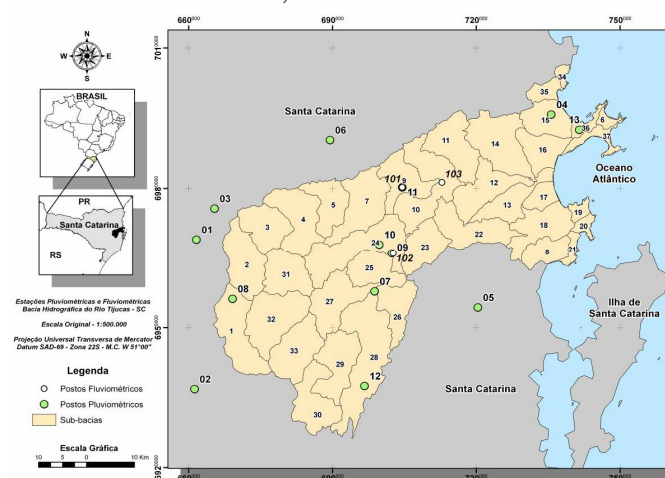


Figura 1 – Localização geográfica da bacia hidrográfica do rio Tijucas, com as sub-bacias analisadas (SANTHI, 2001). Os

postos pluviométricos e fluviométricos estão destacados com pontos brancos e verdes.

De acordo com a classificação climática de Köppen, na faixa leste do Estado o clima é do tipo “mesotérmico úmido com verão quente (Cfa)” e na região de planalto (> 800m) o clima é “mesotérmico úmido com verão seco (Cfb)”. O relevo é do tipo montanhoso, fortemente ondulado com solos rasos a pouco profundos (Santa Catarina, 2007). A precipitação é considerada regular, com média de 1600 mm anuais.

A região preserva sinais de floresta tropical atlântica e vegetação litorânea. O rio Tijucas é formado pela união dos rios: Bonito (27 km de extensão), Engano (39 km) e Garcia (20 km).

2.2. Modelo Swat (Soil and Water Assessment Tool)

O modelo desenvolvido na *Agricultural Research Service (ARS – órgão ligado a USDA – United States Department of Agriculture)* é uma ferramenta de domínio público criado para prever o impacto das práticas do gerenciamento de solo, sedimentos, produtos químico-agrícolas e água sobre bacias hidrográficas que estão sujeitas a diferentes variações de solo, gerenciamento e uso de terra em longos períodos de tempo (Srinivasan *et al.*, 2002).

O SWAT é um modelo baseado fisicamente que requer informações (dados de entrada) específicas sobre o clima, as propriedades do solo, topografia, vegetação e as práticas de gerenciamento do solo que ocorrem ao longo do curso da bacia hidrográfica de interesse. Assim, os processos físicos associados ao movimento da água, ao movimento dos sedimentos, ao crescimento da vegetação, ao ciclo de nutrientes, entre outros (Neitsch *et al.*, 2000).

O modelo foi desenvolvido para verificar os efeitos resultantes das modificações do uso e da ocupação do solo sobre a produção/contribuição de sedimentos da bacia hidrográfica para o sistema, bem como no escoamento superficial e subterrâneo (Srinivasan *et al.*, 2002).

Além da capacidade de integrar os dados sobre o manejo do solo e o uso de terra, o SWAT se difere de outros modelos físicos em sua capacidade de separar a bacia em sub-bacias e Unidades de Resposta

Hidrológica (HRU's – *Hydrological Response Units*). A bacia como um todo é dividida em unidades menores, que apresentam características comuns de solo e uso de terra (Machado, 2002) a partir da seleção de pontos sobre a rede de fluxo, que funcionam como um controle. Desta forma, o modelo pode fornecer dados de saída, como a descarga fluvial em pontos específicos da rede de drenagem do rio (Bekiaris *et al.* 2005).

De acordo com Srinivasan e Arnold (1994), a estrutura de dados que são parâmetros de saída é dividida em sete componentes principais: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas.

2.3 Dados de Entrada e Análises Estatísticas

Os arquivos vetoriais referentes às sub-bacias e aos cursos de água foram disponibilizados pela EPAGRI-SC (Empresa de pesquisa agropecuária e extensão rural de Santa Catarina). O número de HRU's geradas levou em consideração um nível de sensibilidade de 20% para o uso e ocupação de solo e declividade e 10% para os tipos de solo (NEITSCH *et al.*, 2000).

