

## **Estimativa do fator topográfico (LS) da RUSLE para a bacia do alto Taquari – MS/MT, utilizando algoritmo do ângulo de inclinação limite para erosão/deposição**

Sérgio Galdino <sup>1</sup>  
Mara de Andrade Marinho Weill <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Pantanal – CPAP  
Caixa Postal 109 - 79320-900 – Corumbá – MS, Brasil  
galdino@cpap.embrapa.br

<sup>2</sup> Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP  
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Barão Geraldo - Campinas – SP, Brasil  
mweill@agr.unicamp.br

**Abstract.** Soil erosion in the Upper Taquari Basin (UTB) is one of the most serious environmental and socioeconomic impacts in the Brazilian Pantanal. The influence of relief at the erosion risk is usually calculated by the topographic factor (LS) from the Universal Soil Loss Equation - USLE. Improvements in USLE have led to the evaluation of the Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE. New procedures, based on geographic information systems (GIS), have been developed to estimate factor (LS) in hydrographic basins. The complication to identify the deposition areas and their relation with the start and the end of slope length is one of the main difficulties in those areas where the deposition, not erosion, is the dominant process. The Van Remortel methodology includes a mechanism to define deposition areas called cut-off slope angle, which is a user-input value. The purpose of this research is to estimate the RUSLE LS factor for the UTB using methodology based on GIS of the Van Remortel. The digital elevation model was used from the TOPODATA project. The analyzed area was quantified to be occupying UTB 28,078.55 km<sup>2</sup>. The estimated average by the RUSLE LS was 1.602. Around 60% of UTB factor LS area was between 0 and 1, and in only 18.23% of the basin total area the factor LS was above 2. The Van Remortel algorithm represent an improvement on the slope length calculation ( $\lambda$ ) and consequently on RUSLE's LS factor computations. However, its use still demands field studies to proper validation.

**Palavras-chave:** bacia do alto Paraguai, Pantanal, TOPODATA, sistema de informação geográfica.

### **1. Introdução**

Um dos maiores impactos ambientais e socioeconômicos no Pantanal Brasileiro é a intensificação dos processos erosivos nas áreas de planalto, onde nascem os rios pantaneiros. O maior exemplo é o assoreamento do rio Taquari no Pantanal (Galdino e Vieira, 2005). A principal causa desse assoreamento foi a expansão desordenada da agropecuária na bacia do alto Taquari (BAT) a partir da década de 70, em uma região que apresenta um dos maiores potenciais naturais de erosão (PNE) da bacia do alto Paraguai (BAP).

Em 1977 as lavouras e as pastagens cultivadas ocupavam apenas 3,4% da BAT (Oliveira et al., 1997) e mais recentemente, em 2000, as áreas ocupadas pela agropecuária correspondiam a 61,9% da superfície da bacia (Silva, 2003).

O PNE está associado às características do regime pluviométrico, tipos de solos e relevo de uma região. O Plano de Conservação da bacia do alto Paraguai – PCBAP (Risso et al., 1997) estimou em 315,6 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> a perda de solo potencial média na BAT, ou seja, em condições da superfície do terreno descontinuamente destituída de cobertura vegetal (solo em pousio descoberto) e sem nenhuma prática conservacionista de solo (terraços, plantio em nível, etc.).

Os modelos de simulação, como os modelos matemáticos de predição de erosão, são ferramentas poderosas na pesquisa e nas práticas agrícolas, pois, aplicados em campo, esses modelos auxiliam na determinação das práticas conservacionistas e de manejos mais indicados para os diferentes cenários de aplicação (Chaves, 1996).

Um dos modelos mais utilizado até hoje em todo mundo para estimar a perda média anual de solo é a Equação Universal de Perda de Solo (Universal Soil Loss Equation - USLE), desenvolvida a partir de 1950 por Wischmeier e Smith (1965, 1978). No Brasil a USLE também é chamada de EUPS. Sua expressão matemática é:

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

em que:

A = perda anual de solo em Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>;

R = fator erosividade da precipitação em MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>;

K = fator erodibilidade do solo em Mg h MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>;

L = fator comprimento da encosta (adimensional);

S = fator declividade da encosta (adimensional);

C = fator de cobertura e manejo da cultura (adimensional);

P = fator prática de manejo (adimensional).

