

ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE A PARTIR DE ATRIBUTOS DE SOLOS COM HORIZONTE B TEXTURAL NO BRASIL⁽¹⁾

J.J.G.S.M. MARQUES⁽²⁾, N. CURI⁽³⁾, J.M. de LIMA⁽³⁾, M.M. FERREIRA⁽³⁾,
M.L.N. SILVA⁽⁴⁾ & D.F. FERREIRA⁽⁵⁾

RESUMO

Os métodos existentes para estimar a erodibilidade dos solos (fator K) não se têm mostrado adequados quando aplicados a solos brasileiros. Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de método indireto para estimar a erodibilidade, visando obter esse fator, a partir de propriedades do solo facilmente determináveis. Assim, os horizontes A e Bt (B textural) de 22 solos de várias regiões geográficas do Brasil foram submetidos a diversas análises químicas e físicas, e a descrição morfológica do perfil foi considerada. Tais resultados (variáveis independentes) foram submetidos à análise de regressão linear múltipla em "stepwise", e relacionados com a erodibilidade (fator K) medida diretamente no campo (variável dependente). Obtiveram-se várias equações com graus crescentes de complexidade e precisão. A partir das variáveis selecionadas, tanto do horizonte A quanto do Bt, e da distribuição do tamanho das partículas, obtida com e sem dispersante químico, foi possível estimar, satisfatoriamente, a erodibilidade desses solos. As informações contidas na descrição morfológica dos perfis de solo, especialmente as referentes à estrutura, bem como os teores de carbono orgânico, foram de grande importância para a determinação indireta da erodibilidade (fator K).

Termos de indexação: erosão, erodibilidade do solo (fator K), equação universal de perdas de solo.

SUMMARY: *ESTIMATION OF ERODIBILITY FROM ATTRIBUTES OF SOILS WITH ARGILLIC HORIZON IN BRAZIL*

The soil erodibility (K-factor) determination by indirect methods has not been adequate for application in Brazilian soils. This paper aimed the development of K-factor evaluation methods depending on easily-assessed chemical, physical and morphological soil properties. Samples from A and B horizons of 22 Brazilian soils bearing argillic horizon were submitted to several chemical and physical analyses and the morphological description of the soil profile

⁽¹⁾ Parte da dissertação de Mestrado apresentada pelo primeiro autor à Universidade Federal de Lavras (MG). Recebido para publicação em julho de 1996 e aprovado em agosto de 1997.

⁽²⁾ Aluno de Mestrado do CPGSNP- Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG).

⁽³⁾ Professor, UFLA - Departamento de Ciência do Solo, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Pesquisador, EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, CEP 22460-000 Rio de Janeiro (RJ).

⁽⁵⁾ Professor, UFLA - Departamento de Ciências Exatas, Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG).

was considered. A stepwise multiple linear regression analysis was run, relating the results of those analyses with the K-factor values directly measured in the field. Several equations with increasing degrees of complexity and precision were obtained. From the selected variables from the A and B horizons, as well as the particle-size distribution with and without chemical dispersant, it was possible to satisfactorily estimate the erodibility of such soils. The informations obtained from the soil profile description, specially about soil structure, as well as organic carbon amounts, are of major importance for the indirect determination of the erodibility (K-factor).

Index terms: erosion, soil erodibility (K-factor), Universal Soil Loss Equation (USLE).

INTRODUÇÃO

A demanda por modelos que permitam estimar a erosão hídrica causada pelo uso do solo é crescente. A equação universal de perdas de solo - USLE - (Wischmeier & Smith, 1978), apesar de suas restrições (Wischmeier, 1976), é considerada o mais eficiente modelo de estimativa de perdas de solo, sendo amplamente utilizada, principalmente nos EUA (Renard et al., 1994). Embora os princípios da USLE possam ser aplicados às mais diversas situações, daí o fato de ser chamada de "universal", ela só pode ser usada com sucesso em situações em que os parâmetros envolvidos sejam determinados localmente (Foster et al., 1982).

A erodibilidade do solo, representada na USLE pelo fator K, é, indubitavelmente, mais bem determinada por meio da instalação de parcelas de perdas de solo no campo. Entretanto, uma vez que a instalação e a manutenção dessas parcelas envolvem custos consideráveis, além de demandar vários anos de coleta de dados, muitas vezes opta-se por determinar o fator K por meio de chuvas simuladas. Embora isso apresente a vantagem da maior rapidez, a simulação de chuvas não é ainda prática o bastante para ser usada em grande número de solos em vários locais (Wischmeier & Mannering, 1969). Por esses motivos, foram desenvolvidas equações, relacionando o fator K, medido diretamente no campo, com atributos do solo relativos à resistência do solo à erosão, com vistas em estimar a erodibilidade para solos onde o referido fator não é medido diretamente (Wischmeier et al., 1971; Römken et al., 1977; Young & Mutchler, 1977; Denardin, 1990).

