

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

EFEITO DO RELEVO E DO USO DA TERRA NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA EM SC

Warlen Librelon de Oliveira¹; Camila Fatima Rutkoski¹; Pedro Thiago Venzon¹; Adilson Pinheiro¹

RESUMO – O presente estudo tem por objetivo realizar a simulação distribuída da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jacutinga-SC, com foco na análise da influência do uso da terra e da declividade do terreno. O modelo apresentou um desempenho satisfatório através do indicador COE de 0,68 e 0,62 obtidos para a calibração hidrológica e sedimentológica. Observou-se uma alta correlação da produção de sedimentos quando comparados com a vazão média, obtendo valores de 0,943 e 0,939 para calibração e validação, respectivamente. Verificou-se que a declividade é um dos parâmetros mais importantes no processo de produção de sedimentos aliado ao uso da terra. A modelagem com o software SWAT model demonstrou ser um importante instrumento para simulação de produção de sedimentos, apresentando valores que representam forte relação com o uso da terra, declividade e sazonalidade da bacia do Rio Jacutinga.

ABSTRACT– The aim of this study was to carry out the distributed simulation of sediment production in the hydrographic basin of the Rio Jacutinga-SC, focusing on the analysis of the influence of land use and the slope of the land. The model presented a satisfactory performance through the COE indicator of 0.68 and 0.62 obtained for the hydrological and sedimentological calibration. There was a high correlation of sediment production when compared to the average flow, obtaining values of 0.943 and 0.939 for calibration and validation, respectively. It was found that the slope is one of the most important parameters in the sediment production process combined with land use. Modeling with the SWAT model software proved to be an important instrument for simulating sediment production, with values that represent a strong relationship with land use, slope and seasonality in the Jacutinga River basin.

Palavras-Chave – Sedimentos; Erosão; Perda de solo

1. INTRODUÇÃO

O uso e ocupação da terra em uma bacia hidrográfica influenciam fortemente o escoamento superficial e a produção de sedimentos (Macedo *et al.* 2012). A perda de solos é potencializada por atividades antrópicas que degradam fatores de proteção da superfície terrestre (Carvalho *et al.* 2009; Macedo *et al.* 2012; Zanin *et al.* 2018). Vários fatores influenciam na erosão, como o tipo de solo, o escoamento superficial, a declividade, o comprimento da rampa e a erodibilidade (Carvalho, 2008). Desses, o escoamento superficial merece destaque, visto que é aumentado com a redução da

1) Fundação Universidade Regional de Blumenau – FURB, Blumenau- SC, Brasil. warlen@librelon.com.br; camilarutkoski@hotmail.com; pedro.thiago@hotmail.com; pinheiro@furb.br

capacidade de infiltração no solo e da evapotranspiração (Tucci e Clarke, 1997). A erosão mais comum de ocorrer é a erosão hídrica, abrangendo praticamente toda a superfície terrestre e tendo destaque em regiões com clima tropical onde há um aumento no processo em função da alta pluviosidade que ocorre em certas estações do ano (Caprario *et al.* 2017).

A declividade influencia na produção de sedimentos pois os diferentes graus de inclinação existentes no terreno afetam a velocidade do escoamento superficial (Colavite e Dos Passos, 2012). Nas regiões mais elevadas de uma bacia hidrográfica ocorre maior erosão e transporte de sedimentos devido à alta declividade que favorece o aumento da velocidade de escoamento em eventos de chuvas intensas (Kramer e Meyer, 1969). Associado à declividade, alterações no uso e cobertura da terra também provocam o aumento do escoamento superficial e elevam o transporte de sedimentos do meio terrestre para o aquático (Seitzinger *et al.* 2005), o que pode causar danos aos organismos, encarecer o tratamento de água, reduzir a vida útil de reservatórios e causar assoreamento dos rios (Kondolf *et al.* 2014).