Novas pesquisas e experiências continuaram sendo realizadas no intuito de melhorar as estimativas das perdas de solo pela utilização da USLE, originando um novo modelo de predição da erosão denominado Equação Universal de Perda de Solo Revisada - RUSLE (Renard et al., 1997). Na RUSLE manteve-se a mesma estrutura da equação da USLE, no entanto, as formas de determinação dos fatores mudaram expressivamente.

Os valores quantitativos de perda de solo gerados pela USLE ou RUSLE, devem ser considerados como estimativas para fins comparativos, principalmente como uma análise qualitativa da distribuição espacial do potencial erosivo de uma região.

A intensidade da erosão hídrica é afetada tanto pela distância ao longo da qual se processa o escoamento superficial quanto pela declividade do terreno, representadas na USLE/RUSLE pelos fatores L e S, respectivamente. Na prática, esses dois efeitos são considerados conjuntamente, por meio de um termo designado fator topográfico LS. Esse fator representa a relação entre as perdas de solo em uma área com declividade e comprimento de encosta quaisquer e as perdas que ocorrem em uma parcela unitária padrão, com 22,1 m de comprimento e 9% de declividade (Wischmeier e Smith, 1965 e 1978).

Galdino et al. (2004) calcularam o fator LS da BAT utilizando a USLE a partir de modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 100 metros. O valor médio do fator LS para a BAT, obtido por Galdino et al. (2004) foi de 1,58. Mais recentemente, Galdino e Weill (2010) estimaram o fator LS da BAT utilizando a RUSLE a partir de MDE obtido junto ao projeto TOPODATA com resolução espacial de 31,26 metros. No cálculo do fator L da RUSLE, foi utilizado o algoritmo de Desmet e Govers (1996), que emprega o conceito de contribuição de área e requer a geração de um mapa de fluxo acumulado. O LS médio estimado para a BAT pela RUSLE por Galdino e Weill (2010) foi de 3,76.

O Cálculo do fator L pela RUSLE, baseia-se nas seguintes expressões de McCool et al. (1989):

$$L = \left( \frac{\lambda}{22,13} \right)^m \quad (2)$$

em que:

$\lambda$  = comprimento da encosta, em metros;

m = constante dependente da declividade da encosta.

O comprimento da encosta,  $\lambda$ , foi definida por Wischmeier e Smith (1965) como a distância do ponto de origem do fluxo superficial até o ponto onde a declividade da encosta decresça o suficiente para que inicie a deposição, ou então que o fluxo se concentre em um canal definido.

O cálculo da constante “m” na RUSLE empregou a metodologia de Foster *et al.* (1977), cuja expressão é:

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

em que:

$\beta$  = é a razão entre a erosão por sulco (causada pelo fluxo) e a erosão entre-sulcos (causada principalmente pelo impacto das gotas de chuva).

McCool *et al.* (1989) computou valores de “ $\beta$ ” para condições em que o solo é moderadamente susceptível tanto para erosão em sulcos quanto entre-sulcos, através da equação:

$$\beta = \frac{\left(\frac{\text{sen}\theta}{0,0896}\right)}{\left[3 \cdot (\text{sen}\theta)^{0,8} + 0,56\right]} \quad (4)$$

em que:

$\theta$  = declividade da encosta, em graus.

A USLE e a sua sucessora a RUSLE foram concebidas para calcular a média de perda de solo em áreas agrícolas. Com o advento do Sistema de Informação Geográfico (SIG) e dos MDEs, foram aplicadas diversas modificações nesses modelos para estimativa automática da perda de solo em vertentes complexas como bacias hidrográficas.

