



Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro

Júlio C. N. dos Santos¹, Eunice M. de Andrade², Pedro H. A. Medeiros³,
José R. de Araújo Neto⁴, Helba A. de Q. Palácio⁵ & Rafael do N. Rodrigues⁶

¹ UFC. Fortaleza, CE. E-mail: julioesarnds@yahoo.com.br (Autor correspondente)

² UFC. Fortaleza, CE. E-mail: eandrade@ufc.br

³ IFCE. Maracanaú, CE. E-mail: phamedeiros@gmail.com

⁴ UFC. Fortaleza, CE. E-mail: juniorifcelabas@gmail.com

⁵ IFCE. Iguatu, CE. E-mail: helbaraujo23@yahoo.com.br

⁶ UFC. Fortaleza, CE. E-mail: rafaelnr_tid@hotmail.com

Palavras-chave:

perdas de solo
erosão
caatinga

RESUMO

Objetivou-se, neste estudo, calibrar e validar os fatores C da Equação Universal de Perdas de Solo e os coeficientes da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada, para as coberturas de Caatinga Nativa, Caatinga Raleada e Capim (pós desmatamento e queima) no semiárido brasileiro. Os dados foram coletados no período de 2009 a 2012. A avaliação dos ajustes do modelo foi realizada pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe, índice de Willmott (id) e índice de confiança ou desempenho (c). Para determinação dos fatores C foram usados dados de parcela de erosão (20 m²) empregando-se 50% dos dados na calibração e os demais na validação. Já para calibração e validação dos coeficientes “a” e “b” da MUSLE, foram usados dados obtidos na escala de microbacia (1,15 a 2,8 ha). O maior valor do fator C foi registrado na Caatinga Nativa (0,0167), seguido pelo uso do Capim com 0,0084 e o menor valor para a Caatinga Raleada (0,0067). Os resultados indicam que os valores dos fatores C e os coeficientes de ajuste “a” e “b” da MUSLE, para as coberturas estudadas, se apresentaram apropriados e recomendados de acordo com os índices estatísticos empregados podendo ser utilizados como base para microbacias semelhantes não monitoradas.

Key words:

soil loss
erosion
caatinga

Determination of the cover factor and the MUSLE coefficients in watersheds in the Brazilian semiarid region

ABSTRACT

The aim of the present study was to calibrate and to validate the C factor of Universal Soil Loss Equation and the coefficients of the Modified Universal Soil Loss Equation for land covers of native ‘Caatinga’, thinned ‘Caatinga’ and grass (after deforestation and burning) in Brazilian semiarid region. Data were collected in the period 2009-2012. To evaluate the model performance, Nash-Sutcliffe statistical coefficient was determined, as well as the Willmott index (id) and confidence index (c). For determination of the C factor, data from erosion plots of a 20 m² were analysed, employing 50% for calibration and the other half for validation. For calibration and validation of the coefficients “a” and “b” of MUSLE, data obtained from watersheds (1.15 to 2.8 ha) were used. The largest value of C was recorded for native ‘Caatinga’ area (0.0167), followed by grass with 0.0084 and the lowest value of C (0.0067) was determined for the thinned ‘Caatinga’. The results showed that the adjusted values of the C factor and the coefficients “a” and “b” of the MUSLE were appropriate and recommended according to the statistical analysis, and it can be used to simulate similar ungauged watersheds.

INTRODUÇÃO

A erosão hídrica do solo e, conseqüentemente, a produção de sedimentos, têm sido objeto de preocupação crescente em todas as situações relativas à gestão do uso do solo e da água (Paranhos & Paiva, 2008). Os efeitos negativos da erosão acelerada do solo incluem a redução de sua fertilidade, aumento do risco de desertificação, assoreamento e eutrofização dos corpos hídricos, entre outros (Bakker et al., 2004; 2005; Cerdan et al., 2010). Para a redução de riscos a utilização de modelos matemáticos para a simulação de eventos hidrossedimentológicos permite

otimização de tempo, simulação de eventos extremos e a formação de diversos cenários com os prováveis impactos das mudanças no uso do solo.

Os modelos que exigem múltiplos parâmetros de entrada podem não ser viáveis para uso em locais sem dados de campo ou de difícil acesso, como em várias regiões do Brasil. Diversos autores consideram a Equação Universal de Perda de Solo (USLE - Universal Soil Loss Equation) um excelente modelo para a previsão de perda de solo devido à sua fácil aplicabilidade (em termos de dados de entrada exigidos) e a confiabilidade

das estimativas obtidas (Oliveira et al., 2012). A USLE foi desenvolvida para estimativas das perdas de solo anual em escala de parcela de erosão de 22 m de comprimento (Odongo et al., 2013). Tentativas de aplicá-la para eventos de chuva individuais e em escalas maiores indicaram aumentos no erro de estimativa porque a USLE não considera diretamente o escoamento, que é um componente fundamental na concentração de sedimentos (Kinnell, 2005). A aplicação da USLE em escala de bacias hidrográficas vem sendo facilitada pelo uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Esta combinação é considerada ferramenta útil para o planejamento e conservação de solo e água (Oliveira et al., 2011).

A Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) é uma modificação da USLE que, ao contrário da última, desenvolvida para a estimativa da erosão média anual em vertentes (Wischmeier & Smith, 1978), é usada na estimativa do aporte de sedimentos na escala de bacias hidrográficas e por eventos individuais (Eq. 1) (Williams, 1975). A MUSLE é um modelo empírico que substituiu o fator erosividade da chuva (usual na USLE) por um fator de escoamento. Este modelo requer a estimativa adequada de suas variáveis tal como a calibração de seus coeficientes para as condições locais (Sadeghi et al., 2007; Silva et al., 2011).

Proposta originalmente por Williams (1975), os coeficientes empíricos da MUSLE “a” e “b” (Eq. 1) indicavam valores de 11,8 e 0,56 no Sistema Internacional; no entanto, tais coeficientes “a” e “b” podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias (Sadeghi et al., 2007; Chaves, 2010; Silva et al., 2011). Odongo et al. (2013) mostraram, estudando a sensibilidade dos parâmetros da MUSLE, que os fatores mais sensíveis do modelo foram os coeficientes “a” e “b” contribuindo com cerca de 66% da variabilidade da produção de sedimentos. Diversos estudos vêm apontando a necessidade de calibração dos coeficientes “a” e “b” da MUSLE para as condições locais (Avanzi et al., 2008; Paranhos & Paiva, 2008; Silva et al., 2011). Tanto para a USLE como para a MUSLE a determinação do fator topográfico LS na escala de bacia é uma grande limitação porém diversas equações vêm sendo apresentadas na literatura (Zhang et al., 2013).

A MUSLE (Eq. 1) tem sido frequentemente utilizada em estudos que visam à quantificação da produção de sedimentos em pequenas e médias bacias hidrográficas no Brasil como, por exemplo, em Lim et al. (2005), Avanzi et al. (2008), Zhang et al. (2009), Alcântara & Souza (2010) e Schultz et al. (2013). A MUSLE apresenta um grande potencial de aplicação em virtude da simplicidade de sua estrutura, do número relativamente baixo de parâmetros empregados e da facilidade de calibração e aplicação (Avanzi et al., 2008). Entre os fatores empíricos necessários para a utilização deste modelo, estão os fatores de cobertura vegetal (C) e os coeficientes de ajuste (“a” e “b”) que representam as condições locais. Poucos são os estudos para a calibração e validação de tais coeficientes empíricos para o Brasil, sobretudo para a região Nordeste e, mais especificamente, para vegetação de Caatinga e suas formas de uso e manejo.

Objetivou-se, com este estudo, a calibração e a validação do fator C e dos coeficientes de ajuste “a” e “b” da Equação Universal

de Perdas de Solo Modificada – MUSLE para as coberturas de Caatinga Nativa, Caatinga Raleada e Capim (*Andropogon gayanus* Kunt/pós-desmatamento e queima) no semiárido.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo denominada Bacia Experimental de Iguatu (BEI) está localizada no Semiárido Cearense, na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, no município de Iguatu, em área pertencente ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Campus Iguatu (Figura 1). O clima da região é do tipo BSw’h’ (Semiárido quente), de acordo com a classificação climática de Köppen. O Índice de Aridez elaborado por Thornthwaite é de 0,44 classificando-se como semiárido. A evapotranspiração potencial média é de 1.988 mm ano⁻¹, a precipitação média histórica no município de Iguatu é de 867 ± 304 mm, com 85% concentrados no período de janeiro-maio (Santos, 2012).

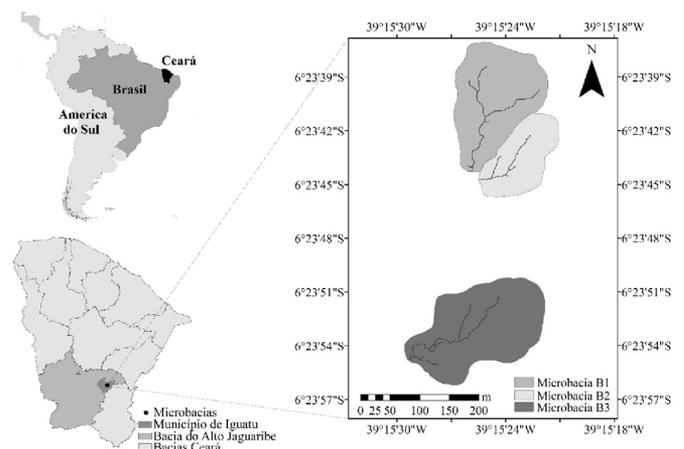


Figura 1. Localização da área de estudo no Estado do Ceará, Brasil

Os solos das microbacias foram classificados como Vertissolo Ebânico Carbonático Típico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. O relevo é pouco acidentado, com solos relativamente profundos com presença elevada de silte (38,7%) e argila (32,2%) nas camadas superficiais e subsuperficiais.

Os estudos de erosão e escoamento superficial foram conduzidos em dois níveis de escala: parcelas de erosão de 20 m² (2 x 10 m) e microbacias com área entre 1,15 ha a 2,8 ha, todas sob condições de chuvas naturais (Santos et al., 2011). Para determinação e validação do fator C, que leva em consideração a cobertura vegetal, usaram-se os dados das parcelas de erosão de 20 m². Na calibração e na validação dos coeficientes de ajuste “a” e “b” da MUSLE, usaram-se os dados registrados na escala de microbacia.