Em locais que não há ou é raro o monitoramento hidrossedimentológico, o uso de modelos hidrológicos baseados fisicamente auxilia na estimativa da produção de escoamento superficial e da perda do solo (Carvalho Neto *et al.* 2011). O modelo hidrossedimentológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um destes modelos e pode ser integrado ao Sistema de Informações Geográficas (SIG), levando em consideração a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica (Silva *et al.* 2017) e avaliando o efeito da água e dos diferentes usos da terra no escoamento superficial e na produção de sedimentos (Silva *et al.* 2018).

Estudos mostram que os usos da terra e o relevo afetam a produção de sedimento. Zabaleta *et al.* (2007) demonstraram que a disponibilidade do sedimento está diretamente relacionada ao uso da terra, ocorrendo baixa disponibilidade em áreas de floresta nativa. Baucke, Pinheiro e Kaufmann (2019) verificaram que apesar das estradas rurais representarem uma pequena área na bacia hidrográfica interferem na vazão e na produção de sedimentos. Lelis e Calijuri (2010) constataram que a área urbana é responsável pela maior produção de sedimentos na bacia e caso houvesse a substituição da área de pastagens por plantio de eucaliptos diminuiria a geração de sedimentos. Arroio Junior, Kuwajima e Mauad (2013) observaram que declividades acentuadas, associadas a áreas com fragmentos de vegetação nativa e com solos de moderada a alta erodibilidade promovem maior transporte de sedimentos.

A bacia hidrográfica do rio Jacutinga está localizada na região oeste do estado de Santa Catarina, sendo caracterizada por possuir períodos de intensa pluviosidade, ter relevo íngreme com

alta declividade e ser composta por municípios considerados polos agrícolas do estado devido a criação de animais e produção de grãos (PRHSC, 2006). Como a produção de sedimentos pode estar relacionada com as atividades antrópicas que causam alterações na paisagem e com a alta declividade e pluviosidade, o objetivo desse estudo foi realizar a simulação distribuída da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Jacutinga-SC a partir da calibração de dados medidos de vazão e sedimentos, utilizando o modelo SWAT.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Jacutinga (Figura 1) está localizada no meio-oeste de Santa Catarina, é composta por 18 municípios e possui uma área de 2.466,31 km² (PERH-SC, 2006). As atividades econômicas desenvolvidas na bacia são a pecuária de suínos e aves em maior parte, produção de grãos, hortifrutigranjeiros e reflorestamento com espécies exóticas (IBGE, 2011).

