XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão
De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

COMBINAÇÃO DE UM MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS E SIG NA ESTIMATIVA DE PERDA DO SOLO

Luis Hernando Walteros Galarza[1]; Nadia Bernardi Bonumá[2]; Ana Clara Lazzari Franco[3].*

Universidade Federal de Santa Catarina UFSC – Engenharia Sanitária e Ambiental
Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima- Bairro Trindade - Florianópolis - Santa Catarina - Brasil CEP: 88040-900.

Resumo: O objetivo do presente trabalho é estimar a perda de solo na bacia hidrográfica do Itacorubi, Florianópolis, SC. Foi aplicada a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) juntamente com um modelo de Dinâmica de sistemas (DS). Os resultados obtidos foram combinados com mapas em uma plataforma SIG, identificando as zonas de origem dos sedimentos, com o intuito de dar suporte a tomada de decisão em relação às zonas mais afetadas. Com o modelo proposto, estimaram-se, com dados hidrológicos do ano de 2014, quantidades anuais totais de perda de solo (3.601 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$), e máximas diárias acumuladas (468 $t.ha^{-1}.dia^{-1}$) nas áreas com maior declividade e atividades antrópicas. Os resultados obtidos com o uso integrado da modelagem de DS e SIG podem fornecer um entendimento mais amplo das variáveis que influenciam no potencial erosivo e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas urbanas.
Palavras-Chave: Erosão do solo; Dinâmica de Sistemas (DS); SIG.

COMBINATION OF A SYSTEM DYNAMICS MODEL AND GIS IN SOIL LOSS ESTIMATE

Abstract: The objective of this study is to estimate the soil loss in Itacorubi watershed, located in Florianópolis, SC, applying the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and the methodology of the Dynamic Systems. Physical models can be programmed using the methodology of System Dynamics (DS), structured to quantitatively analyze the trend and development of variables. The estimated results were combined with maps in a Geographic Information System (GIS), identifying sediment source areas in order to support decision making on those areas. With the proposed model, it was estimated that, according to hydrological and geographic data of the year 2014, the total annual amounts of soil loss was (3.601 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$), with a daily maximum (468 $t.ha^{-1}.dia^{-1}$) on areas with higher slopes and urban activity. The GIS-DS interaction provides a better understanding of the variables that influence the erosive potential of the basin.
Keywords: Soil erosion; System Dynamics (SD); GIS.

[1] Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis/SC. Engenheiro Industrial, (UMNG) (Bogotá-Colômbia), e-mail: sanjulwal@hotmail.com
[2] Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, e-mail: nadia.bonuma@ufsc.br
[3] Mestranda do PPGEA, UFSC, e-mail: ana.franco@posgrad.ufsc.br

INTRODUÇÃO

As ações antrópicas exercem influência significativa sobre bacias hidrográficas podendo provocar o aumento da magnitude e frequência das inundações, erosão das margens, deslizamento de encostas e a degradação da qualidade da água. Alterações no uso e ocupação do solo em bacias urbanizadas resultam em impactos diretos no escoamento superficial, e consequentemente, na erosão hídrica e no transporte de sedimentos. Segundo Guy (1967), grande parte dos sedimentos existentes nas áreas urbanas são oriundos de locais privados, porém, quando atingem os leitos dos rios tornam-se um problema público.

Modelos como a Equação Universal da Perda de Solo (USLE), a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) ou a Equação Universal da Perda de Solo Revisada (RUSLE) são frequentemente utilizadas para a estimativa da erosão superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas (Manoj e Umesh, 2000). As estimativas da perda de solo e do transporte de sedimentos estão relacionadas com a variabilidade espacial das precipitações e heterogeneidade da área de captação da bacia, entretanto a quantidade de elementos necessários para descrever o comportamento das variáveis envolvidas pode dificultar o entendimento do sistema como um todo.