A microbacia B1 foi mantida com cobertura vegetal de Caatinga Nativa; na segunda microbacia B2 foi aplicado o manejo de raleamento da Caatinga mantendo-se, porém, as espécies vegetais com diâmetro igual ou maior que 10 cm e espécies de crescimento herbáceo. Este tratamento foi aplicado com o

propósito de verificar a influência do raleamento da Caatinga sobre escoamento superficial, erosão hídrica e produção de sedimentos em pequenas bacias rurais; na terceira microbacia B3 foi aplicado, em 2010, o manejo de desmatamento total da vegetação seguido de queima e cultivo de capim (*Andropogon gayanus* Kunt) para pastagem. Adotou-se esta prática pelo fato de ser comumente empregada no Nordeste brasileiro. Na Tabela 1 se observam as características morfométricas das microbacias estudadas. O tempo de concentração (T_c) foi determinado graficamente pela diferença entre o tempo de fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma.

Tabela 1. Características morfométricas das microbacias experimentais, Ceará, Brasil

Características	Microbacias			Unid.
	B1	B2	B3	
Área	2,06	1,15	2,80	ha
Comprimento da bacia (Lb)	204,40	188,17	253,90	m
Declividade média da bacia (Db)	10,59	8,72	5,57	%
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,16	1,25	1,17	-
Tempo de concentração (T_c)	33,80	20,00	27,50	min
Sinuosidade do curso principal (Sin)	1,40	1,20	1,27	-

Na escala de parcela de erosão, que representa os processos hidrológicos na encosta, os valores de escoamento superficial e de erosão foram quantificados em parcelas experimentais com dimensões de 2 x 10 m (20 m²), com o comprimento maior obedecendo o sentido da declividade do terreno (Santos et al., 2011).

Na escala de microbacia o escoamento superficial e as perdas de solo foram monitorados através de três estações hidrossedimentológicas, instaladas no exutório de cada microbacia. O escoamento superficial foi quantificado através de calhas Parshall. Para quantificação da descarga sólida em suspensão em cada microbacia, a montante das calhas Parshall, foram instaladas torres coletoras de sedimentos em suspensão as quais possuem garrafas de 100 mL dispostas equidistantes a 7,5 cm, sendo a primeira a 15 cm do solo. A fração das perdas de solo por arraste de leito nas microbacias foi quantificada através de fossos coletores de sedimentos a montante de cada calha, com capacidade total de 185 L, no intuito de retenção de todo o volume de solo em arraste. Após o evento gerador de escoamento eram coletadas as amostras nas torres e realizada a homogeneização da água com sedimentos no fosso e coletada uma amostra para quantificação do total de sólidos.

O estudo ocorreu no período de 2009 a 2012 para as microbacias com cobertura de Caatinga nativa (B1) e Caatinga raleada (B2). Para a microbacia B3 cultivada com capim (*Andropogon gayanus* Kunt) para pastagem (pós desmatamento e queimada), o monitoramento ocorreu entre 2010 a 2012. Durante o período de monitoramento, 116 eventos chuva-vazão-sedimentos foram registrados.

Os dados pluviométricos foram obtidos em uma estação automática instalada na área de estudo, com aquisição de dados a cada 5 min. De posse dos dados de precipitação foram calculadas as intensidades média (I) e as intensidades máximas, em 30 min ($I_{30\text{máx}}$). A energia cinética (EC) por mm de chuva

foi obtida pela Eq. 1 proposta por Wischmeier & Smith (1978) modificada por Foster et al. (1981):

$$EC = 0,119 + 0,0873 \text{Log} I \quad (1)$$

em que:

EC - energia cinética da chuva, MJ ha⁻¹ mm⁻¹

I - intensidade média da chuva, mm h⁻¹

Os valores obtidos através da Eq. 1 foram utilizados para o cálculo do índice de erosividade EI_{30} representado pelo fator R na Equação Universal de Perda de Solo (USLE), a partir da Eq. 2:

$$EI_{30} = EC I_{30\text{máx}} P \quad (2)$$

em que:

EI_{30} - índice de erosividade, em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹

$I_{30\text{máx}}$ - intensidade máxima média da chuva em 30 min, em mm h⁻¹

P - altura pluviométrica total, em mm

Os valores de erodibilidade do solo (fator K) foram obtidos pela equação proposta por Wischmeier & Smith (1978) obtendo-se valores de 0,0346 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ para as microbacias com Caatinga Nativa e Raleamento da Caatinga e 0,0579 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ para a microbacia com capim (pós desmatamento e queima).

Os fatores LS para a escala de parcela de erosão foram determinados de acordo com a equação proposta por Wischmeier & Smith (1978) obtendo-se valores de 1,182, 0,569 e 0,313 para as parcelas com Caatinga Nativa, Raleamento da Caatinga e capim (pós desmatamento e queima) respectivamente. De vez que não foram realizadas práticas conservacionistas para a redução das perdas de solo, o valor do fator P foi considerado 1.