Uma das grandes limitações da USLE/RUSLE é a identificação de áreas onde o processo predominante é a deposição e não a erosão. Isso é fundamental para identificar o início e o final do comprimento de uma longa encosta ( $\lambda$ ). Hickey *et al.* (1994) e Hickey (2000) desenvolveram uma mecanismo para definir as áreas de deposição (útil quando se calcula erosão), chamado de ângulo de inclinação limite (*cutoff slope angle*). Ao considerar um fluxo de água transportando sedimentos na superfície, em algum momento, a velocidade irá diminuir bastante em alguns pontos, ocorrendo deposição. Essa deposição é função de dois fatores: a inclinação do terreno (que em grande parte define a velocidade), e o fluxo de saturação. Se o fluxo é totalmente saturado (com sedimentos), qualquer diminuição na velocidade resultará mais em deposição do que erosão. Por outro lado, se o fluxo não está saturado, deve ocorrer uma diminuição significativa na inclinação (possivelmente zero) para que haja deposição (Hickey, 2000).

De acordo com Van Remortel (2001), o fator de ângulo de inclinação limite é um valor que considera a questão da erosão/deposição. Este fator limite é definido como a mudança do ângulo de inclinação de uma célula para outra ao longo do trajeto da direção do fluxo. Esse valor varia de 0 a 1 e é aplicado onde a inclinação diminui de uma célula para outra. Um valor de inclinação limite zero, fará com que o comprimento da encosta recomece com qualquer mudança no ângulo de inclinação, enquanto um valor unitário evitara o reinício do comprimento da encosta.

Idealmente, os valores apropriados para o fator inclinação limite devem ser atribuídos por um técnico com conhecimentos da área a ser estudada. Como geralmente isso não ocorre, um valor próximo a 0,5 (a inclinação diminui 50% ou mais), seria apropriado baseado na realização de diferentes estudos (Griffin *et al.*, 1988).

Os trabalhos de Hickey *et al.* (1994) e Hickey (2000), resultaram na elaboração de um programa para ArcInfo (ESRI, 2005) em linguagem AML (Arc Macro Language) para a criação de um arquivo raster do fator *LS* baseado na USLE, tendo como dado de entrada um MDE. Recentemente o código foi revisado, substituindo as antigas equações pelos algoritmos da RUSLE, assim como, determinadas modificações associadas com pontos específicos, áreas

planas, cortes de encostas e outros critérios específicos da inclinação de encostas (Van Remortel et al., 2004).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo estimar em ambiente SIG o fator topográfico (LS) da RUSLE para a bacia do alto Taquari, utilizando algoritmo do ângulo de inclinação limite desenvolvido por Remortel et al. (2004).

## 2. Metodologia de Trabalho

A área estudada foi a bacia do alto Taquari, situada entre as latitudes 19°39'20''S e 17°14'21''S e as longitudes 55°02'47''O e 53°09'15''O (Figura 1). Mais de 86% da superfície da bacia situa-se no Estado de Mato Grosso do Sul, e apenas 13,61% no Estado de Mato Grosso. Os municípios que integram a BAT são: Alcínópolis, Bandeirantes, Camapuã, Costa Rica, Coxim, Figueirão, Pedro Gomes, Ribas do Rio Pardo, Rio Negro, Rio Verde de Mato Grosso, Sonora e São Gabriel d'Oeste, localizados no Estado de Mato Grosso do Sul, e Alto Garças, Alto Araguaia e Alto Taquari, no Estado de Mato Grosso.

Além da divisão geopolítica a BAT, também pode ser dividida em três sub-bacias: Taquari, Coxim e Jauru (Figura 1). A sub-bacia do rio Taquari compreende a área de drenagem do rio Taquari a montante da confluência com o seu principal afluente, o rio Coxim. A sub-bacia do rio Coxim, com seção de controle a montante do seu mais importante tributário, o rio Jauru.

O sistema de projeção adotado foi o de Alberts de igual área, Datum SAD69, uma vez que a BAT compreende os fusos UTM 21 e 22. Essa Projeção é recomendável para regiões que possuem grandes extensões Leste-Oeste.