A modelagem da dinâmica de sistemas possibilita estudar sistemas complexos considerando todos seus elementos constituintes simultaneamente. Assim, a dinâmica de sistemas permite a construção de modelos que trazem uma análise cuidadosa dos elementos do sistema considerando características importantes como avaliação das variáveis, desenvolvimento de estratégias, tomada de decisões e planejamento de cenários reais (Forrester, 2011). Winz et al. (2008) ressaltam que os modelos de dinâmica de sistemas podem ser utilizados para resolver de forma dinâmica os complexos problemas relacionados com a gestão de recursos hídricos. Associado a isso segundo Manoj e Umesh (2000) o uso de metodologias de Sistema de Informações Geográficas (SIG) é adequado para a quantificação da heterogeneidade das características topográficas e de drenagem em uma bacia hidrográfica.

Neste contexto os objetivos deste trabalho foram: a) estimar a erosão do solo utilizando a RUSLE e um SIG para a discretização das características físicas da bacia b) aplicar um modelo de dinâmica de sistemas para analisar os fatores que mais afetam os processos de erosão e deposição na bacia hidrográfica estudada.

Modelagem da dinâmica de sistemas

Nos últimos anos, técnicas de simulação têm sido usadas para prever as principais tendências ambientais, e analisar variáveis hidrológicas de acordo com diferentes cenários. Entre estas técnicas, as ferramentas de dinâmica de sistemas são de grande importância, porque possibilitam as demonstrações das relações interativas e interdependentes entre os parâmetros de entrada. Por exemplo: Vijayakumar e Mohapatra (1992) analisaram as inter-relações, para testar a viabilidade das abordagens alternativas de controle de poluição em um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de uma região carbonífera; Dent et al. (1995) simularam fatores ecológicos, sociais e econômicos em sistemas agrícolas; Guo et al. (2001) simularam o planejamento e gestão ambiental na Bacia Erhai na China; Sudhir et al. (1997) simularam as possíveis alternativas de políticas sustentáveis de gestão de resíduos sólidos urbanos em uma grande cidade da Índia; Karavezyris et al. (2002) simularam a predição dos resíduos sólidos urbanos na Alemanha; Dyson e Chang (2004) simularam a geração de resíduos sólidos em uma região urbana.

No entanto, no campo da predição de erosão do solo, a dinâmica de sistemas não tem sido amplamente utilizada. Neste estudo, o *software* Stella foi usado como ferramenta orientadora na programação, incorporando todas as equações e conexões.

Considerando o exposto anteriormente, estabeleceu-se para este trabalho o uso da Dinâmica de Sistemas (DS), com o software Stella, como o seu algoritmo principal, empregado para a construção de cenários, modelos e simulações. O software de SIG foi utilizado com o intuito de integrar mapas que contém informações necessárias para a computação e aplicações, integrando, assim, ambos a Dinâmica de Sistemas e o SIG. Ao final, tem-se um modelo computacional interativo e confiável, que permite analisar as variáveis e fatores que influenciam a perda de solo na bacia, bem como interpretar os condicionantes do meio físico que determinam uma maior ou menor susceptibilidade ao processo erosivo.

METODOLOGIA

Mecanismo de integração do modelo

Inicialmente, as informações das características básicas da bacia hidrográfica do Itacorubi foram coletadas, integradas e analisadas por meio do *software* ArcGIS. Parâmetros e coeficientes necessários para a condução das equações fundamentais, como a RUSLE, foram obtidos na literatura. A modelagem da dinâmica de sistemas (DS) foi construída utilizando o software Stella. Com o modelo DS podem ser identificadas as influências entre as principais variáveis e parâmetros, e consequentemente, realizar uma análise de cenários.

Modelagem da erosão do solo

Para estimativa da erosão do solo foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) (equação 1), que foi desenvolvido por Wischmeier e Smith (1965).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

$$R = \sum (EI) \quad (2)$$

$$K: 0{,}00273\, M^{1{,}14}(10^{-4})(12 - ka) + 0{,}00423(kb - 2) + 0{,}00325(kc - 3) \quad (3)$$

$$LS: 0{,}00984\, .\, S^{1{,}18}\, .\, Lx^{0{,}63} \quad (4)$$

Sendo, **A:** Perda anual de solo do solo (ton/ha/ano) devido ao escoamento superficial; **R:** Fator de Erosividade MJ/ha/(mm/h); **K:** Fator de Erodibilidade que varia de 0,03 a 0,79 ton/MJ/ha/(mm/h); **LS:** Fator de declividade e comprimento de encosta (adimensional); **C:** Fator de prática de cultura variando de 0,001 a 1,0 (adimensional); **P:** fator de pratica de cultura contra erosão que varia de 0,3 a 1,0 (adimensional).