Dada a variação entre solos, o fator K é o mais difícil de ser adaptado a condições diferentes daquelas usadas na elaboração dos modelos (Foster et al., 1982). Por esta razão, os métodos indiretos para estimativa desse fator, desenvolvidos para solos de regiões temperadas, não se têm mostrado adequados aos solos de regiões tropicais (Henklain & Freire, 1983; Silva et al., 1986; Obi et al., 1989; Denardin, 1990; Lima, 1991; Silva et al., 1994; Marques, 1996). Mesmo métodos desenvolvidos, ou adaptados, para o ambiente tropical, como aqueles apresentados por Denardin (1990) e Lima et al. (1990), não se têm mostrado satisfatórios (Silva et al., 1994; Marques, 1996). Possivelmente, uma das causas dessa inadequação é devido à grande heterogeneidade do comportamento

dos solos tropicais frente aos processos erosivos (El-Swaify & Dangler, 1982). Por esse motivo, propôs-se desenvolver equações de estimativa do fator K específicas a cada agrupamento de solos, ao invés de um único método para todo o universo de solos existentes em dada região (El-Swaify & Dangler, 1982; Roloff & Denardin, 1994). O objetivo deste trabalho foi obter uma equação que, envolvendo variáveis de fácil determinação, estimasse o valor do fator K de solos com horizonte B textural (Bt) de diferentes regiões do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras não destorroadas dos horizontes A e Bt de solos com horizonte B textural de várias regiões geográficas do Brasil, cujos valores de erodibilidade (fator K) foram determinados diretamente no campo. A classificação, a localização e o valor do fator K observado estão relacionados no trabalho de Marques et al. (1997).

Na fração TFSA (inferior a 2 mm), foram feitas análises do complexo sortivo, pH (em água e em KCl 1 mol L⁻¹) e carbono orgânico (Vettori, 1969; EMBRAPA, 1979). Nesta mesma fração, foram determinados os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e P₂O₅, extraídos pelo ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1979). A atividade da argila foi calculada subtraindo-se da CTC a pH 7 a contribuição da matéria orgânica e corrigindo-se o resultado pelo teor de argila na TFSA.

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (Blake & Hartge, 1986). Pelo método de Grohmann & Rajj (1977), foram determinadas as seguintes frações granulométricas: acima de 5,66; 5,66 a 4,76; 4,76 a 2,83; e 2,83 a 2 mm. Na TFSA, foram feitas análises granulométricas e fracionamento de partículas, utilizando-se o método da pipeta (Day, 1965), com e sem o emprego de dispersante químico (NaOH 1 mol L⁻¹). A fração areia foi dividida em: areia muito grossa (2 a 1 mm); areia grossa (1 a 0,5 mm); areia média (0,5 a 0,25 mm); areia fina (0,25 a 0,105 mm); areia muito fina (0,105 a 0,074 mm), e areia muitíssimo fina (0,074 a 0,053 mm).

Agregados de diâmetro entre 7,93 e 4,76 mm foram submetidos ao teste de estabilidade de agregados em água, através de peneiramento (Kemper & Rosenau, 1986). A partir da quantidade de agregados retidos

em cada peneira (2; 1; 0,5; 0,25; e 0,105 mm), calculou-se seu diâmetro médio geométrico (DMG) por meio da seguinte equação:

$$DMG = \exp (\sum w_i \log x_i) (\sum w_i)^{-1} \quad (1)$$

onde: w_i = massa dos agregados de cada classe de tamanho (g); x_i = diâmetro de cada classe de tamanho (mm).

Empregaram-se três tipos de tratamentos da amostra de agregados para a análise de estabilidade: (1) sem pré-umedecimento; (2) com pré-umedecimento lento através de capilaridade, e (3) com pré-umedecimento lento através de capilaridade e descontando-se a contribuição da fração (dispersa em NaOH 1 mol L⁻¹) de tamanho superior ao da peneira em que os agregados estavam retidos (Angulo, 1983). Todas as análises anteriormente descritas foram realizadas em ambos os horizontes com quatro repetições.

Agregados do horizonte A de 7,93 a 4,76 mm de diâmetro foram sujeitos ao teste de resistência ao impacto de gotas de chuva (Angulo, 1983). Esses agregados foram colocados num suporte com abertura de malha de 4 mm sob um gotejador posicionado a 1,725 m de altura (Figura 1). Gotas de 4,17 mm de diâmetro atingiram os agregados com energia cinética igual a 0,296 mJ e frequência de 1,65 ± 0,11 gotas s⁻¹. Os agregados foram considerados destruídos quando passaram pela abertura do suporte, enquanto os agregados que não passaram por essa abertura, após impacto de 300 gotas, foram considerados resistentes. O índice de estabilidade de agregados (IEA) foi calculado conforme Angulo (1983). O IEA foi expresso na forma original (Angulo, 1983), ignorando-se os agregados compostos de cascalho de diâmetro superior a 4 mm. Esta análise foi realizada com os agregados secos ao ar e em cinco repetições (dez agregados por repetição).

