



**ENERGIA ULTRA-SÔNICA, USO E
ERODIBILIDADE DE SOLOS**

MARCOS AURÉLIO CAROLINO DE SÁ

2002

53630
27959 MFN

MARCOS AURÉLIO CAROLINO DE SÁ

ENERGIA ULTRA-SÔNICA, USO E ERODIBILIDADE DE SOLOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. Dr. José Maria de Lima

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

2002



**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Sá, Marcos Aurélio Carolino de

Energia ultra-sônica, uso e erodibilidade de solos / Marcos Aurélio Carolino de Sá. -- Lavras : UFLA, 2002.

95 p. : il.

Orientador: José Maria de Lima.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia

1. Solo. 2. Agregado. 3. Ultra-som. 4. Energia. 5. Erodibilidade. 6. Eletroquímica 7. Mineralogia I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.45

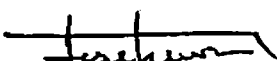
MARCOS AURÉLIO CAROLINO DE SÁ

ENERGIA ULTRA-SÔNICA, USO E ERODIBILIDADE DE SOLOS

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

APROVADA em 30 de Abril de 2002

Prof. Dr. Nilton Curi	UFLA
Prof. Dr. João José Granate de Sá e Melo Marques	UFLA
Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino	UFMS
Dr. Paulo Emílio Ferreira da Motta	EMBRAPA/CNPS


Prof. Dr. José Maria de Lima
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

**Aos meus pais,
Geraldo e Romilda,
*a quem devo tudo que sou.***

**À Marlene,
*pelo apoio e carinho,***

OFEREÇO.

**A Deus,
*a quem tenho muito a agradecer e
pouco a pedir,***

**aos conservacionistas do passado,
presente e futuro,**

e à Nação Brasileira,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

O autor expressa os mais sinceros agradecimentos:

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade do curso, e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor José Maria de Lima, pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao professor Nilton Curi (UFLA), pelas sugestões e conhecimentos transmitidos; ao professor João José Granate de Sá e Mello Marques, pelas críticas e ao professor Daniel Furtado Ferreira (DEX-UFLA), pelo esclarecimento de dúvidas quanto à análise estatística.

Ao professor Antônio Carlos Tadeu Vitorino (UFMS) e ao pesquisador Paulo Emílio Ferreira da Motta (EMBRAPA-CNPS), pelas sugestões.

Aos pesquisadores e professores de diversas instituições, que gentilmente contribuíram para a realização deste trabalho, enviando amostras de solo de várias regiões brasileiras: Dalvan Reinert (UFSM), Elias Margolis (UFRPE), Francisco Ernesto Sobrinho (ESAM), Gustavo Ribas Curcio (EMBRAPA-CNPF), Iêde Brito Chaves e Ivandro França Silva (UFPB), José Ronaldo Coelho Silva (UFC), Lúcia Helena Cunha dos Anjos (UFRRJ), Mauro Resende (UFV), Nestor Kämpf (UFRGS), Ramon Costa Alvarenga (EMBRAPA-CNPMS) e Sônia Carmela Falci Dechen (IAC).

A todos os funcionários e técnicos de laboratório do Departamento de Ciência do Solo, em especial ao Carlos Antônio Ribeiro, Jairo Lima Júnior (In memorian), Dulce Claret Monteiro Moraes, Delane Ribeiro, João Gualberto, Ana Maria, Humberto, Roberto e João Batista Corrêa, Adriana Maria Pedrosa Dias Soares, Maria Alice Resende Assis e Vera Lúcia Alonso, pela colaboração.

Aos graduandos e amigos João Aguilar Massaroto e Sayonara Andrade do Couto Moreno, pelo auxílio na realização das análises.

Aos colegas de curso, Júlio César de Azevedo Nóbrega, Maria Aparecida Pereira Pierângeli, João Bosco V. Gomes, Jonas Jacob Chiaradia, Geraldo César Oliveira, Antônio Carlos T. Vitorino (Totó), Welington Wilian Rocha, Carlos Rogério de Mello, Vicente Gualberto, Marcos Koiti Kondo, Flávia Aparecida de Alcântara, Reginaldo Barboza da Silva, Isabel Cristina de Barros Trannin e todos os demais colegas do Departamento de Ciência do Solo, que embora não citados, contribuíram com sua convivência, que tornou melhor todas as fases deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e a Deus por permitir que tudo isso fosse possível.

BIOGRAFIA

MARCOS AURÉLIO CAROLINO DE SÁ, filho de Geraldo Carolino de Sá e Romilda Rufina Ferreira da Silva, nasceu em São Paulo-SP, em 22 de março de 1972.

Concluiu sua formação básica na EEPSPG "Narciso Pieroni" em Socorro, SP, no ano de 1987.

Técnico em Agropecuária pela ETAESG "Dr. Carolino da Motta e Silva" de Espírito Santo do Pinhal, SP, em dezembro de 1990.

Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em janeiro de 1996.

Mestre em Solos e Nutrição de Plantas pela UFLA, em fevereiro de 1998.

Em março de 1998, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas na UFLA, concluindo em abril de 2002.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO GERAL.....	xi
GENERAL ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
1 Introdução geral.....	1
2 Referencial teórico.....	3
2.1 Atributos eletroquímicos e estabilidade de agregados.....	3
2.2 Estabilidade de agregados e energia ultra-sônica.....	4
2.3 Modelagem de perdas de solo.....	5
3 Metodologia geral.....	8
4 Referências bibliográficas.....	11
CAPÍTULO 2: Influência de usos de um Latossolo na estabilidade de agregados expressa por energia ultra-sônica.....	19
Resumo.....	19
Abstract.....	20
1 Introdução.....	21
2 Material e métodos.....	23
3 Resultados e discussão.....	26
4 Conclusões.....	34
5 Referências bibliográficas.....	34
CAPÍTULO 3: Estimativa da erodibilidade com base na desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural.....	38
Resumo.....	38
Abstract.....	39

1	Introdução.....	40
2	Material e métodos.....	42
2.1	Solos estudados.....	42
2.2	Preparo das amostras e determinação de atributos eletroquímicos.....	43
2.3	Análises mineralógicas.....	49
2.4	Estabilidade de agregados por sonificação.....	50
2.4.1	Sonificação dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm.....	50
2.4.2	Sonificação dos agregados da fração menor que 2 mm (TFSA).....	51
2.5	Análises estatísticas e ajuste dos modelos.....	52
3	Resultados e discussão.....	53
3.1	Eletroquímica dos solos estudados.....	53
3.2	Estimativa da erodibilidade a partir de atributos dos solos estudados.....	59
4	Conclusões.....	67
5	Referências bibliográficas.....	67
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
	ANEXOS.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
Cb	crystalita
cm	centímetros
Ct	caulinita
DCB	ditionito-citrato-bicarbonato
dm ³	decímetros cúbicos
EA	energia aplicada a uma suspensão de solo-agregados (J mL ⁻¹)
EPE	erro padrão da estimativa
g	gramas
Gb	gibbsita
h	hora
Hi	haloisita
Hm + Gt	hematita + goethita
ID	índice de dispersão
IDN	índice de dispersão normalizado
J	joule
K	erodibilidade do solo t h (MJ mm) ⁻¹
kg	quilograma
kHz	quilohertz
Ki	relação molecular SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Kr	relação molecular SiO ₂ /Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
m ³	metros cúbicos
Mi	mica

Mi-Vm	associação de mica e vermiculita
MJ	mega-joule
mL	mililitro
mm	milímetro
P_c	potência calculada, obtida através de calibração do sonificador expressa em watts
PCZ	ponto de carga zero
PESN	ponto de efeito salino nulo
Pf	pirofilita
Qz	quartzo
s	segundo
t	tonelada
T arg	atividade da fração argila sem o desconto do carbono orgânico
T°C	temperatura, em graus centígrados
t_s	tempo de sonificação, expresso em segundos
W	watt
X₁ a X₁₅	variáveis dependentes utilizadas nos modelos
Zr	zirconita
ΔpH	pH_{4gna} - pH_{KCl}
Ψ₀	potencial de superfície da dupla camada elétrica

RESUMO GERAL

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. **Energia ultra-sônica, uso e erodibilidade de solos**. 2002. 95p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras¹

Estudos recentes têm sido feitos visando determinar a estabilidade de agregados por sonificação. Os objetivos deste estudo foram determinar os níveis de energia mais adequados para mostrar o efeito do uso do solo na estabilidade de agregados e propor modelos para determinação da erodibilidade utilizando índices de desagregação por ultra-som e alguns atributos químicos e mineralógicos do solo. O efeito do tipo de uso na estabilidade de agregados foi medido em amostras de um Latossolo Vermelho Distroférico típico, sob diferentes usos. As equações para determinar a erodibilidade do solo foram obtidas com base em índices de desagregação por diferentes níveis de energia de sonificação, em amostras de 22 solos com horizonte B textural do Brasil e comparadas com a erodibilidade obtida em parcelas de campo, para os mesmos solos. O intervalo de energia de sonificação que melhor descreve as mudanças na estabilidade de agregados influenciadas pelo uso do solo está entre 30 e 90 J mL⁻¹. Modelos utilizando índices de desagregação por ultra-som e estes índices associados com atributos químicos e mineralógicos permitem boa estimativa da erodibilidade do solo (R^2 entre 0,83** e 0,91**). Os modelos estimaram precisamente a erodibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo. Entretanto, mais pesquisas são necessárias para validação dos mesmos.

¹ Comitê orientador: José Maria de Lima – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA e João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

GENERAL ABSTRACT

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. **Sonication energy, use and erodibility of soils.** 2002. 95p. Thesis (Doctorate on Soil Science and Plant Nutrition) – Universidade Federal de Lavras, Lavras²

Recent studies have measured aggregate stability using sonication energy. The objective of this study was to determine the level of energy that better shows the effect of land use on aggregate stability, and to propose equations to evaluate soil erodibility using sonication energy and some soil chemical and mineralogical attributes. The effect of land use on soil aggregation was measured on samples of a Red Latosol under different uses. The equations to evaluate soil erodibility were based on aggregate disruption under increasing levels of sonication energy, for samples of 22 soils with argillic horizon from Brazil, as compared to soil erodibility from field plots of the same soils. The results showed that the level of sonication energy that better describes the changes on soil aggregation, according to the different uses, was between 30 and 90 J mL⁻¹. Equations using disruption indexes of sonication energy between 3 and 180 J mL⁻¹, and these indexes associated with chemical and mineralogical attributes allowed good estimation of soil erodibility (R²: 0.83** to 0.91**). These equations estimated accurately the erodibility of a Red-Yellow Argisol. Some more researches are still necessary in order to validate the proposed equations.

² Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA and João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é, indubitavelmente, um dos maiores patrimônios de um país e sua exploração racional garante o crescimento da economia e o bem-estar de seu povo. Entretanto, com o aumento da população, intensificam-se as pressões para uso do solo. É impossível, para qualquer nação do mundo, sobreviver sem programas que visem à conservação deste recurso natural.

A erosão é a principal causa da degradação de áreas agrícolas em todo o planeta, principalmente em regiões tropicais. A pesquisa agrônômica tem buscado meios para prever e minimizar esse problema, tendo sido realizados avanços consideráveis durante a segunda metade do século XX, destacando-se, neste contexto, a melhor compreensão dos mecanismos da erosão. Este fato levou ao desenvolvimento de modelos matemáticos para sua predição, dos quais a Equação Universal de Perdas de Solo, internacionalmente conhecida como USLE - sigla em inglês para *Universal Soil Loss Equation* - talvez seja o mais difundido, dada à sua eficiência e praticidade de utilização.

Esta equação é, sem dúvida, uma ferramenta poderosa para o planejamento conservacionista, possibilitando a simulação das perdas médias anuais de solo em uma área agrícola para diferentes culturas, sistemas de manejo e espaçamento entre terraços, por exemplo, permitindo que se escolha o manejo mais adequado, com base na erosão predita. Entretanto, embora chamada "universal", seus parâmetros devem ser determinados, obrigatoriamente, em âmbito local. Dentre estes parâmetros, a erodibilidade, ou fator K, que expressa a susceptibilidade do solo à erosão, é, sem dúvida, o que apresenta maior custo e morosidade para determinação. É mais prática e

econômica a sua estimativa indireta, com o uso de modelos matemáticos baseados em atributos do solo.

Tais atributos devem estar relacionados com a capacidade de infiltração de água no solo e com a resistência do mesmo à desagregação e transporte de sedimentos, provocado pela chuva e enxurrada. Sendo assim, a estabilidade de agregados é considerada um atributo adequado.

Diversas metodologias têm sido propostas para avaliação da estabilidade de agregados, porém, as relações entre a energia empregada no método e a energia de agentes erosivos que realmente atuam no campo ainda são pouco conhecidas, como é o caso do método do peneiramento úmido, bastante difundido e conhecido na literatura. Testes de impacto de gotas expressariam melhor estas relações, porém, são pouco práticos. Metodologias envolvendo uso da energia ultra-sônica para determinação da estabilidade de agregados têm sido empregadas pela pesquisa em outros países e permitem a quantificação da energia gasta para desagregação em diferentes níveis até dispersão total do solo. Entretanto, ainda faltam informações sobre a sensibilidade deste método em avaliar as diferenças causadas na estabilidade de agregados pelo tipo de uso ao qual o solo é submetido, ou mesmo suas relações com a erodibilidade dos solos.

Partindo da hipótese de que a energia ultra-sônica pode fornecer informações sobre o efeito que o uso/manejo do solo impõe à estabilidade de agregados e informações sobre a erodibilidade do solo, de maneira tão eficiente quanto outros atributos utilizados até então, este estudo teve por objetivos: i) verificar os níveis de energia ultra-sônica mais adequados para apontar as diferenças na estabilidade de agregados do solo causadas pelo tipo de uso; ii) ajustar modelos matemáticos para estimar a erodibilidade do solo que utilizem

como variáveis índices de desagregação por ultra-som ou outros atributos do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Atributos eletroquímicos e estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados é influenciada por diversos atributos do solo, principalmente os eletroquímicos. O estudo das cargas elétricas das partículas coloidais do solo é de fundamental importância, uma vez que a maioria das reações eletroquímicas que influenciam a fertilidade e nutrição de plantas e que podem interferir em fenômenos físico-químicos relacionados ao manejo e conservação do solo, ocorre na superfície destas partículas (Fontes et al., 2001).

Atributos eletroquímicos, dentre eles o PESN, são consequência da mineralogia, grau de intemperismo e teor de matéria orgânica do solo (Raij, 1973; Siqueira, et al., 1990b; Pérez et al., 1993; Benites & Mendonça, 1998). Por representarem as cargas superficiais dos colóides, estes estão relacionados a fenômenos físico-químicos, como CTC, dispersão e floculação de partículas, influenciando a estabilidade dos agregados (Chorom & Rengasamy, 1995; Lima, et al., 2000; Fontes et al., 2001). Sendo assim, estes atributos estão relacionados com a erodibilidade do solo, uma vez que esta depende, além da sua capacidade de infiltração de água no solo, também da sua capacidade de resistir à desagregação e ao transporte, provocados por vento, pela chuva e pelo escoamento superficial (Wischmeier & Mannering, 1969; Römken, 1987; Lal, 1988; Denardim, 1990; Silva et al., 1999)

O termo Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN) foi proposto no Brasil por Alleoni & Camargo (1993) para definir o valor do pH no ponto de intersecção entre duas ou mais curvas de titulação, obtidas de soluções com diferentes forças iônicas, anteriormente chamado Ponto de Carga Zero (PCZ) por Raij

(1973). Este parâmetro expressa a condição de pH em que a concentração iônica da solução não influencia o balanço de cargas na superfície das partículas. Recentemente, foi proposto o termo Ponto Zero de Titulação (Fontes, et al., 2001). Neste caso, o PESN estaria relacionado apenas às cargas variáveis do solo, sendo que, em solos que não apresentam argila de atividade alta, seu valor seria próximo ao PCZ (Uehara & Gilman, 1980; Fontes, et al., 2001), constituindo-se em um bom atributo eletroquímico (Benites & Mendonça, 1998). No Brasil, o PESN tem sido determinado em diversos trabalhos (Raij, 1973; Siqueira et al., 1990a; Siqueira et al., 1990b; Chaves & Trajano, 1992; Pérez et al., 1993; Alleoni & Camargo, 1994; Silva et al., 1996; e Benites & Mendonça, 1998), utilizando a metodologia proposta por Raij, (1973). Entretanto, em valores extremos de pH, H⁺ ou OH⁻ podem ser consumidos pela dissolução de minerais, o que requer cautela na interpretação de resultados deste método (Siqueira et al., 1990a; McBride, 1994).

2.2 Estabilidade de agregados e energia ultra - sônica

A energia ultra-sônica vem sendo utilizada há muitos anos em ciência do solo para um grande número de propósitos, tais como: dispersão total para determinação da granulometria e mineralogia (Saly, 1967; Genrich & Bremner, 1972; Vitorino et al., 2001); estudo da matéria orgânica em diferentes frações de agregados (Christensen, 1985, 1986, 1987; Roscoe et al., 2000) e em seu fracionamento propriamente dito (Edwards & Bremner, 1967; Gregorich et al., 1988; Morra et al., 1991), para a avaliação de grau de salinização (Mulyar & Minkin, 1993); em estudos de atividade enzimática e conteúdo de ATP no solo (De Cesare et al., 2000) e, finalmente, na avaliação da estabilidade de agregados (North, 1976, 1979; Fuller & Goh, 1992; Raine & So, 1993, 1994; Tippkötter, 1994; Barral et al., 1998; Sá et al., 1999; Cerdà, 2000; Sá et al., 2000b).

Alguns trabalhos (North, 1976, 1979; Raine & So, 1993; Tippkötter, 1994; Sá et al., 1999; Cerdà, 2000) apresentaram os resultados em curvas características de desagregação de solos, que são obtidas pela aplicação de níveis crescentes de energia ultra-sônica, onde ocorre desde a desagregação em diferentes níveis, até a dispersão total. Outros trabalhos (Barral et al., 1998; Sá et al., 2000b) utilizam níveis de energia isolados. Porém, não há uma padronização quanto aos níveis de energia utilizados nem quanto à forma de se expressar a energia aplicada.

A estabilidade de agregados influencia vários aspectos relativos ao comportamento do solo frente ao encrostamento, infiltração de água e erosão. No entanto, sob chuvas fortes, a enxurrada pode ocorrer mesmo sem o encrostamento, transportando até mesmo fragmentos grosseiros e agregados maiores. Dessa forma, um único método de avaliação da estabilidade de agregados é insuficiente para explicar o processo erosivo (Le Bissonnais, 1996). Mesmo assim, alguns autores encontraram boas correlações entre estabilidade de agregados medida por peneiramento úmido ou impacto de gotas e a erodibilidade do solo (Angulo, 1983; Egashira et al., 1983). Outros métodos de avaliação da estabilidade de agregados, como a aplicação da energia ultra-sônica, ainda são pouco comuns, sobretudo no Brasil.

2.3 Modelagem de perdas de solo

A modelagem de perdas de solo é importante para a previsão da quantidade de erosão e permite o planejamento de uso, sem o qual a grave e contínua degradação do solo inviabiliza o uso sustentável da terra (Stocking, 1982). Muitos modelos têm sido propostos em outros países, com dois enfoques básicos: o primeiro inclui os modelos empíricos ou estatísticos, como a equação universal de perdas de solo USLE (Wischmeier & Smith, 1965, 1978) e, mais

recentemente, sua versão revisada, a RUSLE (Renard et al., 1994); o segundo trata dos modelos considerados físicos, como: SLEMSA - *Soil loss estimator for southern Africa* - (Elwell & Stocking, 1982) e WEPP - *Water erosion prediction project* (Lane & Nearing, 1989).

De acordo com Stocking (1982), ambos apresentam vantagens e desvantagens. O primeiro enfoque apresenta como vantagem a possibilidade de se obter boas estimativas, desde que os valores fornecidos ao modelo estejam dentro dos limites das variáveis das quais o modelo foi derivado. Como desvantagens, têm-se a impossibilidade de se extrapolar resultados para condições diferentes da qual foi elaborado e o longo tempo de pesquisa necessário para se obter um modelo preciso. O segundo grupo de modelos apresenta como vantagem a real descrição do fenômeno físico, permitindo a extrapolação de resultados. Como desvantagem, existe o fato de muitos processos físicos serem complexos e ainda pouco compreendidos, sendo difícil sua representação matemática, tornando impraticável o uso no campo. Ainda segundo o mesmo autor, o processo erosivo é muito complexo e qualquer modelo deverá ser, necessariamente, uma simplificação da realidade.

A USLE pode ser considerada um modelo prático e eficiente (Renard et al., 1994), pois considera os parâmetros que realmente influenciam a erosão hídrica. Ela é considerada universal, desde que seus parâmetros sejam determinados em âmbito local e ela seja empregada dentro dos limites para os quais foi definida (Wischmeier, 1976). A USLE é expressa da seguinte forma:

$$A = R K L S C P$$

em que:

A: é a perda estimada de solo por erosão, em t (ha ano)⁻¹;

- R: é o potencial erosivo médio anual da chuva MJ mm (ha h ano)⁻¹, calculado com base em informações de intensidade de chuvas;
- K: é a erodibilidade do solo t h (MJ mm)⁻¹, determinada diretamente no campo em condições padronizadas ($K = A / R$) ou estimada com base em atributos do solo;
- LS: é o fator topográfico do solo, que representa o comprimento de rampa e grau de declive, cujos valores podem ser obtidos em tabelas ou calculados;
- C: é o fator cobertura da cultura; depende de seu espaçamento, fase de desenvolvimento, consórcio, etc., sendo determinado experimentalmente;
- P: é o fator práticas de manejo, que inclui plantio em nível, morro abaixo, capinas alternadas, cobertura morta, etc.

Uma vez determinadas suas variáveis, a utilização da USLE é bastante simples. Embora ainda exista considerável carência de informações, para algumas regiões brasileiras estas já são disponíveis, bem mais do que para outros modelos. Mapas de linhas isoerosivas (fator R) já existem para os estados do Paraná (Rufino et al., 1993) e São Paulo (Bertoni & Lombardi Neto, 1990). Há informações isoladas para outras localidades brasileiras, assim como os fatores C e P, principalmente para as regiões sul, sudeste e nordeste, as quais são resultado de anos de pesquisa, cuja reunião e análise conjunta poderiam resultar em uma primeira versão brasileira da USLE (Marques, 1996).

O fator K ainda continua sendo o mais problemático, pois sua determinação direta a campo, sob chuva natural ou simulada, envolve altos custos, morosidade e rigorosa padronização, o que só é conseguido em instituições de pesquisa ou grandes empresas (Denardin, 1990; Marques et al., 1997b). Esse fato levou pesquisadores de diversos países, e em diferentes épocas, a propor modelos para estimativa indireta da erodibilidade, utilizando

como variáveis atributos do solo e suas relações (Dumas, 1965; Wischmeier & Mannering, 1969; Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Romkens et al., 1977, Young & Mutchler 1977; Denardin, 1990; Lima et al., 1990; Paez & Ildfonso, 1992)

Entretanto, pesquisas recentes (Marques et al., 1997a; Silva et al., 2000), demonstraram a inadequação da maioria destes modelos para solos brasileiros, sendo propostos, então, modelos para a predição do fator K de Latossolos (Silva et al., 1999) e para solos com horizonte B textural (Marques et al., 1997b), o que pode ser considerado um avanço significativo. Porém, algumas variáveis destes modelos requerem ainda adaptações laboratoriais, uma vez que suas determinações não são feitas rotineiramente (Marques et al., 1997b). Ainda não foi estudada a estimativa da erodibilidade do solo com base na desagregação causada pela aplicação da energia ultra-sônica que, embora não seja ainda uma determinação rotineira, pode ser bastante prática e rápida.