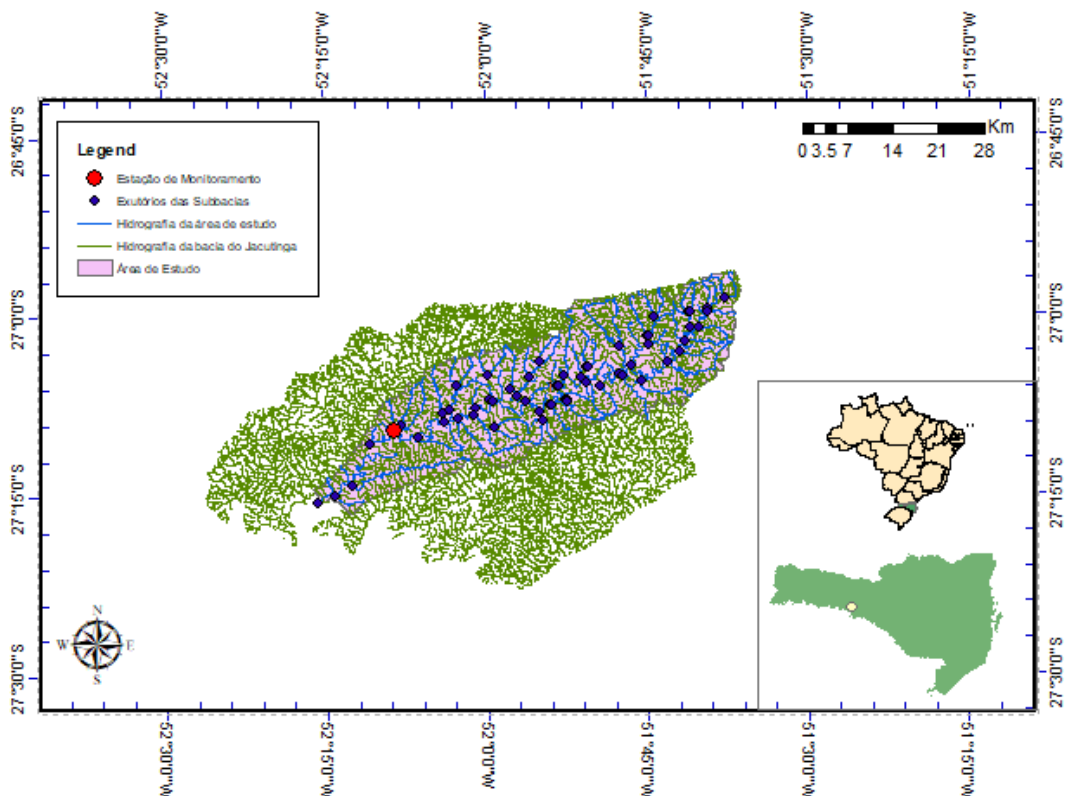


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Jacutinga, área de estudo e Estação Fluviométrica UHE Itá.

O clima predominante é o subtropical (mesotérmico úmido e verão quente), presente em 64,76% da área da bacia seguido do clima temperado (mesotérmico úmido e verão ameno) que ocupa

35,03% da área (EPAGRI, 2002). A temperatura média anual varia de 10 a 27°C, a precipitação de 1.700 a 2.100 mm, a umidade relativa do ar de 76 a 80% e a evapotranspiração de 700 a 1.000 mm/ano (PERH-SC, 2006).

A unidade geológica que predomina na bacia do Rio Jacutinga é a Paranapanema (87,37%), seguida da Formação Serra Geral (8,18%) (PERH-SC, 2006). Todas as classes de declividade ocorrem na bacia, com predominância para a classe de declividade forte e muito forte em 29,66 e 24,44% da área, respectivamente, sendo um fator importante para a erodibilidade do solo (PERH-SC, 2006). A bacia possui área de floresta de 48,23%, sendo 41,68% de floresta em estágio médio, avançado e primário, 0,05% de floresta em estágio pioneiro e 6,50 % de área reflorestada (IBGE (2010) *apud* Filipini, 2013). Em termos de susceptibilidade dos solos a erosão, 52,57% da área classificada possui alto grau de erodibilidade, 35% baixo e 11,2% médio (PERH-SC, 2006).

2.2 Modelo SWAT

Os softwares utilizados foram o ArcGIS e a extensão livre ArcSWAT, ambos versão 10.5. As rotinas de cálculo do modelo foram fundamentadas na divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias e dessas em HRUs, totalizando 105 e 376 respectivamente. As simulações foram feitas em duas etapas, a primeira na fase do terreno, onde foi verificada a afluência da água e sedimentos no leito principal de cada sub-bacia e, a segunda relacionada com o deslocamento da água e sedimentos ao longo de toda a bacia hidrográfica até o exutório (Baucke; Pinheiro; Kaufmann, 2019). Os fenômenos simulados pelo SWAT são controlados principalmente pela equação do balanço hídrico (Equação 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

onde SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm); SW_0 é o conteúdo inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo (dias); R_{day} é a precipitação no dia i (mm); Q_{surf} é o escoamento no dia i (mm); E_a é a evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} é a quantidade de água que entra na zona vadosa percolada através do perfil (mm) e Q_{gw} é a quantidade de água que retorna ao curso da água no dia i por causa do escoamento subsuperficial (mm).

Para o cálculo da erosão na bacia hidrográfica foi utilizada a equação (2) universal de perda no solo:

$$sed = 11,8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0,56} * K * C * P * LS * CFRG \quad (2)$$

onde sed é a produção de sedimentos (ton/dia); Q_{surf} é o volume do escoamento superficial (mm/ha); q_{peak} é o índice máximo do escoamento (m³/s); $area_{hru}$ é a área de HRU (ha); K é o fator de

erodibilidade do solo USLE; C é o fator de cobertura e gestão USLE; P é o fator de prática de apoio USLE; LS é o fator topográfico USLE e o $CFRG$ é o fator de fragmento bruto.