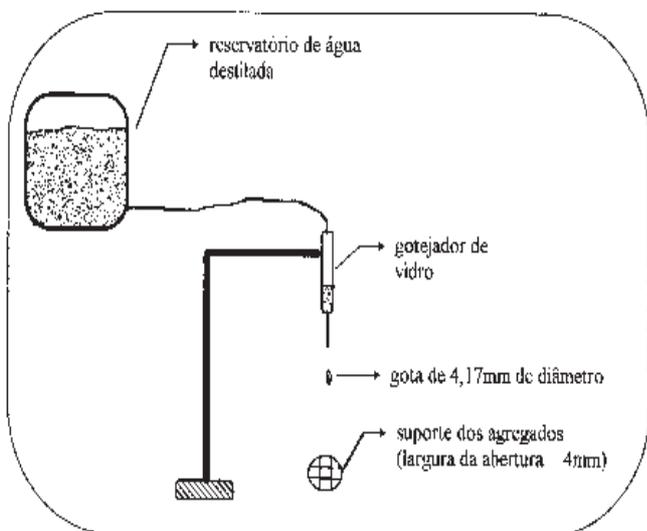


Figura 1. Esquema do gotejador utilizado no teste de resistência ao impacto de gotas (fora de escala).

Com as informações contidas na descrição morfológica dos perfis de cada solo, foram codificadas a estrutura do horizonte A e a permeabilidade do solo, segundo Wischmeier et al. (1971). A permeabilidade dos horizontes A e Bt foi estimada pelo método de Galindo & Margolis (1989), obtendo-se também o produto da multiplicação da permeabilidade dos dois horizontes. Alternativamente, atribuiu-se às classes de drenagem - bem drenado, moderadamente drenado e imperfeitamente drenado (únicas presentes nos solos estudados) - as notas 5, 4 e 3, respectivamente. Para quantificar a estrutura do solo, deram-se notas às diferentes classes de tamanho (muito grande a muito pequena), grau (forte a fraco) e tipo (granular, blocos etc.). A codificação do tamanho foi feita da maneira que se segue: grande = 8; média = 6; pequena = 4; muito pequena = 2; e maciça ou grãos simples = 1. Embora maciça e grãos simples sejam tipo de estrutura e não tamanho, normalmente, quando esses tipos são identificados, não se descreve o tamanho, razão por que foram codificados como 1. Assim, os códigos da estrutura foram compostos pelas notas de cada uma dessas características (tamanho, grau e tipo) ou combinações delas. Na combinação de dois atributos da estrutura (por exemplo, o tamanho: pequena e muito pequena), o valor médio das notas foi considerado.

No desenvolvimento de modelos de estimativa do fator K, consideraram-se como variáveis independentes: (1) os resultados das análises realizadas nas amostras dos horizontes dos diferentes solos; (2) os códigos de permeabilidade e estrutura; (3) as combinações de variáveis usadas com melhores resultados nos modelos propostos por Wischmeier et al. (1971), El-Swaify & Dangler (1976), Denardin (1990) e Roloff & Denardin (1994); e (4) combinações de variáveis criadas neste trabalho. Isso resultou num número total de variáveis independentes igual a 95. Os fatores K observados (Marques et al., 1997) foram considerados como variáveis dependentes. As equações receberam os valores de todas as variáveis e forneceram o valor do fator K em unidades do S.I. (t h (MJ mm)⁻¹). Usou-se o programa estatístico SAS, tendo sido os modelos ajustados por meio de análise de regressão linear múltipla pelo processo de "stepwise". O nível mínimo de significância para inclusão ou exclusão de uma variável no modelo foi de 15% (Denardin, 1990).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das 95 variáveis testadas, 23 tomaram parte em, pelo menos, uma das 20 equações obtidas. A descrição dessas 23 variáveis encontra-se no quadro 1, na mesma seqüência em que tomaram parte nos modelos. Conforme pode ser observado, o número de variáveis oriundas do horizonte A é, aproximadamente, o mesmo que do Bt. É possível, então, que um dos motivos capaz de explicar a falta de adequação dos métodos indiretos para a estimativa do fator K de solos com Bt (Marques, 1996), com exceção da estimativa da drenagem

inferida com base no perfil do solo, seja o fato de os modelos existentes não levarem em consideração as demais propriedades do horizonte subsuperficial. No entanto, isso não significa que sejam as características do horizonte Bt as responsáveis funcionais pela erodibilidade. Embora não exista, nem seja necessário existir, relação de causa e efeito entre as variáveis selecionadas e o fator K (Römkens, 1987), fica claro que a maioria delas tem participação nos processos que governam a erosão, não sendo, no seu conjunto, muito diferentes das selecionadas em outros estudos (Wischmeier & Mannering, 1969; Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1976; Römkens et al., 1977; Denardin, 1990).

Dos componentes caracterizadores da estrutura do solo (tamanho, grau e tipo) ou combinações deles, o tamanho apresentou melhor correlação com o fator K (Figura 2), sendo a primeira variável a ser incluída no modelo (Quadro 1). No horizonte A dos solos estudados, não se verificou a presença do tamanho muito grande. Nos trabalhos de Silva et al. (1994, 1995), solos com unidades estruturais menores, embora apresentassem maior quantidade de solo

salpicada, mostravam menor erodibilidade, concordando com os resultados obtidos neste trabalho. Possivelmente, as partículas salpicadas desses solos eram constituídas das próprias unidades estruturais, as quais, com o salpico, apenas mudavam de posição sem alterar a estrutura da camada superficial, o que poderia levar à redução da infiltração. Por outro lado, quanto maior o tamanho dos agregados, mais fracas as forças que unem suas partículas (Oades, 1993). Assim, as partículas que formam os agregados grandes, quando estes são expostos ao impacto das gotas de chuva, são deslocadas mais facilmente e alojam-se entre as unidades maiores, o que leva a um rápido selamento superficial e, conseqüentemente, à maior erosão (Le Bissonnais et al., 1989; Roth & Eggert, 1994).