3 METODOLOGIA GERAL

Para as sonificações (Capítulos 2 e 3), foi utilizado um aparelho marca Misonix, modelo XL2020TM, operando a 20 kHz, no estágio 9 do mostrador, fornecendo uma potência nominal de 154,0 W. Essa potência corresponde a uma potência real de $120,91 \pm 3,27$ W, calculada com base no procedimento padrão, baseado em técnicas calorimétricas, descrito por Sá et al., (2000a) e Sá et al., (2001).

Cada amostra, cujo peso foi equivalente a 5 g de agregados secos em estufa a 105°C, foi submetida a um pré-umedecimento e transferida para béquer de 250 mL, sendo o volume completado para 200 mL com água destilada (relação solo:suspensão 1:40). Foram utilizados tempos crescentes de

sonificação, cujas respectivas energias foram calculadas segundo Sá et al., (2000a) e Sá et al., (2001), pela equação 1:

$$EA = \frac{P_c \times t_s}{v} \quad (1)$$

em que:

EA é a energia ultra-sônica específica aplicada à amostra ($J mL^{-1}$);

P_c é a potência (W) emitida pelo aparelho e calculada através de calibração;

t_s é o tempo de sonificação em (s);

v é o volume da suspensão (mL).

A ponta da haste do aparelho, de comprimento 175 mm e diâmetro de 19 mm, foi inserida na suspensão a uma profundidade de 47 mm. Conforme pré-testes realizados, a temperatura da suspensão aumenta linearmente com o tempo de sonificação, o que também foi observado por De Cesare et al. (2000), seguindo, no presente estudo, o modelo $T(^{\circ}C) = 0,075(t_s) + 23,114$ $R^2 = 0,99^{**}$. Sendo assim, para reduzir o efeito da elevação da temperatura na amostra foi necessário colocar o béquer em banho de gelo nos tempos maiores que 180 s (3 minutos), mantendo a temperatura da suspensão abaixo de $35^{\circ}C$ durante a sonificação, conforme sugerido por Raine & So (1994). Após cada sonificação, as amostras foram passadas em peneira de malha 0,053 mm. O material retido na peneira (resíduo) foi seco em estufa por 24 horas a $105^{\circ}C$ e pesado para obtenção dos teores de silte + argila (que passaram através da peneira), por diferença, pela equação 2:

$$\text{silte + argila} = (\text{amostra original de 5g}) - \text{resíduo} \quad (2)$$

Isto possibilitou, para cada nível de energia específica aplicado, o cálculo do índice de desagregação (ID), segundo Sá et al. (1999), pela equação 3:

$$ID = \frac{\text{silte + argila (g)}}{\text{amostra original (5g)}} \quad (3)$$

Quanto ao tempo zero de sonificação, este consistiu apenas em colocar os agregados pré-umedecidos no béquer, completar o volume para 200 mL de água destilada e passar imediatamente pela peneira, a fim de quantificar a desagregação causada apenas pelo manuseio da amostra. Os índices de desagregação obtidos também foram normalizados (IDN) para os ID máximos obtidos por sonificação, para cada solo, pela equação 4:

$$ID = \frac{ID}{ID \text{ máximo}} \quad (4)$$

ID terá seu valor máximo limitado pelos teores totais de silte + argila e representa o efeito da estabilidade de agregados mais granulometria, enquanto IDN terá seu valor máximo = 1, independente do teor de silte + argila do solo, representando, portanto, apenas o efeito da estabilidade de agregados. Sendo assim, foram construídas curvas de desagregação, conforme Sá et al. (1999), plotando-se no eixo das abscissas (X) a energia aplicada, em J mL⁻¹ e no eixo das ordenadas (Y), os índices de desagregação, normalizados ou não, ajustando-se modelos do tipo $Y = X/(a + bX)$. Foi calculado um índice, com base na relação entre os coeficientes b/a que, segundo os autores, expressa a estabilidade de agregados com base no comportamento das curvas de desagregação.

Para definição de níveis de energia mais adequados para se estudar o efeito do uso do solo na desagregação por ultra-som, foi utilizado um Latossolo

Vermelho Distroférico típico (Capítulo 2). Para estudo das relações entre atributos do solo e desagregação por ultra-som com a erodibilidade, foram utilizadas amostras dos horizontes A e Bt de 23 solos de diversas regiões brasileiras. A classificação e localização de cada solo podem ser observadas na Tabela 1, Capítulo 3. Os solos de 1 a 22 possuem a erodibilidade (fator K da USLE) determinada diretamente no campo, cujos valores foram extraídos de Marques et al., (1997a). A caracterização química e física dos solos, obtida dos trabalhos de Marques et al. (1997a) e Marques (1996) é mostrada na Tabela 2, Capítulo 3.

Quanto à determinação de atributos eletroquímicos e mineralógicos, as metodologias estão descritas no Capítulo 3. Para ajuste dos modelos de predição da erodibilidade, dos 22 solos foram utilizados 21, sendo um escolhido ao acaso, por sorteio, para validação dos modelos.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Ponto de efeito salino nulo: proposição de nomenclatura. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do solo*, Campinas, v.18, n.1, p.5-11, 1993.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Pontos de efeito salino nulo de latossolos ácidos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, n.2, p.175-180, 1994.

ANGULO, J. R. *Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros*. 1983. 154p. Dissertação (Mestrado em Conservação do solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BARRAL, M. T.; ARIAS, M.; GNÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.46, p.261-272, 1998.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, p. 215-221, 1998.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. Piracicaba: Livroceres, 1990. 392p.

CERDÀ, A. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.57, p.159-166, 2000.

CHAVES. L. H. G.; TRAJANO, M. D. M. Determinação do ponto de carga zero e das cargas elétricas do horizonte Ap de solos do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.3, p.415-418, 1992.

CHOROM, M.; RENGASAMY, P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.46, p.657-665, Dec. 1995

CHRISTENSEN, B. T. Decomposability of organic matter in particle size fractions from field soils with straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 19, n.4, p. 429-435, July/Ago. 1987.

CHRISTENSEN, B. T. Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregates and particle size separates. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.37, n.1, p.125-135, Mar. 1986.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity sedimentation. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Copenhagen, v.35, n.2, p.175-187, 1985.

DE CESARE, F.; GARZILLO, A. M. V.; BUONOCORE, V.; BADALUCCO, L. Use of sonication for measuring acid phosphatase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Amsterdam, v.32, p.825-832, 2000.

DENARDIN, J. E. Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos. 1990, 91p. Tese (Doutorado em Solos e nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba.

- DUMAS, J. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cahiers Orton Série Pédologie*, Bondy, v.3, n.4, p.307-333, 1965.
- EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.18, n.1, p.47-63, 1967.
- EGASHIRA, K. KAETSU, Y. TAKUMA, K. Aggregate stability as an index of erodibility of ando soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v.29, n.4, p. 473-481, 1983.
- EL SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hidrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 30., 1976, West Lafayette. *Proceedings....* Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1977. p.105-110.
- ELWELL, H. A.; STOCKING, M. A. Developing a simple yet practical method of soil loss estimation. *Tropical Agriculture*, Trinidad, v.59, n.1, p.43-48, 1982.
- FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.58, n.3, p.627-646, jul./set. 2001.
- FULLER, L. G.; GOH, T. G. Stability-energy relationships and their application to aggregation studies. *Canadian Journal of Soil Science*, Ontario, v.72, n.4, p.453-466, Nov. 1992.
- GENRICH, D. A.; BREMNER, J. M. A reevaluation of the ultrasonic vibration method of dispersing soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 36, n.6, p.944-947, Nov./Dec. 1972.
- GREGORICH, E. G.; KACHANOSKI, R. G.; VORONEY, R. P. Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions. *Canadian Journal of Soil Science*, Ontário, v.68, n.2 p.395-403, May 1988.
- LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. (Ed.) *Soil erosion research methods*. Ankeny : Soil and Water Conservation Society, 1988. p.141-160.

LANE, L. J.; NEARING, M. A. (eds). USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile version documentation. West Lafayette: NSERL, 1989. (Report, 2).

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. European Journal of Soil Science, Oxford, v.47, p.425-437, Dec. 1996.

LIMA, J. M., CURI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade de latossolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.14, n.1, p.85-90, jan./abr. 1990.

LIMA, J. M.; ANDERSON, S. J.; CURI, N. Phosphate-induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.64, n.3, p.892-897, May/June, 2000.

MARQUES, J. J. G. S. M. Estimativas e comparações dos fatores erosividade das chuvas e erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. 1996. 119p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; SÁ, M. A. C. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.21, n.3, p.477-456, jul./set. 1997a.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, D. F. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.21, n.3, p.457-465, jul./set. 1997b.

McBRIDE, M. B. Environmental chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 1994, 406p.

MORRA, M. J.; BLANK, R. R.; FREEBORN, L. L.; SHAFIL, B. Size fractionation of soil organo-mineral complexes using ultrasonic dispersion. Soil Science, Baltimore, v.152, n.4, p.294-303, Oct. 1991.

- MULYAR, I. A.; MINKIN, M. B. Use of ultrasound in the analysis of water extracts from soils. **Eurasian Soil Science, Maryland**, v.24, n.8, p.119-124, 1993.
- NORTH, P. F. Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.30, n.3, p.463-472, Sept. 1979.
- NORTH, P. F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.27, n.4, p.451-459 Dec. 1976.
- PAEZ, M.; ILDEFONSO, P. S. Evaluación de la eficiencia de índices de erodabilidad en suelos agrícolas en Venezuela. **Agronomía Tropical, Maracay**, v.42, n.1/2, p.27-40, 1992.
- PEREZ, D. V.; RAMOS, D. P.; NASCIMENTO, R. A. M. et al. Propriedades eletroquímicas de horizontes B texturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas**, v.17, p.157-164, 1993.
- RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia, Campinas**, v.32, n.18, dez. 1973.
- RAINE, S. R.; SO, B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.44, n.2, p.249-259, June 1993.
- RAINE, S.R.; SO, B. Ultrasonic dispersion of soil in water: The effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. **Australian Journal of Soil Research, London**, v.32, n.6, p.1157-1174, 1994.
- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; YODER, D. C.; McCOOL, D. K. RUSLE revised: status, questions, answers and the future. **Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny**, v.49, n.3, p.213-220, May/June 1994.
- ROMKENS, M. J. M.; ROTH, C. B.; NELSON, D. W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.41, n.5, p.954-960, Sept/Oct. 1977.

ROMKENS, 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.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J. Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen and $\delta^{13}\text{C}$ distribution in particle-size fractions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.51, p.445-454, Sept. 2000.

RUFINO, R. L.; BISCAIA, R. C. M.; MERTEN, G. H. Determinação do potencial erosivo da chuva do estado do Paraná, através de pluviometria: terceira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.439-444, 1993.

SÁ, M. A. C.; LAGE, G.; LIMA, J. M. **Calibração da potência emitida pelo sonificador para uso em análises de solo**. Lavras: UFLA, 2001, 17p. (Boletim agropecuário, 41).

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; LAGE, G. Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som. **Comunicação. Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.24, n.1, p.300-306, jan./mar. 2000a.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1825-1834, set. 2000b.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.23, n.3, p.525-531, jul./set. 1999.

SALY, R. Use of ultrasonic vibration for dispersing soil samples. **Soviet Soil Science**, Silver Spring, v.11, p.1547-1559, 1967.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2287-2298, dez. 1999.

- SILVA, M. L. N.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.6, p.1207-1220, jun. 2000.
- SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M. et al. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.31, n.9, p.663-671, set 1996.
- SIQUEIRA, C.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. X. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: III. Erros na avaliação das cargas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.19-24, 1990a.
- SIQUEIRA, C.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: II. Quantificação do efeito da matéria orgânica sobre o ponto de carga zero. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.13-17, 1990b.
- STOCKING, M. Modelagem de perdas de solo: Sugestões para uma aproximação brasileira. Brasília, Secretaria Nacional de Produção Agropecuária, 1982. 91p.
- TIPPKÖTTER, R. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-200 μm). *Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Weinheim, v.157, n.6, p.99-104, Apr. 1994.
- UEHARA, G. GILMAN, G. P. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.250-252, 1980.
- VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N. Níveis de energia ultra-sônica na dispersão de argila em solos da região de Lavras (MG). *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.25, n.6, p.1330-1336, nov./dez., 2001
- WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.33, n.1, p.131-137, Jan/Feb. 1969.

WISCHMEIER, W. H. Use and misuse of the universal soil loss equation. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.31, n.1, p.5-9, Jan./Feb. 1976.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.189-193, Sept./Oct. 1971.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)

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: USDA, 1965. 47p. (Agriculture Handbook, 282.).

YOUNG, R. A.; MUTCHLER, C. K. Erodibility of some Minnesota soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.32, n.4, p.180-182, July/Aug. 1977.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DE USOS DE UM LATOSSOLO NA ESTABILIDADE DE AGREGADOS EXPRESSA POR ENERGIA ULTRA-SÔNICA

RESUMO

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. Influência de usos de um Latossolo na estabilidade de agregados expressa por energia ultra-sônica. In:_____. *Energia ultra-sônica, uso e erodibilidade de solos*, 2002, Cap.2, p.19 a 37. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.³

O objetivo deste estudo foi determinar o nível de energia que melhor mostra o efeito do uso na estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho Distroférico típico de Lavras, MG, Brasil. Este solo tem sido utilizado com cafezal (2 e 13 anos), pastagem (26 anos), reflorestamento (*Pinus sp* e *Eucalyptus sp.*, ambos com 27 anos) e mata nativa. O solo, sob cada tipo de uso, foi coletado em três repetições. As amostras foram passadas em peneira de malha 2 mm e sonificadas a 0, 3, 9, 18, 36, 72, 108, 145 e 180 J mL⁻¹. O nível de energia que melhor mostrou diferenças na estabilidade de agregados, respectivamente ao tipo de uso do solo, está entre 30 e 90 J mL⁻¹. A 36 J mL⁻¹, a estabilidade de agregados decresce na seguinte seqüência: mata > *Eucalyptus sp.* > *Pinus sp.* > pastagem = cafezal de 13 anos > culturas anuais > cafezal de 2 anos. Os resultados foram estatisticamente diferentes pelo teste de Scott-Knott (5% de probabilidade), com um coeficiente de variação de 11,5%. Os índices de desagregação aumentaram com o decréscimo nos teores de C orgânico nas amostras (R²: -0,60** a -0,83**).

³ Comitê orientador: José Maria de Lima – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA e João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

ABSTRACT

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. Soil aggregation as affected by land use and measurement by sonication energy. In:_____. **Sonication energy, use and erodibility of soils**, 2002, Chap.2, p.19 to 37. (Doctorate Thesis on Soil Science and Plant Nutrition) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.⁴


The objective of this study was to determine the level of energy that better shows the effect of land use on aggregate stability of a Red Latosol from Lavras, Minas Gerais state, Brazil. This soil has been used for growing coffee (2 and 13 years), annual crops (30 years), pasture (26 years), reforestation (*Pinus sp.* and *Eucalyptus sp.*, 27 years), and natural forest. The soil under each type of use was sampled in triplicate. The samples were sieved to <2mm, and sonicated at 0, 3, 9, 18, 36, 72, 108, 145 and 180 J mL⁻¹. The results showed that the sonication energy that better shows the effect of use on soil aggregation was between 30 and 90 J mL⁻¹. At 36 J mL⁻¹ of energy, aggregate stability decreased according to the following sequence: forest > *Eucalyptus sp.* > *Pinus sp.* > pasture = coffee plantation 13 years > annual cropping > 2yr-coffee. The results were statistically different by the Scott-Knott test (5% probability) showing a coefficient of variation of 11.5%. Disruption indexes increased as organic carbon decreased in the samples (R²: -0.60** to -0.83**).

⁴ Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA and João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A energia ultra-sônica vem sendo utilizada há muitos anos em ciência do solo para um grande número de propósitos. Entre eles, a dispersão total para determinação da granulometria e mineralogia (Saly, 1967; Vitorino et al. 2001); no estudo da matéria orgânica em diferentes frações de agregados (Christensen, 1985) e em seu fracionamento propriamente dito (Gregorich et al., 1988); para avaliação da salinização (Mulyar & Minkin, 1993); estudo de atividade enzimática e conteúdo de ATP no solo (De Cesare et al., 2000) e na avaliação da estabilidade de agregados (North, 1979; Fuller & Goh, 1992; Raine & So, 1993, 1994; Tippkötter, 1994; Barral et al., 1998; Sá et al., 1999; Cerdà, 2000; Sá et al., 2000b).

A quebra dos agregados de um solo submetidos à sonificação é causada pela cavitação, ou seja, pela formação de bolhas de ar no líquido da suspensão, que ocorre principalmente na superfície dos agregados e em suas fendas e linhas de fraqueza (Tippkötter, 1994). Ela pode ser dividida em três etapas: nucleação (formação de bolhas microscópicas), crescimento e implosão (colapso) das bolhas (Christensen, 1992). Raine & So (1994), estudando diversos fatores que afetam a eficiência da dispersão por ultra-som, constataram que esta diminui com o aumento da temperatura do líquido, devido à diminuição da cavitação. Conforme De Cesare et al. (2000), o aumento da temperatura é linear com o aumento do tempo de sonificação e, segundo Saly (1967), este aumento ocorre em virtude da absorção de som pelo líquido. Para se evitar os efeitos indesejáveis da alta temperatura, esta deve ser mantida abaixo de 35°C, segundo Raine & So (1994), ou 40°C, segundo Christensen (1985). Para se conseguir estas temperaturas, recomenda-se manter a suspensão em banho de gelo durante a sonificação.



O uso de ultra-som é bastante promissor em estudos de agregação do solo, uma vez que a mensuração da energia aplicada constitui uma base conveniente para comparação entre trabalhos que relacionam a quebra de agregados sob diferentes condições (Raine & So, 1993). Por isso, é importante a calibração da potência emitida pelo sonificador, com o uso de técnicas calorimétricas, uma vez que a potência indicada nos mostradores dos aparelhos nem sempre equivale à potência realmente emitida pela ponta da haste dos mesmos (Gregorich et al., 1988; Fuller & Goh, 1992; Sá et al., 2000a).

De acordo com Saly (1967), a exposição à energia ultra-sônica não destrói as partículas elementares do solo, ocasionando apenas a quebra de agregados e conseqüente dispersão. Estudos prévios demonstraram serem necessários, em geral, entre 1500 e 1800 J mL⁻¹ para promover a total dispersão do solo (Gregorich et al., 1988; Christensen, 1992; De Cesare et al., 2000). Entretanto, a energia necessária para dispersão total fornece poucas informações sobre o potencial de desagregação influenciado pelo manejo, conforme estudos de North (1979), Raine & So (1993) e Sá et al. (2000b).

Alguns autores têm expressado a estabilidade de agregados por meio de ultra-som com base no comportamento das curvas de desagregação, as quais levam em conta desde os níveis mais baixos, necessários apenas para desagregação, até os mais altos, necessários para dispersão total. Essas curvas são características para cada solo e condição de uso (North, 1979; Fuller & Goh, 1992; Raine & So, 1993; Sá et al., 1999; Cerdà, 2000). Por outro lado, quando se fala em níveis de energia isolados, as informações são contraditórias. Gregorich et al. (1988) mostraram ser necessários de 300 a 500 J mL⁻¹ para destruir macroagregados, os quais, segundo Tisdall & Oades (1982), têm a estabilidade influenciada pelo manejo. Sá et al. (2000b) mostraram ser 15,88 J mL⁻¹ um nível de energia sensível o suficiente para detectar diferenças de

desagregação entre um Latossolo Roxo e uma Terra Roxa Estruturada. Barral, et al., (1998) detectaram diferenças entre dois solos com o uso de 270 J mL^{-1} .

O objetivo deste trabalho foi identificar o nível de energia ultra-sônica mais adequado para se detectar diferenças nas estabilidades de agregados influenciadas pelo uso em um Latossolo Vermelho Distroférico típico do município de Lavras, MG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi estudado um Latossolo Vermelho Distroférico típico, anteriormente classificado como Latossolo Roxo distrófico muito argiloso, relevo suave ondulado, originário de gabro (Rocha, 1982), localizado no campus da Universidade Federal de Lavras, MG. O clima é do tipo Cwb na classificação de Köppen, com precipitação anual média de 1411 mm, estação seca bem pronunciada e temperatura média anual igual a $19,3^{\circ}\text{C}$. A altitude média da área amostrada é de 970 m.

Em estudo prévio, Sá (1998) caracterizou este solo, detectando os seguintes minerais no horizonte Bw (0,8 a 1,0 m): caulinita (351 g kg^{-1}), gibbsita (383 g kg^{-1}), hematita, goethita e maghemita (não quantificados). Alguns atributos químicos do mesmo horizonte comuns a todas as áreas estudadas, foram extraídos pelo ataque sulfúrico: SiO_2 (139 g kg^{-1}), Al_2O_3 (308 g kg^{-1}), Fe_2O_3 (238 g kg^{-1}), ficando as relações Ki e Kr, respectivamente, em 0,77 e 0,51. No horizonte A (0,0–0,2 m), foram determinados os seguintes atributos físicos: densidade de partículas e do solo, respectivamente, 2,70 e $1,24 \text{ kg dm}^{-3}$; volume total de poros de $0,5392 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; índice de floculação de 87%; teores de argila, silte e areia, respectivamente, de 710, 120 e 170 g kg^{-1} .

As áreas estudadas situam-se num raio de 500 m e são homogêneas quanto à pedofoma e declividade, que está entre 7% e 10%, estando, porém, sob diferentes tipos de uso: cafezal de 2 anos irrigado, em área anteriormente cultivada com culturas anuais sob preparo convencional; culturas anuais, sob preparo convencional por cerca de 30 anos; cafezal com 13 anos em área anteriormente utilizada com pastagem; pastagem de *Brachiaria humidicola* com 26 anos em área anteriormente utilizada como cafezal; reflorestamento de 27 anos com *Pinus sp.* e reflorestamento de 27 anos com *Eucalyptus sp.*, ambos em área anteriormente utilizada com pastagem e, finalmente, mata nativa (floresta primária tropical subperenifólia).

Em cada área foram coletadas ao acaso e à profundidade de 0 a 0,05 m, 3 subamostras constituindo repetições. As coletas foram realizadas ao lado da linha de plantio na cultura anual (sorgo), sob a projeção da copa (saia) nas áreas de cafezal, entre as touceiras de capim na área de pastagem e entre as árvores nas áreas de vegetação arbórea (*Pinus*, *Eucalyptus* e mata).