O Modelo Digital de Elevação foi adquirido junto a Embrapa, oriundo da missão da NASA denominada SRTM (*Shuttle radar topography mission*) e disponível para *download* pelo programa Brasil em Relevo, assim como o mapa com a classificação de solos na escala 1:250.000 (EMBRAPA, 1999). Após reclassificadas, foram obtidas oito classes de solo (Tabela 1).

Tabela 1 – Classes de solo da BHRT.

Reclassificação dos solos	Área (km ²)	Área (%)
Afloramentos Rochosos	2	0,071
Areia Quartzosa Marinha	15	0,53
Cambissolo	2024	71,494
Dunas e Areias de Praia	13	0,459
Salos Litólicos	279	9,855
Podzólico Vermelho-Amarelo	308	10,88
Glei Pouco Húmico	170	6,005
Outros	20	0,706

Os dados físico-hídricos referentes a cada uma das oito classes foram compilados de Baldissera (2005) para o banco de dados do modelo.

O mapa de uso e ocupação do solo foi produzido a partir do uso da imagem de satélite Landsat_5_TM (R5G4B3 de 02/09/2002), posteriormente recortada e georreferenciada para abranger somente a área estudada.

Foram definidas sete classes de uso e ocupação do solo durante o processo de classificação da imagem (Tabela 2).

Séries históricas diárias de precipitação e vazão de todas as estações foram obtidas em <http://hidroweb.ana.gov.br>. As tabelas com os dados diários de temperatura foram criadas com as séries históricas diárias de duas estações meteorológicas localizadas nas cidades de São José e Florianópolis.

Tabela 2 – Classes de Uso e Ocupação do Solo para a BHRT.

Uso e ocupação do solo	Área (km ²)	Área (%)
Água	35,12	1,24
Urbanização	162,97	5,76
Floresta	1438,75	50,82
Reflorestamento (Pinos)	139,95	4,94
Áreas alagadas	59,35	2,11
Agricultura	715,01	25,26
Pastagem/Solo exposto	279,79	9,88

São usadas duas análises estatísticas para comprovar a eficiência do modelo. Primeiramente foi usado o Coeficiente de Nash-Sutcliffe - COE. Seu cálculo é baseado na Equação 01, sendo que o resultado pode variar de menos infinito até 01 positivo. O valor de 01 indica que a simulação do evento foi realizada perfeitamente pelo modelo.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - \bar{E})^2} \quad (1);$$

Em = evento observado para o período analisado;

Es = evento simulado para o mesmo período;

E = média do evento observado,

n = número de eventos.

Para apoiar os resultados, o desvio padrão (Dv) em porcentagem também é analisado segundo a Equação 2. Valores de Dv próximos de 0,00% indicam um melhor ajuste do evento simulado com relação ao evento que foi observado.

$$D_v [\%] = \frac{E - E^*}{E} \cdot 100 \quad (2);$$

E = evento observado para o período analisado;

E* = evento simulado para o mesmo período.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Sensibilidade

Foram analisadas 27 variáveis apresentadas na Figura 2, que contém um valor de *ranking* definido após a análise, para cada variável. Um menor valor do *ranking* indica uma maior influência do parâmetro sobre o resultado final da simulação para determinada variável, neste caso, a vazão (Arnold *et al.*, 2005). Variáveis com *ranking* cujo valor é de 27 não exercem nenhuma influência sobre o valor final do parâmetro analisado, portanto a variável correspondente pode ser excluída do processo de calibração.

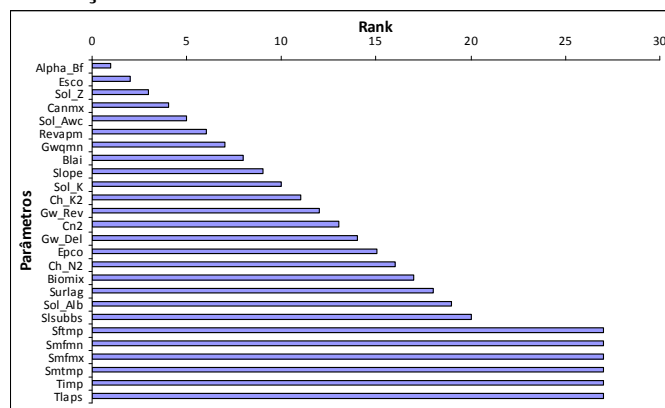


Figura 2 - *Ranking* dos parâmetros depois de realizada a Análise de Sensibilidade.

Os resultados de saída do modelo são influenciados por diversas variáveis que atuam sobre o fluxo superficial, fluxo de base, infiltração de água no solo, profundidade de cada horizonte do solo, entre outros. Uma descrição mais detalhada sobre cada variável pode ser encontrada no manual do modelo SWAT. A Tabela 3 apresenta uma breve descrição

das variáveis que foram consideradas durante a realização da análise de sensibilidade.