O MDE da BAT foi obtido junto ao projeto TOPODATA, disponível para download no site do INPE (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>). A resolução espacial do MDE foi de 31,26 metros.

Na delimitação da BAT e no cálculo do fator LS foram utilizados o software ArcGIS 9x e a extensão Arc Hydro Tools 1.2 (Esri, 2007). As coordenadas do exútorio da bacia foram 18°26'18" S e 54°52'01" O.

No cálculo do fator LS foi utilizado o arquivo executável "lsfac\_c.exe" escrito em linguagem C++ (Remortel et al., 2004), disponível em <http://www.onlinegeographer.com/slope/slope.html>.

Na estimativa do fator L, o comprimento do declive em cada célula, também chamado de "Noncumulative slope length" (NCSL), foi calculado usando as seguintes condições:

- Se a célula de entrada estiver em uma direção cardinal (N, S, E, O), então NCSL = (resolução da célula)
- Se a célula de entrada estiver em uma direção diagonal, NCSL = 1,4142 x (resolução da célula)
- Se a célula estiver localizada em uma crista (ponto mais alto da encosta), então NCSL = 0,5 x (resolução da célula).

Este cálculo está baseado em que as estimativas do comprimento do declive vão desde o centro de uma célula até o centro da célula de entrada. Por tanto, como as cristas não tem uma célula de entrada, o valor de 0,5 representa apenas a erosão ocorrendo na metade desta célula, a partir do ponto central.

O valor do ângulo de inclinação limite adotado foi de 0,5 para declividade igual ou superior a 5%. Para declividade inferior a 5%, conforme sugerido por Remortel et al. (2004), o ângulo de inclinação limite adotado foi de 0,7, pois normalmente em menores gradientes de declive é mais provável que ocorra deposição.

No cálculo do fator S foi empregando a metodologia de McCool et al. (1987), ou seja:

$$S = 10,8 \text{ sen } \theta + 0,03 \quad (\text{para declividade} < 9\%) \quad (6)$$

$$S = 16,8 \text{ sen } \theta - 0,50 \quad (\text{para declividade} \geq 9\%) \quad (7)$$

em que:

$\theta$  = declividade da encosta, em graus.