O tamanho das unidades estruturais do horizonte A pode ser facilmente determinado no campo (Lemos & Santos, 1996) ou por meio das informações constantes na descrição morfológica dos perfis dos solos. Neste trabalho, a estrutura foi analisada, graças a descrições morfológicas realizadas, em várias épocas, por pedólogos das mais diversas instituições e, mesmo

Quadro 1. Descrição das variáveis incluídas nas equações

Variáveis	Descrição
X ₁	Código do tamanho da estrutura do horizonte A (adimensional)
X ₂	Silte disperso em água do horizonte Bt (g kg ⁻¹) multiplicado por X ₁
X ₃	Partículas maiores que 0,1 mm dispersas em NaOH 1 mol L ⁻¹ (g kg ⁻¹) multiplicadas por C orgânico (g kg ⁻¹) do horizonte A (Denardin, 1990)
X ₄	C orgânico (g kg ⁻¹) multiplicado pela AMG ⁽¹⁾ dispersa em água (g kg ⁻¹) do horizonte A
X ₅	AMF ⁽²⁾ (g kg ⁻¹) + AMMF ⁽³⁾ (g kg ⁻¹) + silte (g kg ⁻¹) multiplicados pela argila (g kg ⁻¹) do horizonte A com dispersão em água
X ₆	DMG ⁽⁴⁾ sem pré-tratamento do horizonte Bt (mm)
X ₇	Atividade da argila do horizonte Bt (mmol _c kg ⁻¹)
X ₈	AMG dispersa em água do horizonte Bt (g kg ⁻¹)
X ₉	Fe ₂ O ₃ extraído pelo ataque sulfúrico do horizonte Bt (g kg ⁻¹)
X ₁₀	C orgânico do horizonte Bt (g kg ⁻¹)
X ₁₁	DMG com pré-tratamento, descontando-se o efeito da areia, do horizonte Bt (mm)
X ₁₂	SiO ₂ extraída pelo ataque sulfúrico do horizonte Bt (g kg ⁻¹)
X ₁₃	Código da drenagem proposto (adimensional)
X ₁₄	Fração entre 5,66 e 4,76 mm dispersa em NaOH 1 mol L ⁻¹ do horizonte A (g kg ⁻¹)
X ₁₅	DMG com pré-tratamento do horizonte Bt (mm)
X ₁₆	AG ⁽⁵⁾ dispersa em água do horizonte Bt (g kg ⁻¹)
X ₁₇	Atividade da argila do horizonte A (mmol _c kg ⁻¹)
X ₁₈	Código da estrutura de Wischmeier et al. (1971) (adimensional)
X ₁₉	Código da permeabilidade de Galindo & Margolis (1989) do horizonte A (adimensional)
X ₂₀	AF ⁽⁶⁾ dispersa em água do horizonte A (g kg ⁻¹)
X ₂₁	DMG com pré-tratamento do horizonte A (mm)
X ₂₂	Índice de floculação do horizonte Bt (g g ⁻¹)
X ₂₃	Relação silte/argila dispersos em água do horizonte A (g g ⁻¹)

Frações de tamanho correspondentes a: ⁽¹⁾areia muito grossa, ⁽²⁾areia muito fina; ⁽³⁾areia muitíssimo fina; ⁽⁴⁾Diâmetro médio geométrico; ⁽⁵⁾areia grossa; e ⁽⁶⁾areia fina.

assim, forneceu resultados consistentes, o que mostra ser este um atributo confiável. A alta correlação encontrada entre o tamanho das unidades estruturais e o fator K ressalta a importância da descrição morfológica dos perfis de solo.

Embora Bruce-Okine & Lal (1975) tenham proposto a resistência dos agregados ao gotejamento como um bom índice da erodibilidade do solo, esse parâmetro não se mostrou bem relacionado com o fator K, contrariando os resultados de Angulo (1983). Por outro lado, a presença do DMG, tanto do horizonte A quanto do Bt, entre as variáveis selecionadas atesta a importância das variáveis estruturais no processo erosivo (Angulo, 1983), já que este é tido como um indicador da persistência das unidades estruturais no solo (Puget et al., 1995). Igwe et al. (1995) não encontraram correlação entre o fator K e a estabilidade estrutural nos solos tropicais por eles estudados, porém utilizaram para determinação do fator K o nomograma de Wischmeier et al. (1971). A permeabilidade do solo codificada por Wischmeier et al. (1971) não foi incluída entre as variáveis selecionadas. Denardin (1990) inseriu esta variável em um de seus modelos, contudo a baixa correlação entre ela e o fator K ($r = 0,26$) talvez seja uma das causas da ineficiência do modelo desse autor, quando aplicado a esses solos (Marques, 1996). Tanto o método de estimativa da permeabilidade de Galindo & Margolis (1989) quanto o proposto neste trabalho foram selecionados para o modelo (codificação das classes de drenagem: bem drenado = 5; moderadamente drenado = 4; e imperfeitamente drenado = 3). Ambos são baseados na descrição morfológica dos perfis dos solos, o que reforça o discutido anteriormente, embora esses dois termos (drenagem e permeabilidade) não possam ser considerados equivalentes. A presença da fração 5,66 a 4,76 mm, entre as variáveis selecionadas, revela o controle da erosão exercido pela fração grosseira na superfície do solo. Estes reduzem a erosão aumentando a infiltração de água no solo, reduzindo a desagregação provocada pelo impacto das gotas de chuva, através da proteção (Chow & Rees, 1995), além de apresentar maior massa para ser transportada.

