

# Análise do Equilíbrio Hidrossedimentológico em uma Microbacia Experimental com o Modelo SWAT e as Características Geomorfológicas.

Nadia Hidemi Yano Lopes<sup>1</sup>

Laboratório de Hidrologia – LabHidro; Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
nadia\_hidemi@yahoo.com.br

Masato Kobiyama<sup>2</sup>

Laboratório de Hidrologia – LabHidro; Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
kobiyama@ens.ufsc.br

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi analisar o equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental (M2) com o modelo SWAT e as características geomorfológicas. O modelo obteve um resultado satisfatório, que acompanhou o hidrograma observado, apesar da superestimação nos meses secos e da subestimação no mês úmido. A curva hipsométrica da M2 é caracterizada pelo estágio de equilíbrio em relação ao ciclo de erosão. O rio principal apresentou em seis segmentos a capacidade de erodir e/ou transportar sedimento. O valor das anomalias encontradas no rio principal mostra que ocorreu apenas uma anomalia de 2ª ordem. O índice de Hack mostra que nesta seção há uma grande probabilidade de ocorrência de erosão. Na modelagem, esta seção do rio corresponde a exutória da sub-bacia de 0,08 ha que apresentou baixa produção de sedimento (0,2 kg/ha). O SWAT mostrou que houve produção de sedimentos em sub-bacias a 3,48 km da nascente do rio principal.

Palavras-chave: sedimento; microbacia experimental; SWAT, índice de Hack.

**Abstract:** The objective of this work was to analyze the hydrosedimentological equilibrium in an experimental watershed (M2) with SWAT model and with the geomorphologic features. The model obtained a satisfactory result that attended the observed hydrograph, despite the superestimation in the dry months and the subestimation in the wet month. The M2's hypsometric curve is characterized with the equilibrium stage in relation to the erosion cycle. The main stream has six segments that are enable for erosion and/or sediment transport. The anomaly's value found in the main stream show that only one anomaly of the 2<sup>a</sup> orders. The Hack's index shows the in this section there is a greater probability of erosion occurrence. In the modeling, this stream's section correspond the sub-watershed outlet of 0.08 ha that presented light sediment production (0.2 kg/ha). The SWAT shows that there is sediment yield in sub-basin at 3.48 km from the headwater in the main stream.

Key-words: sediment; experimental watershed, SWAT, Hack's index.

## 1. Introdução

O equilíbrio do curso d'água resulta das características geológicas e geomorfológicas, incluindo considerações sobre transporte de sedimentos e sua deposição a jusante. Mudanças abruptas no gradiente do perfil longitudinal têm sido estudadas para indicar uma resposta de equilíbrio para a variação litológica (HACK, 1973; McKEOWN et al., 1988) ou para uma deformação local (McKEOWN et al., 1988). Esses autores calcularam

---

<sup>1</sup> Bolsista da CAPES, mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

<sup>2</sup> Bolsista do CNPq, professor associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

as características geomorfológicas da microbacia tais como a curva hipsométrica, o perfil longitudinal do rio principal e o índice de Hack para a análise do equilíbrio da bacia hidrográfica.

A modelagem auxilia no entendimento deste equilíbrio, por isso foi aplicado o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), desenvolvido no início da década de 90 pelo *United States Department of Agriculture* (USDA). A finalidade deste modelo é auxiliar os gestores de recursos hídricos na avaliação de impactos de práticas de manejo do solo em relação à água, ao sedimento e ao agrotóxico em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas com variação de solos, usos e coberturas do solo e condições de manejo sobre longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2005). Este modelo permite simular espacialmente uma bacia hidrográfica com mosaico complexo com diferentes usos e cobertura do solo e tipos de solo.

O objetivo do presente trabalho foi analisar o equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental escola na região norte do estado de Santa Catarina – Brasil com o modelo SWAT e as características geomorfológicas.