Cada subamostra foi seca, destorroada e passada em peneira de 2 mm (terra fina seca ao ar – TFSA). Após este preparo, foi determinado o teor de C orgânico pelo método de Walkley & Black (1934), modificado com aquecimento. As sonificações foram feitas utilizando-se um aparelho Misonix, modelo XL2020™, operando a 20 kHz no estágio 9 do mostrador, fornecendo uma potência nominal de 154 W, correspondendo a uma potência real de $120,91 \pm 3,27$ W, calculada com base no procedimento padrão, baseado em técnicas calorimétricas, descrito por Sá et al. (2000a) e Sá et al. (2001). Cada repetição consistiu de agregados menores que 2 mm (TFSA), cujo peso foi equivalente a 5 g de TFSE (terra fina seca em estufa a 105°C).

As sonificações foram feitas em béquer com 200 mL de água destilada, em uma relação solo:água de 1:40, durante 0, 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e

300 s. Cada tempo de sonificação corresponde, respectivamente, às energias específicas aplicadas de 0,0; 3,0; 9,1; 18,1; 36,3; 72,5; 108,8; 145,1; 181,4 J mL⁻¹, calculadas segundo Sá et al. (2000a), pela equação 1:

$$EA = \frac{P_c \times t_s}{v} \quad (1)$$

em que:

EA é a energia ultra-sônica aplicada à amostra (J mL⁻¹);

P_c é a potência (W) emitida pelo aparelho e calculada por calibração;

t_s é o tempo de sonificação (s);

v é o volume da suspensão (mL).

A ponta da haste do aparelho, com comprimento de 175 mm e diâmetro de 19 mm, foi inserida na água a uma profundidade de 47 mm. Conforme De Cesare et al. (2000) e testes preliminares realizados, a temperatura da suspensão aumenta linearmente com o tempo de sonificação. No presente estudo, o modelo ajustado foi $T(^{\circ}\text{C}) = 0,075\text{tempo(s)} + 23,114$, $R^2 = 0,99^{**}$. Sendo assim, para reduzir o efeito da elevação da temperatura na amostra, foi necessário colocar o béquer em banho de gelo apenas nos tempos 180, 240 e 300 s (3, 4 e 5 minutos), mantendo a temperatura da suspensão abaixo de 35°C durante a sonificação, conforme sugerido por Raine & So (1994).

Após cada sonificação, as amostras foram passadas em peneira de malha de 0,053 mm. O material retido nesta peneira (resíduo) foi seco em estufa por 24 horas a 105°C e pesado. Os teores de silte + argila (sólidos que passaram pela peneira) foram obtidos por diferença: silte + argila = amostra original (5g) – resíduo. Este procedimento possibilitou, para cada nível de energia específica aplicado, o cálculo do índice de desagregação, obtido pela relação: (silte + argila dispersos)/amostra original (Sá et al., 1999). Quanto ao tempo zero de

sonificação, este consistiu apenas em colocar o solo no béquer, completar o volume para 200 mL de água destilada e passar imediatamente pela peneira, a fim de quantificar a desagregação causada apenas pelo manuseio da amostra.

A análise estatística consistiu de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três repetições e sete tipos de uso, sendo o solo sob os mesmos, comparado por nove níveis de energia ultra-sônica. Dentro de cada nível de energia foi feita análise de variância e aplicado o teste de médias de Scott Knott, a 5% de probabilidade, visando comparar os índices de desagregação encontrados para cada cobertura vegetal. Foram considerados os níveis de energia mais adequados para estudar a estabilidade de agregados, aqueles mais sensíveis para detectar diferenças na desagregação e com menor coeficiente de variação.

Para cada uso/manejo, foi construída a curva de desagregação segundo Sá et al. (1999). No eixo das abcissas foram plotados os níveis de energia específica aplicados ($J mL^{-1}$) e no eixo das ordenadas os índices de desagregação para cada nível de energia. Correlações lineares de Pearson foram feitas entre os teores de C orgânico das subamostras e os respectivos índices de desagregação para cada nível de energia específica aplicado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De maneira geral, para todos os níveis de energia aplicados, a estabilidade de agregados diminuiu, com aumento dos índices de desagregação na seguinte ordem: mata < *Eucalyptus sp.* < *Pinus sp.* < pastagem < cafezal 13 anos < culturas anuais < cafezal de dois anos (Tabela 1). Os teores de C orgânico decresceram aproximadamente na mesma seqüência, com exceção do

cafezal de dois anos, que apresentou $16,2 \text{ g kg}^{-1}$ contra $14,7 \text{ g kg}^{-1}$ nas culturas anuais.

Considerando ser a mineralogia deste solo uniforme, o teor de C orgânico parece estar influenciando a estabilidade de agregados. O efeito do C orgânico pode ainda ser corroborado pelas correlações negativas entre índices de desagregação e C orgânico, cujos coeficientes R^2 aumentaram com o incremento da energia específica aplicada (Tabela 1), sendo significativos a partir de $9,1 \text{ J mL}^{-1}$. Confirma-se, assim, a importância da participação da matéria orgânica na manutenção da estabilidade de agregados do solo, concordando com Tisdall & Oades, (1982); Fuller et al. (1995); Campos et al. (1995); Barral et al. (1998); Cerdà (2000) e também a altos níveis de energia ultra-sônica (Sá et al. 1999; Sá et al. 2000b).

Entretanto, no presente trabalho, apenas na condição sob mata, o teor de C orgânico foi estatisticamente maior, não havendo diferença significativa nas demais condições, o que pode ter ocorrido em virtude do alto coeficiente de variação encontrado (38,2%). Cada ponto de coleta (subamostra) foi considerado e analisado como uma repetição, aumentando, dessa forma, o coeficiente de variação, devido à variabilidade da vegetação dentro de cada área de cobertura vegetal e, conseqüentemente, nos teores de C orgânico no campo. Segundo Macedo et al. (1998), o C orgânico é uma variável de média variação, cujo coeficiente de variação pode estar entre 10% e 30%, tendo os autores encontrado valores de CV de até 47%. Por outro lado, para os índices de desagregação, observa-se, na Tabela 1, que, à medida em que se aumenta o nível de energia específica aplicada, diminui o coeficiente de variação. Isto significa que, em níveis de energia a partir de $18,1 \text{ J mL}^{-1}$, ocorre menor variabilidade entre as repetições e, portanto, maior precisão na determinação das diferenças proporcionadas ao solo pelo uso.

TABELA 1 Índices de desagregação obtidos para cada nível de energia específica aplicada e teores de C orgânico em Latossolo Vermelho Distroférico típico sob diferentes condições de uso e coeficientes de correlação (R^2) entre índices de desagregação e C orgânico⁽¹⁾.

Condição de uso	Níveis de energia específica aplicada									C orgânico
	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	72,5	108,8	145,1	181,4	
	J mL ⁻¹									g kg ⁻¹
cafezal 2 anos	0,06a	0,19a	0,47a	0,62a	0,80a	0,91a	0,92a	0,92a	0,92a	16,2b
culturas anuais	0,08a	0,13a	0,39a	0,46b	0,66b	0,72b	0,77b	0,77b	0,81b	14,7b
cafezal 13 anos	0,08a	0,14a	0,26b	0,36b	0,48c	0,58c	0,64c	0,69c	0,74b	28,1b
pastagem	0,06a	0,10a	0,17b	0,26c	0,43c	0,50c	0,58c	0,65c	0,73b	29,0b
<i>Pinus sp.</i>	0,07a	0,11a	0,16b	0,21c	0,31d	0,42d	0,47d	0,57d	0,61c	31,0b
<i>Eucalyptus sp.</i>	0,06a	0,09a	0,15b	0,21c	0,29d	0,39d	0,44d	0,50d	0,60c	35,2b
mata nativa	0,04a	0,07a	0,09b	0,12d	0,19e	0,28e	0,38d	0,50d	0,56c	55,9a
CV(%)	47,4	31,3	24,1	16,8	11,5	12,4	12,9	10,4	9,9	38,2
R^2	-0,16 ^{ns}	-0,34 ^{ns}	-0,60 ^{**}	-0,63 ^{**}	-0,70 ^{**}	-0,72 ^{**}	-0,73 ^{**}	-0,78 ^{**}	-0,83 ^{**}	

(1) Valores seguidos de mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (5%); CV: coeficiente de variação; ns e **: não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente.

Dentro de cada nível de energia aplicado foram feitos testes de médias comparando a estabilidade de agregados sob diferentes tipos de uso (Tabela 1). Em níveis de energia mais baixos (0,0 e 3,0 J mL⁻¹) não foram detectadas diferenças. Sob 9,1 J mL⁻¹, os agregados do solo sob cafezal de 2 anos e sob culturas anuais foram menos estáveis, comparados aos demais usos. Para o nível de 18,1 J mL⁻¹ a estabilidade de agregados diminuiu na seguinte seqüência: mata > *Eucalipus sp.* = *Pinus sp.* = pastagem > cafezal 13 anos = culturas anuais > cafezal de dois anos. Este foi o único nível de energia que possibilitou detectar diferença entre cafezal de 13 anos e pastagem.

Maiores diferenças na estabilidade de agregados, proporcionadas pelo uso, com coeficiente de variação mais baixo, foram observadas para os níveis de energia 36,3 e 72,5 J mL⁻¹. A estabilidade dos agregados diminuiu na ordem: mata > *Eucalipus sp.* = *Pinus sp.* > pastagem = cafezal 13 anos > culturas anuais > cafezal de dois anos. Estes dois níveis de energia foram os mais sensíveis para avaliar o efeito do tipo de uso na estabilidade de agregados do solo estudado.

Sá et al. (2000b) mostraram ser de 15,88 J mL⁻¹ o nível de energia específica mais eficiente para se detectar diferenças na estabilidade de agregados de dois solos, um Latossolo Roxo gibbssítico e uma Terra Roxa Estruturada caulínítica. Essas diferenças, por se tratar de solos diferentes, provavelmente são menos sutis do que as diferenças demonstradas pelos níveis 36,3 e 72,5 J mL⁻¹ no presente trabalho, realizado em um mesmo solo, de mineralogia uniforme (gibssítica), porém, sob usos diferentes. Os níveis de energia 108,8 e 145,1 J mL⁻¹ desagregaram o solo da mesma maneira, porém, não foram sensíveis o suficiente para se determinar diferença entre as condições de mata e *Eucalyptus*.

Na Figura 1 nota-se que as curvas se originam aproximadamente no mesmo ponto e permanecem muito próximas entre si para baixos níveis de

energia, os quais não são adequados para apontar diferenças entre tratamentos (Tabela 1). Por outro lado, são observadas maiores distâncias entre as curvas nos níveis entre 30 a 90 J mL⁻¹, intervalo este que contém os níveis 36,3 e 72,5 J mL⁻¹. Isso indica ser esta faixa a mais adequada para se detectar diferenças na estabilidade de agregados proporcionadas pelo tipo de uso, os quais foram mais apropriados, conforme os testes de médias aplicados (Tabela 1).

A partir de 90 J mL⁻¹, as curvas tendem a convergir para um patamar, limitado pelos teores de silte + argila, conforme a definição do índice de desagregação utilizado neste trabalho, ou seja: (silte + argila desagregados) / massa da amostra original (Sá et al. 1999). Alguns autores mostraram que altos níveis de energia, não são adequados para apontar diferenças na estabilidade de agregados (North, 1979; Raine & So, 1993; Sá et al., 2000b). Assim, para o solo estudado, níveis acima de 72,5 J mL⁻¹ não seriam adequados para apontar diferenças causadas pelo tipo de uso, podendo ser considerados muito altos os níveis de energia entre 300 e 500 J mL⁻¹ que, segundo Gregorich et al. (1988), são necessários para destruir macroagregados, ou os 270 J mL⁻¹ utilizados por Barral et al. (1998).

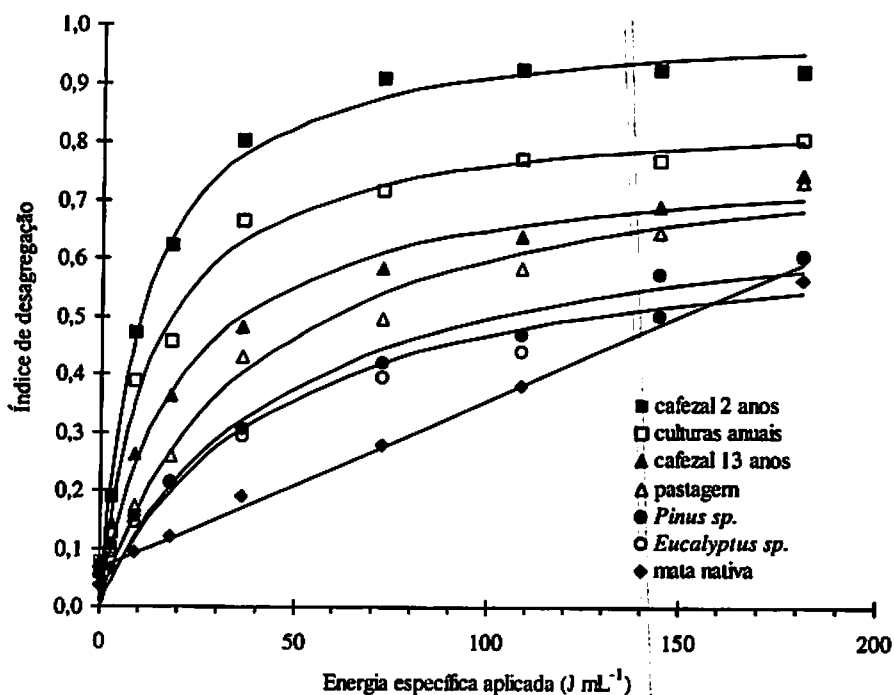


FIGURA 1 Curvas de desagregação para o horizonte A (prof. 0 a 5 cm) do Latossolo Vermelho Distroférrico típico sob diferentes condições de uso.

Na curva de desagregação relativa ao cafezal de 2 anos foram encontrados índices de desagregação de 0,92 a partir de 108,8 J mL⁻¹, quando esta curva se estabiliza (Tabela 1 e Figura 1), mostrando que os teores de silte e argila somaram 920 g kg⁻¹. Entretanto, este solo possui teor de silte + argila de 120 + 710 = 830 g kg⁻¹, pela análise granulométrica (agitação rápida com o uso de dispersante NaOH 1 mol L⁻¹), confirmando ser a energia ultra-sônica mais eficiente do que a agitação mecânica para dispersão do solo (Saly, 1967; Vitorino et al. 2001), mesmo sem o uso de dispersante químico (Sá et al., 1999). Isto mostra que o tipo de uso do solo influencia a desagregação também a altos

níveis de energia ultra-sônica, tornando a curva de desagregação característica para cada tipo de solo e, mesmo, para cada sistema de uso/manejo a que este solo é submetido, uma vez que as demais curvas sequer atingiram um patamar para os níveis de energia utilizados no presente estudo. Isto confirma a possibilidade da aplicabilidade de curvas de desagregação por ultra-som para expressar a estabilidade de agregados, conforme relatos de North, (1979); Fuller & Goh, (1992); Raine & So, (1993); Sá et al. (1999) e Cerdà (2000).

No entanto, quando comparadas a um único nível de energia, as curvas de desagregação demandam maior número de sonificações, e, conseqüentemente, maior quantidade de amostras e maior tempo de laboratório, tornando a análise mais cara. Entretanto, as curvas de desagregação podem ser de grande utilidade em trabalhos de pesquisa. Para todas as curvas foram ajustadas equações que apresentaram altos valores de R^2 , todos significativos a 1% (Tabela 2). Todas as curvas seguiram um modelo hiperbólico, do tipo $Y = X/(a + bX)$, com exceção da mata nativa que, para o intervalo de energia utilizado no presente estudo (0,0 a 181,4 J mL⁻¹), seguiu um modelo linear. Espera-se que, em níveis de energia acima dos que foram utilizados no presente estudo, esta curva também apresente um patamar seguindo um modelo hiperbólico, conforme observado por Sá et al. (1999). Esses autores, estudando o mesmo solo sob mata (e, portanto, na mesma área), encontraram um patamar a 600 J mL⁻¹, em virtude da grande estabilidade dos agregados no solo condicionada, sobretudo, pelo maior teor de matéria orgânica (Borges et al., 1999).

TABELA 2 Equações ajustadas para as curvas de desagregação do solo e respectivos R² para diferentes condições de uso do Latossolo Vermelho Distroférico típico

Condição de uso	Equação ajustada	R ²
cafezal de 2 anos	ID = EA/(10,6030 + 0,9937EA)	0,99**
culturas anuais	ID = EA/(15,3642 + 1,1669EA)	0,98**
cafezal de 13 anos	ID = EA/(25,8485 + 1,2843EA)	0,98**
pastagem	ID = EA/(46,1662 + 1,2128EA)	0,97**
<i>Pinus sp.</i>	ID = EA/(62,6427 + 1,3870EA)	0,96**
<i>Eucalyptus sp.</i>	ID = EA/(64,2588 + 1,4930EA)	0,96**
mata nativa	ID = 0,0646 + 0,0029EA	0,99**

ID: Índice de desagregação estimado pela equação; EA: energia específica aplicada (J mL⁻¹); **: significativo a 1% de probabilidade.

Conforme Tabela 1, pode-se afirmar que os níveis de energia específica de 36,3 J mL⁻¹ e 72,5 J mL⁻¹ são os mais adequados como níveis de energia isolados para se avaliar a estabilidade de agregados do presente solo. Isso porque apresentaram boa sensibilidade para detectar as diferenças proporcionadas pelo uso, com um baixo coeficiente de variação. No entanto, 36,3 J mL⁻¹ é o nível mais recomendado, uma vez que sua determinação é fácil e rápida; foi obtido pela equação (1), a partir de 1 minuto de sonificação de 5 g de TFSA em 200 mL de água destilada, com o aparelho fornecendo uma potência de 120,91±3,27 W, possibilitando um rendimento de aproximadamente 30 amostras por hora.

Para este tempo de sonificação, pode ser dispensado o banho de gelo, conforme proposto por Raine & So, (1994), uma vez que a temperatura da suspensão não atinge 35°C, tornando possível sua utilização em determinações

de rotina. No caso de aparelhos que emitem maior ou menor potência, o tempo de sonificação pode ser reduzido ou aumentado, respectivamente, mantendo-se a relação expressa pela equação 1. Outro fato a ser observado é a manutenção da relação solo:água (1:40), para facilitar comparações, uma vez que esta relação influi na eficiência da desagregação, conforme Raine & So (1994).

4 CONCLUSÕES

A melhor faixa de energia ultra-sônica para se detectar diferenças na estabilidade de agregados do LVd submetido a diferentes condições de uso está entre 30 e 90 J mL⁻¹.

A estabilidade de agregados é influenciada pelos teores de C orgânico e diminui, a 36,3 J mL⁻¹, na seguinte ordem: mata > *Eucalyptus sp* = *Pinus sp.* > pastagem = cafezal 13 anos > culturas anuais > cafezal de 2 anos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARRAL, M. T.; ARIAS, M. GNÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.46, p.261-272, 1998.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C.; SOUZA, L. S. Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, n.4, p.1019-1025, 1999.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.19, n.1, p.121-126, jan./abr. 1995.

- CERDÀ, A. Aggregate stability against water forces under different climates on agriculture land and scrubland in southern Bolivia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.57, p.159-166, 2000.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, New York, v.20, p. 2-76, 1992.
- CHRISTENSEN, B.T. Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity sedimentation. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Copenhagen, v.35, n.2, p.175-187, 1985.
- DE CESARE, F.; GARZILLO, A. M. V.; BUONOCORE, V.; BADALUCCO, L. Use of sonication for measuring acid phosphatase activity in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v.32, p.825-832, 2000.
- FULLER, L.G.; GOH, T.G. Stability-energy relationships and their application to aggregation studies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v.72, n.4, p.453-466, Nov. 1992.
- FULLER, L.G.; GOH, T.G.; OSCARSON, D.W. Cultivation effects on dispersive clay of soil aggregates. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v.75, n.1, p.101-107, Feb. 1995.
- GREGORICH, E.G.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Ultrasonic dispersion of aggregates: distribution of organic matter in size fractions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v.68, n.2 p.395-403, May. 1988.
- MACEDO, J. R.; OTONNI FILHO, T. B.; MENEGUELLI, N. A. Variabilidade de características físicas, químicas e físico-hídricas em solo Podzólico Vermelho-Amarelo de Seropédica, RJ. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.13, p.3043-3053, dez. 1998.
- MULYAR, I. A.; MINKIN, M. B. Use of ultrasound in the analysis of water extracts from soils. **Eurasian Soil Science**, Maryland, v.24, n.8, p.119-124, 1993.
- NORTH, P.F. Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.30, n.3, p.463-472, Sept. 1979.

RAINE, S.R.; SO, B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.44, n.2, p.249-259, June 1993.

RAINE, S.R.; SO, B. Ultrasonic dispersion of soil in water: the effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. *Australian Journal of Soil Resourch*, London, v.32, n.6, p.1157-1174, 1994.

ROCHA, G. C. *Geologia, geomorfologia e pedologia de uma catena de solos situada no campus da Escola Superior de Agricultura de Lavras (MG)*. 1982. 109p., Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras.

SÁ, M. A. C. *Quantificação da energia para dispersão dos agregados de Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada*. 1998. 92p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SÁ, M. A. C.; LAGE, G.; LIMA, J. M. *Calibração da potência emitida pelo sonificador para uso em análises de solo*. Lavras: UFLA, 2001. 17p. (Boletim agropecuário, 41).

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; LAGE, G. Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som. *Comunicação. Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.24, n.1, p.300-306, jan./mar., 2000.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.9, p.1825-1834, set. 2000.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, n.3, p.525-531, jul./set., 1999.

SALY, R. Use of ultrasonic vibration for dispersing soil samples. *Soviet Soil Science*, Silver Spring, v.11, p.1547-1559, 1967.

TIPPKÖTTER, R. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-200 μm). *Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Weinheim, v.157, n.2, p.99-104, Apr. 1994.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science, Oxford*, v.33, n.1, p.141-163, Mar. 1982.

VITORINO, A. C. T.; FERREIRA, M. M.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; CURI, N. Níveis de energia ultra-sônica na dispersão de argila em solos da região de Lavras (MG). *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, v.25, n.6, p.1330-1336, nov./dez., 2001

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science, Baltimore*, v.37, p.29-38, 1934.