Entre as combinações de variáveis criadas por outros autores (Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Denardin, 1990; Roloff & Denardin, 1994), apenas a variável X_3 , criada por Denardin (1990), foi selecionada para o modelo. A variável M ((silte + areia muito fina) x (1.000 - argila)) apresentou uma correlação elevada com a erodibilidade em outros trabalhos (Wischmeier et al., 1971; Römken et al., 1977). Contudo, ao que parece, essa variável acha-se relacionada com a erodibilidade quando são incluídos na análise apenas solos de textura média (El-Swaify & Dangler, 1977; Denardin, 1990; Roloff & Denardin, 1994).

No quadro 2, observam-se algumas das equações obtidas, as quais são mostradas em virtude de possuírem elevados coeficientes de determinação, sem, contudo, terem um número excessivo de variáveis. Obviamente, à medida que novas variáveis são acrescentadas ao modelo, o coeficiente de determinação aumenta, atingindo 1,00 quando 20 das 23 variáveis listadas no quadro 1 foram incluídas (equação não mostrada). As variáveis X_6 , X_{10} e X_9 foram removidas do modelo após a entrada da variável X_{12} . Os coeficientes de determinação obtidos são da mesma magnitude que os encontrados em outros trabalhos (Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Römken et al., 1977; Denardin, 1990). A complexidade das equações é apenas aparente, pois sua linearidade facilita muito os cálculos. Além disso, existe tendência de os modelos de previsão de perdas de solo serem utilizados por meio de recursos computacionais (Roloff & Clivati, 1995; Yoder & Lown, 1995), o que reduz o trabalho de cálculo. O baixo número de variáveis foi apontado por Silva et al. (1994) como uma das causas da inadequação dos modelos de Denardin (1990).

Embora as equações geradas (Quadro 2) necessitem de número considerável de variáveis, estas são, sem exceção, de fácil determinação ou prontamente disponíveis nos boletins de levantamentos de solos. Possivelmente, apenas as variáveis X_6 e X_{11} não sejam rotineiramente determinadas por todos os laboratórios de análise de solo nacionais. A escolha da equação a ser empregada pode ser feita com base no coeficiente

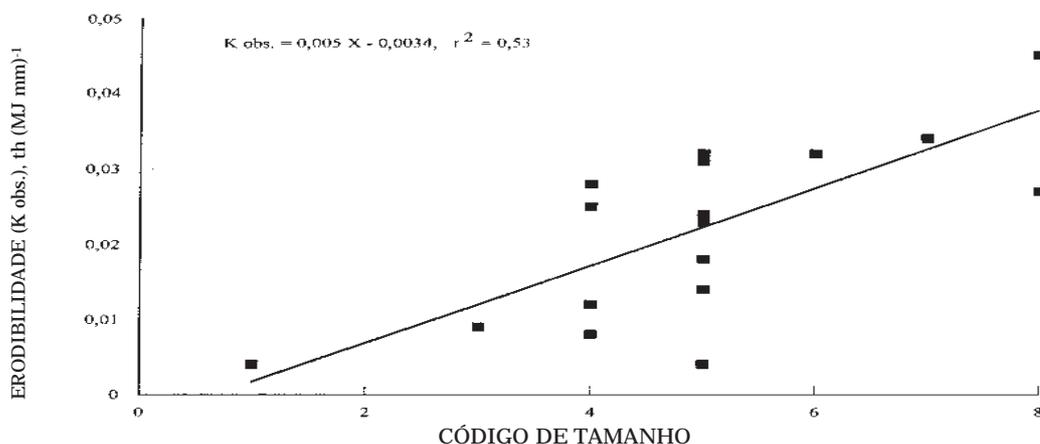


Figura 2. Relação entre o código do tamanho das unidades estruturais e o fator K observado (K obs.).

de determinação (Quadro 2), em função da precisão desejada para o fator K. O uso dessas equações restringe-se a solos geneticamente semelhantes, cujos atributos não apresentem valores diversos dos abrangidos pelos solos aqui estudados.

Nos quadros 3 e 4, encontram-se os resultados das análises físicas, químicas e os códigos de estrutura e drenagem que compõem as variáveis presentes no quadro 2.