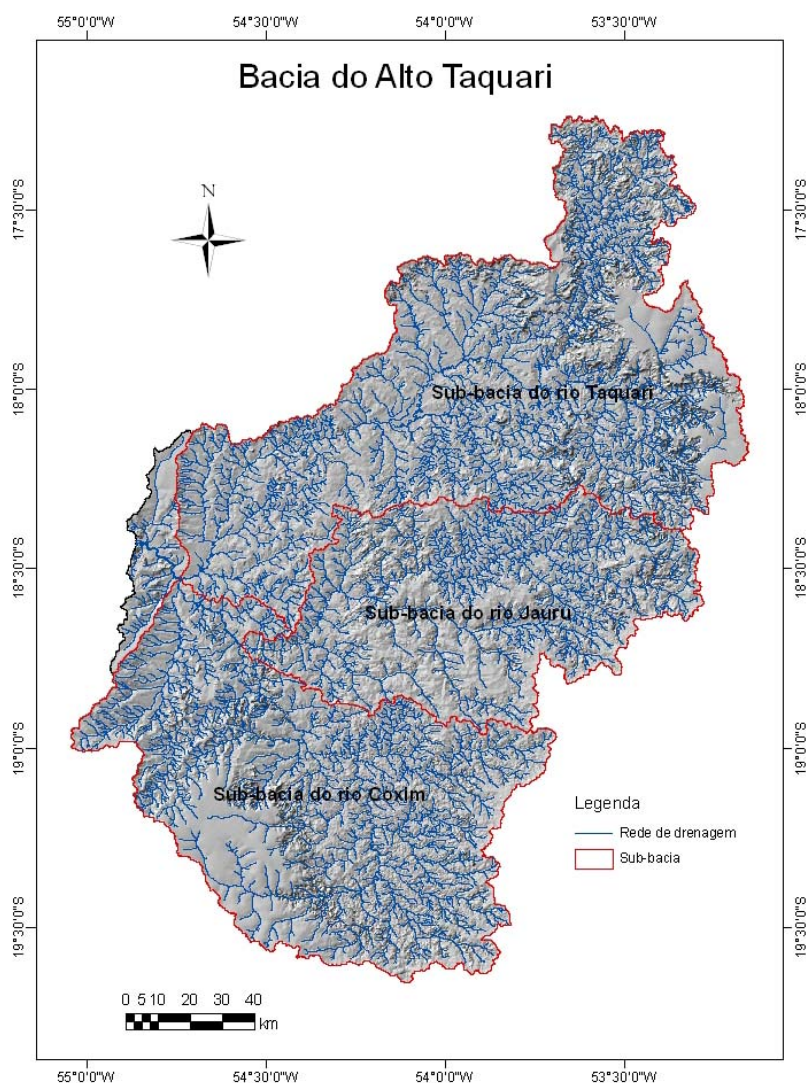


Figura 1. Bacia do alto Taquari com a localização das principais sub-bacias.

### 3. Resultados e Discussão

A área delimitada da bacia do alto Taquari foi quantificada em 28.078,55 km<sup>2</sup>.

O tempo de processamento e geração dos arquivos em ASCII (extensão dat), utilizando o executável “lsfac\_c.exe” foi bastante rápido. As 29.125.717 células do MDE da BAT, foram processadas em menos de 45 minutos, em um microcomputador equipado com processador Intel Core i7 860 (2,80 GHz), 4 Gb de memória RAM e sistema operacional Windows XP. Os arquivos de saída do programa podem ser facilmente importado para os principais softwares de geoprocessamento disponíveis atualmente no mercado.

O valor médio do fator LS para a BAT foi de 1,602. Esse valor é praticamente a metade do valor obtido por Galdino e Weill (2010) que utilizaram o algoritmo de Desmet e Govers (1996). A explicação provável para essa diferença, considerando que o MDE da BAT foi praticamente o mesmo e o cálculo do fator S foi semelhante, é que o algoritmo de Remortel et al. (2004) seccionou mais o comprimento de rampa ao longo do trajeto da direção do fluxo, fazendo com que o fator L fosse menor que o estimado pelo algoritmo de Desmet e Govers (1996). A metodologia de Hickey et al. (1994) desenvolvida para o cálculo do fator LS da

USLE, e posteriormente ajustada por Remortel et al. (2004) para a RUSLE, teoricamente é mais coerente que a de Desmet e Govers (1996), quanto ao conceito de comprimento da encosta definido por Wischemeier e Smith (1965), ao estimar a distância do ponto de origem do fluxo superficial até o ponto onde a declividade da encosta decresce o suficiente e inicia a deposição.

A distribuição do fator LS na BAT é apresentada na Figura 1 e a frequência das classes do fator topográfico para a BAT é mostrado na Tabela 2.