O escoamento superficial foi calculado pelo método da curva número do *Soil Conservation Service*, a vazão foi obtida pelo método racional (Neitsch *et al.* 2011) e a evapotranspiração foi calculada através do método de Samani (2000).

O processo de calibração e validação se deu em duas etapas, sendo a primeira com dados de vazão e a segunda com dados de concentração de sedimentos. A série histórica de concentração de sedimentos obtidos através da estação fluviométrica citada, não possuía dados diários suficientes para execução do procedimento de calibração e simulação. Dessa forma, foi necessário criar a curva chave de sedimentos com base nas concentrações de sólidos suspensos (h_0) e da vazão (x), obtendo-se os valores através da equação (3).

$$y = 0,0369 * (x - h_0)^2 - 0,7249 * x + 17,507 \quad (3)$$

Para que o modelo excluísse eventuais problemas de condição inicial foram usados os três primeiros anos (2008-2009) como aquecimento. A calibração foi feita manualmente por tentativa e com o uso do software Swat-Cup, realizando-se várias simulações até obter a calibração desejada. Para tanto, foram utilizados dados de vazão, obtidos da estação fluviométrica de monitoramento UHE Itá – SC, de janeiro de 2010 a dezembro de 2013 e para os sedimentos, de janeiro de 2010 a dezembro de 2014. A validação foi feita utilizando-se os dados de vazão medidos no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015 e para os sedimentos de janeiro a dezembro de 2015. Para comparar os dados medidos e simulados, bem como avaliar a confiabilidade das simulações foram utilizados o coeficiente de Nash-Stucliffe (COE) e o *percent bias* (PBIAS).

O processo de construção das HRUs dentro de cada sub-bacia pelo software SWAT, considerou apenas a declividade de forma discretizada. Em relação aos dados de usos da terra, o software considerou um uso por sub-bacia, atribuindo à mesma o uso da terra de maior relevância.

Foi usado o software R para as os cálculos de correlação entre as variáveis, através do método de Pearson's, para um intervalo de confiança de 95%.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os hidrogramas de calibração (A) e validação (B) do modelo para a bacia do Rio Jacutinga estão apresentados na Figura 3, correspondendo ao período de 2010 a 2014 e 2015, respectivamente. O COE para a calibração foi de 0,68 e o PBIAS foi de -34% e para a validação 0,08 e -56%, respectivamente. Para a simulação sedimentológica, a calibração (Figura 3 - C) corresponde ao

período de 2010 a 2014 e a validação (Figura 3 - D) no ano de 2015. Ambos para os anos completos. O COE e PBIAS para a calibração foi de 0,62 e 0% e para a validação de 0,07 e -8%, respectivamente. O COE de 0,68 e 0,62 obtidos para a calibração hidrológica e sedimentológica indicam um desempenho satisfatório do modelo de acordo com Moriasi *et al.* (2007). Os valores negativos de PBIAS encontrados sugerem uma superestimação do modelo (Brighenti; Bonumá; Chaffe, 2016). Os baixos valores de COE para a validação do modelo estão associados a dificuldade em o modelo realizar a simulação nos picos de cheias.