## **2. Área de estudo**

O presente trabalho está inserido em projetos de monitoramento de sete microbacias experimentais localizadas nos municípios de Mafra e Rio Negrinho pertencentes ao estado de Santa Catarina – Brasil. Kobiyama et al. (2007) explicaram que estas microbacias foram construídas para entender as influências hidrológicas dos usos do solo nesta região caracterizada economicamente pelo reflorestamento de pinus e ambientalmente pela Floresta Ombrófila Mista. No presente trabalho foi estudado a microbacia experimental denominada M2 localizada no município de Rio Negrinho (Figura 1).

No Planalto Norte Catarinense predomina o clima do tipo Cfb, na classificação de Köppen (EPAGRI/CIRAM, 2006). A formação geológica predominante são rochas sedimentares paleozóicas (arenito e folhelho) que demonstram estratificação horizontal. O relevo em geral é moderado com a presença de pântanos nas áreas de cabeceiras (KOBİYAMA et al., 2007).

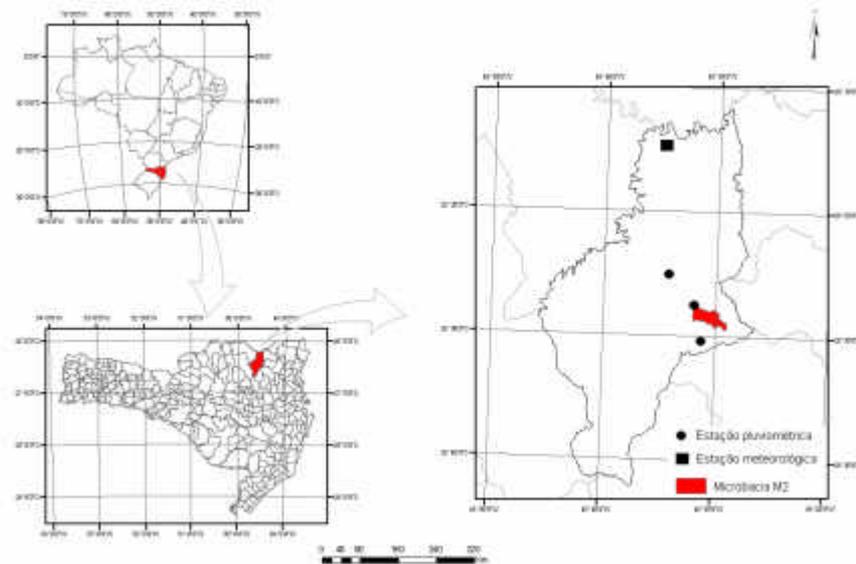


Figura 1 – Localização da microbacia experimental.

A microbacia M2 apresenta uma área de 856,16 ha com altitude variando de 837 a 1010 m e declividade média de 2,03%. A microbacia é caracterizada pelo *Pinus taeda* com 43,4% de pinus novo, com variação de 2 a 5 anos, 4,2% de pinus velho com cerca de 20 a 25 anos, 45,2% de floresta nativa, que corresponde a vegetação secundária, 6,3% de vegetação em restituição em estágio inicial, e 0,8% de água (Figura 2).

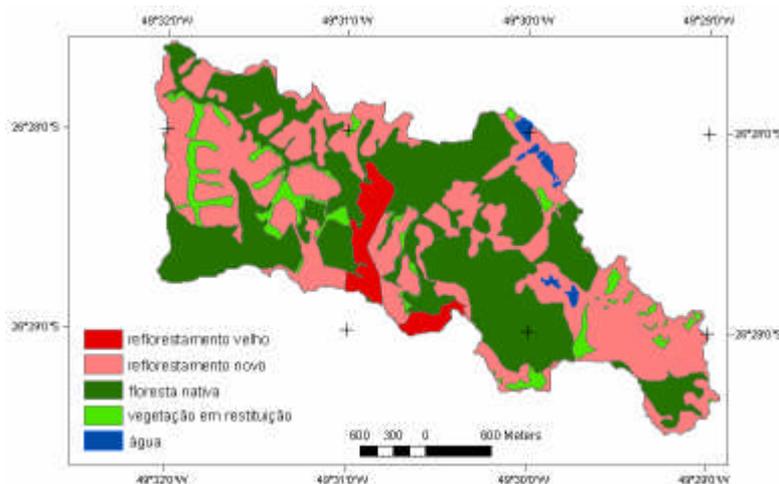


Figura 2 – Usos e coberturas do solo.