CAPÍTULO 3

ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE COM BASE NA DESAGREGAÇÃO POR ULTRA-SOM E ATRIBUTOS DE SOLOS COM HORIZONTE B TEXTURAL

RESUMO

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. Estimativa da erodibilidade com base na desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. In: _____ Energia ultra-sônica, uso e erodibilidade de solos, 2002. Cap.3, p.38 a 75. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.⁵

A erodibilidade é um fator importante para estimar as perdas de solo por erosão. Trata-se da combinação de atributos do solo, os quais possibilitam sua estimativa. O objetivo deste estudo foi determinar atributos químicos e mineralógicos que, combinados com índices de estabilidade de agregados por ultra-som, foram utilizados como variáveis em modelos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural do Brasil. Estes atributos foram determinados em 22 solos, com erodibilidade conhecida, determinada diretamente no campo. O ponto de efeito salino nulo (PESN) variou entre 3,4 e 5,5 em amostras do horizonte A e entre 3,6 e 5,0 para amostras do horizonte B. Todos os valores de PESN foram menores que os valores de pH em água. Caulinita e mica são os principais minerais na fração argila de todos os solos, apesar de alguns solos apresentarem mica-vermiculita em sua constituição. Atributos de 21 dos solos foram utilizados para ajuste dos modelos, e um dos solos (Argissolo Vermelho-Amarelo) foi escolhido ao acaso para teste dos mesmos. Das 96 variáveis, 15 foram incluídas nos modelos de estimativa da erodibilidade. A maioria delas é de índices de desagregação por sonificação de amostras do horizonte A. Este estudo resultou em quatro modelos para estimar a erodibilidade, com R^2 variando entre 0,83** e 0,91**. Os modelos estimaram precisamente a erodibilidade do Argissolo utilizado para teste dos mesmos. Entretanto, apesar desta estimativa precisa, mais pesquisas são necessárias para validar os modelos propostos.

⁵ Comitê orientador: José Maria de Lima – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA e João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

ABSTRACT

SÁ, Marcos Aurélio Carolino de. Estimating soil erodibility from sonication indexes and other attributes of argillic horizon soils from Brazil. In: _____ **Sonication energy, use and erodibility of soils, 2002, Chap.3, p.38 to 75.** (Doctorate Thesis on Soil Science and Plant Nutrition) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.⁶

Soil erodibility is an important factor for estimating soil erosion losses. This factor is an expression of combined soil attributes, which make possible to estimate soil erodibility by equations that take them into account. The objective of this study was to measure some chemical and mineralogical attributes, and to combine them with aggregate stability indexes from sonication analysis, in equations to estimate soil erodibility of argillic horizon soils from Brazil. These attributes were measured for 22 soils that had their erodibility measured directly from field plots. The results showed that point of zero salt effect (PZSE) ranged from 3.4 to 5.5 for A horizon samples, and from 3.6 to 5.0 for B horizon samples. All the PZSE values were lower than the values of pH that were measured in water. Although some of the soils had mica-vermiculite, kaolinite and mica were the main minerals in the clay fraction of all these soils. Attributes of 21 soils were used to adjust the equations. One of the soils (Red-Yellow Argisol) was used to test the equations. From 96 variables, 15 showed to be significantly correlated to soil erodibility. Most of them were the disruption indexes from sonication analysis of A-horizon samples. This study resulted in four equations to estimate soil erodibility, whose R^2 ranged from 0.83** to 0.91**. The equations accurately estimated the erodibility of the studied Argisol. Despite the accuracy of the erodibility estimation in this study, more researches are necessary in order to validate the proposed equations.

⁶ Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA and João José Granate de Sá e Melo Marques – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A capacidade produtiva do solo tem sido historicamente relacionada ao desenvolvimento e decadência de civilizações. Neste contexto, a erosão é uma das principais causas da degradação de áreas agrícolas e poluição de mananciais em todo o mundo, até os dias atuais (Bennett, 1939; El-Swaify & Dangler, 1982; Bertoni & Lombardi Netto, 1990).

Alguns pesquisadores do passado (Middleton, 1930; Bouyoucos, 1935) tentaram relacionar atributos físicos do solo com sua susceptibilidade à erosão. Entretanto, o estudo da erodibilidade passou a receber maior atenção com o advento de modelos matemáticos de previsão de perdas de solo, como a Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), proposta por Wischmeier & Smith, (1965, 1978) e, mais recentemente, a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) (Renard et al., 1994). A erodibilidade é uma das variáveis desta equação (fator K), sendo um índice que expressa, quantitativamente, a susceptibilidade do solo à erosão hídrica. Este fator depende da capacidade de infiltração de água, resistência à desagregação e transporte, provocados pela chuva e pelo escoamento superficial (Wischmeier e Mannering, 1969; Römkens, 1987; Lal, 1988; Denardin, 1990; Silva et al. 1999).

O fator K pode ser determinado diretamente no campo, em parcelas experimentais sob chuva natural ou simulada, o que demanda tempo e altos custos, principalmente no primeiro caso. Este fator também pode ser estimado indiretamente com a utilização de modelos matemáticos que utilizam, como variáveis, atributos relacionados direta ou indiretamente com a resistência do solo à erosão, o que exige menor tempo e custo (Wischmeier et al., 1971; Denardin, 1990; Marques et al., 1997b; Silva et al., 1999).

Quando um modelo é proposto para esta finalidade, ele é válido para solos semelhantes aos utilizados na sua elaboração. Muitos modelos têm sido propostos, em diversos países, para estimativa indireta da erodibilidade (Dumas, 1965; Wischmeier & Mannering, 1969; Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Romkens et al., 1977, Young & Mutchler, 1977; Paez & Ildfonso, 1992). Porém, a grande maioria não apresenta resultados satisfatórios para solos brasileiros, conforme demonstrado por Marques et al. (1997a) e Silva et al. (2000).

A erodibilidade é um fator complexo, que depende da interação de atributos múltiplos (Silva et al. 1999). Sendo assim, fica difícil, muitas vezes, estabelecer uma relação de causa-efeito entre as variáveis utilizadas nos modelos e a erodibilidade (Römken et al., 1977, Denardin, 1990; Marques et al., 1997b; Silva et al., 1999). Para alguns autores, a estabilidade de agregados medida por peneiramento úmido, impacto de gotas ou chuva simulada é o atributo que melhor se correlaciona com a erodibilidade (Angulo, 1983; Egashira et al., 1983).

Nos últimos anos, pesquisas têm sido feitas visando à determinação da estabilidade de agregados mediante a aplicação de energia ultra-sônica (North, 1976, 1979; Fuller & Goh, 1992; Raine & So, 1993, 1994; Tippkötter, 1994; Barral et al., 1998; Sá et al., 1999; Sá et al., 2000b). A grande vantagem da determinação da estabilidade de agregados desta maneira é a mensuração da energia aplicada à amostra, o que constitui uma base conveniente para comparação de trabalhos que relacionam a quebra de agregados sob diferentes condições (Raine & So, 1993).

Com a utilização desta técnica, é possível conhecer a resistência que um solo oferece à desagregação, quando submetido a diferentes níveis de energia, até atingir a dispersão total. Avaliam-se os índices de desagregação

isoladamente ou plotando-os em curvas de desagregação, cujo comportamento é um reflexo da estabilidade de agregados do solo (Sá et al., 1999). Dessa forma, o conhecimento da energia associada à desagregação do solo torna a estabilidade de agregados determinada por ultra-som potencialmente promissora na determinação da erodibilidade.

A estabilidade de agregados é influenciada por diversos atributos do solo, dentre eles a mineralogia (Ferreira et al., 1999), o teor de matéria orgânica (Tisdall & Oades, 1982) e atributos eletroquímicos (Chorom & Rengasamy, 1995; Lima et al., 2000; Fontes et al., 2001). Estes últimos, por representarem o efeito de cargas superficiais dos colóides, estão relacionados a fenômenos físico-químicos, como CTC, dispersão e floculação, influenciando a resistência e estabilidade dos agregados. A manifestação de atributos eletroquímicos, dentre eles o ponto de efeito salino nulo (PESN), é consequência da mineralogia, grau de intemperismo e teor de matéria orgânica do solo (Raij, 1973; Siqueira et al., 1990b; Pérez et al., 1993; Benites & Mendonça, 1998).

Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram: i) determinar atributos eletroquímicos de solos brasileiros com horizonte B textural, relacionando-os com atributos químicos e mineralógicos, ii) ajustar modelos para estimativa indireta da erodibilidade (fator K da USLE) utilizando como variáveis atributos eletroquímicos e índices de estabilidade de agregados por ultra-som, dos horizontes A e B de solos brasileiros com horizonte B textural.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Solos estudados

Foram utilizadas amostras dos horizontes A e Bt de 23 solos de diversas regiões brasileiras. A classificação e localização de cada solo podem ser

observadas na Tabela 1. Os solos de 1 a 22 possuem a erodibilidade (fator K da USLE) determinada diretamente no campo, cujos valores foram extraídos de Marques et al., (1997a). Alguns dados para a caracterização química e física dos solos foram obtidos dos trabalhos de Marques et al. (1997a) e Marques (1996) e são mostrados na Tabela 2.

2.2 Preparo das amostras e determinação de atributos eletroquímicos

As amostras foram passadas em peneira de 2 mm, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), onde foi determinado o ponto de efeito salino nulo (PESN). Esse ponto é definido como o pH em que ocorre a intersecção das curvas de titulação potenciométrica com ácido ou base, conforme metodologia de Zelasny et al. (1996), com modificações, que consistiram em pesar o equivalente a 2 g de TFSE em 16 frascos de 45 mL, adicionando-se 20 mL de cada uma das soluções descritas na Tabela 1 nos respectivos frascos. Estes foram, então, agitados por 4 horas e deixados em repouso por 14 horas, sendo as leituras de pH das suspensões, bem como das soluções puras, feitas após esse tempo. Foram feitas para cada amostra, em três replicatas, duas curvas de titulação empregando soluções com forças iônicas de 0,005 e 0,05 M, que foram constantes para cada ponto dentro da mesma curva, independente do seu valor de pH. Em cada curva, foi plotado no eixo das abcissas o valor de pH das amostras e no eixo das ordenadas, o valor de $\Delta H - \Delta OH$, calculado para cada força iônica e pH, pela equação 1:

TABELA 1 Classificação antiga, atual e localização dos solos estudados.

Solo	Classificação antiga	Classificação atual	Localização	K t h (MJ mm) ⁻¹	Fonte
1	Podzólico Amarelo	Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto	Fortaleza, CE	0,045	1
2	Podzólico Vermelho-Escuro	Alissolo Crômico Argilúvico típico	Santa Maria, RS	0,024	2
3	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Distrófico típico	Eldorado do Sul, RS	0,032	3
4	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico	Viçosa, MG	0,027	4
5	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	Alagoa Grande, PB	0,032	5
6	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutrófico Abrupto plântico	Itapororoca, PB	0,018	5
7	Bruno não Cálcico	Luvissole Hipocrômico Órtico planossólico	Gurinhém, PB	0,032	5
8	Solonetz-Solidizado	Planossolo Nátrico Órtico vértico	Boa Vista, PB	0,012	6
9	Bruno não Cálcico	Luvissole Crômico Órtico típico	Patos, PB	0,008	7
10	Podzólico Vermelho-Escuro	Luvissole Crômico Pálico típico	Patos, PB	0,004	6
11	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	Tavares, PB	0,025	7
12	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutrófico típico	Teixeira, PB	0,008	7

...continua...

TABELA 1 Cont...

Solo	Classificação antiga	Classificação atual	Localização	K t h (MJ mm) ⁻¹	Fonte
13	Podzólico Vermelho-Amarelo	Alissolo Hipocrômico Argilúvico típico	Alagoa Nova, PB	0,031	5
14	Bruno não Cálcico	Luvissole Crômico Órtico lítico	Casserengue, PB	0,009	6
15	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	Gloria do Goitá, PE	0,014	8
16	Podzólico Vermelho-Amarelo	Alissolo Crômico Argilúvico típico	Morretes, PR	0,004	9
17	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico	Sete Lagoas, MG	0,033	10
18	Podzólico Vermelho-Escuro	Alissolo Crômico Argilúvico típico	Santa Maria, RS	0,034	3
19	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutrófico arênico	Pindorama, SP	0,004	11
20	Podzólico Vermelho-Amarelo	Nitossolo Háptico Eutrófico típico	Mococa, SP	0,023	12
21	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutrófico típico	Itaguaí, RJ	0,028	13
22	Podzólico Vermelho-Amarelo	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abruptico plântico	Quixadá, CE	0,008	1
23	Podzólico Vermelho-Escuro	Argissolo Vermelho Eutrófico típico	Patu, RN		10

Fonte: ¹Silva (1994); ²Dal Conte, (1982); ³Levien, citado por Denardin, (1990); ⁴Resck et al. (1981); ⁵Rodrigues do Ó (1986); ⁶Silva & Andrade (1994); ⁷Silva et al. (1986); ⁸Campos Filho et al. (1992); ⁹EMBRAPA-CNPF (informação pessoal do pesquisador G. R. Curcio); ¹⁰Marques, (1996); ¹¹Carvalho et al. (1994); ¹²Carvalho et al. (1989); ¹³Leprun, citado por Denardin, (1990).

TABELA 2 Atributos dos horizontes A e B dos solos estudados.

Solo	Horizonte A				Horizonte B						
	Areia	Silte	Argila	¹ C org.	Areia	Silte	Argila	¹ C org.	² V	³ Ki	⁴ Kr
	-----g kg ⁻¹ -----				%						
1	812	46	142	4	577	55	368	4	58	2,14	1,14
2	479	303	218	13	238	235	527	6	25	2,25	1,03
3	706	150	144	15	302	138	560	4	20	2,16	1,05
4	481	141	378	14	238	125	637	6	49	1,82	0,84
5	678	160	162	14	594	118	288	5	65	1,95	0,86
6	666	144	190	7	437	166	397	3	52	2,13	0,97
7	659	196	145	13	517	158	325	4	85	2,72	1,18
8	769	120	111	4	471	62	467	6	81	2,62	1,15
9	687	153	160	9	557	154	289	4	89	2,50	1,07
10	615	194	191	9	555	195	250	4	76	1,89	0,85
11	652	142	206	9	472	160	368	5	77	2,04	1,02
12	563	129	308	11	397	107	496	7	51	2,01	0,95
13	628	123	249	17	596	92	312	13	7	1,78	0,93
14	665	202	133	7	431	128	441	4	80	2,61	1,11
15	657	117	226	2	540	150	310	3	66	2,10	1,03
16	257	368	375	28	179	164	657	3	2	2,03	0,91
17	110	366	524	21	54	237	709	9	52	2,00	1,01
18	682	106	212	9	436	111	453	7	14	2,07	1,00
19	816	75	109	6	601	58	341	4	74	2,02	0,97
20	532	150	318	13	368	188	444	11	74	1,78	0,81
21	622	110	268	12	405	89	506	3	55	2,09	1,60
22	829	60	111	5	565	94	341	4	75	2,35	1,18
23	489	358	153	12	276	456	268	2	83	2,07	0,98

¹Carbono orgânico; ² saturação por bases; ^{3,4} relações moleculares SiO₂/Al₂O₃ e SiO₂/Al₂O₃+Fe₂O₃, respectivamente. Fonte: Marques (1996) e Marques et al. (1997a).

$$\Delta H - \Delta OH = \left[\frac{(10^{-(14-pHB)} - 10^{-(14-pHS)}) - (10^{-(14-pHB)} - 10^{-(14-pHS)})}{\gamma} \right] \times \frac{V}{M} \times 1000 \quad (1)$$

em que:

$\Delta H - \Delta OH$ é a densidade de cargas superficiais de prótons, em mmol_c kg⁻¹;

ΔH é a diferença entre a concentração final de H⁺ da suspensão e da solução;

ΔOH é a diferença entre a concentração final de OH⁻ da suspensão e da solução;

pHB é o pH da respectiva solução;

pHS é o pH da suspensão (solução equilibrada com a amostra);

γ é o coeficiente de atividade, calculado pela equação 2;

V é o volume de solução utilizado (L);

M é a massa de solo seco utilizado (g).

O coeficiente de atividade é calculado por meio da equação 2, proposta por Davies (1962), citado por Lindsay (1979):

$$\text{Log} \gamma = -AZ_i^2 \times \left[\frac{\sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}} - 0,3\mu \right] \quad (2)$$

em que:

A é 0,509 para água a 25°C;

Z é a valência dos íons existentes nas soluções (1);

μ é a força iônica da solução (0,005 ou 0,05 M);

Conhecidos os valores de PESN, foram calculados os valores do potencial de superfície da dupla camada, pela equação 3 (Raij, 1973):

$$\Psi_0 = 59,1 \times (\text{PESN} - \text{pH}_{\text{água}}) \quad (3)$$

em que:

Ψ_0 é o potencial de superfície da dupla camada (mV);

PESN é o ponto de efeito salino nulo;

$\text{pH}_{\text{água}}$ é o pH em água (1:25).

O ΔpH foi determinado segundo EMBRAPA (1997) e o PCZ (ponto de carga zero) foi estimado conforme equação 4 (SOIL SURVEY STAFF, 1967, citado por UEHARA, 1988):

$$\text{PCZ} = (2 \times \text{pH}_{\text{KCl}}) - \text{pH}_{\text{água}} \quad (4)$$

em que:

pH_{KCl} é o pH do solo em solução de KCl 1M (1:25);

$\text{pH}_{\text{água}}$ é o pH medido em água (1:25);

TABELA 3 Esquema para o preparo de 1000 mL de cada uma das soluções utilizadas para determinação do PESN.

Solução	Força iônica	HCl 0,005M	NaOH 0,005M	NaCl			Água destilada	¹ pH
				0,005M	0,1M	0,155M		
		-----Volume a ser gasto (mL)-----						
1a	0,005	700	0	300	-	-	-	2,48
2a	0,005	500	0	500	-	-	-	2,63
3a	0,005	300	0	700	-	-	-	2,83
4a	0,005	80	0	920	-	-	-	3,42
5a	0,005	0	0	1000	-	-	-	5,91
6a	0,005	0	80	920	-	-	-	10,41
7a	0,005	0	300	700	-	-	-	11,10
8a	0,005	0	500	500	-	-	-	11,42

1b	0,05	700	0	-	-	300	-	2,49
2b	0,05	500	0	-	465	-	35	2,62
3b	0,05	300	0	-	485	-	215	2,84
4b	0,05	80	0	-	495	-	425	3,42
5b	0,05	0	0	-	500	-	500	5,60
6b	0,05	0	80	-	495	-	425	10,38
7b	0,05	0	300	-	485	-	215	11,10
8b	0,05	0	500	-	465	-	35	11,40

1: Valores aproximados, podem variar de uma bateria para outra.

2.3 Análises mineralógicas

Amostras de TFSA (50 g) foram dispersas com uso de agitação mecânica e dispersante (10 mL de NaOH 0,1 M). A fração areia foi separada das demais frações por peneiramento (malha 0,053mm) e as frações silte e argila separadas por sedimentação, tendo por princípio a lei de Stockes. As suspensões de água e argila foram então floculadas, adicionando-se gotas de HCl 1M ou pitadas de NaCl, quando necessário, pois o pH foi mantido na faixa de 4 a 8 durante todo o processo, para evitar dissolução de minerais. As suspensões floculadas foram então submetidas à diálise em membrana de celofane para retirada de sais, congeladas e liofilizadas para retirada da água.

As amostras de argila foram então cuidadosamente moídas e passadas em peneira de malha 0,21 mm, para posterior determinação dos teores de Fe_2O_3 de baixa cristalinidade, extraído pelo oxalato ácido de amônio, e dos teores de Fe_2O_3 cristalino mais os de baixa cristalinidade, extraído pelo ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) conforme metodologia de EMBRAPA (1997). Os teores, em ambos os casos, foram corrigidos para a terra fina.

As amostras desferrificadas pelo DCB foram transferidas para frascos de 30 mL, novamente congeladas, liofilizadas e posteriormente moídas. Foram feitos tratamentos com Mg, K e Mg + etilenoglicol, para identificação de minerais de argila 2:1 (EMBRAPA, 1997) e preparadas lâminas orientadas, que foram submetidas à difração de raios X (DRX) para obtenção de informações sobre sua composição mineralógica (Klug & Alexander, 1974); a quantificação de caulinita e gibbsita na fração argila desferrificada foi feita por meio de Análise Térmica Diferencial (ATD). Todas as determinações foram feitas em triplicatas, exceto DRX e ATD, cujos resultados foram utilizados apenas para caracterização.

2.4 Estabilidade de agregados por sonificação

Dados sobre o aparelho utilizado e calibração da potência emitida são descritos nos Capítulos 1 e 2. Foi utilizada a metodologia descrita por Sá et al. (1999), em duas frações de agregados: 7,93 a 4,76 mm e menores que 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA).

2.4.1 Sonificação dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm

Devido à quantidade limitada de agregados da fração 7,93 a 4,76 mm, foi possível fazer apenas uma replicata para as amostras de horizontes A dos solos 8, 10 e 22 e duas replicatas para os horizontes A do solo 1 e B dos solos 10 e 23. Foram feitas três replicatas para as demais amostras. Para cada replicata, cujo peso foi equivalente a 5 g de agregados secos em estufa a 105°C, foi feito um pré-umedecimento por capilaridade (Sá et al., 1999). Elas foram, então, submetidas aos tempos de sonificação: 0, 5, 15, 30, 60, 300, 900, 1800 e 2700 s, o que corresponde, respectivamente, às energias específicas aplicadas de 0,0; 3,0; 9,1; 18,1; 36,3; 181,4; 544,1; 1088,2 e 1682,3 J mL⁻¹, calculadas segundo Sá et al. (2000a) e Sá et al. (2001), pela equação 1, Capítulo 1.

Para cada nível de energia aplicado, foi calculado o índice de desagregação (ID), que foi também normalizado (IDN). O primeiro representa o efeito da estabilidade de agregados e granulometria, enquanto o segundo, apenas da estabilidade de agregados, conforme procedimento descrito no Capítulo 1. Uma vez que alguns solos estudados apresentam considerável teor de cascalho, para cálculo dos índices de desagregação foi descontada a contribuição desta fração. Isso foi feito separando-se do resíduo, após a sonificação, as partículas maiores que 2 mm e descontando-se o seu peso do peso total da amostra inicial.

Foram então construídas curvas de desagregação conforme Sá et al.

(1999), semelhantes às do Capítulo 2, plotando-se no eixo das abcissas (X) a energia aplicada, em $J mL^{-1}$, e no eixo das ordenadas (Y), os índices de desagregação, normalizados ou não, ajustando-se modelos do tipo $Y = X/(a + bX)$, sendo a e b coeficientes. Foi calculado um índice, o qual é a relação entre os coeficientes b/a , que expressa a estabilidade de agregados, com base no comportamento das curvas de desagregação.

2.4.2 Sonificação dos agregados da fração menor que 2 mm (TFSA)

Para esta fração, foi possível a realização de todas as análises em triplicatas. Cada determinação partiu de 5 g de agregados secos em estufa a $105^{\circ}C$, com pré-umedecimento, conforme proposto por Fuller & Goh (1992). O processo consistiu em colocar os agregados secos em béquer de 250 mL, o qual foi colocado em um suporte, em posição inclinada (45°) abaixo de uma bureta, sendo gotejada água destilada, lentamente (aproximadamente 2 mL por minuto), sobre a parede do béquer, promovendo umedecimento gradativo dos agregados. Quando estes já estavam cobertos por água destilada, o volume do béquer foi completado para 200 mL. As amostras foram então submetidas aos seguintes tempos de sonificação: 0, 5, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 s. Cada tempo de sonificação corresponde, respectivamente, às energias específicas aplicadas de 0,0; 3,0; 9,1; 18,1; 36,3; 72,5; 108,8; 145,1; 181,4 $J mL^{-1}$.