De posse dos fatores R, K, LS e P da USLE e das perdas de solo medidas por eventos nas parcelas de erosão de 20 m², foram efetuadas a determinação e a validação do fator C para as coberturas do solo estudadas. Para a calibração do fator C utilizaram-se 50% dos dados de eventos geradores de escoamento nas parcelas de erosão de 20 m². A separação dos dados para a calibração e validação foi feita de maneira intercalada, sendo o primeiro evento selecionado para a calibração e o seguinte para a validação e assim sucessivamente. A determinação do fator C da USLE na etapa de calibração foi realizada pelo ajustamento do seu valor visando maximizar o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE - Eq. 3). Este coeficiente pode variar de -∞ até 1, sendo 1 um ajuste perfeito. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de NSE superar 0,75, e é considerado aceitável se o valor de NSE está no intervalo aberto 0,36-0,75.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (Y_m - Y_c)^2}{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2} \right] \quad (3)$$

em que:

NSE - coeficiente de Nash e Sutcliffe (-∞ < NSE < 1)

- Y_m - valor medido
 Y_c - valor calculado
 \bar{Y}_m - média dos valores medidos

Os coeficientes “a” e “b” da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) (Williams, 1975) (Eq. 4) foram calibrados e validados utilizando-se os dados de monitoramento hidrológico do deflúvio, vazão de pico e produção de sedimentos, extraídos diretamente dos hidrogramas das microbacias.

$$A = a(D Qp)^b K LS C P \quad (4)$$

sendo:

- A - perda de solo por evento individual de chuva, t
D - deflúvio ou escoamento superficial direto, mm
Qp - vazão de pico, m³ s⁻¹
“a” e “b” - coeficientes de ajuste, calibração
K - fator de erodibilidade dos solos da bacia, t h MJ⁻¹ mm⁻¹
LS - fator topográfico, adimensional
C - fator de cobertura do solo, adimensional
P - fator de práticas conservacionistas, adimensional

O fator topográfico (LS) foi obtido através da Eq. 5 proposta por Bertoni & Lombardi Neto (1990):

$$LS = 0,00984L_R^{0,63}S_R^{1,18} \quad (5)$$

em que:

- S_R - grau de declive
 L_R - comprimento de rampa (m), conforme Eqs. 6 e 7:

$$S_R = \frac{C_{90\%} - C_{10\%}}{\sqrt{0,8A}} \quad (6)$$

$$L_R = \frac{A}{4L_0} \quad (7)$$

em que:

- $C_{90\%}$ - cota abaixo da qual estão 90% da área da microbacia, m
 $C_{10\%}$ - cota abaixo da qual estão 10% da área da microbacia, m
A - área da microbacia, m²
 L_0 - comprimento total dos canais de drenagem, m

Os valores dos fatores K (erodibilidade dos solos) e fator P (práticas conservacionistas) foram os mesmos usados na determinação e na validação dos fatores C. Com valor de K de 0,0346 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ (microbacias com Caatinga Nativa e Raleada) e 0,0579 t h MJ⁻¹ mm⁻¹ (microbacia com Capim pós desmatamento e queima) e fator P igual a 1.

Para a calibração dos coeficientes de ajuste “a” e “b” da MUSLE foram empregados 50% dos dados registrados nas microbacias. Os outros 50% dos dados, tanto das parcelas de

erosão quanto das microbacias, foram utilizados na validação. Da mesma forma realizada na determinação e na validação do fator c, a separação dos dados para a calibração e validação foi feita de maneira intercalada sendo o primeiro evento selecionado para a calibração e o seguinte para a validação e assim sucessivamente. O ajuste dos parâmetros “a” e “b” da MUSLE na etapa de calibração foi realizado pelo ajustamento do seu valor visando maximizar o coeficiente de Nash e Sutcliffe (Eq. 3). Foi analisado, também, o desempenho do modelo com os coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975), sendo “a” e “b” com valor de 11,8 e 0,56, respectivamente.

Para a análise da qualidade dos fatores C e dos parâmetros “a” e “b” da MUSLE, nas etapas de calibração e validação, foram aplicados outros índices estatísticos, como: coeficiente de correlação (R), o qual indica a dispersão dos dados em relação à média (precisão) e índice de Willmott (id) que indica o grau de exatidão do modelo, ou seja, de quanto os valores estimados se aproximam dos observados. Empregou-se, ainda, o índice de confiança ou desempenho (c) o qual é o produto do coeficiente de correlação com o índice de Willmott ($c = R * id$), em que $c = 1$ significa confiança perfeita e $c = 0$ é considerado péssimo, conforme proposto por Camargo & Sentelha (1997). Por último foi aplicado o índice PBIAS (percentagem da diagonal) utilizado para medir a tendência média dos dados simulados para ser maior ou menor do que os seus pares observados. O valor ideal de PBIAS é zero, com valores positivos indicando que os dados gerados pelo modelo subestimam a realidade enquanto os negativos a superestimam.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observam-se, na Tabela 2, os valores dos fatores C e os índices estatísticos da calibração e validação para as três coberturas vegetais estudadas. O melhor ajuste do fator C da USLE para a cobertura vegetal representativa da Caatinga Nativa (dados de parcela de erosão) foi de 0,0167 obtendo-se o melhor valor do coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE). Na calibração e com uso da função objetivo, o coeficiente de Nash e Sutcliffe atingiu 0,62 com valor do fator C de 0,0167 considerado, portanto, aceitável (NSE entre 0,36 e 0,75). Objetivando verificar o desempenho do fator C encontrado na etapa de calibração obteve-se, na etapa de validação, coeficiente NSE com valor de 0,42 enquadrando-se novamente na categoria aceitável. Embora a calibração tenha apresentado um ajuste melhor (como previsto) os coeficientes estatísticos na validação continuam apontando para um bom desempenho, inclusive com menor PBIAS (11,08). Devido à complexidade para a obtenção do fator C são poucos os trabalhos, no Brasil, com determinação deste fator para as diferentes coberturas. Albuquerque et al. (2005) encontraram, para parcelas de perda de solo com Caatinga nova, valores do fator C = 0,0178 e Pousio com cobertura morta C = 0,0128, no município de Sumé-PB.