De acordo com a EMBRAPA (2004), na microbacia M2 predomina-se a Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente com textura argilosa junto ao solo Litólico Álico A proeminente com textura média (Ca51) com 63,2%, seguido pelo Cambissolo Álico Tb A proeminente com textura média (Ca54) com 27,8% e pelo Cambissolo Álico Tb A moderado com textura argilosa (Ca9) que representam 9,0% (Figura 3).

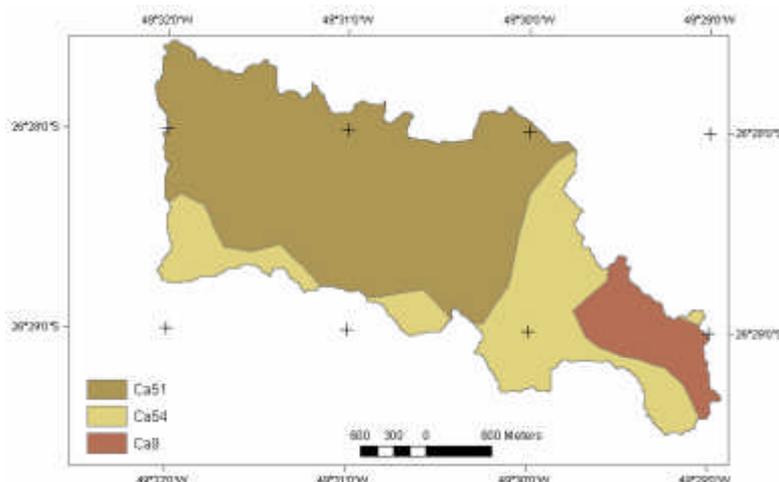


Figura 3 – Tipos de solo da microbacia M2.

### 3. Materiais e métodos

A altura de lâmina de água (m) e a precipitação (mm) têm sido continuamente monitoradas, no intervalo de 10 minutos, pelas estações fluviométricas e pluviométricas desde janeiro de 2007. A vazão foi calculada pela determinação da curva-chave nas cotas 0,21 e 0,34 m com a seguinte equação:

$$Q = 0,2723 \cdot H^2 + 0,7345 \cdot H - 0,119 \quad (1)$$

na qual  $Q$  é a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); e  $H$  é a altura de lâmina de água (m).

A extrapolação das cotas superiores foi realizada pelo método de Stevens conforme as Equações (2) e (3)

$$AR^{0,5} = 0,0202 \cdot e^{7,3941 \cdot H} \quad (2)$$

na qual  $AR^{0,5}$  é definido como fator geométrico.

$$Q = (AR^{0,5} - 0,0332) / 1,282 \quad (3)$$

O modelo digital de terreno (MDT) foi gerado a partir de curvas de nível no formato *shapefile* na escala 1:25.000 com projeção UTM e *datum* SAD69 que foram interpoladas pelo método TIN (*Triangular Irregular Network*), posteriormente, este arquivo foi transformado para dado matricial com resolução de 10 m. O mapa de solos da Embrapa (2004) e o mapa de uso do solo foram transformados em dados matriciais com a mesma resolução do MDT. Os dados climatológicos de temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar foram cedidos pela Battistella Florestas, cuja estação meteorológica encontra-se nas coordenadas geográficas 49°34'53"O e 26°14'48"S na altitude de 840 m.

O SWAT é um modelo computacional de parâmetro semi-distribuído que delimita a bacia hidrográfica e as suas sub-bacias. Defini os parâmetros geomorfológicos a partir de cálculos do MDT. De acordo com a distribuição dos usos e cobertura do solo e dos tipos de solo as sub-bacias são englobadas em unidades de resposta hidrológica (URH) (Figura 4). O SWAT calcula o escoamento superficial pelo método da Curva Número (CN). A produção de sedimentos é estimada pela Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE).