Testes preliminares mostraram que os índices de desagregação se estabilizavam a partir de $181,5 J mL^{-1}$, dispensando, portanto, o uso de níveis mais elevados de energia. Os demais procedimentos de sonificação e cálculo dos índices ID e IDN e ajuste das curvas de desagregação seguiram os mesmos passos utilizados para agregados da fração 7,93 a 4,76 mm (item 2.4.1).

2.5 Análises estatísticas e ajuste dos modelos

Foram feitas correlações de Pearson entre os valores de PESN e atributos dos solos, bem como PCZ estimado. Uma vez que os solos de 1 a 22 possuem a erodibilidade (fator K da USLE) determinada diretamente no campo, foram criadas variáveis, baseadas em atributos dos solos (PESN, Ψ_o , PCZ estimado, ΔpH , T arg, Fe_2O_3 -DCB, Fe_2O_3 -oxalato e Ct, nos horizontes A e B) e índices de desagregação por ultra-som (ID e IDN, nos horizontes A e B e nas duas frações de agregados e b/a, para ambos os casos), num total de 96 variáveis, as quais foram utilizadas para o ajuste de modelos para predição da erodibilidade, por *Stepwise em backward*, do tipo:

$$K_{est} = C + (C_1 X_1) + (C_2 X_2) + \dots + (C_n X_n)$$

em que:

K_{est} é a erodibilidade estimada do solo [$t h (MJ mm)^{-1}$];

C, C_1 , C_2 e C_n são os coeficientes de ajuste dos modelos (positivos ou negativos);

X_1 , X_2 e X_n são as variáveis dos modelos.

Foi utilizado o aplicativo estatístico *Sigma Stat for Windows 1.0 (Jandel Corporation Inc.)*, adotando-se 5% como nível de significância máximo para inclusão de uma variável no modelo, abaixo portanto, do nível de 15% utilizado por Denardin, (1990) e Marques et al. (1997b). A aceitação dos modelos foi feita mediante interpretação de R^2 , R^2 ajustado e erro padrão da estimativa (EPE). O solo 5, cuja erodibilidade também é conhecida, não foi incluído no ajuste dos modelos, sendo escolhido ao acaso, por sorteio, para teste dos mesmos, cuja erodibilidade estimada foi comparada com a erodibilidade conhecida. Também foi estimada a erodibilidade do solo 23 e comparada com a erodibilidade estimada por Marques (1996).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Eletroquímica dos solos estudados

Os valores de PESN variaram entre 3,44 e 5,45 no horizonte A e 3,63 e 5,04 no horizonte B (Tabela 4). Em geral, foram superiores aos encontrados por outros autores para solos brasileiros com horizonte B textural, que variaram de 2,5 a 3,4 (Chaves & Trajano, 1992) e 2,2 a 3,7 (Pérez et al., 1993). A diferença é atribuída à grande abrangência de solos do presente estudo, superior à utilizada pelos autores. Entretanto, em ambos os horizontes foram observados valores de PESN menores que $\text{pH}_{\text{água}}$, sendo, conseqüentemente, negativos os valores do potencial de superfície (Ψ_0), consistentes com os valores negativos de ΔpH (Tabela 4). Isso mostra que todos os solos possuem CTC maior que CTA a valores de pH natural. Esse resultado está de acordo com o que foi observado por outros autores para amostras de solos desta categoria (Chaves & Trajano 1992; Pérez et al., 1993; Alleoni & Camargo, 1994).

Não foram determinados os valores de PESN para os horizontes A e B do solo 5 e B dos solos 7, 8 e 14 (Tabela 4), uma vez que as curvas de titulação não se cruzaram para essas amostras na faixa de pH estudada, a qual, após o tempo de equilíbrio, variou, em geral, de 3,00 a 9,00. Neste estudo, não foram utilizadas soluções com valores de pH mais baixos ou elevados que os da Tabela 3, para se evitar a dissolução de minerais, conforme observado por Siqueira et al., (1990a) em valores extremos de pH. Com exceção do horizonte B do solo 5, estas amostras possuem argila de atividade alta (TABELA 4), ou seja, CTC maior que $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ sem a correção para C orgânico, conforme critério de EMBRAPA (1999). Este atributo, isoladamente, não explica o fato das curvas não se cruzarem, pois, em boa parte dos solos que também apresentam argila de atividade alta, foi possível a determinação do PESN, citando como exemplo o solo 9 (Luvissole). Este solo possui a argila mais ativa

dentre os solos estudados e apresenta valores de PESN de 4,36 e 4,30, respectivamente, para horizontes A e B, acima, portanto, dos valores observados para alguns solos caulínticos com argila de baixa atividade (solos 1, 12 e 17, por exemplo – Tabela 4). Isso pode ser melhor visualizado nas baixas correlações entre atividade da fração argila e PESN, para ambos os horizontes (Tabela 6).

As amostras nas quais não foi possível determinar o PESN no intervalo investigado possuem em comum, a presença de mica na fração argila (Tabela 5). Embora também presente em outros solos, ela pode ser mais ativa (menor tamanho de partícula) para estas amostras, conferindo maior quantidade de cargas permanentes, sendo que os solos 7 e 14 possuem Mi-Vm.

Alguns solos com argila de atividade alta e minerais 2:1 apresentaram valores de PESN mais elevados do que os observados para solos caulínticos com argila de atividade baixa. Para Ct, outras variáveis são também importantes, como sua cristalinidade (Pérez et al., 1993), a qual não foi avaliada no presente estudo, e a sua interação com outros minerais (Silva et al., 1996; Fontes et al., 2001). Possivelmente, essa combinação entre grau de cristalinidade dos minerais e suas interações expliquem o fato de alguns solos com mais caulinita ainda apresentarem menor PESN do que aqueles com argila 2:1.

Foi observada correlação negativa e significativa, embora baixa (-0,46*), entre PESN e formas menos cristalinas de Fe_2O_3 extraídas pelo oxalato ácido de amônio e PESN nos horizontes A (Tabela 6), semelhante ao observado por Silva et al. (1996). Essa correlação negativa é atribuída às interações entre as formas menos cristalinas de Fe_2O_3 e outros componentes do solo, como sílica e matéria orgânica, que contribuem para abaixar o PESN, conforme Schwertmann & Fechter (1982).

TABELA 4 Atributos eletroquímicos e químicos dos solos estudados.

solo	¹ ΔpH		pH _{água}		² PESN		³ Ψ _o		⁴ PCZ		⁵ Targ		Fe ₂ O ₃ - DCB		Fe ₂ O ₃ - oxalato	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
	-----mV-----								-----cmol _c kg ⁻¹ -----				-----g kg ⁻¹ -----			
1	-1,3	-1,0	5,6	5,2	3,99	3,85	-95,3	-80,0	3,0	3,2	26,8	13,6	2,48	5,61	0,25	0,29
2	-1,2	-1,2	5,4	5,0	4,56	4,13	-49,8	-51,4	3,0	2,6	47,7	38,9	14,57	32,90	2,12	2,34
3	-1,8	-0,7	5,6	5,2	4,04	3,80	-92,0	-82,7	2,0	3,8	47,9	24,5	7,00	34,30	1,19	0,87
4	-1,0	-0,5	5,4	5,4	4,13	4,59	-74,9	-47,9	3,4	4,4	13,2	6,4	32,24	58,38	1,56	1,21
5	-0,6	-1,1	7,7	6,2	-	-	-	-	6,5	4,0	54,3	18,8	12,49	24,06	1,20	1,62
6	-0,9	-0,4	5,1	4,6	3,92	3,76	-69,7	-49,8	3,3	3,8	34,2	15,1	6,32	22,23	1,06	0,92
7	-0,9	-1,8	5,6	6,5	3,76	-	-108,9	-	3,8	2,9	89,0	39,7	4,93	6,84	2,06	1,67
8	-1,3	-1,0	5,8	5,3	3,44	-	-139,5	-	3,2	3,3	53,2	29,8	2,09	9,90	1,31	2,94
9	-0,5	-1,0	5,8	6,0	4,36	4,30	-85,1	-100,3	4,8	4,0	63,8	62,3	9,08	18,32	0,68	0,90
10	-0,4	-0,8	6,1	6,1	4,45	4,36	-97,3	-102,8	5,3	4,5	37,2	28,4	14,69	18,47	0,54	0,64
11	-0,6	-0,7	6,5	6,1	5,41	4,18	-64,4	-113,3	5,3	4,7	35,9	22,3	8,95	16,91	0,56	0,88
12	-0,5	-0,6	5,6	4,7	3,97	3,63	-96,5	-63,4	4,6	3,5	22,4	14,7	14,92	24,86	0,56	0,63
13	-0,7	-0,5	4,8	4,5	3,75	3,87	-61,9	-37,4	3,4	3,5	41,8	42,6	4,70	5,83	1,32	1,48
14	-0,4	-1,8	5,3	5,6	3,88	-	-84,1	-	4,5	2,0	48,9	41,7	4,91	16,12	0,93	1,75
15	-0,4	-0,4	5,4	5,6	4,69	4,45	-42,0	-67,8	4,6	4,8	45,6	18,1	11,12	16,41	1,30	0,35
16	-0,7	-0,4	4,7	4,3	3,91	3,83	-46,5	-28,0	3,3	3,5	26,9	28,9	26,05	69,13	2,94	1,38
17	-1,2	-1,3	5,8	5,5	4,15	4,00	-97,5	-88,7	3,4	2,9	23,7	13,3	36,06	57,22	2,46	1,52
18	-0,6	-0,6	4,6	4,5	3,92	3,95	-40,2	-32,5	3,4	3,3	47,6	39,1	12,05	26,82	1,17	1,95
19	-0,4	-0,7	4,9	5,7	3,50	4,07	-82,5	-96,3	4,1	4,3	41,3	21,7	6,62	16,83	1,79	0,73
20	-0,7	-0,8	5,3	6,1	4,32	4,81	-57,9	-76,4	3,9	4,5	26,1	23,0	22,78	29,17	1,08	1,32
21	-0,7	-0,2	5,4	5,6	4,52	5,04	-52,0	-32,9	4,0	5,2	28,7	9,1	21,80	49,94	1,27	0,64
22	-1,1	-0,6	6,4	5,5	5,38	4,56	-60,1	-55,8	4,2	4,3	39,6	19,9	2,91	9,98	0,21	0,42
23	-0,4	-0,3	6,6	6,2	5,45	4,69	-68,2	-89,0	5,8	5,6	51,0	23,9	9,42	15,16	0,30	0,48

1: pH_{KCl} - pH_{água}; 2: ponto de efeito salino nulo; 3: potencial de superfície da dupla camada; 4: 2 pH_{KCl} - pH_{água}; 5: atividade da fração argila, sem o desconto do C orgânico

TABELA 5 Atributos mineralógicos dos solos estudados.

Solo	¹ Ct		² Gb		³ Mi-Vm	⁴ Mi	⁵ HI	⁶ Qz		⁷ Cb	⁸ Zr	⁹ Pf
	A	B	A	B				Horizontes A e B				
g kg ⁻¹												
1	79,1	272,8	-	-	-	t	-	d	-	-	-	-
2	51,0	87,8	-	-	t	t	t	d	t	-	-	-
3	41,9	179,8	-	-	-	t	-	d	-	-	-	-
4	221,9	429,5	10,6	21,7	-	t	-	t	-	-	-	-
5	64,1	161,2	-	-	-	d	-	-	-	-	-	-
6	86,4	257,4	4,8	9,5	-	t	-	t	-	-	-	-
7	25,8	62,2	-	-	t	d	-	-	-	-	-	-
8	18,3	75,2	-	-	-	d	-	-	-	-	-	-
9	35,7	56,2	-	-	t	d	-	-	-	-	-	-
10	92,6	147,9	-	-	-	d	-	t	-	-	-	-
11	99,2	218,9	-	-	-	t	-	-	-	t	-	-
12	167,0	315,9	-	-	-	t	-	-	-	t	-	-
13	113,8	177,2	-	-	-	t	-	-	-	t	-	-
14	22,2	92,7	-	-	t	d	-	-	-	-	-	-
15	114,9	219,9	-	-	-	t	-	-	-	t	-	-
16	150,8	236,5	-	-	-	t	-	-	-	-	-	t
17	103,7	155,2	-	-	-	d	-	-	-	-	-	-
18	72,1	163,3	-	-	t	t	-	t	-	-	-	-
19	37,2	93,6	-	-	-	t	-	-	-	-	-	-
20	139,8	229,2	31,7	42,5	-	-	-	-	-	t	-	-
21	123,4	268,8	-	-	-	-	-	t	-	-	-	-
22	54,0	174,1	-	-	-	-	-	d	-	-	-	-
23	80,4	151,7	-	-	-	d	-	-	-	t	-	-

¹Caulinita; ²gibbsita; ³associação de mica e vermiculita; ⁴mica; ⁵haloisita; ⁶quartzo; ⁷cristobalita; ⁸zirconita; ⁹pirofillita; t: traços; d: detectado, porém, não quantificado.

TABELA 6 Correlações de Pearson entre PESN e atributos dos horizontes A e B dos solos estudados.

Atributo	Ponto de efeito salino nulo (PESN)	
	Horizonte A	Horizonte B
PCZ estimado	0,21*	0,50**
Δ pH	0,17 ^{ns}	0,26 ^{ns}
caulinita	0,10 ^{ns}	0,06 ^{ns}
atividade da fração argila	-0,07 ^{ns}	-0,17 ^{ns}
Ki	0,06 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
Kr	0,17 ^{ns}	0,33 ^{ns}
SiO ₂ – ataque sulfúrico	0,12 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Al ₂ O ₃ – ataque sulfúrico	0,19 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Fe ₂ O ₃ – ataque sulfúrico	0,06 ^{ns}	0,30 ^{ns}
Fe ₂ O ₃ – oxalato	-0,46°	-0,22 ^{ns}
Fe ₂ O ₃ – DCB	0,03 ^{ns}	0,08 ^{ns}
C orgânico	-0,12 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
n	22	19

ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente; n: número de solos utilizados na correlação, tendo sido excluídos o solo 5 (horizonte A) e os solos 5, 7, 8 e 14 (horizonte B), os quais não apresentaram PESN.

Há uma tendência geral, demonstrada na literatura, de que os valores de PESN decrescem com o aumento dos teores de matéria orgânica (Raij, 1973; Siqueira et al., 1990b; Alleoni & Camargo, 1994, Benites & Mendonça, 1998). Entretanto, no presente estudo e para ambos os horizontes, as correlações entre PESN e C orgânico total foram baixas e não significativas (Tabela 6). O mesmo foi observado por Silva et al. (1996), fato que os autores atribuíram à diversidade de materiais de origem e condições climáticas atuantes na formação dos solos por eles estudados, o que também ocorre no presente estudo.

O grau de contribuição da matéria orgânica em abaixar o PESN é menor nos solos menos intemperizados, com Ki maior que 1,2 (Siqueira et al., 1990b). Estão enquadrados neste grupo os solos aqui estudados, que possuem Ki superior a 1,3. Outra variável importante é o grau de humificação da matéria orgânica, conforme demonstrado por Benites & Mendonça (1998).

Embora significativas, as correlações entre PESN e PCZ estimado foram baixas em ambos os horizontes, principalmente no A (Tabela 6). Alguns autores definem o verdadeiro PCZ do solo, determinado por mobilidade eletroforética, como sendo o valor de pH no qual o balanço de todas as cargas, variáveis e permanentes, é zero, estando o PESN relacionado apenas a cargas variáveis (Parker et al., 1979; Sposito, 1981). Os dois apresentam o mesmo valor apenas em solos altamente intemperizados, compostos quase que exclusivamente por cargas variáveis (Uehara & Gilman, 1980).

Esta condição não é verificada para os solos do presente estudo, pelo fato de apresentares valores de K_i mais elevados (Tabelas 3 e 4), associados a minerais de argila do tipo 2:1 (Tabela 5). Também, pelo fato da equação 4 ser apenas uma estimativa do PCZ baseada em valores de pH em água e KCl, tendo sido proposta para solos mais intemperizados do que os utilizados no presente estudo.

Parece que a relação entre PESN e PCZ estimado, além do grau de intemperismo do solo, depende também do grau de humificação da matéria orgânica, conforme demonstrado por Benites & Mendonça (1998) para um Latossolo Ácrico. Os autores encontraram correlação de 0,99** entre PESN e PCZ estimado, em condição de matéria orgânica bem humificada, diminuindo para 0,59^{ns} em condição de matéria orgânica pouco humificada. Entretanto, uma vez que as amostras utilizadas no presente estudo provêm de experimentos de erosão (parcelas padrão de perdas de solo, mantidas sem vegetação), mesmo que alguns deles já estivessem desativados na ocasião da coleta das amostras, é pouco provável que tenha havido adição de resíduos orgânicos frescos, além do fato de as amostras já estarem armazenadas há algum tempo antes da realização deste estudo. Sendo assim, o grau de intemperismo explicaria melhor a baixa correlação entre PESN e PCZ estimado, para os solos estudados.

3.2 Estimativa da erodibilidade a partir de atributos dos solos

Semelhante ao observado em outros trabalhos (Denardin, 1990; Marques et al., 1997b; Silva et al., 1999), nenhuma das variáveis, isoladamente, foi capaz de prever a erodibilidade. Sendo assim, das 96 variáveis obtidas (Tabelas 4 e 3.5 e Tabelas 1A a 6A, Anexos), 15 apresentaram nível de significância adequado e foram incluídas em modelos para predição da erodibilidade (fator K). Estas podem ser observadas na Tabela 7, juntamente com os valores mínimo, médio e máximo de cada uma, no conjunto de solos estudados, em que o fator K determinado diretamente no campo varia entre 0,004 e 0,045 t h (MJ mm)⁻¹. Sendo assim, em estimativas futuras do fator K utilizando os modelos aqui propostos, valores obtidos fora desta faixa devem ser interpretados com cautela. A mesma observação é válida para solos que apresentem valores de X_1 a X_{15} fora do intervalo observado na Tabela 7.

Outro ponto importante é a padronização das determinações, ou seja, a prévia calibração da potência emitida pelo sonificador, conforme Sá et al. (2000a). Também a manutenção da relação expressa pela equação 1, no Capítulo 1, para o caso de aparelhos que emitam maior ou menor potência do que o utilizado no presente estudo e, finalmente, a manutenção da relação solo:água (1:40), pois esta influi na eficiência da desagregação, conforme Raine & So (1994).

O número de variáveis oriundas do horizonte A (12) é superior às do B (3). As variáveis X_1 a X_{10} são índices de estabilidade de agregados por ultra-som e todas são do horizonte A, da fração < 2 mm. O fato de apenas agregados desta fração apresentarem nível de significância adequado para fazer parte dos modelos se deve, provavelmente, à proximidade de tamanho com a fração 0,06 – 2,00 mm, que, conforme Tippkötter (1994), é a que melhor expressa o comportamento do solo perante a erosão hídrica. Também são do horizonte A as

variáveis X_{11} e X_{14} (respectivamente, Targ. e Ct). As variáveis X_{12} , X_{13} e X_{15} são oriundas do horizonte B (respectivamente, Targ, Fe_2O_3 -DCB e Ct).

A simples presença de variáveis do horizonte B nos modelos mostra a importância do horizonte subsuperficial no processo erosivo deste grupo de solos, semelhante ao observado por Marques et al. (1997b). Isso pode ser uma das causas da inadequação de modelos propostos no passado (Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Romkens et al., 1977, Denardin, 1990) para a estimativa do fator K deste grupamento de solos brasileiros, conforme demonstrado no trabalho de Marques et al., (1997a). Isso provavelmente deve-se ao fato destes modelos utilizarem exclusivamente variáveis baseadas em atributos do horizonte A.

O fato de a maioria das variáveis selecionadas ser obtidas em níveis de energia ultra-sônica mais baixos confirma as observações de outros autores. Segundo eles, altos níveis de energia, nos quais ocorre a desagregação total do solo, fornecem poucas informações sobre o comportamento do mesmo a nível de campo, no que diz respeito às relações entre estabilidade de agregados e resistência à erosão (North, 1979; Raine & So, 1993). Entretanto, fica difícil estabelecer as relações de causa e efeito entre cada uma delas e os valores de erodibilidade, o que é confirmado pelas baixas correlações entre as variáveis e o fator K (Tabela 8A, Anexos), sendo a mesma observação feita por outros autores (Wischmeier & Mannering, 1969; Römkens, 1987, Lal, 1988; Denardim, 1990, Silva, et al., 1999). Segundo eles, a erodibilidade depende tanto da capacidade de infiltração de água do solo quanto da sua capacidade de resistir à desagregação e ao transporte, estes últimos causados pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial.

As variáveis selecionadas têm participação, pelo menos indireta, no processo erosivo, pois, conforme sugerido por Fuller & Goh, (1992), a argila

dispersa pelo ultra-som é um parâmetro adequado para se avaliar a quebra de agregados. Além disso, segundo Gregorich et al. (1988), essa argila, quando dispersa em baixos níveis de energia, provém de material que liga microagregados entre si, formando macroagregados, os quais possuem diâmetro maior que 0,25 mm, conforme Tisdall & Oades (1982). Sendo assim, as frações silte + argila dos índices de desagregação (variáveis X_1 a X_9), quando obtidos em níveis de energia mais baixos, seriam oriundos da quebra de macroagregados, pois, quanto maior o tamanho dos agregados, mais fracas as forças que unem as partículas (Oades, 1993). Pode-se, então, inferir que durante uma chuva erosiva este material pode estar sendo salpicado e se alojando entre as unidades maiores, causando um selamento superficial, o que diminui a permeabilidade, aumentando a erosão (Le Bissonais et al., 1989; Roth & Eggert, 1994). A variável X_{10} representa a estabilidade de agregados como um todo, com base no comportamento da curva de desagregação.

Os índices de desagregação obtidos a 36,3 e 72,5 J mL⁻¹, os quais apresentaram melhor sensibilidade para detectar as diferenças na estabilidade de agregados promovidas pelo uso do solo, conforme observado no Capítulo 2, não apresentaram nível de significância adequado para inclusão nos modelos. Provavelmente, isso se deve ao fato de, no Capítulo 2, ter sido utilizado um único solo (Latossolo) e diferentes usos. Já no presente capítulo, são estudados apenas solos com horizonte B textural, para os quais ainda são necessários mais estudos nesse sentido. Outras variáveis (X_{11} a X_{15}), que são atributos como atividade da fração argila, Fe_2O_3 - DCB e Ct, em ambos os horizontes, estão associadas à estabilidade de agregados e tipo de estrutura, o que, de certa forma, influencia a permeabilidade (Ferreira et al., 1999).

TABELA 7 Descrição das variáveis incluídas nos modelos e respectivos valores mínimo, médio e máximo.