Tabela 3 – Descrição dos parâmetros e *ranking* de cada uma das variáveis após a realização da Análise de Sensibilidade do modelo SWAT.

Parâmetro	Rank	Descrição
Alpha_BF	1	Fator alfa do fluxo de base (dias)
Esco	2	Fator de compensação da evaporação do solo
Sol_Z	3	Profundidade do solo (mm)
Canmx	4	Armazenamento máximo de água no dosse vegetativo (mm)
Sol_awc	5	Capacidade de água disponível (mm H ₂ O / mm solo)
Revapmn	6	Profundidade de água limite no aquífero raso para ocorrer "revap" (mm)
Gwqmn	7	Concentração de nitrato na água subterrânea contribuinte (mgN/L)
Blai	8	Índice máximo de área foliar
Slope	9	Declividade média mais acentuada (mm/m)
Sol_K	10	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
Ch_k2	11	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/ano)
Gw_revap	12	Coefficiente de re-evaporação da água subterrânea
Cn2	13	Valor do curva número inicial do <i>Soil Conservation Service</i>
Gw_delay	14	Retardo do escoamento subterrâneo
Epc0	15	Fator de compensação da retirada das plantas
Ch_n2	16	Coefficiente de Manning do canal principal
Biomix	17	Eficiência da mistura biológica
Surlag	18	Tempo de retardo do escoamento superficial
Sol_alb	19	Albedo do solo
Ssubbsn	20	Comprimento da declividade média (m)
Sftmp	27	Temperatura da neve (graus celcius)
Smfmn	27	Fator de derretimento da neve em dezembro (mmH ₂ O/oC/dia)
Smfmx	27	Fator de derretimento da neve em junho (mmH ₂ O/oC/dia)
Smtmp	27	Temperatura de base para derretimento de neve (oC)
Timp	27	Fator de retardo da temperatura do bloco de neve
Tlaps	27	Taxa de variação da temperatura (oC/km)

3.2 Calibração do Modelo Swat

De acordo com a metodologia proposta por Santhi *et al.* (2001), os seguintes parâmetros tiveram o seu valor alterado: i) o CN2 foi multiplicado por 0,75, para que seu valor fosse reduzido em 25%; ii) a

variável ESCO teve seu valor acrescido até o máximo permitido, que é de 1,0; iii) o SOL_AWC também teve o seu valor alterado até o máximo permitido, que é de 0,6; iv) o GWQMN teve seu valor substituído por 5000 e; v) o RCHRG_DP, teve seu valor alterado para 1,0.

A última variável citada, (RCHRG_DP - fração de percolação do aquífero profundo) melhorou os resultados apenas para a Sub-bacia 09. Portanto, acabou sendo descartada e se optou por apresentar os valores resultantes apenas da mudança das outras quatro variáveis mencionadas.

Tabela 3 - Valores de R² (após o ajuste), COE E Dv (%) antes e após a calibração.

	R ²	COE (sem ajuste)	Dv (% sem ajuste)	COE (ajustado)	Dv (ajustado)
Estação 101 (09)	0.56	-1.85	63.43	0.40	- 28.12
Estação 102 (24)	0.81	-23.51	72.09	0.63	- 4.01
Estação 103 (10)	0.60	0.12	-86.38	0.36	-23.00

Fazendo um comparativo entre as médias mensais para os dez anos da simulação dos três postos fluviométricos foram encontrados valores de desvio padrão em porcentagem variando entre -8% e 16% (Tabela 4). O COE obteve uma melhora significativa após a calibração dos resultados para as estações das microbacias 10 e 24, sendo que para a sub-bacia 09, o valor encontrado não satisfaz as condições necessárias para confirmar a eficiência da modelagem (-0,01), indicando um péssimo ajuste do modelo mediante estas condições.

O valor de COE de 0.73 encontrado na microbacia 24 atingiu um patamar onde indica que a calibração utilizada foi muito eficiente (Krysanova *et al.*, 1998 apud Machado, 2002).

Os resultados obtidos na estação 102, localizada na sub-bacia 24 indicam uma calibração realizada com sucesso para este ponto de controle. O valor do coeficiente de correlação linear levando em consideração os dados observados *versus* os dados simulados foi de aproximadamente 0,81 (Figura 3). Na figura 4 é apresentada a série histórica de vazão simulada e observada, utilizando a precipitação média do período relativo para efeito de comparação.