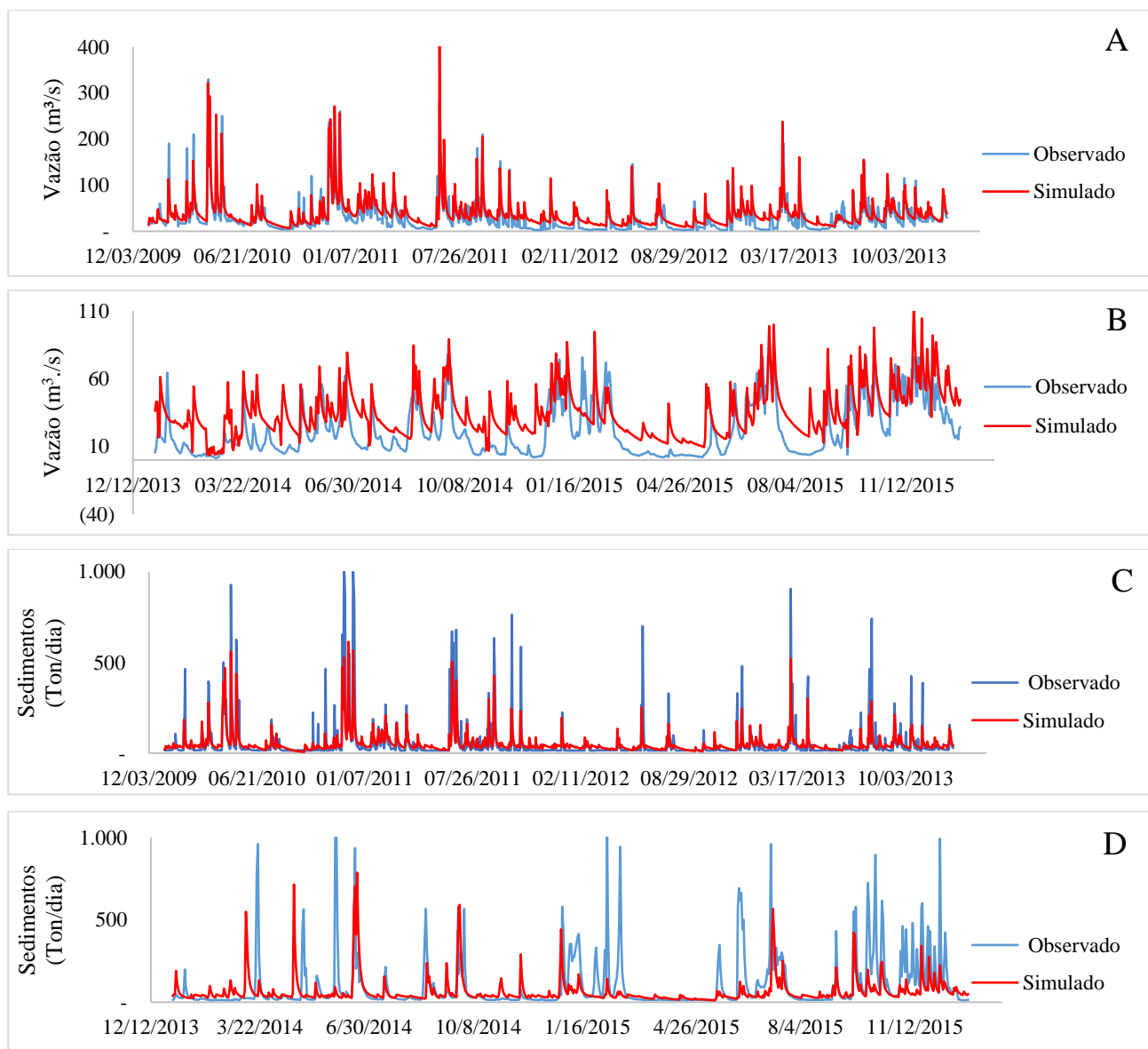


Figura 3 – Hidrogramas de calibração (A) e validação (B) e sedimentogramas de calibração (C) e de validação (D) para a bacia do Rio Jacutinga

O coeficiente de correlação de Pearson entre a taxa de produção de sedimentos e a vazão média mensal (Tabela 1) para a etapa de calibração foi de 0,939 e para a validação de 0,936. De acordo com Montgomery e Runger (2003), quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente, maior é a relação entre as variáveis. Com isso, houve alta correlação entre a taxa de produção de sedimentos e a vazão média, verificando-se que a maior produção de sedimentos ocorreu nos meses que as precipitações foram mais intensas e que possuem as maiores vazões, sendo março, abril e junho no período de calibração e em julho, setembro e dezembro no período de validação (Tabela 1). Esses resultados corroboram com o estudo de Zabaleta *et al.* (2007) que obteve boa correlação entre precipitação, vazão e a produção de sedimentos.