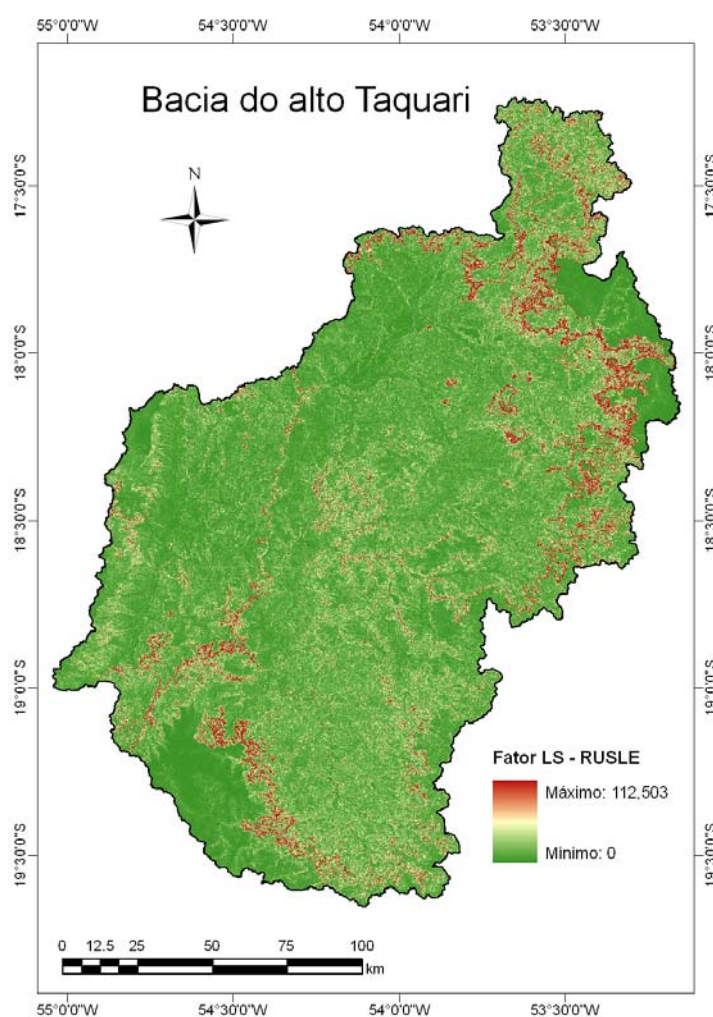


Figura 2. Distribuição do fator LS da RUSLE na bacia do alto Taquari.

Tabela 1. Frequência das classes do fator topográfico (LS) da RUSLE na bacia do alto Taquari.

Classe de LS	Área		Frequência acumulada (%)
	km <sup>2</sup>	(%)	
0 - 1	16.321,82	58,13	58,13
1 - 2	6.636,77	23,64	81,77
2 - 3	2.065,08	7,35	89,12
3 - 4	922,82	3,29	92,41
4 - 6	891,63	3,18	95,58
6 - 10	657,44	2,34	97,92
> 10	582,99	2,08	100,00

Analisando a Tabela 1, observa-se que quase 60% do fator LS na BAT está compreendido entre 0 e 1. Isto provavelmente se deve ao predomínio das classes de declividade plano e suave ondulado (72,96%) (Galdino e Weill, 2010), e a alta frequência de áreas localizadas nos divisores de água das micro-bacias ou próximas a essas áreas, onde o comprimento de rampa ainda é reduzido. Pode se observar também que apenas 18,23% da BAT apresenta fator LS superior a 2. Uma explicação para isto é a maior divisão em segmentos de comprimento de rampa ao longo do trajeto da direção do fluxo, fazendo com que o fator L seja menor.

#### 4. Conclusões e Considerações Finais

O valor médio do fator LS da RUSLE estimada pela metodologia do ângulo de inclinação limite (*cutoff slope angle*) para a bacia do alto Taquari foi de 1,602.

Quase 60% do fator LS na BAT está compreendido entre 0 e 1 e apenas 18,23% da BAT apresenta fator LS superior a 2.

A metodologia de Hickey et al. (1994) desenvolvida para o cálculo do fator LS da USLE, e posteriormente ajustada por Remortel et al. (2004) para a RUSLE, utiliza um mecanismo para definir as áreas de erosão/deposição denominado de ângulo de inclinação limite. Teoricamente é mais coerente que metodologias anteriores de cálculo do fator LS como a de Desmet e Govers (1996), pois incorpora o conceito de comprimento da encosta definido por Wischmeier e Smith (1965), ao estimar a distância do ponto de origem do fluxo superficial até o ponto onde a declividade da encosta decresce o suficiente e inicia a deposição.

A metodologia de cálculo do fator LS baseada no ângulo de inclinação limite se propõem a corrigir uma das grandes limitações da USLE/RUSLE para vertentes complexas, que é a identificação de áreas onde o processo predominante é a deposição e não a erosão. Entretanto a recomendação do seu uso ainda demanda estudos de campo para a sua efetiva validação.