A inconsistência do modelo em simular os dados observados ocorreu no início da série, onde ocorreu um erro do modelo em reconhecer as médias de pluviosidade (janeiro/91 a julho/91) para efetuar os cálculos de vazão e no período que compreende entre junho/95 a abril/96, onde não foram encontradas evidências para justificar a incoerência dos valores simulados.

Tabela 4 - Coeficiente de correlação R^2 , COE e Dv (%) para as médias mensais ao longo do período simulado.

Vazão Simulada x Vazão Observada	R^2	COE	Dv (%)
Estação 101 (Sub-bacia 09)	0.6183	-0.01	16.23
Estação 102 (Sub-bacia 24)	0.9547	0.73	-5.47
Estação 103 (Sub-bacia 10)	0.8502	0.5	-7.98

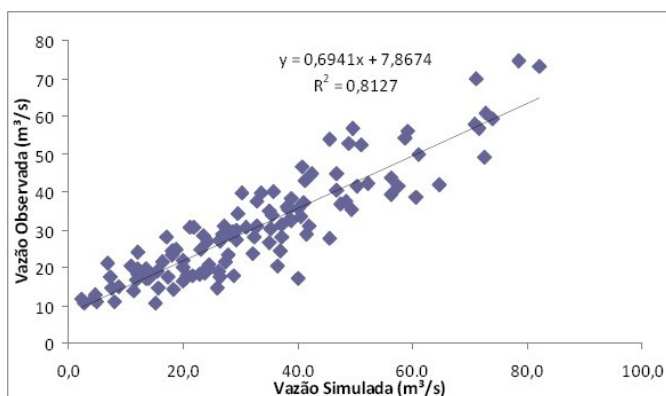


Figura 3 – Coeficiente de correlação linear para a Estação 102 (Sub-bacia 24)

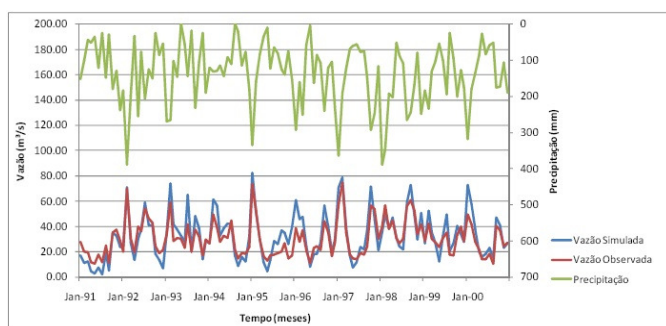


Figura 4 – Vazão observada x vazão simulada para a estação 102 (sub-bacia 24) no eixo principal e no eixo secundário a série histórica de precipitação do posto pluviométrico desta sub-bacia.

Moriasi *et al.* (2007) propõe que os resultados encontrados para o COE devem exceder o valor de 0.5 para que o modelo seja considerado satisfatório para a predição hidrológica mensal. Considerando este critério para ambos os índices (COE e R^2), os resultados foram considerados satisfatórios apenas para a Estação 102 na microbacia 24, que replicou corretamente a vazão e os outros indicadores hidrológicos. Levando em conta a média mensal, as estações 102 e 103 estariam de acordo com o critério estabelecido por Moriasi *et al.* (2007).

Os fracos desempenhos obtidos pelas outras estações podem ser atribuídos em parte a representação inadequada dos dados de chuva requeridos ou a falta de postos de coleta pluviométrica ao longo da bacia hidrográfica estudada, impossibilitando a coleta de dados que sejam espacialmente representativos para esta variável (Bouraoui *et al.*, 2004). Outros fatores que podem afetar negativamente os resultados gerados pelo modelo compreendem a falta de calibração do modelo (Bosch *et al.*, 2004), erros na série temporal de dados de vazão que estão sendo comparados (Harmel *et al.*, 2006) e curtos períodos selecionados para a calibração e validação do modelo (Muleta e Nicklow, 2005b).

As séries de dados utilizadas não podem ser contestadas uma vez que são disponibilizadas por órgãos governamentais e os dados faltantes ou inexistentes foram substituídos corretamente pelo usuário para garantir uma maior eficiência do processo de modelagem. O período de simulação de dez anos é maior até que muitos outros encontrados na literatura referente ao SWAT, mas é sempre importante ressaltar que séries históricas maiores sempre estão mais passíveis a presença de erros.

Ao contrário de outros autores e estudos, como por exemplo, os realizados por Baldissera (2005), Machado (2002) e Prado (2005), não foram considerados outros cenários para comparar a produção de sedimentos. Optou-se por trabalhar apenas com a configuração atual de uso e ocupação de terras existente atualmente para a BHRT. Machado (2002) calibrou o escoamento superficial e atingiu um COE igual a 0,90, e para produção de sedimentos o COE encontrado foi de 0,82. Baldissera (2005) não encontrou resultados favoráveis de COE para os postos de monitoramento utilizados em todos os

cenários que foram propostos.