Tabela 1- Relação entre percentual de produção de sedimentos com vazão média mensal

Mês	Calibração		Validação	
	Sedimentos (Ton.ha ⁻¹)%	Vazão média (m ³ /s)	Sedimentos (Ton.ha ⁻¹)%	Vazão média (m ³ /s)
Janeiro	4,10	38,89	5,17	69,46
Fevereiro	6,05	44,27	5,09	52,36
Março	13,13	57,71	0,53	36,76
Abril	15,18	63,78	1,25	37,17
Mai	5,13	34,36	3,04	39,06
Junho	17,20	84,52	7,21	51,32
Julho	5,59	38,64	21,04	133,73
Agosto	4,24	37,28	3,30	40,87
Setembro	7,68	52,33	19,89	111,13
Outubro	4,77	39,51	9,55	92,78
Novembro	7,54	43,63	16,65	114,51
Dezembro	9,40	57,82	7,29	92,77

Através dos dados de produção de sedimentos e área no período de validação em relação a declividade (Figura 4), identificou-se uma forte correlação com base no método de Pearson's com um valor de 0,988, demonstrando assim que a área é um parâmetro importante nas análises.

Na Figura 4A é demonstrada a importância da declividade no processo de produção de sedimentos como um parâmetro de destaque na equação universal de perda de solo, como também mostra a correlação com a área. Para figura 4B, houve um destaque para a declividade de 14 a 24% devido a uma menor área e conseqüentemente uma taxa maior que as demais. A figura 4C confirma as observações anteriores onde a declividade assume uma relevância no processo de produção de sedimentos.