#### Referências Bibliográficas

Chaves, H. M. L. Modelagem matemática da erosão hídrica: passado, presente e futuro. In: Alvarez V. H.; Fontes, L. E.; Fontes, M. P. F. (Eds.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: SBCS, UFV, DPS, 1996. p. 731-750.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10, 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, 1979. 83p.

Esri. “ArcGIS desktop help user’s manual. Version 9.1.”. California, 2005.

Esri. “Arc Hydro Tools version 1.2 for ArcGIS 9.2 Tutorial”. California. 2007, 110 p.

Desmet, P. J. J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p.427-433, 1996.

Foster, G.R., L.D. Meyer, And C.A. Onstad. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. **Trans. ASAE** 20:683-687, 1977.

Galdino, S.; Risso, A.; Soriano, B. M. A.; Vieira, L. M.; Padovani, C. R.; Melo, E. C.; Almeida Júnior, N. de. Erosão Potencial Laminar Hídrica na Bacia do Alto Taquari. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p.125-133, 2004.

Galdino, S.; Vieira, L. M. A Bacia do Rio Taquari e seus problemas ambientais e socioeconômicos. In: Galdino, S.; Vieira, L. M.; Pellegrin, L. A. (Ed.) **Impactos ambientais e socioeconômicos na Bacia do Rio Taquari – Pantanal**. Campo Grande: Gráfica Mundial; Corumbá: Embrapa Pantanal, 2005. p.29-43

Galdino, S.; Weill, M. A. M. Estimativa e análise do fator topográfico (LS) da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) para a bacia do Alto Taquari – MS/MT. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 3., 2010, Cáceres. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2010. p. 260-269. CD-ROM



Griffin, M.; Beasley, D.; Fletcher, J.; Foster, G. Estimating soil loss on topographically nonuniform field and farm units. **Journal of Soil and Water Conservation**, 43(4), 326–331, 1988.

Hickey, R. Slope angle and slope length solutions for GIS. **Cartography**, 29(1), 1–8, 2000.

Hickey, R.; Smith, A.; Jankowski, P. Slope length calculations from a DEM within Arc/Info GRID.” **Comput. Environ. Urban Syst.**, 18(5), 365–380, 1994.

McCool, D. K.; Brown, L. C.; Foster, G. R. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 30, 1387–1396, 1987.

McCool, D. K.; Foster, G. R.; Mutchler, C. K.; Meyer, L. D. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. **Trans. ASAE**, 32(5):1571-1576, 1989.

Oliveira, H. de; Oliveira, F. D. A. de; Sano, E. E.; Adámoli, J. Expansão da fronteira agrícola na bacia do alto Taquari utilizando o sistema de informações geográficas SGI/INPE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Viçosa: SBCS, 1997. 4 p. CD-ROM.

Renard, K. G.; Foster, G. R.; Weesies, G. A. & McCool, D. K. **Predicting soil erosion by water** – A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). Washington, USDA-ARS, (**Agriculture Handbook**, 703), 1997.

Risso, A.; Bordas, M. P.; Borges, A. L. Produção de sedimentos. In: BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Plano de Conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal) – PCBAP**: hidrossedimentologia do Alto Paraguai. Brasília: MMA/PNMA, 1997. v. 2, t. 2a, p 271-307.

Silva, J. dos S. V. da. **Análise multivariada em zoneamento para planejamento ambiental, estudo de caso**: bacia hidrográfica do alto Rio Taquari MS/MT. 2003. 307 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas: GRI/UNICAMP, Campinas.

Van Remortel, R.; Hamilton, M.; Hickey, R. Estimating the LS factor for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data. **Cartography**, 30(1), 27–35, 2001.

Van Remortel, R. D.; Maichle, R. W.; Hickey, R. J. Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable. **Comput. Geosci.**, 30, 1043–1053, 2004.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Washington, Agricultural Research Service, 47p. (**Agriculture Handbook**, 282), 1965.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning. Washington, USDA, 58p. (**Agricultural Handbook**, 537), 1978.