Desta forma, optou por realizar um teste ‘t’ de Student para comparar a médias observadas a conseguiu um ajuste de 0,7156 e considerado-o favorável. Prado (2005) concluiu que é muito importante aplicar o manejo correto em Áreas de Preservação Permanente (APP’s), obtendo produções menores de sedimentos em condições onde estas estão delimitadas corretamente, sendo áreas importantes no controle contra a erosão.

O modelo SWAT analisa a produção de sedimentos para cada sub-bacia em função das variáveis hidrológica, climáticas, físicas do solo e geomorfológicas. É considerado o uso de solo e ocupação de terra predominante para estimar a produção de sedimentos. BERTONI & LOMBARDI NETO (1990) citam a introdução de Áreas de Preservação Permanente em áreas ocupadas por pastagens, diminui a exposição dos solos mais suscetíveis a erosão. Isto acarreta em um aumento da rugosidade do solo, fazendo com que a água permaneça mais tempo na superfície do solo, aumentando assim, a taxa de infiltração.

Dentro do cenário proposto, um mapa contendo a média da produção de sedimentos de cada sub-bacia ao longo do período de 10 anos analisado foi confeccionado a partir dos dados de saída do modelo para esta variável (Figura 5).

Pode ser visualizado que nas microbacias 03, 04 e 18, a produção de sedimentos chega ao valor de até nove toneladas por hectare (9,0 ton/ha) por ano. Dentro dos resultados apresentados, algumas hipóteses podem ser levantadas sobre os motivos que estariam levando estas regiões a serem potenciais zonas de erosão.

As sub-bacias 03 e 04 estão situadas onde o tipo de solo Cambissolo não é predominante, e aparecem regiões onde o solo é identificado como sendo do tipo Litólico ou Podzólico Vermelho-Amarelo. O Cambissolo é um dos solos mais resistentes ao processo de erosão, e além do mais, a faixa por onde se estende este tipo de solo é bastante vegetada, aumentando a rugosidade do solo e diminuindo a ação hídrica sobre ele. Os solos Litólicos são rasos e apresentam textura argilosa, o que os torna um pouco resistentes ao processo erosivo. Já os solos Podzólicos que apresentam uma fração mais arenosa são mais suscetíveis a perdas de

sedimento por ação da água (Bertoni e LOMBARDI Neto, 1990).

A microbacia de número 18 está situada em uma região onde a atividade agrícola é predominante acrescida da ação da chuva e da água superficial que age sobre o solo (Figura 6).

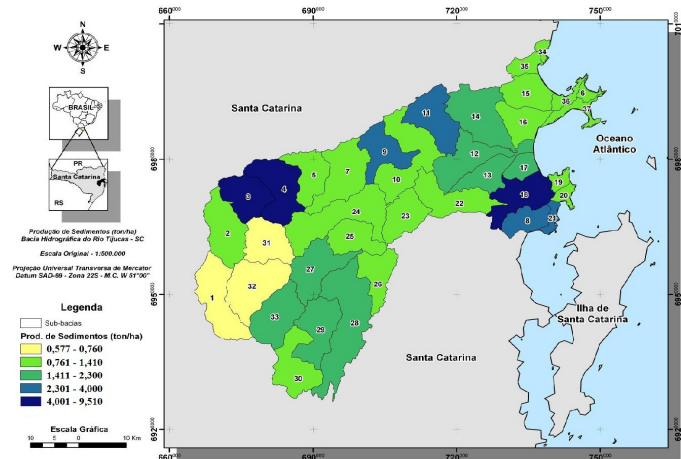


Figura 5 - Distribuição espacial da produção de sedimentos (ton/ha) por microbacia na BHRT.

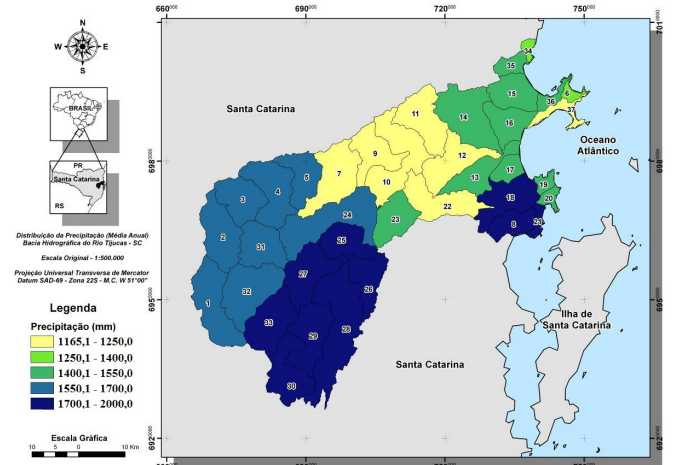


Figura 6 – Distribuição da precipitação para a bacia hidrográfica do rio Tijucas.