Para os fatores **M**: (silte% + areia %+areia muito fina%).(100 - argila%); **ka**: matéria orgânica (%); **kb**: código da estrutura: 1 - granular muito fina; 2 - granular fina; 3 - granular média a grossa; 4 - em blocos, laminar ou maciça; **kc:** classe de permeabilidade do perfil: 1 – rápida;2 - moderada/rápida; 3 – moderada; 4 - lenta/moderada; 5 – lenta,6 - muito lenta. E fatores **S:** declividade média da encosta (%) sendo: S ≤ 35%; **Lx:** comprimento da rampa (m) sendo: 10m ≤ L≤ 180m.

O modelo RUSLE considera variáveis antrópicas, para o fator **C** foi realizado um levantamento bibliográfico. Foram estimados os valores que melhor representavam as classes presentes no mapa de uso e ocupação do solo (Tabela 1). A prática conservacionista, fator **P**, foi identificada segundo a inclinação do solo (Tabela 1).

Agrupando os elementos mencionados da RUSLE, obtemos a estrutura geral de um modelo de dinâmica de sistemas em que cada nível pode se associar com um fluxo de entrada e um fluxo de saída. Em termos matemáticos é equivalente a uma equação integral do saldo entre fluxos ou a uma

equação diferencial (equação 5), do saldo entre taxas de variação de fluxos, que indica a taxa líquida de acumulação do nível (Forrester, 2011), assim:

$$\frac{d(nivel)}{dt} = \text{mundaça liquida no nivel} = \text{fluxo de entrada (t)} - \text{fluxo de saida (t)} \quad (5)$$

Tabela 1 – Valores do fator uso do solo "C" e valores do fator de práticas conservacionistas "P".

Valores de C[1] - Uso da terra	
Plantações	0,080
Florestas virgens (C tende a 0,001)	0,001
Pastagens	0,010
Vegetação natural	0,100
Florestas	0,005
Terras urbanas	0,010
Área desnuda (C tende 1,00)	1,000
Outros	1,3

Valores P[2] para alguns tipos de manejo do solo				
Tipo de manejo	Inclinação do terreno %			
	2 a 7	8 a 12	13 a 18	19 a 24
Plantio morro abaixo	1,0	1,0	1,0	1,0
Faixas niveladas	0,50	0,60	0,80	0,90
Cordões de vegetação permanente	0,25	0,30	0,40	0,45
Terraceamento	0,10	0,12	0,16	0,18

Fonte: [1]Tomaz, 2008; [2]Righetto, 1998

ESTUDO DE CASO

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Itacorubi (BHI), localizada em Florianópolis - SC, foi escolhida para realização deste trabalho devido a sua vulnerabilidade socioambiental às enchentes e processos erosivos. A BHI está localizada na região centro-oeste da Ilha de Santa Catarina (27°34'35" - 27°37'57" de latitude Sul e 48°28'25" - 48°33'00"de longitude Oeste) e abrange os bairros Córrego Grande, Itacorubi, Pantanal, Santa Mônica e Trindade (Figura 1) do município de Florianópolis. Na bacia também se encontra parte do campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