Nas figuras 3a e 3b, estão reunidos, respectivamente, os gráficos dos resíduos padronizados e a dispersão dos pontos (Kobs. x Kest.), usando-se a seguinte equação:

$$K = -0,006 + 0,0074X_1 - 0,855 \times 10^{-5}X_2 + 3,637 \times 10^{-6}X_3 - 1,878 \times 10^{-5}X_4 + 1,172 \times 10^{-7}X_5 - 0,012X_6 - 2,438 \times 10^{-4}X_7 + 1,107 \times 10^{-4}X_8 \quad (1)$$

Quadro 2. Variáveis e coeficientes de determinação (r²) das equações obtidas por "stepwise"

Nº	Const.	Variáveis										r ²	
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀		
		x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁶	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁷			x10 ⁻⁴	x10 ⁻⁴	x10 ⁻⁴	x10 ⁻⁴		
1	-0,020	0,0073	-0,684	4,045	-1,465	0,668							0,79
2	-0,016	0,0080	-0,846	3,736	-1,355	0,989	-0,007						0,85
3	-0,007	0,0078	-0,875	3,281	-1,079	0,928	-0,009	-1,984					0,88
4	-0,006	0,0074	-0,855	3,637	-1,878	1,172	-0,012	-2,438	1,107				0,90
5	-0,012	0,0082	-1,044	3,768	-2,122	1,254	-0,015	-2,819	1,300	1,039			0,94
6	-0,009	0,0085	-1,148	4,385	-2,446	1,623	-0,017	-3,104	1,700	0,988	-8,659		0,96
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₁₁	X ₇	X ₈	X ₁₂	X ₁₃		
		x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁶	x10 ⁻⁵	x10 ⁻⁷			x10 ⁻⁴	x10 ⁻⁴	x10 ⁻⁴			
7	-0,036	0,0081	-1,282	7,096	-3,388	2,078	-0,012	-5,333	1,441	1,639			0,97
8	-0,029	0,0081	-1,373	7,621	-3,638	2,221	-0,014	-6,162	1,551	1,935	-0,002		0,98

Quadro 3. Atributos granulométricos dos solos estudados

Solo	Horizonte A						Horizonte B				
	NaOH 1 mol L ⁻¹				Água		Água		Água		
	AMG ⁽¹⁾	AG ⁽²⁾	AM ⁽³⁾	AF ⁽⁴⁾	AMG	AMF ⁽⁵⁾	AMMF ⁽⁶⁾	Silte	Argila	AMG	Silte
Nº	g kg ⁻¹										
1	43	134	192	328	31	94	26	103	70	26	426
2	40	106	208	388	41	44	31	110	74	19	210
3	4	45	134	199	5	41	67	451	68	24	419
4	127	157	147	206	104	51	29	181	36	156	241
5	20	132	138	138	12	17	12	382	331	6	759
6	57	189	188	194	67	32	26	182	150	26	174
7	18	50	116	265	19	107	90	233	109	61	242
8	65	140	119	209	49	78	80	246	61	53	196
9	16	97	180	316	13	94	81	177	51	22	191
10	66	143	149	233	88	53	42	169	101	66	262
11	57	137	135	199	67	52	42	208	151	71	251
12	72	113	140	217	63	63	53	205	138	38	266
13	53	120	128	183	33	51	44	215	190	22	213
14	76	213	139	149	95	32	22	194	137	135	204
15	23	45	60	278	29	167	125	174	90	25	249
16	46	171	179	192	39	45	30	196	130	59	184
17	14	47	69	89	31	27	26	408	238	12	825
18	22	21	19	33	16	9	13	486	396	32	335
19	5	87	230	279	8	56	39	181	64	45	234
20	0	6	147	531	1	77	55	87	58	1	193
21	52	155	123	147	63	39	18	244	168	95	243
22	43	171	169	178	40	39	25	192	150	33	544

Frações de tamanho correspondentes a: ⁽¹⁾ Areia muito grossa (1 a 2 mm); ⁽²⁾ Areia grossa (0,5 a 1 mm); ⁽³⁾ Areia média (0,25 a 0,50 mm); ⁽⁴⁾ Areia fina (0,1 a 0,25 mm); ⁽⁵⁾ Areia muito fina (0,05 a 0,1 mm); ⁽⁶⁾ Areia muitíssimo fina (0,074 a 0,053 mm).

Quadro 4. Teores de C orgânico, Fe₂O₃ e SiO₂ extraídos pelo ataque sulfurico do horizonte Bt, diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados do horizonte Bt, atividade da argila do horizonte Bt (T arg.), códigos da estrutura do horizonte A (E) e da drenagem do solo (D)

Solo	C orgânico		T	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	E ⁽¹⁾	D ⁽²⁾	DMG	
	Hor. A	Hor. Bt	argila					s/p ⁽³⁾	c/p s/a ⁽⁴⁾
Nº	— g kg ⁻¹ —		mmolc kg ⁻¹	— g kg ⁻¹ —		— mm —			
1	5	4	147	30	153	4	5	0,40	0,65
2	4	4	87	20	160	8	5	0,32	0,35
3	13	6	337	62	186	5	5	0,45	0,85
4	15	4	213	61	231	7	5	1,37	2,45
5	14	6	22	101	248	8	4	0,62	2,47
6	14	5	109	55	120	5	4	0,60	1,39
7	7	3	119	66	185	5	4	1,83	2,6
8	13	4	343	52	148	5	3	0,71	0,66
9	4	6	240	44	128	4	3	0,94	0,65
10	9	4	555	71	178	4	5	0,51	0,24
11	9	4	213	68	154	1	5	0,85	1,09
12	9	5	161	43	181	4	5	0,89	1,01
13	11	7	84	66	209	4	5	1,85	3,78
14	17	13	240	24	134	5	4	0,58	0,87
15	7	4	377	76	195	3	4	0,45	0,38
16	2	3	137	56	225	5	4	1,53	2,46
17	28	3	269	97	231	5	5	0,34	0,60
18	21	9	75	58	271	6	5	1,64	4,30
19	9	7	322	46	163	5	5	0,37	0,91
20	6	4	165	38	130	1	5	0,48	0,63
21	13	11	118	85	192	5	5	1,11	2,29
22	12	3	64	88	226	4	4	0,57	1,79