O resultado do mapa da Figura 7 mostra como é o comportamento da velocidade da vazão ao longo da bacia hidrográfica do rio Tijucas. É apresentada uma média para o período de dez anos em que foram usados os dados para a simulação.

De acordo com as variáveis de saída, as médias podem variar de 0,18 a 5,77 m³/s nas regiões

de maior altitude e nas zonas mais costeiras que não fazem parte da área de drenagem dos canais principais, chegando até a atingir valores médios de $49,67\text{m}^3/\text{s}$ nas áreas onde os cursos de água se apresentam em estágio mais desenvolvido. A tabela 5 apresenta as médias mensais observadas e calculadas para a década de 1990 determinadas após o processo de modelagem.

Tabela 5 - Médias mensais da vazão observada e simulada para a década de 1990 para a BHRT.

	Estação 101/ Sub-bacia 09		Estação 102/ Sub-bacia 24		Estação 103/ Sub-bacia 10	
	Vazão Simulada (m^3/s)	Vazão Observada (m^3/s)	Vazão Simulada (m^3/s)	Vazão Observada (m^3/s)	Vazão Simulada (m^3/s)	Vazão Observada (m^3/s)
Janeiro	15.88	13.96	45.30	39.64	72.72	66.38
Fevereiro	19.56	21.77	55.21	49.39	91.21	82.18
Março	8.09	11.15	36.42	31.63	55.59	51.12
Abril	6.21	10.31	23.53	23.99	39.11	42.55
Mai	5.56	10.22	18.39	22.10	33.57	38.33
Junho	10.59	10.97	23.44	23.39	40.33	43.45
Julho	13.13	14.95	33.33	29.72	56.82	47.59
Agosto	12.68	16.26	26.69	25.48	48.72	43.08
Setembro	14.00	12.58	37.93	31.30	64.46	48.23
Outubro	12.97	13.20	38.52	35.30	69.43	52.94
Novembro	6.83	13.91	25.07	27.44	41.78	42.12
Dezembro	9.36	10.01	28.73	27.53	45.76	46.80

O comportamento das médias de vazão calculadas atingiu um padrão esperado, uma vez que as cabeceiras e áreas localizadas a montante são regiões onde ocorre a produção de água (nascentes). Sendo assim, o terreno é bastante recortado e os cursos de água ainda não estão bem formados. À medida que a água vai escoando para as regiões mais baixas da bacia hidrográfica, os cursos de água de ordem inferior vão convergindo e formam os cursos de água de maior ordem, mais desenvolvidos e com maior capacidade de transportar grandes volumes de água e sedimentos.

Na zona costeira, o mapa mostra que ocorre uma pequena redução nos valores médios observados na área onde aparece o exutório da bacia. Este fato

pode ser atribuído a menor declividade presente nesta região. Apesar do canal principal (rio Tijucas) suportar uma grande carga de sedimentos e água, a ação da gravidade não atua mais nesta região da mesma forma que atua nas áreas onde foram encontrados os maiores índices de vazão, reduzindo o fluxo por unidade de área.

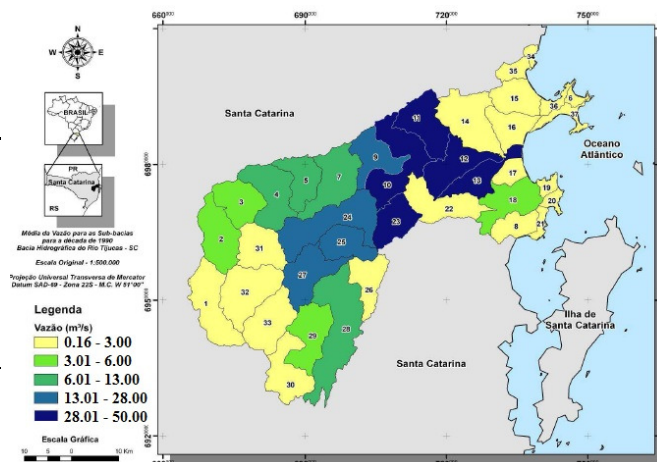


Figura 7 - Mapa de Média de Vazão de Longo período para os 10 anos de simulação.