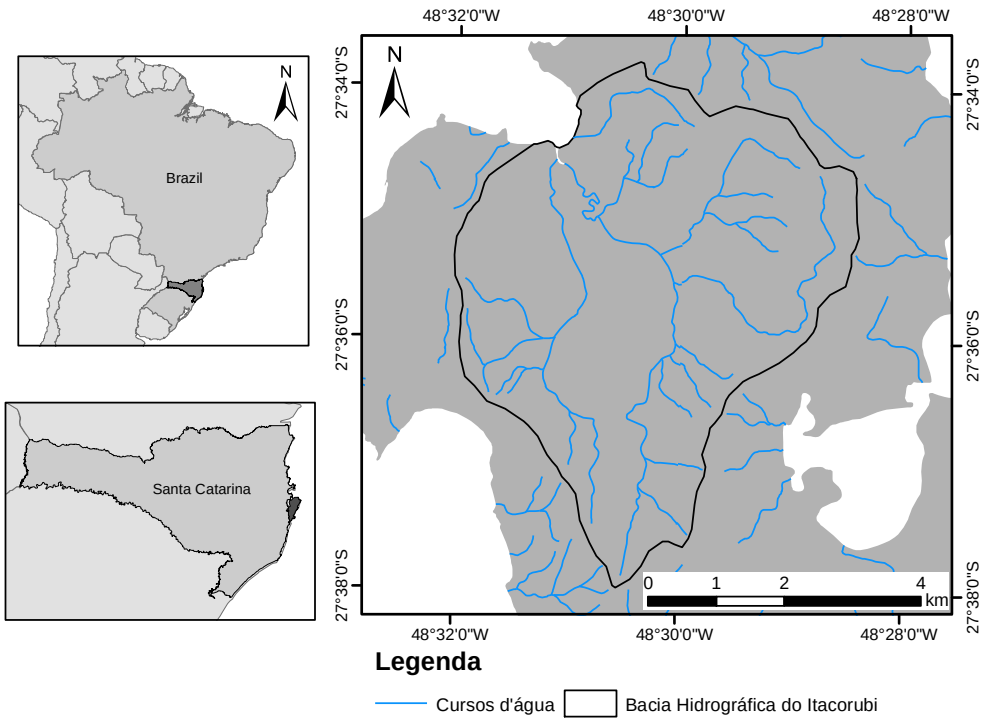


Figura 1- Localização da bacia hidrográfica do Itacorubi.

Foi elaborado o modelo DS, e foram simulados os principais parâmetros da RUSLE (Figura 2). Os fatores R, K, L, S, P, e C conforme as equações 1 a 4 foram estimados. Além disso, foram elaborados mapas no SIG com camadas de informações detalhadas. Os dados de precipitação de duas estações pluviométricas, identificadas como PE1 e PE2, foram interpolados a fim de estabelecer o Fator R (erosividade da chuva).