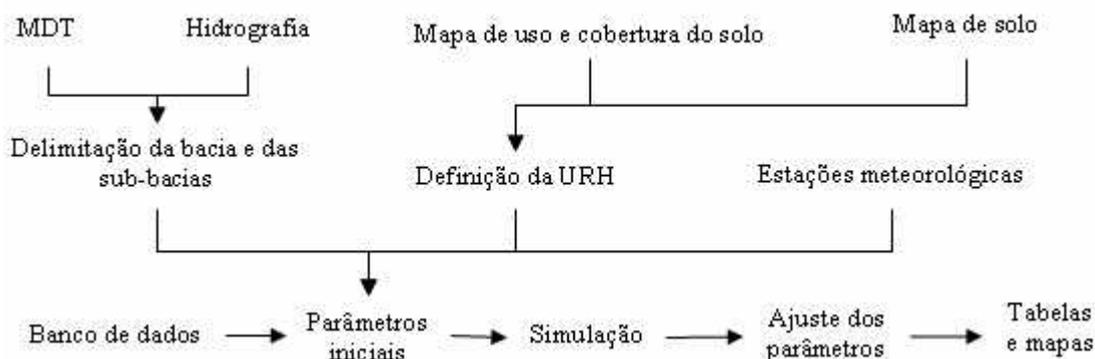


Figura 4 – Fluxograma do modelo SWAT.

O modelo necessita dados climáticos de precipitação, temperaturas máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Os parâmetros de entrada são inicializados com base nas URHs e no banco de dados. O cruzamento destas informações foi alcançado pela interface ArcGis e SWAT desenvolvida por Di Luzio et al. (2002). Maiores informações sobre o modelo podem ser encontradas em Neitsch et al. (2005).

O modelo requer um período para o aquecimento, assim foi realizado simulações desde janeiro de 2006 a dezembro de 2007. Os dados de precipitação da estação pluviométrica da M2 foram interpolados por média móvel com os dados da estação pluviométrica da bacia do rio Corredeiras (49°34'21"O e 26°25'08"S).

A calibração foi efetuada para o período compreendido entre junho e dezembro de 2007. Os parâmetros utilizados para a calibração foram em relação: (i) Ao solo: quantidade de água disponível no solo (AWC); (ii) À vazão: curva número (CN); coeficiente de retardo do escoamento superficial, (SURLAG) que corresponde à relação entre a vazão e o tempo de concentração,  $n$  de Manning para o rio principal e seus tributários, e para os usos e cobertura do solo; e (iii) À água subterrânea: coeficiente de recessão (ALAFa\_BF).

A calibração do modelo foi realizada pela análise visual e pela aplicação da função objetivo Nash e Sutcliffe (COE) (Equação 4) e pelo modelo de regressão linear

simples com 95% de confiança, ou seja, com nível de significância ( $\alpha$ ) = 5%, sendo analisado o menor nível de significância ( $p$ ) de cada modelo de regressão.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (4)$$

na qual  $E_m$  é o evento observado;  $E_s$  é o evento simulado; e  $\bar{E}$  é a média do evento observado.

O Índice de Gradiente do Rio (*Stream-Gradient index*) foi desenvolvido por Hack (1973) e estabeleceu um índice fluvio-morfométrico para analisar perfis longitudinais dos rios e refere-se à relação entre a declividade de um segmento do rio e a distância do mesmo à nascente (RDE) como apresenta a Equação (5) (ETCHEBEHERE, 2006).

$$RDE = (\Delta h / \Delta l) \cdot L \quad (5)$$

na qual  $\Delta h$  é a diferença altimétrica entre dois pontos de um segmento do curso d'água;  $\Delta l$  é a projeção horizontal da extensão do segmento analisado; e  $L$  é a distância entre este segmento e a nascente do rio.

O índice RDE está relacionado com os níveis de energia da corrente que reflete na capacidade desta energia erodir o substrato e/ou de transportar a carga sedimentar (ETCHEBEHERE et al., 2006; GOLDRICK e BISHOP, 2007). O índice pode ser calculado para toda a extensão de um rio sendo considerado a amplitude altimétrica total e o logaritmo natural de sua extensão (McKEOWN et al., 1988).