(¹) Valores segundo as características estruturais; (²) Valores segundo a classe de drenagem: 5 = bem drenado, 4 = moderadamente drenado, 3 = imperfeitamente drenado; (³) sem pré-umedecimento; (⁴) com pré-umedecimento lento e descontando-se a contribuição da fração de tamanho superior ao da peneira em questão.

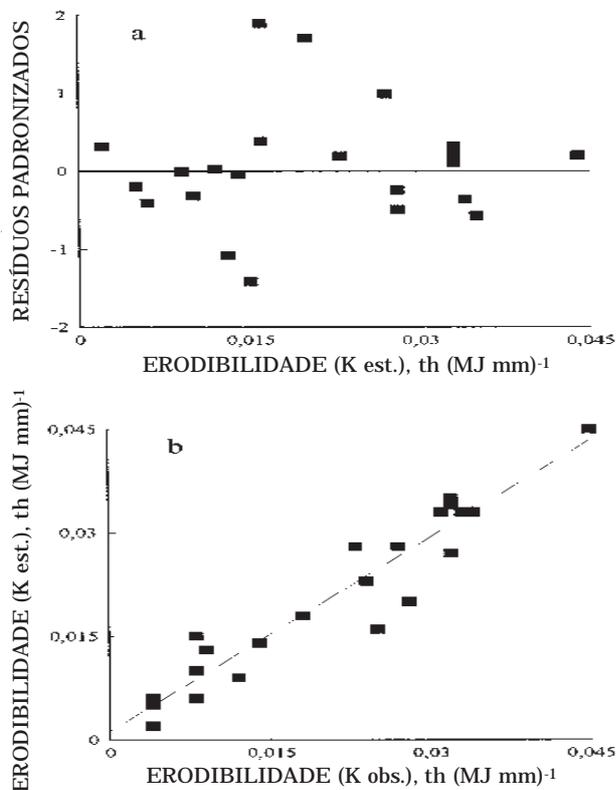


Figura 3. Resíduos padronizados (a) e relação entre os valores observados e estimados do fator K pela equação 4 (b). Na figura 3 b o traço contínuo representa a linha 1:1.

As variáveis relacionadas no modelo foram descritas no quadro 1. Esta equação foi escolhida por ser, dentre as de mais alto r^2 , a que possui variáveis mais facilmente adaptáveis à rotina. Na figura 3a, observa-se que a distribuição dos resíduos padronizados está dentro da faixa 2 e -2, indicando serem eles aceitáveis (Neter & Wassermann, 1974). Como os erros estão uniformemente distribuídos ao longo dos valores de K estimados, pode-se afirmar que não existe tendência de super ou subestimação dos valores da erodibilidade para certos valores estimados. Embora a maioria dos valores de erodibilidade estimados esteja bastante próxima dos observados ($r^2 = 0,90$), para alguns solos (1, 12 e 22), esta equação ainda mostra certa inadequação (Figura 3b). Na figura 3b, optou-se por não mostrar o intervalo de confiança do valor predito, visto que, para cada solo, ele assume diferentes amplitudes conforme os valores de X_1 a X_8 distanciam-se da média dos 22 solos. Entre todos os valores observados, apenas os solos 1, 12 e 22 achavam-se além do intervalo de confiança do fator K estimado.

CONCLUSÕES

1. A partir das variáveis selecionadas, tanto do horizonte A quanto do Bt, e da distribuição do tamanho das partículas, obtida com e sem dispersante químico, foi possível estimar satisfatoriamente a erodibilidade dos solos brasileiros com horizonte B textural.

2. As informações contidas na descrição morfológica dos perfis de solo, especialmente as referentes à estrutura, bem como os teores de carbono orgânico, foram de grande importância para a determinação indireta da erodibilidade de solos brasileiros com horizonte B textural.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores e professores D. J. Reinert (UFMS), E. Margolis (UFRPE), G.R. Curcio (EMBRAPA), I.B. Chaves e I.F. Silva (UFPB), J.R.C. Silva (UFC), L.H.C. Anjos (UFRRJ), M. Resende (UFV), N. Kämpf (UFRGS), R.C. Alvarenga (EMBRAPA) e S.C.F. Dechen (IAC) que, gentilmente, enviaram amostras de solo.