Na etapa de calibração para a cobertura de Caatinga Nativa a perda de solo total medida para os eventos selecionados, foi de 1.080 kg ha⁻¹ e o somatório das perdas de solo estimadas foi de 1.450,3 kg ha⁻¹, superestimado em 34,25% (PBIAS de -34,25).

Tabela 2. Fator C e índices estatísticos da calibração e validação para as três coberturas vegetais estudadas

Cobertura	Fator C	Estatística calibração					Estatística validação				
		NSE	Id	R	c	PBIAS	NSE	Id	R	c	PBIAS
Caatinga Nativa	0,0167	0,62	0,86	0,83	0,71	-34,25	0,42	0,69	0,70	0,48	11,08
Raleamento da Caatinga	0,0067	0,52	0,88	0,77	0,68	-5,26	0,57	0,89	0,81	0,73	-20,00
Capim (pós desmatamento e queima)	0,0084	0,51	0,81	0,71	0,57	-4,37	0,40	0,75	0,69	0,52	28,47

NSE - Coeficiente de Nash e Sutcliffe; Id - Índice de Willmott; R - Índice de erosividade; c - Índice de confiança ou desempenho; PBIAS - percentagem da diagonal; C - cobertura vegetal.

Por sua vez, o somatório das perdas de solo medidas para os eventos utilizados na validação resultou em 2.624 kg ha⁻¹ e a perda de solo total estimada com o fator C calibrado foi de 2.334 kg ha⁻¹, com PBIAS de 11,08.

O fator C calibrado para a cobertura de Caatinga Raleada na microbacia B2 a partir do máximo valor do coeficiente de Nash e Sutcliffe, foi de 0,0067 (Tabela 2). O NSE encontrado na calibração foi de 0,52, o que é considerado aceitável. Após a validação com os demais 50% dos dados o valor do coeficiente de Nash e Sutcliffe melhorou porém se apresentando ainda na categoria aceitável, com valor de 0,57. A cobertura de Caatinga Raleada promove redução do sombreamento do solo e, em contrapartida, o desenvolvimento de um estrato herbáceo mais denso resultando em maior rugosidade da superfície do solo e maiores oportunidades de dissipação da energia cinética da chuva, resultando em menor poder erosivo da mesma (Santos, 2012). Desta forma, a cobertura de Caatinga Raleada apresentou fator C menor que a vegetação de Caatinga nativa. Este valor do fator C encontrado para a Caatinga raleada se apresenta na mesma ordem de grandeza do fator C (0,001) para floresta tropical do Estado do Rio Grande do Sul, no Brasil, utilizado por Caten et al. (2012).

Considerando as perdas de solo acumuladas na microbacia com cobertura de Caatinga Raleada, obteve-se o total medido de 1.430 kg ha⁻¹ para os 50% dos dados da calibração além de perda de solo, de 1.506 kg ha⁻¹ estimada com a USLE e com uso do fator C calibrado. Desta forma, o modelo superestimou em 5,26% (PBIAS= -5,26) (Tabela 2). Na etapa de validação as perdas de solo medidas e estimadas foram de 781 e 938 kg ha⁻¹, continuando na superestimativa com valor de 20% (PBIAS = -20).

No que diz respeito ao manejo de desmatamento total da Caatinga seguido de queima e cultivo de capim (*Andropogon gayanus* Kunt) para pastagem, obteve-se um fator C calibrado de 0,0084 (Tabela 2). Nesta microbacia, como foi cultivado o capim *Andropogon gayanus* Kunt, o solo apresentou maior proteção vegetal pela cobertura vegetal herbácea (Santos et al., 2011), o que implicou num fator C menor que na cobertura de Caatinga nativa. Na Tabela 2 observa-se que o coeficiente de Nash e Sutcliffe na calibração foi de 0,51 e na validação de 0,40, ambos enquadrados como aceitáveis.