Seeber e Gornitz (1983) estudaram a relação entre o RDEsegmento (RDEs) e o RDEtotal (RDEt) e concluíram que  $RDEs/RDEt = 2$  é o limiar da faixa de anomalias;  $2 < RDEs/RDEt < 10$  foi classificado como anomalia de 1ª ordem; e  $RDEs/RDEt > 10$  foi classificado como anomalia de 2ª ordem. As anomalias são indicadores de áreas suspeitas de atividade deformacional recente.

#### 4. Resultados e discussões

A microbacia M2 foi delimitada e dividida em 49 sub-bacias, a URH correspondeu a 90 e foi definida com 25% de usos e cobertura do solo e 25% de tipos de solo predominante em cada sub-bacia. Os parâmetros de calibração podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros calibrados na simulação.

Parâmetro	Faixa de valores adotados
AWC	0,04 – 0,25 mm
CN	55 – 74
n para os usos e cobertura do solo	0,06 – 0,1
n para a rede de drenagem	0,08
SURLAG	1
ALFA_BF	0,05

A Tabela 2 apresenta o resultado da função objetivo COE e do coeficiente de correlação ( $r^2$ ) junto com o menor nível de significância (p).

Tabela 2 – Análise do desempenho da simulação.

Simulação	COE	$r^2$	p	$\alpha$	Equação
Entre junho e dezembro de 2007	0,23	0,51	0,00	0,05	$1/Q_{Observada} = -2,24 + 2,49 \cdot 1/Q_{Simulada}$
Mês de julho de 2007	0,45	0,44	0,00	0,05	$Q_{Observada} = 0,12 + 0,53 \cdot Q_{Simulada}$
Mês de dezembro de 2007	0,86	0,87	0,00	0,05	$Q_{Observada} = 0,09 + 0,76 \cdot Q_{Simulada}$

As vazões observada e simulada entre junho e dezembro de 2007 sofreram transformação para obter uma aproximação à distribuição normal que resultou em um melhor coeficiente de correlação. A Figura 5 e a Tabela 2 mostram um bom ajuste do modelo. O modelo obteve uma superestimação dos eventos nas pequenas vazões nos meses secos, que ocorreram em agosto e setembro ( $0,64 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,36 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente).

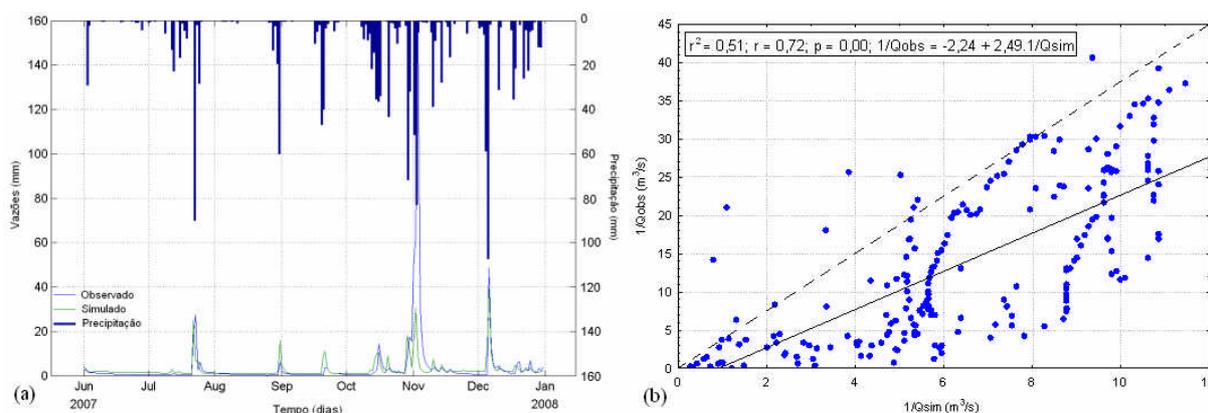


Figura 5 – Simulação no período de junho a dezembro de 2007: (a) Precipitação e vazões observada e simulada; (b) Correlação entre as vazões observada e simulada.