Var.	Descrição	Valor		
		Mínimo	Médio	Máximo
K	Erodibilidade - fator K da USLE [t h (MJ mm ⁻¹)]	0,004	0,020	0,045
X ₁	ID obtido a 3,0 J mL ⁻¹	0,039	0,113	0,226
X ₂	ID obtido a 9,1 J mL ⁻¹	0,049	0,137	0,265
X ₃	ID obtido a 18,1 J mL ⁻¹	0,084	0,170	0,347
X ₄	ID obtido a 145,1 J mL ⁻¹	0,083	0,214	0,496
X ₅	ID obtido a 145,1 J mL ⁻¹	0,149	0,380	0,907
X ₆	IDN obtido a 3,0 J mL ⁻¹	0,138	0,315	0,595
X ₇	IDN obtido a 9,1 J mL ⁻¹	0,169	0,386	0,724
X ₈	IDN obtido a 18,1 J mL ⁻¹	0,249	0,474	0,772
X ₉	IDN obtido a 108,8 J mL ⁻¹	0,864	0,953	0,997
X ₁₀	Índice b/a (curva entre 0 e 181,4 J mL ⁻¹)	0,034	0,120	0,394
X ₁₁	Atividade da fração argila no horizonte A	13,230	40,710	89,970
X ₁₂	Atividade da fração argila no horizonte B	6,440	25,990	62,280
X ₁₃	Fe ₂ O ₃ extraído pelo DCB no horizonte B (g kg ⁻¹)	5,610	25,920	69,130
X ₁₄	Caulinita no horizonte A (g kg ⁻¹)	18,310	87,050	221,930
X ₁₅	Caulinita no horizonte B (g kg ⁻¹)	56,200	185,250	429,530

ID: índice de desagregação; IDN: índice de desagregação normalizado. As variáveis de X₁ a X₁₀ são obtidas de agregados da fração < 2 mm do horizonte A.

Na Tabela 8 observam-se os modelos propostos para predição da erodibilidade, com suas respectivas variáveis e coeficientes. Foram escolhidos os modelos de utilização mais prática, os quais apresentaram altos valores de R², significativos a menos de 1% (Tabela 7A, Anexos), em geral, de mesma magnitude dos valores encontrados por outros autores (Wischmeier & Mannering, 1969; Wischmeier et al., 1971; El-Swaify & Dangler, 1977; Romkens et al., 1977, Young & Mutchler, 1977; Denardin, 1990; Marques et al., 1997b; Silva et al., 1999). A maioria das variáveis incluídas nos modelos apresentou nível de significância menor que 1%, exceto as variáveis X₃ e X₁₁ no

modelo 1, X_3 , X_4 e X_5 no modelo 2 e X_{12} no modelo 3, que apresentaram níveis de significância menores do que 5% (Tabela 7A, Anexos).

Os modelos 1 e 2 utilizam apenas variáveis oriundas do horizonte A. No modelo 1, com exceção da variável X_{11} (atividade da fração argila), todas são índices de estabilidade de agregados por ultra-som. No modelo 2, a retirada da variável X_{11} fez com que o R^2 diminuísse de 0,91** para 0,85**, sendo neste caso, a erodibilidade estimada apenas a partir da estabilidade de agregados por ultra-som. Já os modelos 3 e 4 possuem menos variáveis, porém, algumas não são determinadas rotineiramente, pois requerem análises mais sofisticadas, como as variáveis X_{14} e X_{15} , (Ct nos horizontes A e B), obtidas por análise térmica diferencial (ATD).

Os valores do fator K estimados pelos modelos estão próximos dos valores observados (ou determinados diretamente no campo), conforme pode ser constatado na Figura 1a, em que os valores estimados estão distribuídos junto da linha 1:1. A precisão dos modelos pode ser melhor observada na Figura 1 b, onde estão plotados os resíduos padronizados em função do K estimado. Em todos os casos, os resíduos padronizados ficaram entre 2 e -2, o que é considerado um bom resultado, conforme Neter e Wassermann, (1974), sendo que, para a maioria dos solos, os valores ficaram entre 1 e -1.

Semelhante ao observado por Marques et al. (1997b) e Silva et al. (1999), a complexidade dos modelos aqui apresentados é apenas aparente. Isso porque sua linearidade facilita em muito os cálculos, principalmente se forem utilizados recursos computacionais, como planilhas eletrônicas que não requerem conhecimentos profundos em informática e, atualmente, estão ao alcance de boa parte dos pesquisadores, professores, extensionistas.

TABELA 8 Variáveis e coeficientes dos modelos ajustados por *Stepwise* em *backward* para predição da erodibilidade (fator K).

Variável	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Constante	-0,4807	-0,4138	-0,1944	-0,1910
X ₁	3,8387	3,6302	-	-
X ₂	-4,3743	-4,2297	-	-
X ₃	0,7721	0,9215	-	-
X ₄	-0,2797	-0,2614	-0,2672	-0,2649
X ₅	0,2434	0,1696	0,2848	0,2741
X ₆	-1,3008	-1,2295	-	-
X ₇	1,6139	1,5583	-	-
X ₈	-0,2715	-0,3187	-	-
X ₉	0,4574	0,4202	0,1839	0,1974
X ₁₀	-0,2058	-0,1937	-	-
X ₁₁	0,0002	-	-	-
X ₁₂	-	-	0,0003	-
X ₁₃	-	-	-0,0008	-0,0007
X ₁₄	-	-	-0,0007	-0,0006
X ₁₅	-	-	0,0003	0,0003
R ²	0,91**	0,85**	0,87**	0,83**
R ² ajustado	0,81**	0,72**	0,80**	0,76**
EPE	0,0053	0,0065	0,0054	0,0059
n	21	21	21	21

X₁ a X₁₅: variáveis; R²: coeficiente de determinação; EPE: erro padrão da estimativa [t h MJ mm)⁻¹]; n: nº de solos utilizados para ajustar o modelo; **: significativo a 1 %.

Para teste dos modelos, foi estimada a erodibilidade para o solo 5, cujo valor determinado diretamente no campo é 0,032 t h (MJ mm)⁻¹ (Tabela 9). Para este solo, os valores estimados variaram entre 0,022 e 0,041 t h (MJ mm)⁻¹, estando a diferença entre o valor real e estimado, para todos os modelos, dentro da faixa de ± 2 EPE para cada modelo, o que é considerado um bom resultado, conforme Neter e Wassermann, (1974). Para o solo 23, os valores estimados variaram entre 0,028 e 0,047 t h (MJ mm)⁻¹, acima do valor estimado por Marques (1996). Porém, a erodibilidade deste solo, determinada de maneira direta, ainda não é conhecida.

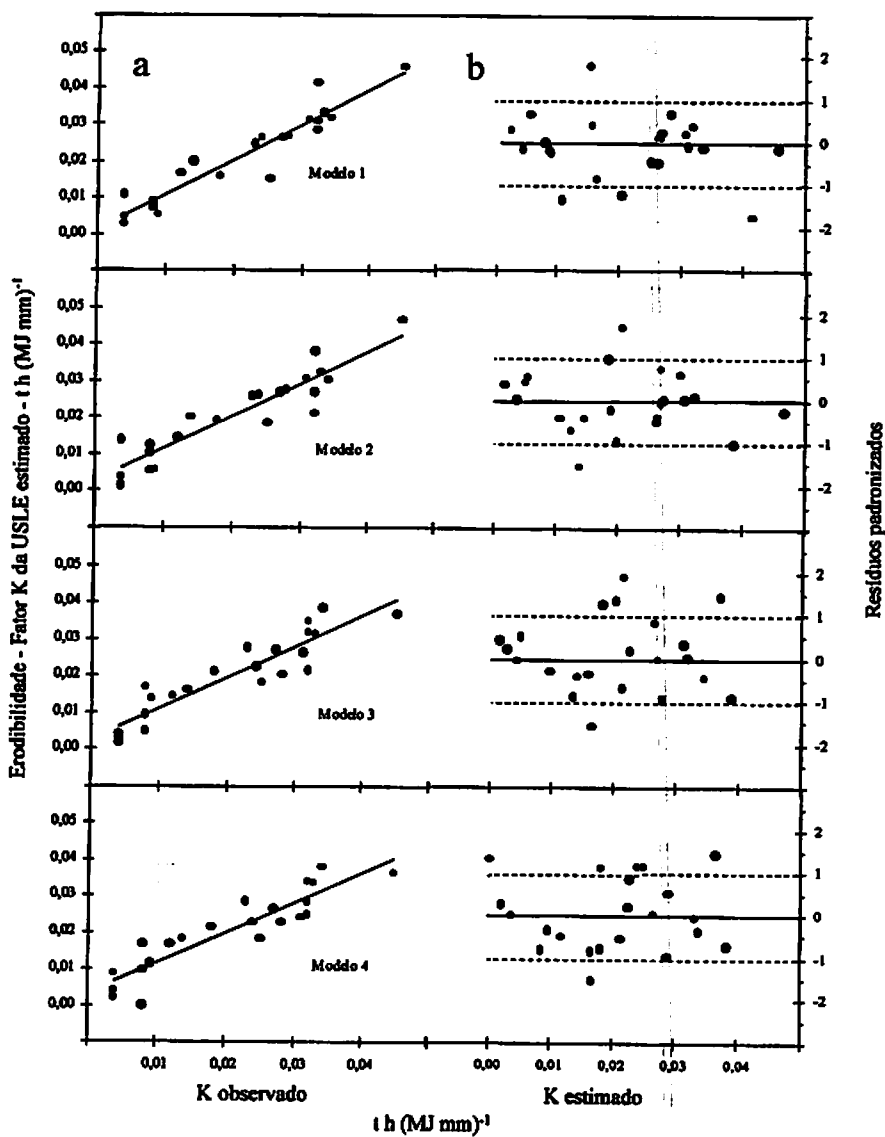


FIGURA 1 Relação entre os valores do fator K observados e estimados pelos modelos. O traço contínuo representa a linha 1:1 (a). Resíduos padronizados, onde o traço pontilhado representa o erro padrão da estimativa (b).

TABELA 9 Comparação entre a erodibilidade (fator K) prevista pelos modelos propostos e a erodibilidade já conhecida do solo 5 e estimativa da erodibilidade para o solo 23.

Solo	K conhecido	K estimado pelos modelos			
		1	2	3	4
		-----t h (MJ mm) ⁻¹ -----			
5	0,032	0,041	0,038	0,022	0,025
23	¹ 0,004	0,047	0,043	0,028	0,030

1: estimado indiretamente por Marques, (1996).

Embora ainda não seja comum a determinação da estabilidade de agregados por ultra-som, sonificadores não são equipamentos caros. Também a determinação dos índices de desagregação utilizados para predição do fator K não é trabalhosa, pois as sonificações variam de 30 a 300 segundos, considerando-se as especificações do aparelho utilizado no presente estudo. Do mesmo modo, o cálculo dos índices é também bastante prático, sendo, porém, necessária uma rigorosa padronização no tocante à energia aplicada. Seria interessante, para validação dos modelos aqui propostos, a realização de trabalhos futuros visando estimar o fator K para solos com horizonte B textural que possuam a erodibilidade determinada de maneira direta, seja com chuva natural ou simulada, mas que não tomaram parte no presente estudo. Também seria interessante a estimativa do fator K para solos com horizonte B textural de diversas regiões do Brasil com atributos contrastantes, ou seja, teores extremos de argila, areia, silte, óxidos de ferro, alumínio, C orgânico, por exemplo, o que fornecerá informações sobre a real adequação dos modelos aqui propostos.

4 CONCLUSÕES

Todos os solos apresentaram valores de PESN menores que pH em água, sendo, portanto, eletronegativos.

Os valores de PESN não se correlacionaram significativamente com os atributos químicos e mineralógicos dos solos.

A erodibilidade pode ser estimada com base na estabilidade de agregados por ultra-som, pelo modelo: $K = -0,4138 + 3,6302X_1 - 4,2297X_2 + 0,9215X_3 - 0,2614X_4 + 0,1696X_5 - 1,2295X_6 + 1,5583X_7 - 0,3187X_8 + 0,4202X_9 - 0,1937X_{10}$ ($R^2 = 0,85^{**}$).

Os quatro modelos propostos são adequados para a estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural semelhantes aos utilizados para seu ajuste.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Pontos de efeito salino nulo de latossolos ácidos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.18, n.2, p.175-180, 1994.

ANGULO, J. R. *Relações entre a erodibilidade e algumas propriedades de solos brasileiros*. 1983. 154p. Dissertação (Mestrado em Conservação do Solo). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BARRAL, M. T.; ARIAS, M. GNÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.46, p.261-272, 1998.

BENNETT, H. H. *Soil Conservation*. New York, McGraw-Hill, 1939, 993p.

BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria

orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, p. 215-221, 1998.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Piracicaba: Livroceres, 1990. 392p.

BOUYOUCOS, G. J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. *Journal of the American Society of Agronomy*, Madison, v.27, p. 738 – 741, 1935.

CAMPOS FILHO, O. R.; SILVA, I. F.; ANDRADE, A. P.; LEPRUN, J. C. Erosividade da chuva e erodibilidade do solo no agreste de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.27, n.9, p.1363-1370, set. 1992.

CARVALHO, M. P.; CATANEO, A.; LOMBARDI NETTO, F. Fator erosividade da chuva e enxurrada para chuvas individuais de Pindorama (SP). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10, Florianópolis, 1994. **Resumos...** Florianópolis: SBCS, 1994. p.150-151.

CARVALHO, M. P.; LOMBARDI NETO, F.; VASQUES FILHO, J.; CATANEO, A. Índices de erosividade da chuva correlacionados com perdas de solo de um Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): Primeira aproximação do fator erodibilidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.13, n.2, p.237-242, maio/ago. 1989.

CHAVES, L. H. G.; TRAJANO, M. D. M. Determinação do ponto de carga zero e das cargas elétricas do horizonte Ap de solos do estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.3, p.415-418, 1992.

CHOROM, M.; RENGASAMY, P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.46, p.657-665, Dec. 1995

DAL CONTE, F. M. **Índice de erodibilidade de um solo Podzólico Vermelho-Amarelo, determinado sob chuva simulada**. 1982. 67p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DAVIES, C. W. Ion Association. Butterworths, London, 1962. In: LINDSAY, L. W. *Chemical equilibria in soils*. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1979. 449p.

DENARDIN, J. E. *Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. 1990. 81p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

DUMAS, J. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cahiers Orton Série Pédologie*, Bondy, v.3, n.4, p.307-333, 1965.

EGASHIRA, K. KAETSU, Y. TAKUMA, K. Aggregate stability as an index of erodibility of ando soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v.29, n.4, p. 473-481, 1983.

EL SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hidrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 30., 1976, West Lafayette. *Proceedings*. Ankeny: Soil and Water conservation Society, 1977. p.105-110.

EL SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W. Rainfall erosion in the Tropics: A state-of-the-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. EMBRAPA *Manual de métodos de análises de solo* 2 ed., Rio de Janeiro, CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed., Brasília: SPI, 1999. 412p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, n.3, p.515-524, set./dez. 1999.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.58, n.3, p.627-646, jul./set. 2001.

FULLER, L.G.; GOH, T.G. Stability-energy relationships and their application to aggregation studies. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v.72, n.4, p.453-466, Nov. 1992.

GREGORICH, E.G.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Ultrasonic dispersion of aggregates: Distribution of organic matter in size fractions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontário, v.68, n.2 p.395-403, May. 1988.

KLUG, H. P.; ALEXANDER, L. E. **X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials**. New York: J. Wiley & Sons, 1974. 716p.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. (Ed.) **Soil erosion research methods**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1988. p.141-160.

LE BISSONNAIS, Y.; BRUAND, A.; JAMAGNE, M. Laboratory experimental study of soil crusting: relation between aggregate breakdown mechanisms and crus structure. **Catena**, Cremligen, v.16, p.377-392, 1989.

LIMA, J. M.; ANDERSON, S. J.; CURTI, N. Phosphate-induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n.3, p.892-897, May/June, 2000.

LIMA, J. M.; CURTI, N.; RESENDE, M.; SANTANA, D. P. Dispersão do material de solo em água para avaliação indireta da erodibilidade em latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.1, p.85-90, jan./abr. 1990.

LINDSAY, L. W. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1979. 449p.

MARQUES, J. J. G. S. M. **Estimativas e comparações dos fatores erosividade das chuvas e erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil**. 1996, 119p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; SÁ, M. A. C. Adequação de métodos indiretos para estimativa da erodibilidade de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.477-456, jul/set, 1997a.

MARQUES, J. J. G. S. M.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, D. F. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, n.3, p.457-465, jul/set, 1997b.

MIDDLETON, H. E. *Properties of soils wich influence soil erosion*. Washington: USDA, 1930. 16p. (Technical Bulletin, 178).

NETER, J.; WASSERMAN, W. *Applied linear statistical models: regression analysis of variance and experimental designs*. Homewood: Richard D. Irwin Inc., 1974. 842p.

NORTH, P. F. Towards an absolute measurement of soil structural stability using ultrasound. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.27, n.4, p.451-459, Dec. 1976.

NORTH, P.F. Assessment of the ultrasonic method of determining soil structural stability in relation to soil management properties. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.30, n.3, p.463-472, Sept. 1979.

OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, Amsterdam, v.56, p.337-400, 1993.

PAEZ, M.; ILDEFONSO, P. S. Evaluación de la eficiencia de índices de erodabilidad en suelos agrícolas en Venezuela. *Agronomía Tropical*, Maracay, v.42, n.1/2, p.27-40, 1992.

PARKER, J. C.; ZELASNY, L. W.; SAMPATH, S. HARRIS, W. G. et al. A critical evaluation of the extension of zero point of charge (ZPC) theory to soil systems. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.43, p.668-673, 1979.

PEREZ, D. V.; RAMOS, D. P.; NASCIMENTO, R. A. M. et al. Propriedades eletroquímicas de horizontes B texturais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.17, p.157-164, 1993.

RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. *Bragantia*, Campinas, v.32, n.18, dez. 1973.

RAINE, S.R.; SO, B. An energy based parameter for the assessment of aggregate bond energy. **Journal of Soil Science, Oxford**, v.44, n.2, p.249-259, June 1993.

RAINE, S.R.; SO, B. Ultrasonic dispersion of soil in water: The effect of suspension properties on energy dissipation and soil dispersion. **Australian Journal of Soil Research, London**, v.32, n.6, p.1157-1174, 1994.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; YODER, D. C.; McCOOL, D. K. RUSLE revisited: status, questions, answers and the future. **Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny**, v.49, n.3, p.213-220, May/June 1994.

RESCK, D. V. S.; FIGUEIREDO, M. S.; FERNANDES, B.; RESENDE, M.; SILVA, T. C. A. Erodibilidade de um Podzólico Vermelho – Amarelo câmbico distrófico fase terraço, localizado na zona da Mata (MG), determinada com simulador de chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas**, v.5, n.1, p.7-14, jan/abr. 1981.

RODRIGUES DO Ó, N. C. Erodibilidade das principais classes de solo do Estado da Paraíba determinada por chuva simulada e método nomográfico. 1986. 29p. Dissertação (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Areia.

ROMKENS, M. J. M.; ROTH, C. B.; NELSON, D. W. Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.41, n.5, p.954-960, Sept/Oct. 1977.

ROMKENS, 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.

ROTH, C. H.; EGGERT, T. Mechanisms of aggregate breakdown involved in surface sealing, runoff generation and sediment concentration on loess soils. **Soil & Tillage Research, Amsterdam**, v.32, p.253-268, 1994.

SÁ, M. A. C. Quantificação da energia para dispersão dos agregados de Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada. 1998. 92p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SÁ, M. A. C.; LAGE, G.; LIMA, J. M. **Calibração da potência emitida pelo sonificador para uso em análises de solo.** Lavras: UFLA, 2001. 17p. (Boletim agropecuário, 41).

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; LAGE, G. **Procedimento-padrão para medida da potência liberada pelo aparelho de ultra-som.** *Comunicação. Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.24, n.1, p.300-306, jan./mar., 2000a.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. **Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.9, p.1825-1834, set. 2000b.

SÁ, M. A. C.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. **Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.23, n.3, p.525-531, jul./set., 1999.

SCHWERTMANN, U.; FECHTER, H. **The point of zero charge of natural and synthetic ferrihydrites, and its relation to adsorbed silicate.** *Clay Minerals*, Oxford, v.17, p.471-476, 1982.

SILVA, I. F.; ANDRADE, A. P. **Relatório de pesquisa sobre conservação do solo: 1977 – 1984.** Areia: SUDENE/UFPB, 1994. (não paginado).

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.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, v.10, n.3, p.283-287, maio/ago. 1986.

SILVA, J. R. C. **Erodibilidade dos solos do Ceará: distribuição espacial e avaliação de métodos para sua determinação (1ª aproximação).** 1994. 60p. Tese (Professor Titular) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. **Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de latossolos brasileiros.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.12, p.2287-2298, dez. 1999.

SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; **Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.6, p.1207-1220, jun. 2000.

SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M. et al. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de latossolos brasileiros. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.31, n.9, p.663-671, set 1996.

SIQUEIRA, C.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. X. et al. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: III. Erros na avaliação das cargas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.19-24, 1990a

SIQUEIRA, C.; LEAL, J. R.; VELLOSO, A. C. X.; SANTOS, G. A. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: II. Quantificação do efeito da matéria orgânica sobre o ponto de carga zero. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.14, n.1, p.13-17, 1990b

SPOSITO, G. The operational definition of the zero point of charge in soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.45, p.292-297, 1981.

TIPPKÖTTER, R. The effect of ultrasound on the stability of mesoaggregates (60-200 μm). *Zeitschrift Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Weinheim, v.157, n.2, p.99-104, Apr. 1994.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.33, n.1, p.141-163, Mar. 1982.

UEHARA, G. Acric properties and their significance to soil classification. In: **PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP – Classification characterization and utilization of oxisols, Brazil . 1986, Part 1: papers...** Rio de Janeiro: 1988. p.19-22.

UEHARA, G.; GILMAN, G. P. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.250-252, 1980.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.33, n.1, p.131-137, Jan/Feb. 1969.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.19-89-193, Sept./Oct. 1971.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture Handbook, 537)

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: USDA, 1965. 47p. (Agriculture Handbook, 282.).

YOUNG, R. A.; MUTCHLER, C. K. Erodibility of some Minnesota soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.32, n.4, p.180-182, July/Aug. 1977.

ZELASNY, L. W.; HE, L.; VANWORMHOUDT, A. Charge analysis of soils and anion exchange. In: **Methods of soil analysis**. Madison: SSSA, 1996. v.5, part 3 – Chemical Methods, p.1231-1253.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da população e da demanda por alimentos vem intensificando a pressão sobre o solo, sendo o grande desafio para a humanidade do século XXI aliar produtividade e sustentabilidade. Para tanto, é necessário o uso racional da terra, com o desenvolvimento de sistemas de cultivo que mantenham sua capacidade produtiva e reduzam ao máximo a erosão.

No último século, consideráveis avanços têm sido realizados. A melhor compreensão do processo erosivo resultou no advento de modelos matemáticos para sua predição e sistemas de cultivo mínimo e plantio direto têm sido adotados com sucesso para sua redução. Análises de solo cada vez mais sofisticadas permitem o melhor conhecimento do solo que cultivamos e dos efeitos positivos ou negativos proporcionados pelo uso e/ou sistemas de manejo adotados.