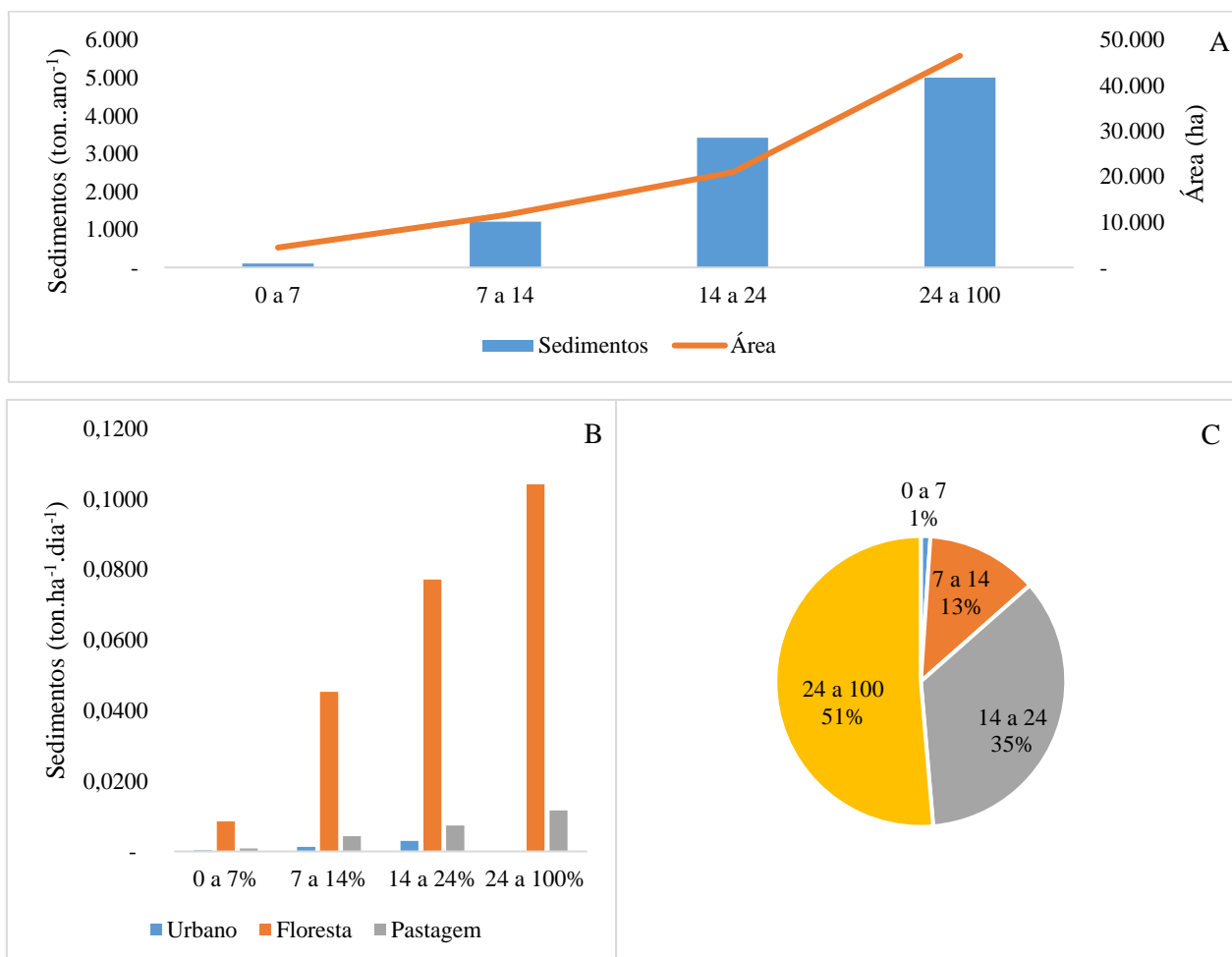


Figura 4 – Relação entre área, produção de sedimento por faixa de declividade (A), relação entre usos da terra, produção de sedimentos e faixa de declividade (B) e percentual de produção de sedimento por faixa de declividade. Ambos referentes ao período de calibração.

Observa-se na figura 4-B que todos os usos da terra relacionados com as faixas de declividade, possuem uma taxa média diária de produção de sedimentos crescente por área à medida que a declividade aumenta, reforçando o que os estudos apresentam. Porém é importante destacar que a diferença extrema entre floresta e os demais usos da terra está relacionado com a forma que o modelo discretizou a área de estudo, considerando os usos da terra por sub-bacia, enquanto a declividade foi por HRU. Com essa forma de discretização, a produção de sedimento teve uma maior representatividade para a floresta.

4. CONCLUSÃO

A modelagem com o software SWAT model demonstrou ser um importante instrumento para simulação de produção de sedimentos, apresentando valores que representam forte relação com o uso

da terra, declividade e sazonalidade da bacia do Rio Jacutinga. A maior produção de sedimentos ocorreu nos meses de chuvas intensas e com as maiores vazões. Identificou-se também influência do aumento da declividade com o aumento da taxa de produção de sedimentos, destacando assim a importância dessa variável na equação universal de perda de solo. Diante dessas observações e resultados, pode-se inferir a importância na preservação das áreas de encostas como já previsto nas legislações, acrescentando que áreas declivosas e desprotegidas podem produzir outros impactos negativos ao meio ambiente além dos já conhecidos, sendo esses mais intensos. Levando em consideração à forma de discretização que o modelo executou referente ao uso da terra, abre uma oportunidade para uma modelagem específica para o uso da terra, como forma de observar com mais detalhes tais influências na produção de sedimentos.