Percebe-se que ocorreu uma grande vazão ( $15,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) no mês de novembro, mês úmido, e que o modelo subestimou este evento. Isto implica na possibilidade de ter ocorrido intensa precipitação a montante da M2, este evento não foi medido devido à estação pluviométrica estar localizada no exutório da M2. As simulações nos meses de julho e dezembro foram coerentes com os valores observados por isso foi realizada uma análise da produção de água e sedimentos destes meses (Figuras 6 e 7).

A sub-bacia que apresentou maior produção de sedimento, 45,9 kg/ha em julho e 60,1 kg/ha em dezembro, tem declividade média de 23,7% em 30% de sua área com a cobertura de vegetação em restituição e 12,8% na área restante com o uso de reflorestamento de pinus novo. Na análise das URHs e da declividade observa-se que no SWAT a produção de sedimento é vinculada com os usos e cobertura e com a declividade. O SWAT mostrou que houve produção de sedimentos em sub-bacias a 3,48 km da nascente do rio principal.

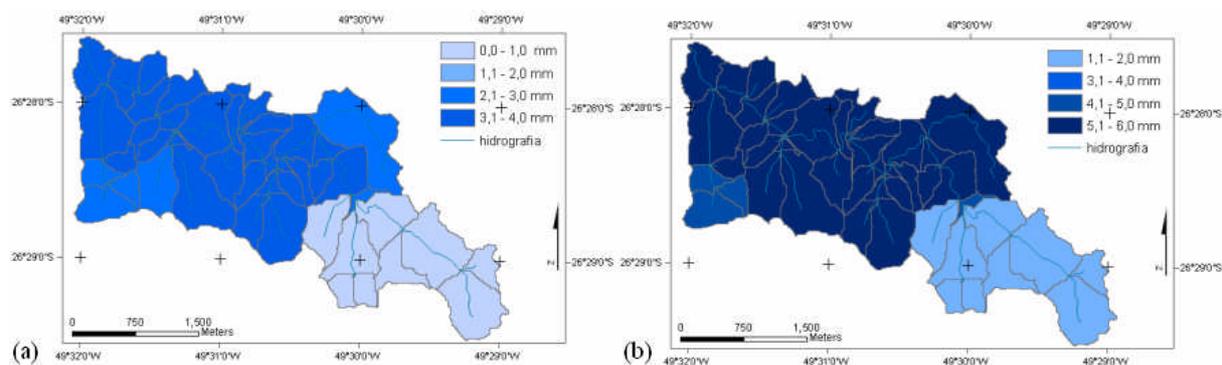


Figura 6 – Produção de água: (a) julho de 2007; e (b) dezembro de 2007.

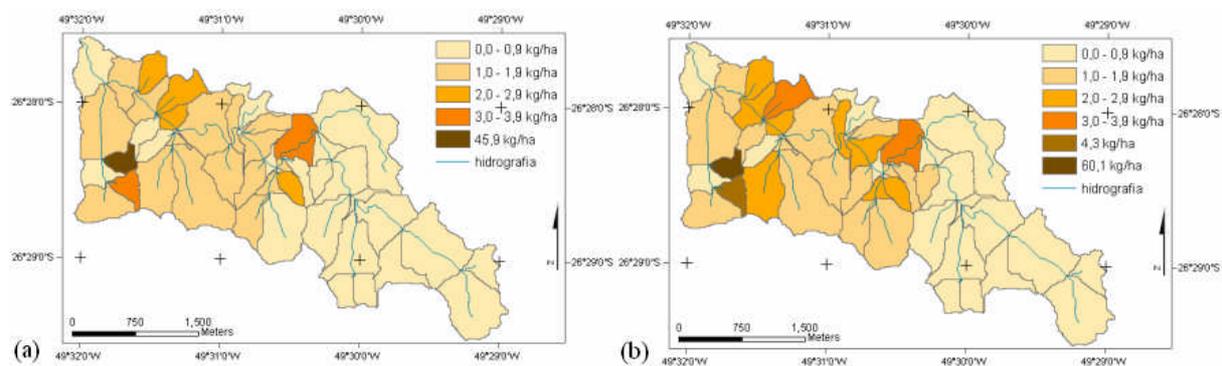


Figura 7 – Produção de sedimento: (a) julho de 2007; e (b) dezembro de 2007.