Bosch *et al.*, (2004) realizaram um estudo comparando os resultados do modelo SWAT e de outros modelos que possuem rotinas aplicadas ao transporte de sedimentos, hidrologias, pesticidas e nutrientes e concluíram que os valores de volume de vazão mensais são muito bem representados pelas saídas do modelo, exceto para os meses onde é registrada a ocorrência de algum evento extremo de tempestade.

A Figura 8 apresenta uma série temporal para os 10 anos de simulação propostos pelo presente estudo. São observados os comportamentos da precipitação, da produção de água e da produção de sedimentos para o período analisado. É visualizado que o comportamento da produção de água acompanha os picos de precipitação, ou seja, a produção de água está intrinsecamente ligada à quantidade de chuva precipitada. Ainda pode ser observado que nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro), ocorre um pico na produção de sedimentos média ao longo de toda a bacia hidrográfica, em função da maior quantidade de água precipitada que é disponibilizada para o escoamento superficial.

O SWAT foi criado e é compatível com as mais diversas práticas de agricultura que podem ser realizadas pela ação humana, porém, este não é o objetivo central do trabalho. Sendo assim, erros qualitativos podem estar associados com os valores apresentadas para a produção de solos, uma vez que somente um posto de vazão obteve um coeficiente de eficiência favorável a partir dos dados de vazão mensais.

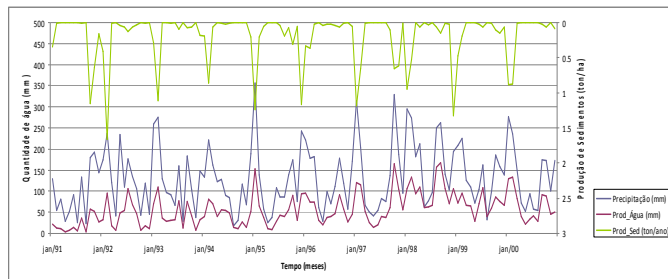


Figura 8 - Produção de Água, Produção de Sedimentos e Precipitação Média para os 10 anos simulados pelo modelo SWAT para a BHRT.

5. CONCLUSÕES

Apenas parte dos resultados simulados obtiveram os índices estatísticos necessários para garantir a eficiência do modelo em representar o ambiente real. Mesmo assim é possível inferir em hipóteses sobre os resultados de maneira qualitativa e não de forma quantitativa.

Desta forma, as microbacias 03, 04 e 18 foram estabelecidas como as HRU's onde a produção de água e de sedimentos foi mais significativa para o período estudado. Nos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro), a produção de sedimentos sempre foi mais significativa, acompanhando o pico de precipitação e produção de água que são maiores ao longo deste período.

Para o presente trabalho, uma das limitações mais significativas foi à falta de dados sobre produção e concentração de sedimentos ao longo da bacia hidrográfica.

Embora o modelo seja sensível a mais de uma centena de variáveis, resultados muito bons após a calibração realizada depois da análise de sensibilidade, seguindo a metodologia de Santhi *et al.* (2002) foram atingidos. É necessário salientar a importância de estudar cada uma destas variáveis e a

influência destas nos resultados finais, para não comprometer a índole e a validade do estudo realizado.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço a FAPESC – Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina, por ter financiado o projeto durante os seus 12 meses de desenvolvimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, D.S. Sistema De Informação Geográfica. In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 1., 1990. São Paulo, Anais... São Paulo: Usp, Escola Politécnica. P.66-78. 1990.
- Arnold, Jg; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; Williams, J.R. Large Area Hydrologic Modeling And Assessment. Part I: Model Development. Journal Of The American Water Resources Association, Temple, V. 34, N. 1, P. 73-89, 1998.
- Arnold, J.G.; Fohrer, N. Swat 2000: Current Capabilities And Research Opportunities In Applied Watershed Modeling. Hydrological Processes, V.19, P. 563-572, 2005.
- Baldissera, G.C. Aplicabilidade Do Modelo De Simulação Hidrológica Swat (Soil And Water Assessment Tool), Para A Bacia Hidrográfica Do Rio Cuiabá/Mt. 2005. 144f. Dissertação (Mestrado Em Física E Meio Ambiente) – Instituto De Ciências Exatas E Da Terra, Ufimt, Cuiabá – Mt, 2005.
- Bekiaris I.G.; Panagopoulos I.N.; Mikikou M.A. Application Of Swat (Soil And Water Assessment Tool) Model In The Ronnea Catchment Of Sweden. Global Nest Journal, Vol. 7, N°3, P.252-257, 2005.
- Bertoni, J; Lombardi Neto, F. Conservação Do Solo. 2.Ed. São Paulo: Ícone, 1990. 355 P.
- Bosch, D. D.;J. M. Sheridan, H. L. Batten; J. G. Arnold.. Evaluation Of The Swat Model On A Coastal Plain Agricultural Watershed. J.American Water Resources. 2004.
- Bouraoui, F., B. Grizzetti, K. Granlund, S. Rekolainen, And G. Bidoglio. Impact Of Climate Change On The Water Cycled And Nutrient Losses In A Finnish Catchment. J.American Water Resources. 2004.
- Embrapa. Centro Nacional De Pesquisa De Solos. Sistema Brasileiro De Classificação De Solos. Brasília: Embrapa Produção De Informação; Rio De Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 P.
- Harmel, R. D.; Cooper, R. J.; Slade, R. M.; Haney, R. L.;