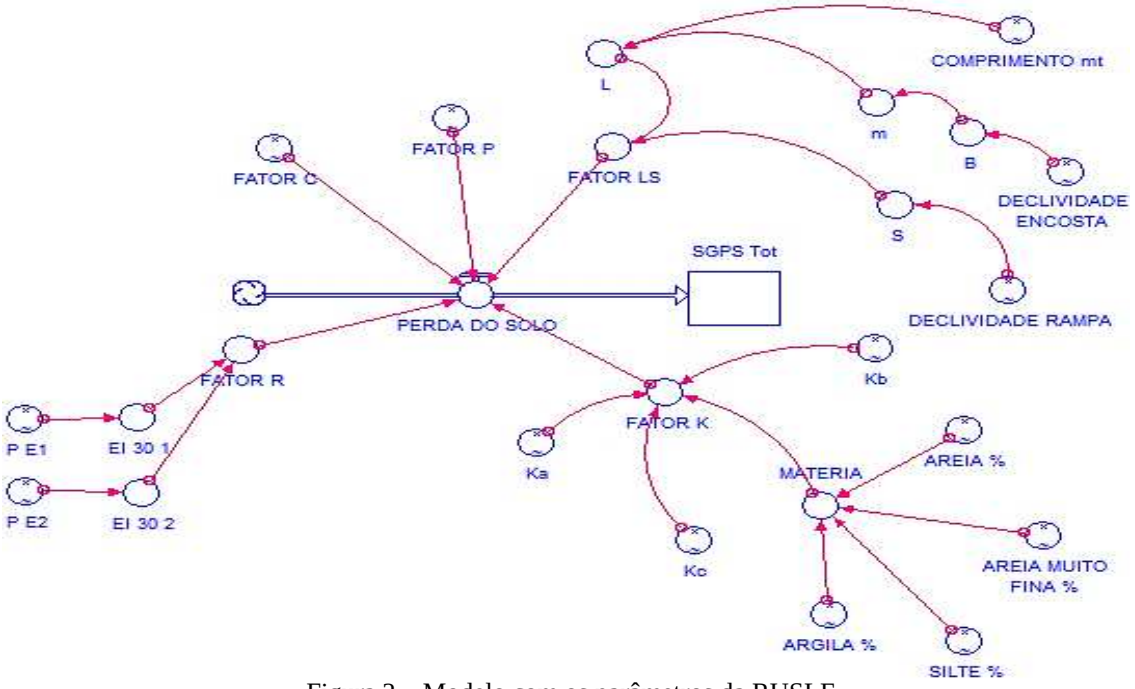


Figura 2 – Modelo com os parâmetros da RUSLE

1.1. Resultados das principais medidas físicas com DS

Na determinação das perdas de solo da área de estudo, os mapas elaborados pelo GIS e gráficas obtidas pela DS representam as variáveis que compõe o modelo RUSLE, combinando as duas simulações a fim de se obter maior aceitabilidade dos resultados.

O fator R foi obtido a partir dos dados de erosividade da chuva para a região e equivale ao valor de 7.381 J.mm.ha^{-1}.ano^{-1}. Os valores do fator K, bem como os parâmetros utilizados na determinação do mesmo, estão apresentados na Tabela 2, divididos conforme os tipos de solos presentes na bacia.

Tabela 2 – Parâmetros físicos e químicos para cálculo da erodibilidade.

TIPO DE SOLO		Argila	Areia muito	Areia	Silte	ka	kb	kc	K
Nome	**Simb.**	**%**	**fina %**	**%**	**%**				**[ton.MJ^{-1}.mm^{-1}]**
Cambissolo	Ca24	15	15	39	31	1	1	1	0,0645
Cambissolo	Ca17	15	15	39	31	1	1	1	0,0645
Cambissolo	Ca24	15	15	39	31	1	1	1	0,0645
Glei Pouco Húmico	HG9a7	6	14	30	50	3,5	2	5	0,0797
Cambissolo	PVa19	3	7	48	42	2,5	3	3	0,0921
Solos Orgânicos	HOa2	26	11	44	19	10	2	5	0,0165
Cambissolo	Ca24	15	15	39	31	1	1	1	0,0645
Solos Indiscriminados	SM	9	54	19	18	6	3	1	0,0457
Glei Pouco Húmico	HG9a7	6	14	30	50	3,5	2	5	0,0797
Solos indiscriminados	SM	9	54	19	18	6	3	1	0,0457

Por meio da espacialização do fator **K** obteve-se um mapa (i.e. Figura 3a) com os valores deste parâmetro para cada tipo de solo. Foi observada a predominância do solo de tipo cambissolo, sendo que o menor valor de erodibilidade foi identificado nos solos orgânicos, que correspondem à classe HOa2, com um valor de 0,0165 ton.MJ^{-1}.mm^{-1}. O maior valor da erodibilidade corresponde ao solo de tipo cambissolo, classe PVa19, com valores de 0,0921 ton.MJ^{-1}.mm^{-1}. Nota-se que a

erodibilidade para ambos os solos foi elevada quando comparada ao mesmo tipo de solo de outras regiões. Correlacionando os valores de **K**, apresentados na Tabela 2, com a cobertura vegetal, pode-se dizer que o menor valor da erodibilidade do solo foi evidenciado em local de solos orgânicos, já o maior corresponde à área urbana do município.

O mapa do fator topográfico **LS** (i.e. Figura 3b) foi construído pela multiplicação dos mapas de comprimento de rampa (L) e de declividade (S), divididos pela área do pixel. O resultado indica um comportamento semelhante ao de bacias com relevos planos, onde os valores relativamente mais baixos prevalecem.

Para o fator **P** (i.e. Figura 3c) o valor adotado segue o descrito na Tabela 1 segundo a inclinação do terreno correspondente, para faixas niveladas.