As Figuras 8 e 9 apresentam as anomalias e as características geomorfológicas da microbacia M2. Comparando as Figuras 7 e 8, observa-se que os pontos indicados pela seta (na Figura 8) apresentaram um comportamento semelhante entre as anomalias determinadas no curso d'água e a produção de sedimento modelada pelo SWAT, principalmente, para o mês de dezembro que apresentou maior precipitação.

Entre quinze pontos anômalos determinados nos cursos d'água, seis coincidiram em representar o exutório das sub-bacias que obtiveram produção de sedimento variando de 2 a 3,9 kg/ha. A baixa relação encontrada entre as características geomorfológicas e o modelo SWAT pode ser atribuída pelo fato no qual a calibração do modelo foi realizada em um único exutório, e/ou pela não realização da calibração da produção de sedimentos. Por isso, as investigações em campo devem ser realizadas para que estas relações sejam afirmadas.

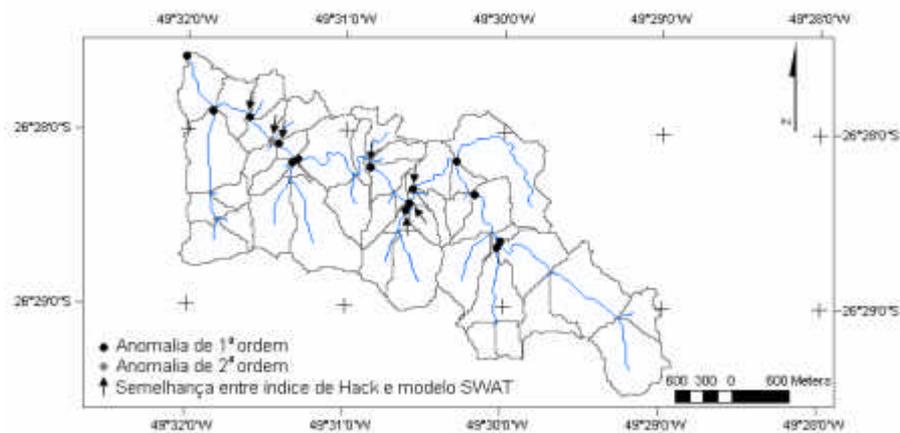


Figura 8 – Anomalias encontradas na microbacia M2.

O valor das anomalias encontradas no rio principal mostra que ocorreu apenas uma anomalia de 2ª ordem ( $RDEs/RDEt > 10$ ). O índice de Hack mostra que nesta seção há uma grande probabilidade de ocorrência de erosão. Na modelagem esta seção do rio corresponde ao exutório da sub-bacia de 0,08 ha que apresentou baixa produção de sedimento (0,2 kg/ha). Segundo Strahler (1964), a curva hipsométrica da microbacia é caracterizada pelo estágio de equilíbrio em relação ao ciclo de erosão.