REFERÊNCIAS

- ARROIO JUNIOR, P. P.; KUWAJINA, J. I.; MAUAD, F.F. (2013). “Avaliação da produção de sedimentos em uma bacia de pequeno porte por meio do simulador Swat” in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Nov. 2013, pp. 1-8
- BAUCKE, A. S.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. (2019). *Contribuição hidrossedimentológica das estradas rurais em bacias hidrográficas com pequenas e médias propriedades*. Revista Brasileira de Ciências Ambientais (online) (53), pp. 13-32.
- BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. (2016). *Calibração hierárquica do modelo Swat em uma bacia hidrográfica Catarinense*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (21-1), pp.53-64.
- CAPRARIO, J.; RECH, A. S.; CAPRARIO, G. N.; FINOTTI, A. R. (2017). *Hydrossedimentological Simulation of the Quatorze River Watershed, Francisco Beltrão (Paraná, Brazil)*. Anuário do Instituto de Geociências – Ufrj (40-1), pp. 102-114.
- CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. (2011). *Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDES, de duas pequenas sub-bacias no Cariri Paraibano utilizando o modelo SWAT*. Revista Geográfica Acadêmica (5-1), pp. 48-58.
- CARVALHO, D.F.; CRUZ, E.S.; PINTO, M.F.; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M. (2009). *Características da chuva e perdas por erosão sob diferentes práticas de manejo do solo*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (13-1), pp.3-9.
- CARVALHO, N. de O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: Interciência. 372 p.
- COLAVITI, A. P.; DOS PASSOS, M. M. (2012). *Integração de mapas de declividade e modelos digitais tridimensionais do relevo na análise da paisagem*. Revista Geonorte (2-4), pp.1547-1559.
- EPAGRI. (2002). Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. *Levantamento Agropecuário Catarinense 2002-2003*. Disponível em: http://cepa.epagri.sc.gov.br/Dados_do_LAC/lac_indice.htm. Acesso em: 12 maio 2020.
- FILIPINI, G.T.R (2013). *Os recursos hídricos na bacia do Rio Jacutinga, meio oeste de SC: o uso da terra e a qualidade das águas*. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 256 p.
- IBGE. (2011). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Banco de Dados*. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/cidadesat>. Acesso em 14/05/2020.

- KRAMER, L. A.; MEYER, L. D. (1969) *Small ammounts of surface mulch reduce soil erosion and runoff velocity*. Transactions of the ASAE, St. Joseph (12), pp.638-641.
- KONDOLF, G. M.; RUBIN, Z. K.; MINEAR, J. T. (2014). *Dams on the mekong: cumulative sediment starvation*. Water Resources Research (50- 6), pp. 5158–5169.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. (2010). *Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT*. Revista Ambiente & Água (5-2), pp.158-174.
- MACEDO, F. L.; JÚNIOR MÉLLO, A. V.; MARCELLINI, S. S.; PEDROTTI, A. (2012) *Modelagem da produção de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do riacho Jacaré- SE*. Revista RA'EGA. (24), pp.272-289.
- MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons - USA, 811 p.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transactions of the Asabe (50-3), pp. 885-900.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; GRASSLAND, J.R.W. (2011). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation*. Texas: Texas Water Resources Institute, 647 p.
- PERH-SC. (2006). *Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina*. Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/>. Acesso em: 15 maio 2020.
- SAMANI, Z. (2000). *Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (126-4), pp. 265-267.
- SEITZINGER, S. P.; HARRISON, J. A.; DUMONT, E.; BEUSEN, A. H. W.; BOUWMAN, A. F. (2005). *Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: an overview of global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application*. Global Biogeochemical Cycles (19-4), pp. 1–11.
- SILVA, A. K. L.; SOUSA, A.M.L. de; SANTOS, J.T.S. dos; VILLELA, J.M.; MARTORANO, L. G.; CRESTANA, S. (2018). *Estimation of sediment production in oil palm expansion areas in the Amazon*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (22-5), pp. 344-348.
- SILVA, M.; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, V. R. da; SILVA, B. K. N.; MARIANO, E. B.; AMORIM, M. R. B. (2017). *Estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco*. Journal Of Environmental Analysis And Progress (2-3), pp. 203-211.
- TUCCI, C.E. M.; CLARKE, R.T. (1997). *Impacto das Mudanças da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (2-1), pp. 135-152.
- ZABALETA, A.; MARTÍNEZ, M.; URIARTE, J. A.; ANTIGÜEDAD. (2007). *Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country*. Catena (71-1), pp. 179-190.
- ZANIN, P.R.; BONUMA, N.B.; CORSEUIL, C.W. (2018) *Hydrosedimentological modeling with SWAT using multi-site calibration in nested basins with reservoirs*. Brazilian Journal of Water Resources (23), p. 1-26.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil (Código de Financiamento 001), a FAPESC (processo 2016TR2525) e ao CNPq (Processo 309980/2017-8).