As perdas de solo total medidas e estimadas para os dados da calibração e validação nesta microbacia com cobertura de capim (*Andropogon gayanus* Kunt) (pós-fogo) apresentaram os menores erros entre as coberturas vegetais estudadas. Na calibração as perdas de solo total medidas e estimadas foram de 654 e 683 kg ha⁻¹ respectivamente ocorrendo, assim, uma superestimativa de apenas 4,37% (PBIAS) (Tabela 2). Na etapa de validação as perdas de solo total medidas e estimadas

foram de 827 e 592 kg ha⁻¹, respectivamente, ocorrendo uma subestimativa de 28,47% (PBIAS).

Os coeficientes “a” e “b” da MUSLE para a cobertura de Caatinga Nativa apresentaram valores de 36,80 e 0,55 (Figura 2A), respectivamente. O coeficiente de Nash da calibração foi 0,72 sendo considerado aceitável (Figura 2A). Obteve-se, também, bom coeficiente de correlação (R = 0,85) o qual indica baixa dispersão dos dados em relação à média (precisão). Quanto ao índice de Willmott (id), que indica o grau de exatidão do modelo obteve-se, na calibração, valor de 0,91 indicando boa exatidão. O índice de confiança ou desempenho (c) para a microbacia com Caatinga Nativa atingiu valor de 0,78, sinalizando desempenho “bom”, conforme Camargo & Sentelhas (1997).

Na etapa de validação, mais sensível a erros na estimativa, contou-se bom desempenho dos coeficientes “a” e “b” da MUSLE e do fator C para a Caatinga Nativa (Figura 2B). Salienta-se que os dados da validação foram mensurados na escala de microbacia e não utilizados em nenhuma das etapas anteriores. Observa-se que o nível aceitável do coeficiente de Nash-Validação foi mantido, com valor de 0,63 (Figura 2B) (Figura 2B). Quanto à dispersão dos dados em relação à média (precisão) manteve-se elevada correlação com R = 0,81. Para o índice de Willmott (id) obteve-se valor de 0,90, o que indica elevada exatidão do modelo. Com a utilização dos coeficientes da M-USLE calibrados, observa-se que a perda de solo total para os eventos da validação foi superestimada em apenas 4,5% (PBIAS = -4,5) (perdas de solo medidas e estimadas de 6,20 e 6,48 t, respectivamente). Testando os coeficientes “a” e “b” originalmente propostos por Williams (1975), com valores de 11,8 e 0,56, respectivamente obteve-se, com dados da calibração para a microbacia com Caatinga Nativa, valor do coeficiente de NSE de 0,25 (inadequado); índice “c” de 0,52 (desempenho mediano) e PBIAS de 64,88 (alta subestimativa) indicando péssimo desempenho do modelo com os coeficientes originais para outra região.

Para a Microbacia B2 com cobertura vegetal composta de Caatinga Raleada, os fatores “a” e “b” da MUSLE calibrados e validados foram de 90,18 e 0,53 (Figura 2C e 2D) respectivamente. Na etapa de calibração (Figura 2C) o melhor valor do NSE foi de 0,71 sendo o ajuste considerado “aceitável”. Em relação à correlação dos dados (medida de dispersão), observou-se baixa dispersão com “R” de 0,90. Na exatidão do modelo obteve-se, na calibração, valor de 0,90 para o índice de Willmott (id) indicando excelente exatidão e “Bom” desempenho com índice “c = 76” (Figura 2C).

Na validação dos coeficientes da MUSLE para a Microbacia B2/Caatinga Raleada constataram-se índices estatísticos melhores que na etapa de calibração. O coeficiente