As variáveis antrópicas consideradas no modelo RUSLE, ou seja, a cobertura vegetal e a prática conservacionista foram identificadas segundo o mapa de uso e ocupação do solo e observações em campo, respectivamente. Já para a elaboração do mapa de cobertura vegetal, primeiramente foi realizado o levantamento das distribuições de usos do solo, para então elaborar o mapa do fator de cobertura **C** (i.e. Figura 3d). É possível notar a predominância do valor 0,01, que, segundo a Tabela 1, corresponde à presença de área urbana. Isto foi coerente com as observações realizadas em campo, onde foi constatada, além de área urbana, a presença de vegetação natural com um fator de 0,1. As menores distribuições de classes de cobertura vegetal ocorreram entre os valores de 0,005 e 0,001 e 0,1, que, ainda segundo a Tabela 1, equivalem a florestas, florestas virgens e vegetação natural, respectivamente.

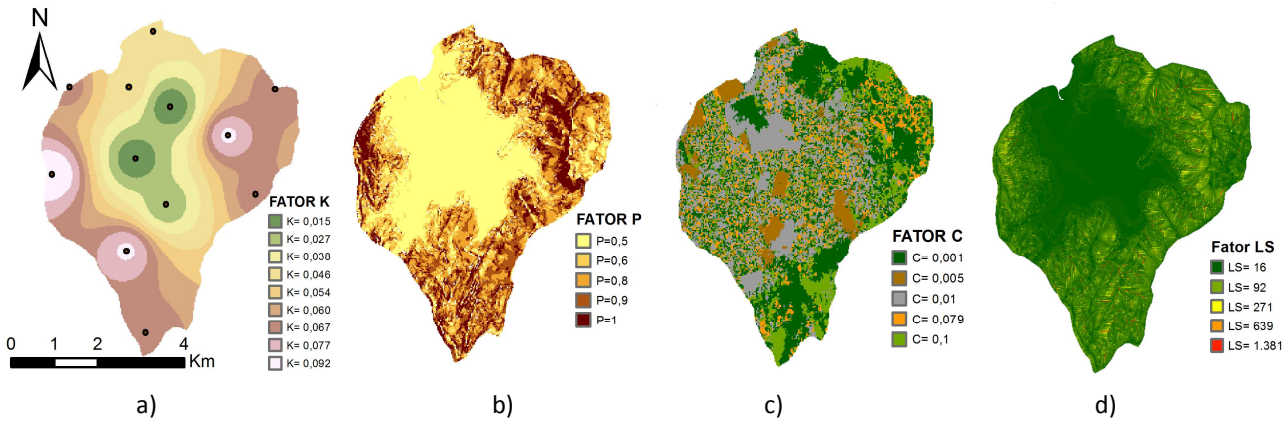


Figura 3 – Mapas a) Fator K; b) Fator LS; c) Fator P; d) Fator C

O fluxo de entrada no modelo de Stella corresponde ao resultado da aplicação da equação de perda do solo (RUSLE). O fluxo de saída ou nível (SGPSTot), por sua vez, corresponde ao acúmulo total do comportamento dos fatores. Os fluxos podem ser expressos matemáticamente segundo a figura 4.