- Arnold, J. G. Cumulative Uncertainty In Measured Streamflow And Water Quality Data For Small Watersheds. 2006.
- Machado, R.E. Simulação De Escoamento E De Produção De Sedimentos Em Uma Microbacia Hidrográfica Utilizando Técnicas De Modelagem E Geoprocessamento. 2002. 154 P. Tese (Doutorado Em Irrigação E Drenagem) – Escola Superior De Agricultura “Luiz De Queiroz”, Universidade De São Paulo, Piracicaba, 2002.
- Martins, S. G.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Ferreira, M. M.; Fonseca, S.; Marques, J. J. G. S. M. Perdas De Solo E Água Por Erosão Hídrica Em Sistemas Florestais Na Região De Aracruz (Es). Revista Brasileira De Ciência De Solo, V.27, N. 3, Pp. 395-403, Mai./Jun. 2003.
- Moriasi, D. N.; J. G. Arnold, Van Liew, M. W.; Binger, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. Model Evaluation Guidelines For Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. J.American Water Resources. 2007.
- Muleta, M. K.; Nicklow, J. W. Sensitivity And Uncertainty Analysis Coupled With Automatic Calibration For A Distributed Watershed Model. J.American Water Resources. 2005b.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Willians, J.R. Soil And Water Assessment Tool – User’s Manual: Version 2000. Temple: Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2000. 458p.
- Prado, T.B.G. Evolução Do Uso Das Terras E Produção De Sedimentos Na Bacia Hidrográfica Do Rio Jundiá-Mirim. 2005. 72f. Dissertação (Mestre Em Agronomia) – Instituto Agrônomo, Universidade De Campinas, Campinas, 2005.
- Santa Catarina. – Panorama Dos Recursos Hídricos Em Santa Catarina. Florianópolis: Secretaria Do Estado Do Desenvolvimento Sustentável(Sds), Execução: Consórcio Engecorps – Tetraplan – Lacaz Martins. 2007.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., Hauck, L.M. October 2001. Validation Of The Swat Model On A Large River Basin With Point & Non-Point Sources, Journal Of The American Water Resources Association, Vol. 37, No. 5, 1169-1188pp.
- Santhi, C.; Arnold J. G.; Williams, J. R.; L. Hauck, M; Dugas, W. A. Application Of A Watershed Model To Evaluate Management Effects On Point And Nonpoint Source Pollution. Trans. Asae. 2002.
- Srinivasan, R.; Arnold, J.G. Integration Of A Basin-Scale Water Quality Model With Gis. Water Resources Bulletin, V.30, N.3, P.453-462, 1994.
- Srinivasan, R.; Arnold, J. G. Santhi, C. Tmdl Applications Using Swat. At Asae Conference Titled "Watershed Management To Meet Emerging Tmdl Environmental Regulations Conference & Exhibition." Fort Worth, Tx. March 10, 2002.
- Tucci, C.E.M. Hidrologia: Ciências E Aplicação. 2.Ed. Porto Alegre. Ed. Ufrgs, Abrh, 2001. 943 P.
- Whitehead, P.G.; Robinson, M. Exprimental Basin Studies – An International And Historical Perspective Of Forest Impacts. J. Hydrol., Amsterdam, V.145, P.217-230, 1993.
- Zakia, M.J.B., Identificação E Caracterização Da Zona Ripáriaem Uma Microbacia Experimental: Implicações No Manejo De Bacias Hidrográficas E Na Recomposição De Matas Nativas. Tese De Doutorado. Eesc/Usp. 1998.
- Zhou, Y.; Fulcher, C., A Watershed Management Tool Using Swat And Arcinfo. Esri User Conference, Proceedings 1997.