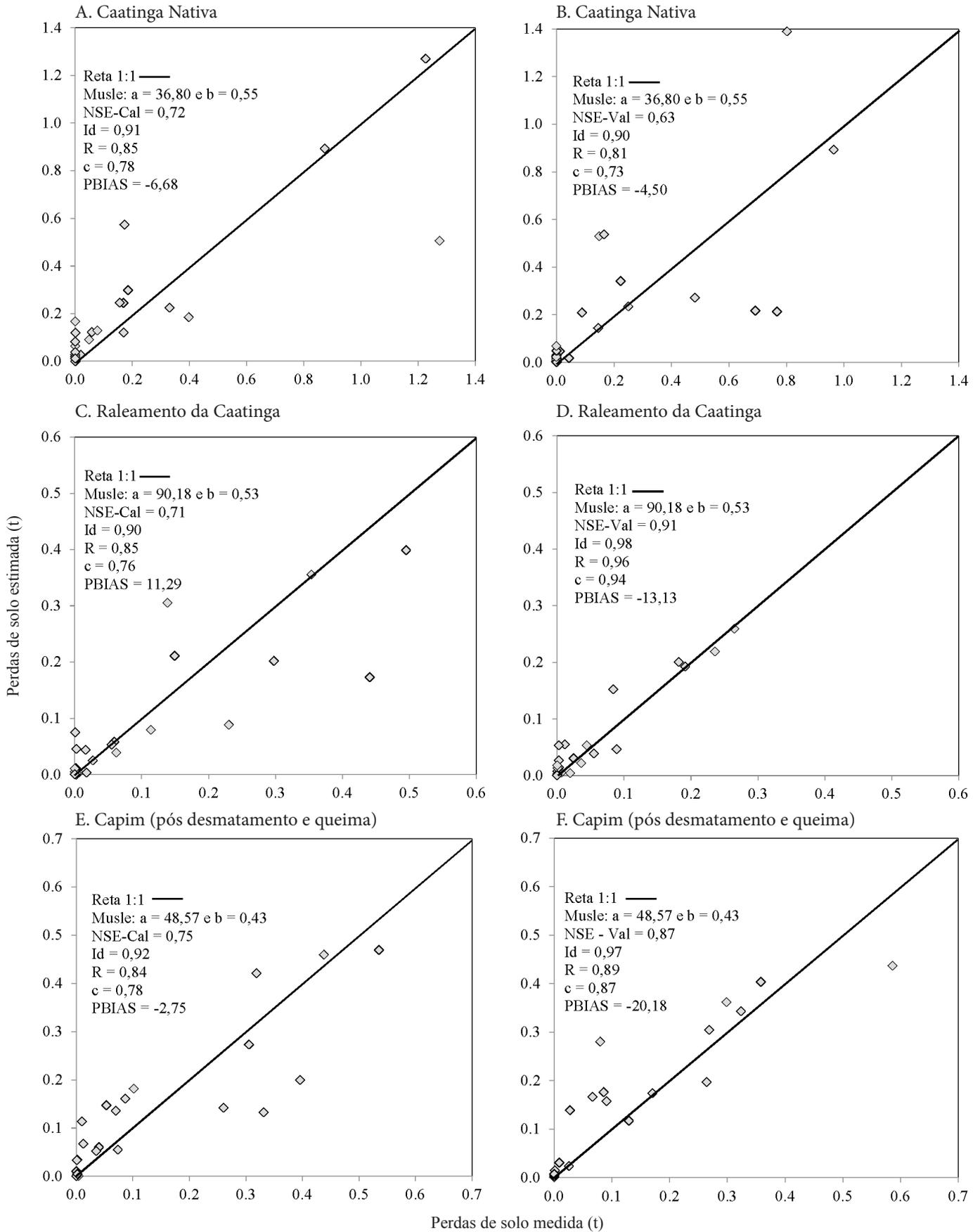


Figura 2. Perdas de solo medidas e estimadas pela MUSLE com uso dos coeficientes “a” e “b” ajustados para as coberturas vegetais estudadas: Caatinga Nativa, calibração (A) e validação (B); raleamento da Caatinga, calibração (C) e validação (D); manejo de desmatamento, queima e cultivo de capim, calibração (E) e validação (F)

de Nash e Sutcliffe de 0,91 (Figura 2D) é considerado adequado e bom. Observaram-se bom índice de dispersão $R = 0,96$ e índice de Willmott (id) de 0,98, o que indica elevada exatidão do modelo. Em relação ao índice de desempenho (c) com valor de 0,94, indica desempenho “ótimo” (Camargo & Sentelhas, 1997). Na análise do desempenho do modelo para as perdas de solo para todos os eventos da validação observa-se que o modelo superestimou em apenas 13,13% (PBIAS = -13,13) em relação ao total medido (perdas de solo medidas e estimadas de 1,26 e 1,42 t, respectivamente). Com os coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975) foram obtidos, com dados da calibração na microbacia com Caatinga Raleada, valor do coeficiente de NSE de -0,20 (inadequado); índice “c” de 0,40 (desempenho mau) e PBIAS de 87,63 (alta subestimativa).

Os fatores “a” e “b” da MUSLE calibrados e validados para a microbacia B3 (cobertura de capim/*Andropogon gayanus* Kunt/ pós-fogo) foram de 48,57 e 0,43 (Figura 2E e 2F) respectivamente. De acordo com as informações geradas nas etapas de calibração e validação, observam-se (Figura 2E e 2F) valores de NSE de 0,75 e 0,87, respectivamente, o que aponta o modelo como “adequado e bom”. Constata-se, também, baixa dispersão dos dados com elevados índices de correlação de 0,84 e 0,89 para as etapas de calibração e validação, respectivamente. Quanto ao índice de Willmott (id), nas duas etapas o modelo apresentou alta exatidão com índice superior a 0,9. Em relação ao índice de confiança ou desempenho (c), na etapa de calibração foi enquadrado como “bom” e na etapa de validação “muito bom” conforme Camargo & Sentelhas (1997). Para as perdas de solo total nos eventos da calibração e validação, respectivamente, ocorreu uma superestimativa de apenas 2,75% (3,08 e 3,16 t, medida e estimada, respectivamente) e 20,18% (2,79 e 3,35 t, medida e estimada, respectivamente). Comparando com o uso dos coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975) obteve-se, com dados da calibração, valor do coeficiente de NSE de 0,36 (aceitável, faixa superior a 0,36); índice “c” de 0,63 (desempenho mediano) e PBIAS de 55,16 (alta subestimativa) o que indica baixo desempenho do modelo com os coeficientes originais.

CONCLUSÕES

1. Os coeficientes de ajuste calibrados “a e b” da MUSLE, mostraram-se apropriados de acordo com o coeficiente de Nash e Sutcliffe, o índice de Willmott (id) e o índice de confiança ou desempenho (c) para as coberturas estudadas: Caatinga Nativa (a = 36,80 e b = 0,55), Caatinga Raleada (a = 90,18 e b = 0,53) e capim (a = 48,57 e b = 0,43).