A energia ultra-sônica vem sendo utilizada há muitos anos em ciência do solo para diversas finalidades, como dispersão do solo para avaliação da textura, pré-tratamento para análises mineralógicas e estudo da matéria orgânica. Ao longo deste trabalho, foi mostrado o potencial da energia ultra-sônica para determinação da estabilidade de agregados, cuja utilização é mais recente, principalmente no Brasil. Sua grande vantagem, além da praticidade, é o conhecimento da energia necessária para desagregação em diferentes níveis, até dispersão total. A estabilidade de agregados medida desta forma permite não só avaliar o efeito do uso do solo na estabilidade de agregados, mas também estimar a erodibilidade (fator K da USLE) para solos com horizonte B textural.

Entretanto, ainda há muito por descobrir sobre esta ferramenta. Pesquisas ainda são necessárias visando comparar esta metodologia com outras, no estudo de tipos de uso/manejo para diferentes solos, bem como estudar sua relação com a erodibilidade para outras classes de solo.

ANEXOS

LISTA DE TABELAS

Tabela		Pg
1A	Índices de dispersão dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.	80
2A	Índices de dispersão normalizados dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.....	81
3A	Índices de dispersão dos agregados da fração <2,00 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.....	82
4A	Índices de dispersão normalizados dos agregados da fração <2,00 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.....	83
5A	Coefficientes a, b e R^2 dos modelos ajustados e índices b/a para dados não normalizados das curvas de dispersão dos agregados das frações 7,93 a 4,76 e < 2 mm dos horizontes A e B dos solos estudados.....	84
6A	Coefficientes a, b e R^2 dos modelos ajustados e índices b/a, para dados normalizados das curvas de dispersão dos agregados das frações 7,93 a 4,76 e < 2 mm dos horizontes A e B dos solos estudados.....	85
7A	Níveis de significância das variáveis (X_1 a X_{15}), graus de liberdade da regressão (GLreg) e do resíduo (GLres), quadrado médio do resíduo (QMR), F e respectivos níveis de significância (P), para cada um dos modelos ajustados por "Stepwise" em "backward" para predição do fator K, no Capítulo 3.....	86
8A	Matriz de correlações entre variáveis X_1 a X_{15} e entre variáveis e fator K.....	87

LISTA DE FIGURAS

Figura	Pg
1A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 1, 2 e 3, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Qz: quartzo; Hl: haloisita; Vm: vermiculita; Cb: cristobalita..... 88
2A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 4, 5 e 6, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Gb: gibbsita; Qz: quartzo..... 89
3A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 7, 8 e 9, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita..... 90
4A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 10, 11 e 12, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita, Mi: mica; Qz: quartzo; Zr: zirconita..... 91
5A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 13, 14 e 15, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita; Zr: zirconita. 92
6A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 16, 17 e 18, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita; Qz: quartzo; Pf: pirofilita..... 93
7A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 19, 20 e 21, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Gb: gibbsita; Zr: zirconita; Qz: quartzo..... 94
8A	Difratogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B dos solos 22 e 23, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita, Mi: mica; Zr: zirconita; Qz: quartzo..... 95

TABELA 1A Índices de dispersão dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.

Solo	Níveis de energia específica aplicada (J mL ⁻¹)																	
	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	181,4	544,1	1088,2	1682,3	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	181,4	544,1	1088,2	1682,3
	-----Horizonte A-----									-----Horizonte B-----								
1	0,037	0,139	0,209	0,234	0,240	0,242	0,249	0,243	0,253	0,012	0,082	0,188	0,273	0,374	0,431	0,431	0,432	0,434
2	0,079	0,459	0,539	0,550	0,561	0,569	0,573	0,569	0,601	0,022	0,349	0,523	0,739	0,735	0,772	0,770	0,777	0,785
3	0,011	0,161	0,265	0,300	0,346	0,383	0,387	0,391	0,399	0,142	0,363	0,466	0,533	0,583	0,609	0,595	0,603	0,615
4	0,003	0,020	0,063	0,206	0,432	0,631	0,630	0,632	0,649	0,001	0,072	0,289	0,483	0,753	0,793	0,793	0,803	0,803
5	0,026	0,155	0,187	0,325	0,403	0,427	0,444	0,463	0,479	0,021	0,221	0,405	0,431	0,430	0,414	0,438	0,449	0,500
6	0,064	0,234	0,324	0,344	0,354	0,365	0,363	0,380	0,382	0,011	0,155	0,211	0,249	0,244	0,502	0,660	0,608	0,644
7	0,084	0,183	0,302	0,368	0,404	0,404	0,409	0,426	0,454	0,114	0,460	0,544	0,544	0,537	0,554	0,564	0,559	0,576
8	0,081	0,221	0,289	0,289	0,340	0,268	0,319	0,287	0,310	0,061	0,404	0,569	0,597	0,593	0,596	0,593	0,597	0,611
9	0,073	0,216	0,318	0,353	0,416	0,427	0,459	0,463	0,471	0,056	0,313	0,460	0,475	0,495	0,531	0,554	0,585	0,563
10	0,026	0,111	0,174	0,306	0,370	0,405	0,417	0,420	0,456	0,013	0,083	0,235	0,245	0,403	0,486	0,507	0,502	0,550
11	0,066	0,219	0,209	0,328	0,412	0,405	0,417	0,465	0,445	0,030	0,146	0,249	0,371	0,488	0,525	0,550	0,548	0,582
12	0,005	0,059	0,125	0,278	0,424	0,466	0,471	0,472	0,476	0,004	0,037	0,058	0,145	0,269	0,618	0,644	0,645	0,638
13	0,017	0,098	0,283	0,352	0,401	0,435	0,448	0,449	0,452	0,021	0,192	0,304	0,422	0,477	0,472	0,466	0,490	0,474
14	0,177	0,247	0,290	0,281	0,291	0,306	0,295	0,334	0,328	0,099	0,439	0,585	0,626	0,601	0,634	0,650	0,644	0,660
15	0,013	0,033	0,101	0,156	0,195	0,394	0,399	0,398	0,408	0,014	0,013	0,023	0,059	0,094	0,613	0,627	0,622	0,635
16	0,001	0,014	0,037	0,069	0,155	0,723	0,727	0,739	0,746	0,004	0,031	0,055	0,175	0,212	0,841	0,840	0,844	0,857
17	0,009	0,046	0,075	0,225	0,304	0,918	0,927	0,930	0,933	0,001	0,029	0,063	0,111	0,335	0,963	0,964	0,965	0,967
18	0,012	0,033	0,046	0,054	0,075	0,361	0,370	0,362	0,383	0,002	0,013	0,020	0,029	0,048	0,706	0,753	0,764	0,774
19	0,013	0,057	0,053	0,055	0,124	0,337	0,435	0,369	0,345	0,044	0,077	0,127	0,156	0,261	0,483	0,511	0,525	0,498
20	0,020	0,030	0,038	0,078	0,264	0,546	0,607	0,613	0,606	0,017	0,022	0,021	0,046	0,076	0,443	0,767	0,783	0,794
21	0,007	0,051	0,138	0,304	0,408	0,475	0,484	0,480	0,489	0,024	0,170	0,383	0,481	0,574	0,658	0,649	0,659	0,688
22	0,060	0,198	0,276	0,304	0,285	0,285	0,366	0,342	0,303	0,020	0,130	0,307	0,367	0,420	0,474	0,463	0,485	0,453
23	0,033	0,044	0,078	0,164	0,268	0,462	0,507	0,571	0,548	0,019	0,199	0,402	0,501	0,534	0,636	0,662	0,688	0,671

TABELA 2A Índices de dispersão normalizados dos agregados da fração 7,93 a 4,76 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.

Solo	Níveis de energia específica aplicada (J mL ⁻¹)																		
	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	181,4	544,1	1088,2	1682,3	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	181,4	544,1	1088,2	1682,3	
	-----Horizonte A-----									-----Horizonte B-----									
1	0,145	0,547	0,820	0,919	0,944	0,949	0,976	0,953	0,991	0,028	0,187	0,429	0,624	0,854	0,984	0,983	0,987	0,991	0,991
2	0,134	0,764	0,890	0,911	0,927	0,940	0,948	0,941	0,989	0,028	0,443	0,664	0,938	0,933	0,980	0,978	0,986	0,996	0,996
3	0,028	0,399	0,659	0,746	0,860	0,953	0,961	0,972	0,990	0,228	0,585	0,752	0,860	0,940	0,983	0,960	0,973	0,991	0,991
4	0,005	0,031	0,098	0,317	0,666	0,971	0,969	0,972	0,998	0,001	0,089	0,359	0,599	0,935	0,984	0,984	0,997	0,997	0,997
5	0,056	0,321	0,401	0,672	0,838	0,880	0,912	0,948	0,983	0,045	0,447	0,813	0,866	0,864	0,837	0,882	0,902	1,000	1,000
6	0,165	0,607	0,839	0,890	0,916	0,944	0,940	0,982	0,990	0,017	0,231	0,311	0,369	0,368	0,748	0,982	0,910	0,959	0,959
7	0,185	0,402	0,666	0,812	0,892	0,890	0,903	0,940	1,000	0,197	0,794	0,938	0,938	0,926	0,955	0,972	0,964	0,992	0,992
8	0,239	0,650	0,852	0,852	1,000	0,790	0,940	0,846	0,914	0,099	0,657	0,925	0,970	0,963	0,969	0,963	0,971	0,992	0,992
9	0,147	0,437	0,642	0,715	0,845	0,868	0,928	0,940	0,953	0,094	0,530	0,778	0,804	0,839	0,899	0,937	0,991	0,953	0,953
10	0,057	0,244	0,381	0,672	0,812	0,888	0,914	0,921	1,000	0,024	0,151	0,427	0,446	0,733	0,884	0,923	0,913	1,000	1,000
11	0,142	0,471	0,453	0,704	0,885	0,873	0,897	1,000	0,959	0,050	0,249	0,423	0,632	0,838	0,898	0,940	0,938	0,994	0,994
12	0,011	0,123	0,257	0,566	0,868	0,957	0,968	0,968	0,975	0,006	0,056	0,089	0,221	0,411	0,947	0,987	0,988	0,978	0,978
13	0,037	0,213	0,615	0,764	0,872	0,946	0,974	0,975	0,982	0,042	0,379	0,600	0,835	0,944	0,934	0,922	0,970	0,940	0,940
14	0,514	0,723	0,851	0,822	0,854	0,896	0,865	0,977	0,959	0,147	0,652	0,866	0,926	0,890	0,938	0,962	0,954	0,977	0,977
15	0,031	0,080	0,245	0,382	0,477	0,963	0,975	0,974	0,997	0,022	0,021	0,037	0,093	0,148	0,963	0,985	0,977	0,998	0,998
16	0,001	0,019	0,050	0,091	0,207	0,969	0,975	0,991	0,999	0,005	0,037	0,064	0,204	0,247	0,982	0,980	0,985	1,000	1,000
17	0,009	0,049	0,081	0,241	0,325	0,981	0,991	0,994	0,998	0,001	0,030	0,065	0,114	0,346	0,993	0,995	0,996	0,997	0,997
18	0,029	0,080	0,114	0,133	0,184	0,893	0,916	0,898	0,950	0,003	0,016	0,026	0,036	0,061	0,902	0,963	0,976	0,990	0,990
19	0,034	0,124	0,123	0,129	0,286	0,757	0,992	0,847	0,784	0,084	0,148	0,242	0,296	0,496	0,919	0,973	1,000	0,949	0,949
20	0,032	0,048	0,062	0,123	0,428	0,876	0,974	0,983	0,973	0,020	0,027	0,024	0,056	0,094	0,552	0,945	0,966	0,976	0,976
21	0,014	0,104	0,282	0,621	0,831	0,967	0,986	0,978	0,996	0,035	0,250	0,562	0,704	0,838	0,958	0,945	0,959	1,000	1,000
22	0,164	0,541	0,754	0,831	0,779	0,780	1,000	0,935	0,828	0,040	0,260	0,612	0,732	0,838	0,945	0,923	0,966	0,904	0,904
23	0,058	0,079	0,135	0,282	0,470	0,803	0,877	0,983	0,942	0,028	0,288	0,580	0,725	0,773	0,920	0,958	0,995	0,972	0,972

TABELA 3A Índices de dispersão dos agregados da fração <2,00 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.

Solo	Níveis de energia específica aplicada (J mL ⁻¹)																	
	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	72,5	108,8	145,1	181,4	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	72,5	108,8	145,1	181,4
	-----Horizonte A-----									-----Horizonte B-----								
1	0,073	0,097	0,120	0,136	0,155	0,188	0,192	0,188	0,191	0,129	0,150	0,176	0,243	0,295	0,425	0,428	0,430	0,425
2	0,204	0,226	0,265	0,301	0,351	0,512	0,522	0,520	0,523	0,120	0,145	0,204	0,267	0,434	0,722	0,739	0,730	0,743
3	0,032	0,051	0,078	0,126	0,184	0,304	0,311	0,310	0,311	0,071	0,088	0,158	0,181	0,341	0,551	0,554	0,559	0,559
4	0,063	0,081	0,117	0,146	0,187	0,466	0,513	0,521	0,517	0,065	0,097	0,147	0,159	0,323	0,751	0,764	0,768	0,767
5	0,075	0,103	0,147	0,197	0,209	0,324	0,330	0,324	0,328	0,127	0,193	0,195	0,257	0,297	0,412	0,416	0,427	0,419
6	0,132	0,157	0,183	0,202	0,260	0,318	0,319	0,319	0,321	0,112	0,161	0,170	0,199	0,249	0,560	0,595	0,591	0,604
7	0,100	0,127	0,162	0,175	0,227	0,327	0,352	0,358	0,363	0,099	0,141	0,199	0,253	0,369	0,470	0,489	0,495	0,490
8	0,122	0,145	0,167	0,177	0,206	0,238	0,242	0,243	0,246	0,065	0,101	0,139	0,187	0,301	0,510	0,525	0,527	0,523
9	0,075	0,107	0,129	0,175	0,186	0,265	0,271	0,271	0,287	0,081	0,147	0,176	0,247	0,355	0,457	0,472	0,478	0,469
10	0,124	0,139	0,171	0,211	0,279	0,361	0,391	0,390	0,395	0,083	0,099	0,128	0,175	0,180	0,460	0,467	0,484	0,481
11	0,103	0,131	0,161	0,204	0,256	0,352	0,363	0,362	0,368	0,087	0,146	0,192	0,199	0,275	0,531	0,549	0,545	0,548
12	0,092	0,102	0,141	0,155	0,217	0,402	0,406	0,417	0,421	0,087	0,095	0,122	0,148	0,189	0,548	0,610	0,603	0,614
13	0,058	0,062	0,083	0,109	0,154	0,334	0,331	0,336	0,330	0,063	0,072	0,101	0,135	0,207	0,425	0,439	0,447	0,447
14	0,118	0,157	0,191	0,203	0,227	0,253	0,257	0,259	0,261	0,129	0,175	0,244	0,316	0,351	0,597	0,596	0,605	0,611
15	0,073	0,084	0,103	0,131	0,182	0,283	0,331	0,337	0,339	0,065	0,099	0,133	0,125	0,139	0,559	0,555	0,606	0,602
16	0,147	0,164	0,195	0,243	0,322	0,663	0,605	0,695	0,700	0,138	0,150	0,187	0,239	0,310	0,787	0,726	0,835	0,843
17	0,165	0,209	0,241	0,347	0,496	0,718	0,803	0,907	0,911	0,144	0,181	0,225	0,276	0,318	0,559	0,906	0,952	0,958
18	0,067	0,078	0,083	0,099	0,138	0,322	0,317	0,327	0,321	0,052	0,063	0,089	0,125	0,170	0,675	0,683	0,718	0,734
19	0,032	0,039	0,049	0,084	0,083	0,140	0,149	0,149	0,150	0,079	0,095	0,102	0,161	0,195	0,404	0,409	0,416	0,421
20	0,051	0,065	0,079	0,121	0,135	0,405	0,429	0,447	0,463	0,061	0,087	0,114	0,128	0,197	0,645	0,605	0,627	0,650
21	0,051	0,091	0,084	0,105	0,132	0,319	0,382	0,410	0,422	0,079	0,103	0,118	0,175	0,215	0,566	0,553	0,618	0,634
22	0,041	0,061	0,085	0,110	0,128	0,174	0,176	0,210	0,177	0,101	0,130	0,209	0,266	0,299	0,439	0,445	0,445	0,444
23	0,106	0,134	0,148	0,192	0,226	0,416	0,402	0,402	0,418	0,068	0,090	0,108	0,148	0,188	0,506	0,550	0,520	0,556

TABELA 4A Índices de dispersão normalizados dos agregados da fração <2,00 mm dos horizontes A e B e níveis de energia ultra-sônica utilizados.

Solo	Níveis de energia específica aplicada (J mL ⁻¹)																	
	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	72,5	108,8	145,1	181,4	0,0	3,0	9,1	18,1	36,3	72,5	108,8	145,1	181,4
	-----Horizonte A-----									-----Horizonte B-----								
1	0,381	0,505	0,623	0,706	0,803	0,976	0,997	0,976	0,990	0,299	0,348	0,409	0,564	0,686	0,988	0,994	0,998	0,988
2	0,390	0,432	0,505	0,576	0,671	0,979	0,997	0,994	1,000	0,161	0,194	0,274	0,359	0,582	0,969	0,991	0,979	0,996
3	0,102	0,162	0,249	0,402	0,587	0,970	0,994	0,989	0,994	0,126	0,156	0,281	0,322	0,606	0,979	0,985	0,994	0,994
4	0,119	0,153	0,220	0,276	0,354	0,879	0,968	0,984	0,975	0,085	0,125	0,190	0,206	0,418	0,974	0,991	0,996	0,995
5	0,228	0,311	0,445	0,598	0,634	0,982	1,000	0,982	0,994	0,298	0,450	0,457	0,603	0,695	0,964	0,973	1,000	0,981
6	0,409	0,488	0,566	0,626	0,806	0,986	0,988	0,988	0,994	0,185	0,266	0,281	0,329	0,412	0,925	0,982	0,977	0,998
7	0,276	0,351	0,446	0,483	0,627	0,903	0,970	0,987	1,000	0,200	0,285	0,401	0,511	0,743	0,947	0,987	0,997	0,988
8	0,496	0,588	0,677	0,721	0,837	0,967	0,984	0,989	1,000	0,122	0,190	0,262	0,352	0,565	0,959	0,987	0,991	0,982
9	0,261	0,372	0,448	0,611	0,649	0,926	0,947	0,946	1,000	0,167	0,301	0,364	0,513	0,734	0,947	0,976	0,989	0,970
10	0,311	0,348	0,428	0,530	0,699	0,905	0,982	0,978	0,990	0,170	0,201	0,262	0,358	0,368	0,939	0,953	0,988	0,982
11	0,279	0,353	0,435	0,550	0,690	0,950	0,980	0,977	0,993	0,157	0,262	0,345	0,359	0,496	0,957	0,989	0,981	0,987
12	0,217	0,241	0,333	0,366	0,511	0,948	0,957	0,983	0,994	0,140	0,153	0,198	0,240	0,307	0,887	0,987	0,976	0,994
13	0,170	0,182	0,243	0,321	0,452	0,981	0,971	0,986	0,969	0,141	0,160	0,225	0,301	0,459	0,945	0,976	0,993	0,994
14	0,448	0,595	0,724	0,772	0,863	0,960	0,977	0,985	0,990	0,212	0,287	0,399	0,517	0,575	0,977	0,975	0,989	1,000
15	0,213	0,244	0,299	0,380	0,529	0,823	0,963	0,979	0,986	0,106	0,164	0,219	0,205	0,230	0,920	0,915	0,998	0,991
16	0,209	0,234	0,279	0,347	0,459	0,946	0,864	0,991	0,999	0,164	0,178	0,222	0,283	0,368	0,934	0,861	0,990	1,000
17	0,181	0,228	0,263	0,380	0,543	0,785	0,878	0,991	0,996	0,150	0,189	0,234	0,288	0,332	0,583	0,945	0,993	0,999
18	0,199	0,233	0,250	0,297	0,414	0,967	0,952	0,980	0,964	0,070	0,085	0,120	0,170	0,230	0,913	0,925	0,972	0,994
19	0,207	0,255	0,320	0,546	0,538	0,909	0,970	0,966	0,974	0,188	0,224	0,241	0,382	0,462	0,956	0,968	0,984	0,997
20	0,109	0,138	0,169	0,256	0,286	0,861	0,913	0,950	0,983	0,093	0,133	0,173	0,194	0,299	0,979	0,917	0,950	0,986
21	0,121	0,215	0,199	0,249	0,312	0,754	0,903	0,968	0,997	0,124	0,163	0,186	0,276	0,339	0,893	0,872	0,975	1,000
22	0,201	0,294	0,422	0,549	0,629	0,857	0,868	0,993	0,874	0,227	0,291	0,467	0,595	0,668	0,982	0,996	0,996	0,993
23	0,260	0,297	0,348	0,483	0,519	0,845	0,968	0,983	0,998	0,127	0,155	0,195	0,262	0,332	0,959	0,907	0,968	0,999

TABELA 5A Coeficientes a, b e R² dos modelos¹ ajustados e índices b/a para dados não normalizados das curvas de dispersão dos agregados das frações 7,93 a 4,76 e < 2 mm dos horizontes A e B dos solos estudados.