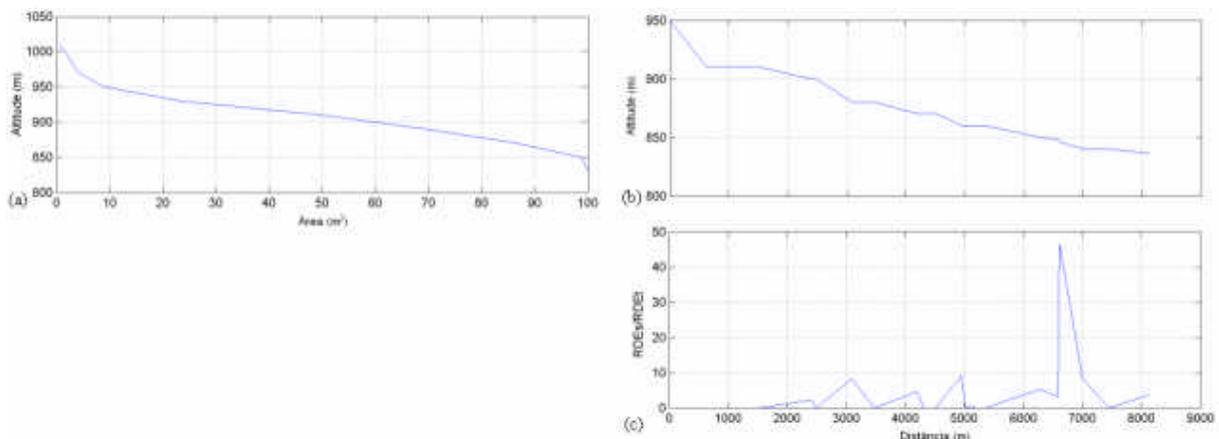


Figura 9 – Características geomorfológicas da microbacia M2: (a) Curva hipsométrica; (b) Perfil longitudinal do rio principal; (c) Relação entre o  $RDE_{segmento}/RDE_{total}$  do rio.

Observa-se a relação entre o perfil longitudinal e o  $RDEs/RDEt$  e nota-se que o rio principal apresentou em seis segmentos a capacidade de erodir e/ou transportar sedimento.

## 5. Considerações Finais

O modelo obteve um resultado satisfatório, apesar da superestimação nos meses secos e da subestimação no mês úmido. A curva hipsométrica da M2 é caracterizada pelo estágio de equilíbrio em relação ao ciclo de erosão. Em quinze pontos anômalos determinados

nos cursos d'água, seis coincidiram em representar o exutório das sub-bacias que obtiveram produção de sedimento variando de 2 a 3,9 kg/ha. O rio principal apresentou em seis pontos a capacidade de erodir e/ou transportar sedimento e foi encontrada uma anomalia de 2ª ordem. O índice de Hack mostra que nesta seção há uma grande probabilidade de ocorrência de erosão. Na modelagem, esta seção do rio corresponde o exutório da sub-bacia de 0,08 ha que apresentou baixa produção de sedimento (0,2 kg/ha).

### **Referências bibliográficas**

- DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. (2002) ArcView interface for SWAT2000 - User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 351p.
- EMBRAPA. (2004) Solos do estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro : Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. n. 46. 745p.
- EPAGRI/CIRAM. (2006) Zoneamento agroecológico e socioeconômico. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br:8080/cms/zoneamento/zae.jsp>>. Acesso em: 21 jul. 2006. 1010p.
- ETCHEBEHERE, M.L.C.; SAAD, A.R.; SANTONI, G.; CASADO, F.C.; FULFARO, V.J. (2006) Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do rio do Peixe, região ocidental paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. *Geociências*. São Paulo, 25:271–287.
- GOLDRICK, G.; BISHOP, P. (2007) Regional analysis of bedrock stream long profiles: evaluation of Hack's SL form, and formulation and assessment of an alternative (the DS form). *Earth Surface Processes and Landforms*. 32:649–671.
- HACK, J. T. (1973) Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal Research of the U. S. Geol. Survey*. 1:421- 429.
- KOBIYAMA, M.; CHECCHIA, T.; CORSEUIL, C.W.; LINO, J.F.L.; LOPES, N.H.Y.; GRISON, F.; CHAFFE, P.L.B.; MALUTTA, S.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R.; BASSO, S. (2007) Forest hydrology project (UFSC–MOBASA) for water resources management in Rio Negrinho City, Santa Catarina, Brazil. In: VAN de GIESEN, N.; XIA, J.; ROSBJERG, D.; FUKUSHIMA, Y. (eds.) *Changes in Water Resources Systems: Methodologies to Maintain Water Security and Ensure Integrated Management*. IAHS. Wellington, 315:250-257.
- McKEOWN, F. A.; JONES-CECIL, M.; ASKEW, B. L.; McGRATH, M. B. (1988) Analysis of stream-profile data and inferred tectonic activity, Eastern Ozark Mountains region. *U. S. Geol. Survey Bulletin*. Denver, 1807:1–39.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2005) Soil and water assessment tool - Theoretical documentation version 2005. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. 541p.
- SEEBER, L.; GORNITZ, V. (1983) Rivers profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*. 92:335-367.
- STRAHLER, A. N. (1964) Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V.T. *Handbook of applied hydrology*. Nova Iorque: Mc-Graw-Hill, 39–75.