2. De modo geral, as estimativas pela USLE na escala de 20 m² e pela MUSLE na escala de microbacia apresentaram erros inferiores a 20% para os totais acumulados no período de estudo.

3. O uso dos coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975) apresentou altos erros de estimativa para as microbacias estudadas evidenciando a importância da calibração desses coeficientes, para a região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo apoio financeiro ao projeto PELD - sítio 16, à CAPES, pela bolsa de doutorado do primeiro autor e ao Instituto Federal do Ceará, pela infraestrutura oferecida e pelas bolsas de produtividade em pesquisa, aos pesquisadores envolvidos.

LITERATURA CITADA

- Albuquerque, A. W.; Lombardi Neto, F.; Srinivasan, V. S.; Santos, J. R. Determinação de fatores da equação universal de perdas de solo em Sumé, PB. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.153-160, 2005.
- Alcântara, E. H.; Souza, A. Produção de sedimentos na zona costeira da Bahia – Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.2, p.199-205. 2010.
- Avanzi, J. C.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Mello, C. R. de; Fonseca, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.563-569, 2008.
- Bakker, M. M.; Govers, G.; Kosmas, C.; Vanacker, V.; Oost, K. van; Rounsevell, M. Soil erosion as a driver of land-use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.105, p.467-481, 2005.
- Bakker, M. M.; Govers, G.; Rounsevell, M. D. A. The crop productivity-erosion relationship: an analysis based on experimental work. *Catena*, v.57, p.55-76, 2004.
- Bertoni, J.; Lombardi Neto, F. Conservação dos solo. São Paulo: Ícone, 1990. 335p.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.5, p.89-97, 1997.
- Caten, A. T.; Minella, J. P. G.; Madruga, P. R. A. Desintensificação do uso da terra e sua relação com a erosão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1006-1014, 2012.
- Cerdan, O.; Govers, G.; Bissonnais, Y.; Oost, K. van; Poesen, J.; Saby, N.; Gobin, A.; Vacca, A.; Quinton, J.; Auerswald, K.; Klik, A.; Kwaad, F. J. P. M.; Raclot, D.; Ionita, I.; Rejman, J.; Rousseva, S.; Muxart, T.; Roxo, M. J.; Dostal T. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, v.122, p.167-177, 2010.
- Chaves, H. M. L. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1469-1477, 2010.
- Foster, G. R.; Mccool, D. K.; Renato, K. G.; Moldenhauer, W. C. Conservation of the Universal Soil Loss Equation the SI metric units. *Journal of Soil and Water Conservation*, v.36, p.355-359, 1981.

- Kinnell, P. I. A. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Processes*, v.1, p.851-854, 2005.
- Lim, K. J.; Sagong, M.; Engel, B.A.; Tang, Z.; Choi, J.; Kim, K. S. GIS-based sediment assessment tool. *Catena*, v.64, p.61-80, 2005.
- Odongo, V. O.; Onyando, J. O.; Mutua, B. M.; van Oel, P. R.; Becht, R. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa Catchment, Kenya. *International Journal of Sediment Research*, v.28, p.368-383, 2013.
- Oliveira, P. T. S.; Alves, S. T.; Rodrigues, D. B. B.; Panachuki, E. Erosion risk mapping applied to environmental zoning. *Water Resources Management*, v.25, p.1021-1036, 2011.
- Oliveira, P. T. S.; Wendland, E.; Nearing, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. *Catena*, v.100, p.139-147, 2012.
- Paranhos R. M.; Paiva J. B. D. Avaliação de metodologia de estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.13, p.7-18, 2008.
- Sadeghi, S. H.; Mizuyama, T.; Vangah, B. G. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for stormwise sediment yield estimation. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, v.18, p.117-128, 2007.
- Santos, J. C. N. Mensuração da erosão do solo no semiárido em diferentes usos de terras e escalas espaciais. Fortaleza: UFC, 2012. 100p. Dissertação Mestrado
- Santos, J. C. N.; Palácio, H. A. Q.; Andrade, E. M.; Meireles, A. C. M.; Araújo Neto, J. R. Runoff and soil and nutrient losses in semiarid uncultivated fields. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.813-820, 2011.
- Schultz, G. B.; Siefert, C. A. C.; Santos I. D. Avaliação do ARCMUSLE para estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do alto rio negro, região sul brasileira. *Boletim de Geografia*, v.31, p.131-141, 2013.
- Silva, C. R.; Chaves, H. M. L.; Camelo, A. P. Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1431-1439, 2011.
- Williams, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA. ARS-S-40, 1975. p.244-252.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. Agriculture Handbook, 537.
- Zhang, H.; Yang, Q.; Li, R.; Liu, Q.; Moore, D.; He, P.; Ritsema, C. J.; Geissen, V. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences*, v.52, p. 177-188, 2013.
- Zhang, Y.; Degroote, J.; Wolter, C.; Sugumaran, R. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into GIS framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation & Development*, v.20, p.84-91, 2009.