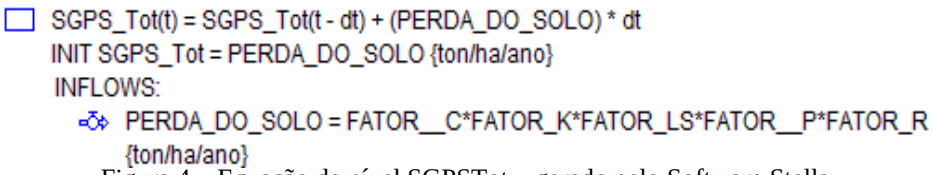
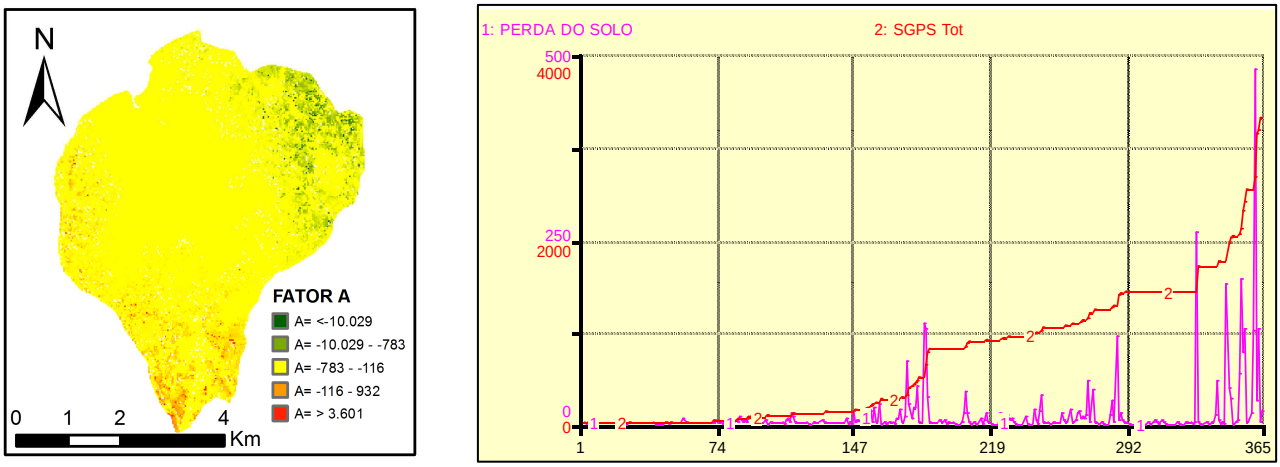


Figura 4 – Equação de nível SGPSTot – gerado pelo Software Stella

Devido às características do modelo da RUSLE, a erosão do solo e outras medidas físicas relacionadas foram calculadas para o ano 2014. Assim, a Figura 5a ilustra o mapa de perdas de solo, resultante da multiplicação dos mapas de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, fator topográfico, cobertura vegetal e práticas conservacionistas. A Figura 5b ilustra o comportamento dos **S**edimentos **T**otais **G**erados pela **P**erda do **S**olo (SGPSTot) como a variável de nível principal,

simulado pelo Stella, tendo sido feita a simulação para os 365 dias do ano. Pode-se observar que quanto mais a erosão do solo ocorreu durante o verão, maior foi a perda do solo.



a) b)

Figura 5 – Resultados da analise da RUSLE a) GIS; b) Stella

Carvalho (1994) classificou a perda do solo quanto a classes de intensidade em: nula a moderada, se A<-10.029; media, se -10.029<A>-783; media a forte, se -783<A>-116; forte, se -116<A>932; e muito forte, se A>3.601.

Com base nessa classificação e segundo a figura 5a, a erosividade da bacia hidrográfica do Itacorubi é de intensidade meia a forte, pois ocorre em grande maioria entre -783 a -116t.ha-¹.ano-¹. Também foi possível observar na figura 5b que as maiores perdas de solo, ou seja, os SGPSTot são aquelas maiores a 3.601t.ha-¹.ano-¹ tendo uma intensidade muito forte, chegando a valores máximos de 468t.ha-¹.dia-¹ em toda a região. Observam-se picos com valores altos nos meses de julho, novembro e dezembro, sendo coerentes com o aumento da erosão pelas atividades humanas no sudoeste da bacia.

Análises em campo permitiram identificar que nos locais classificados com perda de solo de intensidade muito forte existem estradas rurais construídas sem medidas de conservação do solo. Além disso, o comportamento de geração de perda do solo se apresenta em sua maioria nas estações de inverno a verão, isso devido ao aumento das precipitações e as fortes mudanças climáticas na região.

2. Conclusões

A combinação de um SIG com um modelo de dinâmica de sistemas, associados a um modelo de erosão laminar, possibilita a caracterização física (relevo, tipo de solos, uso e ocupação do solo) da Bacia Hidrográfica do Itacorubi. Ademais, a metodologia aplicada mostrou-se eficiente para a análise do comportamento espacial e quantificação das perdas de solo num intervalo de tempo determinado. Foi possível, também, a identificação das variáveis e da distribuição espacial dos fatores que influenciaram na ocorrência das perdas de solo, podendo auxiliar a adoção de futuras medidas de controle.