LITERATURA CITADA

- ANGULO, J.R. Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros. Curitiba, UFPR, 1983. 154p. (Dissertação de Mestrado)
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.377-382.
- BRUCE-OKINE, E. & LAL, R. Soil erodibility as determined by raindrop technique. Soil Sci., Baltimore, 119:149-157, 1975.
- CHOW, T.L. & REES, H.W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. Can. J. Soil Sci., Ottawa, 75:227-232, 1995.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle - size analysis. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.545-566.
- DENARDIN, J.E. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. Piracicaba, ESALQ, 1990. 81p. (Tese de Doutorado)
- EL-SWAIFY, S.A. & DANGLER, E.W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 1976, West Lafayette. Proceedings. Ankeny, SWCS, 1977. p.105-104.
- EL-SWAIFY, S.A. & DANGLER, E.W. Rainfall erosion in the tropics: a state of art. In: KREBS, D.M., ed. Determinants of soil loss tolerance. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p.1-25.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS, 1979. n.p.
- FOSTER, G.R.; MOLDENHAUER, W.C. & WISCHMEIER, W.H. Transferability of U.S. technology for prediction and control of erosion in the tropics. In: American Society of Agronomy. Soil erosion and conservation in the tropics. Madison, ASA/SSSA, 1982. p.135-149. (Special Publication, 43)
- GALINDO, I.C.L. & MARGOLIS, E. Tolerância de perdas por erosão para solos do Estado de Pernambuco. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 13:95-100, 1989.
- GROHMANN, F. & RAIJ, B. Dispersão e pré-tratamento para análise granulométrica de latossolos argilosos. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 1:52-53, 1977.
- HENKLAIN, J.C. & FREIRE, O. Avaliação do método nomográfico para determinação da erodibilidade de latossolos do Estado do Paraná. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 7:191-195, 1983.
- IGWE, C.A.; AKAMIGBO, F.O.R. & MBAGWU, J.S.C. Physical properties of soils of southeastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability. Soil Sci., Baltimore, 160:431-441, 1995.
- KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, p.425-442.
- LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A. & JAMAGNE, M. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crust structure. Catena, Cremlingen, 16:377-392, 1989.
- LEMOES, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3.ed. Campinas, SBSC, 1996. 83p.
- LIMA, J.M.; CURTI, N.; RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade em latossolos. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 14:85-90, 1990.
- LIMA, P.M.P. Índices de erodibilidade diretos e indiretos para dois latossolos do município de Lavras - Minas Gerais. Ci. Prát., Lavras, 15:186-193, 1991.
- MARQUES, J.J.G.S.M.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N. & CAROLINO DE SÁ, M.A. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. R. bras. Ci. Solo, Viçosa, 21:447-456, 1997.
- MARQUES, J.J.G.S.M. Estimativas e comparações dos fatores erosividade das chuvas e erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. Lavras, UFLA, 1996. 119p. (Dissertação de Mestrado)
- NETER, J. & WASSERMANN, W. Applied linear statistical models: regression, analysis of variance and experimental designs. Homewood, Richard D. Irwin, 1974. 842p.
- OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, Amsterdam, 56:377-400, 1993.
- OBI, M.E.; SALAKO, F.K. & LAL, R. Relative susceptibility of some southeastern Nigeria soils to erosion. Catena, Cremlingen, 16:215-225, 1989.
- PUGET, P.; CHENU, C. & BALESSENT, J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. Eur. J. Soil Sci., Oxford, 46:449-459, 1995.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; YODER, D.C. & MCCOOL, D.K. RUSLE revised: status, questions, answers and the future. J. Soil Water Cons., Ankeny, 49:213-220, 1994.
- ROLOFF, G. & CLIVATI, A.A. Modelo de erosão e sedimentação para o Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Resumos. Viçosa, SBSC/UFV, 1995. v.3, p.1782-1784.
- ROLOFF, G. & DENARDIN, J.E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis, 1994. Resumos. Florianópolis, SBSC, 1994. p.146-147.
- RÖMKENS, M.J.M. The soil erodibility factor: a perspective. In: HARLIN, J.M. & BERARDI, G.M., eds. Agricultural soil loss: processes, policies and prospects. Boulder, Westview, 1987. p.125-149.

- RÖMKENS, M.J.M.; ROTH, C.B. & NELSON, D.W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 41:954-960, 1977.
- ROTH, C.H. & EGGERT, T. Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soils. *Soil Til. Res.*, Amsterdam, 32:253-268, 1994.
- SILVA, I.F.; ANDRADE, A.P. & CAMPOS FILHO, O.R. Erodibilidade de seis solos do semi-árido paraibano obtida com chuva simulada e método nomográfico. *R. bras. Ci. Solo*. Campinas, 10:283-287, 1986.
- SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MARQUES, J.J.G.S.M.; LIMA, L.A.; FERREIRA, M.M. & LIMA, J.M. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas. *Ci. Prát.*, Lavras, 19:176-182, 1995.
- SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, M.S.; FERREIRA, M.M. & LOMBARDI NETO, F. Comparação de métodos direto e indiretos para determinação da erodibilidade em latossolos sob cerrado. *Pesq. Agropec. bras.*, Brasília, 29:1751-1761, 1994.
- VETTORI, L. Métodos de análise de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura-Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- YODER, D. & LOWN, J. The future of RUSLE: inside the new Revised Universal Soil Loss Equation. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 50:484-489, 1995.
- YOUNG, R.A. & MUTCHLER, C.K. Erodibility of some Minnesota soils. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 32:180-182, 1977.
- WISCHMEIER, W.H. Use and misuse of the universal soil loss equation. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 31:5-9, 1976.
- WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Cons.*, Ankeny, 26:189-193, 1971.
- WISCHMEIER, W.H. & MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 33:131-137, 1969.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)