A BHI apresenta em sua maior parte uma perda de solo classificada como nula a moderada, principalmente em função da presença de áreas urbanas. As perdas de solo consideradas de intensidade muito forte, foram maiores que 3.601t.ha-¹.ano-¹, com valores máximos no mês de dezembro de até 468t.ha-¹.dia-¹ em toda a bacia, associadas a áreas próximas às estradas rurais não pavimentadas e áreas com maior declividade do terreno. Com base nos resultados da relação entre os valores de erodibilidade do solo (K) e os diferentes tipos cobertura do solo, foi possível concluir

que as perdas de solo foram menores nas áreas de solos orgânicos (0,0165ton.MJ^{-1}.mm^{-1}), quando comparadas às de solos indiscriminados (0,0457ton.MJ^{-1}.mm^{-1}).

Este trabalho permite, ainda, concluir que as áreas cobertas por floresta o mata nativa minimizam os processos erosivos, uma vez que diminuem a energia com que as gotas de chuva incidem na superfície do solo, tornando-o menos vulnerável ao carreamento de partículas. Assim, ressalta-se que estudos utilizando a modelagem DS integrada com o modelo RUSLE em um ambiente SIG poderão auxiliar na definição de diretrizes para controle da erosão e transporte de sedimentos em rios urbanos, bem como na gestão integrada de bacias urbanas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, N.P.;RODRIGUEZ, C. (2013). Estimativa de perda de solo por erosão hídrica utilizando técnicas de geoprocessamento na bacia do rio Cedro/MG. *Anais* do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril.

CARVALHO, N.O. (1994). *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 372 p.

DENT, J.B., EDWARD-JONES, G., McGREGOR, M.J., (1995). Simulation of ecological, social, and economic factors in agricultural systems. *Agricultural Systems* n. 49, p. 337 a 351.

DYSON, B., CHANG, N.B. (2004). Forecasting of solid waste generation in an urban region by system dynamics modeling. *Waste Management*, in press, doi: 10.1016/j.wasman.

EPAGRI/CIRAM. Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. Acessado em 03 de maio de 2015. Dísponivel em: http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=285.

GUO, H.C., LIU, L., HUANG, G.H., FULLER, G.A., ZOU, R., YIN, Y.Y., (2001). A system dynamics approach for regional environmental planning and management: a study for the lake Erhai Basin. *Journal of Environmental Management.* n. 61, p. 93 a 111.

GUY, H. P. (1967). Research needs regarding sediment and urbanization. *Journal of the hydraulics division* ASCE V 93 No. HY 6 p. 247-254.

HAAN, C.T., BARFI ELD, B.J., HAYES, J.C., (1994*). Diseño de Hidrología y sedimentología para cuencas pequeñas*. ACADEMIC PRESS 588 p.

KARAVEZYRIS, V., TIMPE, K., MARZI, R., (2002). Application of system dynamics and fuzzy logic to forecasting of municipal solid waste. *Mathematics and Computers in Simulation* 60, 149e158.

MANOJ K. JAIN; UMESH C. KOTHYARI. (2000). Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS Hydrological Sciences-]*ournal-des Sciences Hydrologiques*, 45(5) .

MEYER, L.D., WISCHMEIER, W.H., (1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Trans. ASAE 12 (754–758), 762.

SUDHIR, V., SRINIVASAN, G., MURALEEDHARAN, V.R., (1997*). Planning for sustainable solid waste in Urban India*. System dynamics review 13, 223e246.

RIGHETTO, A.M. (1998). *Hidrologia e recursos hídricos.* São Carlos: EESC/USP. 264 p.

TOMAZ, P. (2008). RUSLE – *Equação revisada universal da perda de solo.* Capítulo 23. Curso de Manejo de águas pluviais.

VIJAYAKUMAR, K., MOHAPATRA, P.K.J., (1992). Environmental impact analysis of a coalfield. *Journal of Environmental Management* 34, 73e93.

WALLING, D. E., (1988). Measuring sediment yield from river basins. In Lal, R. (ed.), Soil Erosion Research Methods. *Soil and Water Conservation Society.* Ankeny, Iowa: 39–73.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. (1965). Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountain. Washington, DC: ARS/USDA.