Solo																
Horizonte A				Horizonte B				Horizonte A				Horizonte B				
a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²	
1	14,843	3,996	0,269	0,99**	16,986	2,294	0,135	0,99**	23,588	5,115	0,217	0,99**	21,348	2,204	0,103	0,99**
2	9,582	1,689	0,176	0,99**	4,328	1,276	0,295	0,99**	15,780	1,820	0,115	0,99**	24,434	1,197	0,049	0,97**
3	15,458	2,515	0,163	0,99**	6,014	1,634	0,272	0,99**	58,803	2,832	0,048	0,97**	34,747	1,562	0,045	0,96**
4	63,568	1,504	0,024	0,99**	13,672	1,236	0,090	0,99**	57,738	1,585	0,027	0,88**	44,375	1,018	0,023	0,85**
5	27,787	2,100	0,076	0,99**	32,617	2,061	0,063	0,99**	28,578	2,879	0,101	0,99**	18,511	2,260	0,122	0,99**
6	13,747	2,620	0,191	0,99**	39,998	1,547	0,039	0,99**	17,322	3,017	0,174	0,99**	37,143	1,450	0,039	0,93**
7	27,133	2,240	0,083	0,99**	5,761	1,751	0,304	0,99**	31,744	2,600	0,082	0,99**	20,190	1,907	0,094	0,99**
8	12,604	3,283	0,260	0,99**	5,013	1,648	0,329	0,99**	16,545	3,992	0,241	0,99**	35,645	1,677	0,047	0,97**
9	15,260	2,127	0,139	0,99**	6,762	1,754	0,259	0,99**	32,301	3,393	0,105	0,99**	20,913	1,984	0,095	0,99**
10	34,718	2,235	0,064	0,99**	35,408	1,851	0,052	0,99**	24,702	2,402	0,097	0,99**	49,915	1,785	0,036	0,91**
11	20,668	2,214	0,110	0,99**	21,938	1,739	0,079	0,99**	25,071	2,583	0,103	0,99**	31,596	1,634	0,052	0,96**
12	24,638	2,087	0,085	0,99**	64,650	1,509	0,023	0,99**	41,870	2,139	0,051	0,96**	58,543	1,289	0,022	0,81**
13	12,691	2,210	0,174	0,99**	5,059	2,088	0,413	0,99**	67,055	2,584	0,039	0,94**	56,015	1,890	0,034	0,93**
14	26,350	3,035	0,115	0,99**	5,139	1,523	0,296	0,99**	12,279	3,779	0,308	0,99**	19,984	1,525	0,076	0,98**
15	58,116	2,427	0,042	0,99**	198,69	1,424	0,007	0,97**	54,082	2,657	0,049	0,97**	72,134	1,257	0,017	0,64**
16	144,53	1,229	0,009	0,98**	76,933	1,111	0,014	0,99**	30,356	1,282	0,042	0,95**	34,900	1,007	0,029	0,89**
17	52,150	1,031	0,020	0,99**	73,910	0,975	0,013	0,99**	22,259	0,997	0,045	0,97**	35,872	0,880	0,025	0,84**
18	163,13	2,529	0,016	0,99**	328,34	1,034	0,003	0,86**	71,635	2,655	0,037	0,92**	78,562	0,901	0,011	0,57**
19	75,194	2,744	0,036	0,99**	35,358	1,947	0,055	0,99**	90,829	6,146	0,068	0,98**	49,428	2,087	0,042	0,95**
20	101,88	1,562	0,015	0,99**	249,63	1,072	0,004	0,94**	82,625	1,717	0,021	0,80**	62,744	1,181	0,019	0,76**
21	25,664	2,038	0,079	0,99**	14,423	1,466	0,102	0,99**	84,447	1,957	0,023	0,83**	52,548	1,309	0,025	0,86**
22	-25,85	3,178	-0,123	0,99**	-0,142	2,161	-15,24	0,99**	48,121	5,084	0,106	0,98**	20,146	2,122	0,105	0,99**
23	65,214	1,763	0,027	0,99**	9,594	1,474	0,154	0,99**	36,973	2,220	0,060	0,87**	62,073	1,531	0,025	0,85**

Modelo $Y = X/(a + bX)$, onde Y é o índice de dispersão e X o nível de energia aplicado; b/a = índice de estabilidade de agregados por ultra-som; coeficiente da divisão do coeficiente b pelo coeficiente a do modelo; * ** : significativo a 5 e 1%, respectivamente.

TABELA 6A Coeficientes a, b e R² dos modelos¹ ajustados e índices b/a para dados normalizados das curvas de dispersão dos agregados das frações 7,93 a 4,76 e < 2 mm dos horizontes A e B dos solos estudados.

Solo	-----7,93 a 4,76 mm-----								-----< 2,00 mm-----							
	Horizonte A				Horizonte B				Horizonte A				Horizonte B			
	a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²	a	b	b/a	R ²
1	3,735	1,019	0,273	0,99**	7,429	1,005	0,135	0,99**	4,544	0,986	0,217	0,99**	9,196	0,949	0,103	0,99**
2	5,280	1,025	0,194	0,99**	3,410	1,006	0,295	0,99**	8,250	0,952	0,115	0,99**	18,215	0,892	0,049	0,97**
3	6,159	1,013	0,164	0,99**	3,721	1,013	0,272	0,99**	18,445	0,887	0,048	0,97**	19,557	0,879	0,045	0,96**
4	41,251	0,978	0,024	0,99**	11,020	0,995	0,090	0,99**	30,590	0,840	0,027	0,88**	34,239	0,785	0,023	0,85**
5	13,133	1,024	0,078	0,99**	15,470	1,029	0,066	0,99**	9,442	0,950	0,101	0,99**	7,903	0,966	0,122	0,99**
6	5,324	1,012	0,190	0,99**	26,673	1,038	0,039	0,99**	5,591	0,974	0,174	0,99**	22,462	0,877	0,039	0,93**
7	12,257	1,016	0,083	0,99**	3,316	1,015	0,306	0,99**	11,515	0,943	0,082	0,99**	10,017	0,946	0,094	0,99**
8	4,280	1,115	0,260	0,99**	3,072	1,014	0,330	0,99**	4,071	0,982	0,241	0,99**	18,957	0,892	0,047	0,97**
9	7,408	1,050	0,142	0,99**	4,003	1,037	0,259	0,99**	9,261	0,972	0,105	0,99**	10,109	0,958	0,095	0,99**
10	15,826	1,019	0,064	0,99**	19,471	1,018	0,052	0,99**	9,839	0,958	0,097	0,99**	24,393	0,875	0,036	0,91**
11	9,345	1,029	0,110	0,99**	12,724	1,018	0,080	0,99**	9,297	0,957	0,103	0,99**	17,576	0,907	0,052	0,96**
12	11,740	1,019	0,087	0,99**	42,341	0,985	0,023	0,99**	17,756	0,907	0,051	0,96**	36,133	0,797	0,022	0,81**
13	5,852	1,017	0,174	0,99**	2,681	1,054	0,393	0,99**	22,826	0,880	0,039	0,94**	25,226	0,850	0,034	0,93**
14	8,751	1,039	0,119	0,99**	3,426	1,029	0,300	0,99**	3,231	0,995	0,308	0,99**	12,222	0,932	0,076	0,98**
15	23,801	0,992	0,042	0,99**	126,35	0,907	0,007	0,97**	18,596	0,914	0,049	0,97**	43,782	0,764	0,017	0,64**
16	108,32	0,916	0,008	0,98**	65,975	0,952	0,014	0,99**	21,275	0,898	0,042	0,95**	29,435	0,849	0,029	0,89**
17	48,779	0,964	0,020	0,99**	71,632	0,945	0,013	0,99**	20,348	0,912	0,045	0,97**	34,388	0,844	0,025	0,84**
18	66,349	1,020	0,015	0,99**	257,45	0,808	0,003	0,86**	23,905	0,885	0,037	0,92**	58,018	0,666	0,011	0,57*
19	32,307	1,204	0,037	0,99**	18,670	1,022	0,055	0,99**	13,977	0,946	0,068	0,98**	20,875	0,882	0,042	0,95**
20	63,653	0,973	0,015	0,99**	204,60	0,870	0,004	0,94**	38,868	0,808	0,021	0,80**	41,289	0,780	0,019	0,76**
21	12,560	1,000	0,080	0,99**	9,648	1,009	0,105	0,99**	35,690	0,829	0,023	0,83**	33,307	0,830	0,025	0,86**
22	-9,460	1,163	-0,123	0,99**	0,007	1,084	151,86	0,99**	9,571	1,045	0,109	0,99**	9,010	0,949	0,105	0,99**
23	36,599	1,026	0,028	0,99**	6,646	1,018	0,153	0,99**	15,455	0,926	0,060	0,87**	33,323	0,821	0,025	0,85**

¹ Modelo $Y = X/(a + bX)$, onde Y é o índice de dispersão e X o nível de energia aplicado; b/a = índice de estabilidade de agregados por ultra-som: cociente da divisão do coeficiente b pelo coeficiente a do modelo; * e **: significativo a 5 e 1%, respectivamente.

TABELA 7A Níveis de significância das variáveis (X_1 a X_{15}), graus de liberdade da regressão (GLreg) e do resíduo (GLres), quadrado médio do resíduo (QMR), F e respectivos níveis de significância (P), para cada um dos modelos ajustados por “*Stepwise*” em “*backward*” para predição do fator K, no Capítulo 3.

Variável	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
X_1	0,0003	0,0011	-	-
X_2	<0,0001	0,0001	-	-
X_3	0,0416	0,0394	-	-
X_4	0,0134	0,0400	<0,0001	<0,0001
X_5	0,0029	0,0233	<0,0001	<0,0001
X_6	0,0004	0,0015	-	-
X_7	<0,0001	0,0002	-	-
X_8	0,0115	0,0107	-	-
X_9	<0,0001	0,0002	0,0005	0,0004
X_{10}	0,0044	0,0151	-	-
X_{11}	0,0386	-	-	-
X_{12}	-	-	0,0528	-
X_{13}	-	-	0,0001	0,0003
X_{14}	-	-	<0,0001	<0,0001
X_{15}	-	-	<0,0001	<0,0001
GLreg	11	10	7	6
GLres	9	10	13	14
QMR	2,85E-05	4,24E-05	2,93E-05	3,51E-05
F	8,7	6,05	12,72	11,83
P	0,0015	0,0044	<0,0001	<0,0001

Níveis de significância menores que 0,01 ou 1% recebem ** no texto; níveis de significância abaixo de 0,05 ou 5% recebem * no texto.

TABELA 8A. Matriz de correlações entre variáveis X_1 a X_{15} e entre variáveis e fator K

	K	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
K	1,00															
X_1	-0,06 ^{ns}	1,00														
X_2	-0,08 ^{ns}	0,99**	1,00													
X_3	-0,04 ^{ns}	0,94**	0,95**	1,00												
X_4	0,03 ^{ns}	0,88**	0,90**	0,97**	1,00											
X_5	0,14 ^{ns}	0,57**	0,56**	0,71**	0,79**	1,00										
X_6	-0,16 ^{ns}	0,51**	0,50**	0,31 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,37*	1,00									
X_7	-0,18 ^{ns}	0,45*	0,46*	0,28 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,42*	0,98**	1,00								
X_8	-0,24 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,37*	0,24 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,49**	0,92**	0,95**	1,00							
X_9	0,20 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,50**	0,44*	0,46*	0,45*	1,00						
X_{10}	-0,19 ^{ns}	0,38*	0,38*	0,22 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,40*	0,94**	0,95**	0,90**	0,36*	1,00					
X_{11}	-0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,39*	0,34 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,36*	0,30 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,00				
X_{12}	-0,18 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,72**	1,00			
X_{13}	0,04 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,38*	0,45*	0,80**	-0,47*	-0,53**	-0,56**	-0,52**	-0,45*	-0,54**	-0,35 ^{ns}	1,00		
X_{14}	0,07 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,51**	-0,60**	-0,60**	-0,70**	-0,30 ^{ns}	-0,58**	-0,77**	-0,56**	0,58**	1,00	
X_{15}	0,22 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,23 ^{ns}	-0,42*	-0,41*	-0,50**	-0,12 ^{ns}	-0,40*	-0,79**	-0,74**	0,44*	0,88**	1,00

ns, * e **: não significativo, significativo a 5 e 1%, respectivamente.

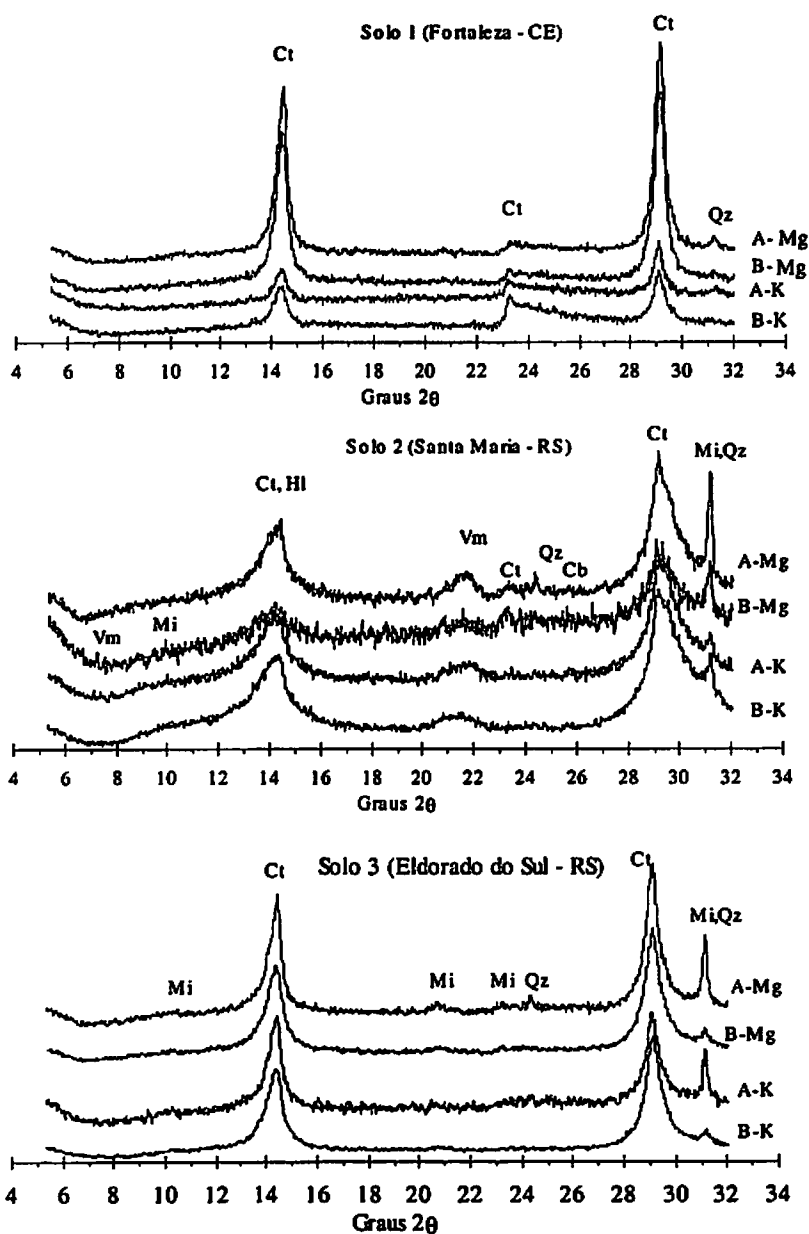


FIGURA 1A. Difratoigramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 1, 2 e 3, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Qz: quartzo; HI: haloisita; Vm: vermiculita; Cb: cristobalita.

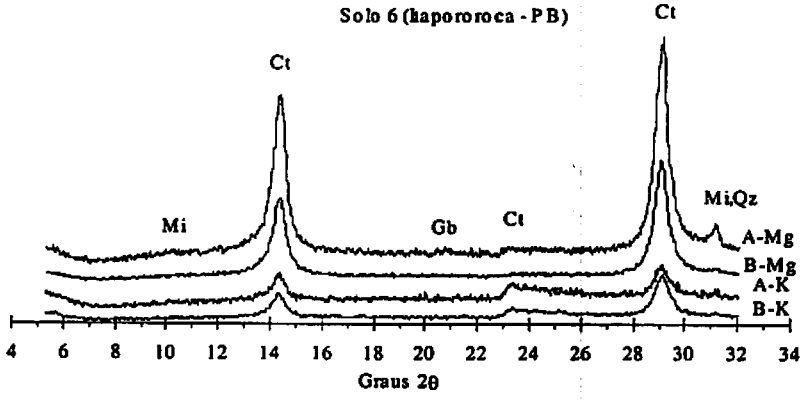
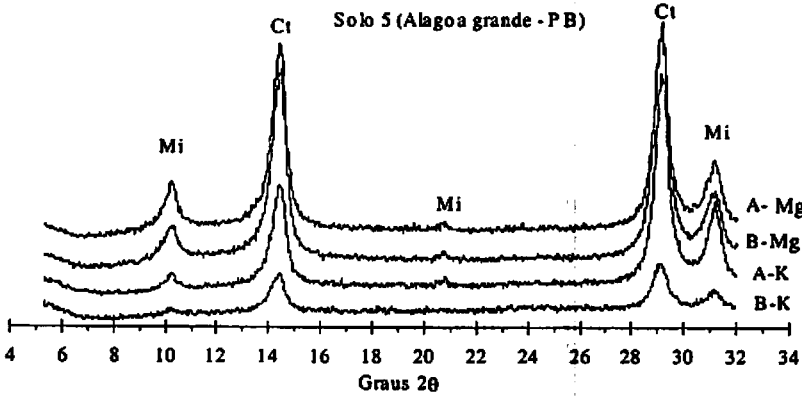
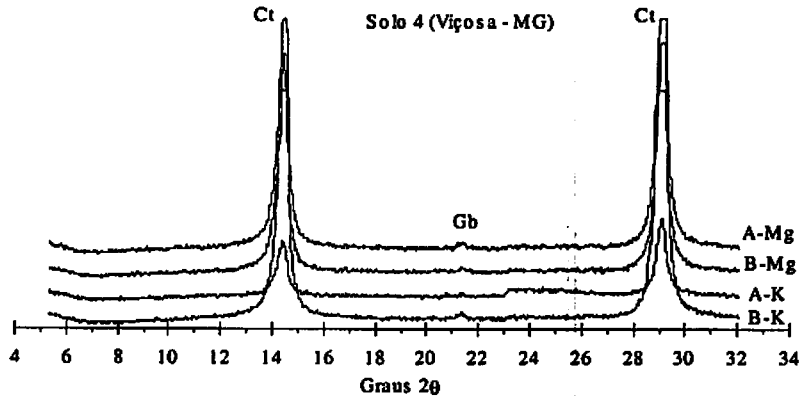


FIGURA 2A. Difratoformas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 4, 5 e 6, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Gb: gibbsita; Qz: quartzo.

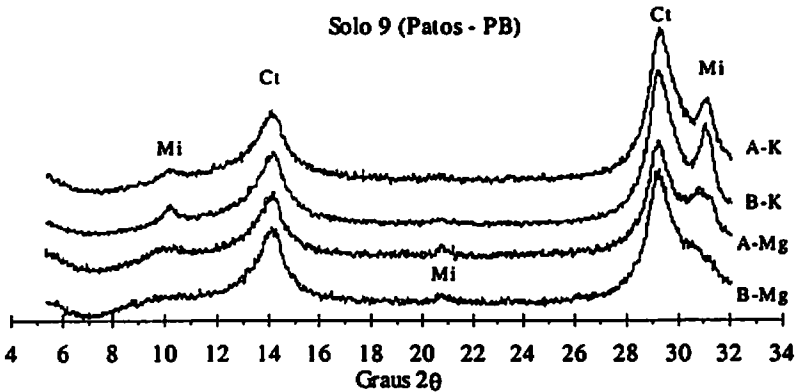
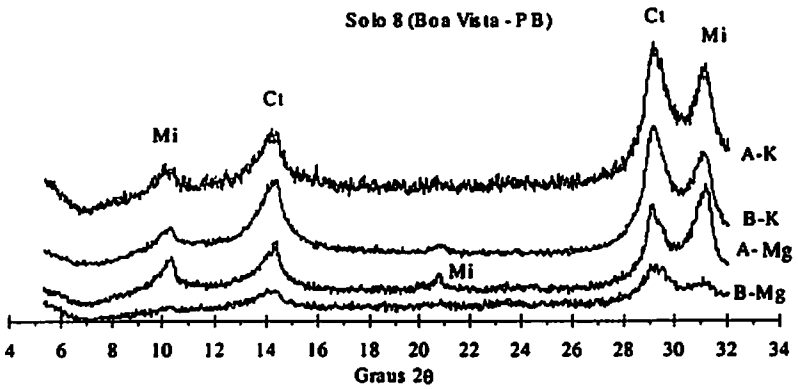
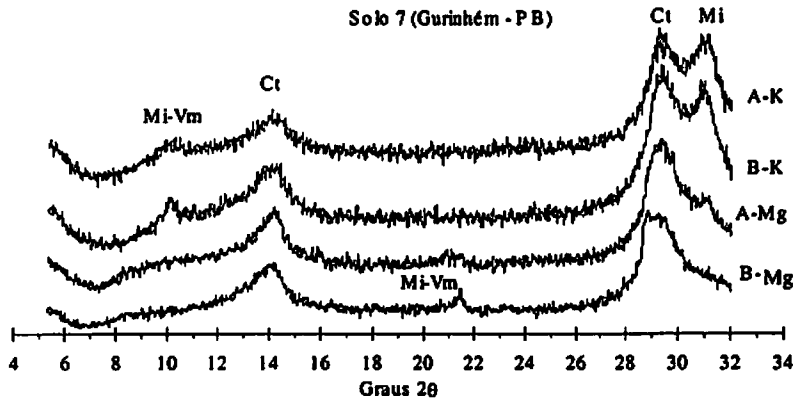


FIGURA 3A. Difratoigramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 7, 8 e 9, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita.

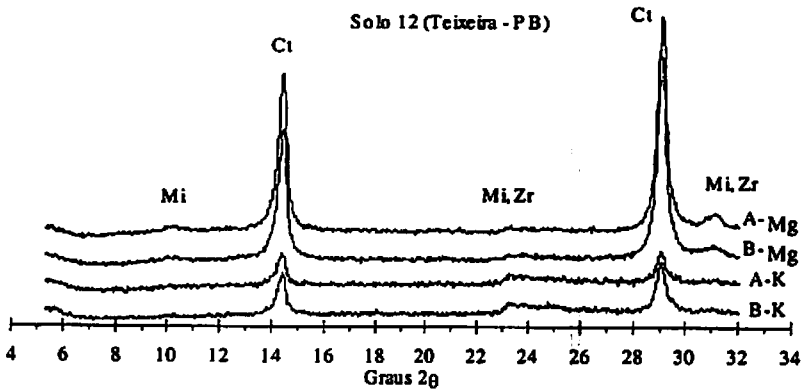
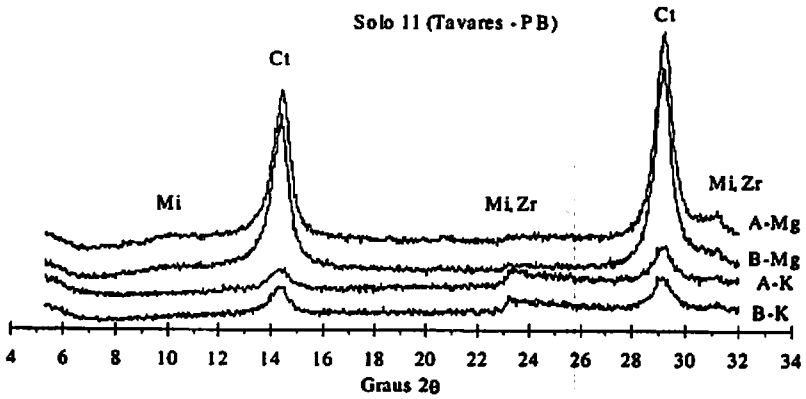
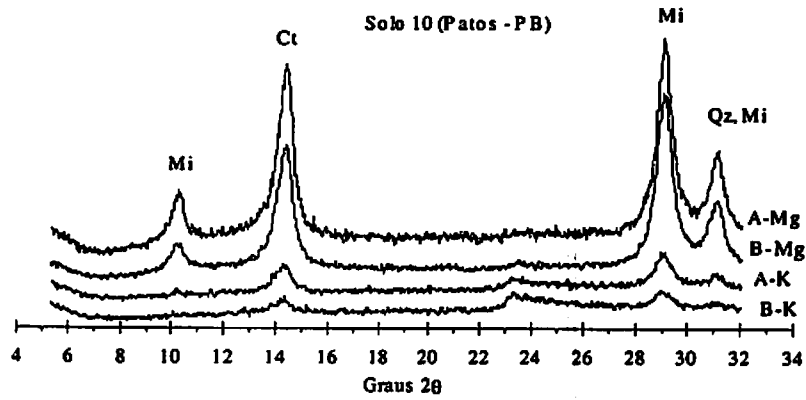


FIGURA 4A. Difratoigramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 10, 11 e 12, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita, Mi: mica; Qz: quartzo; Zr: zirconita.

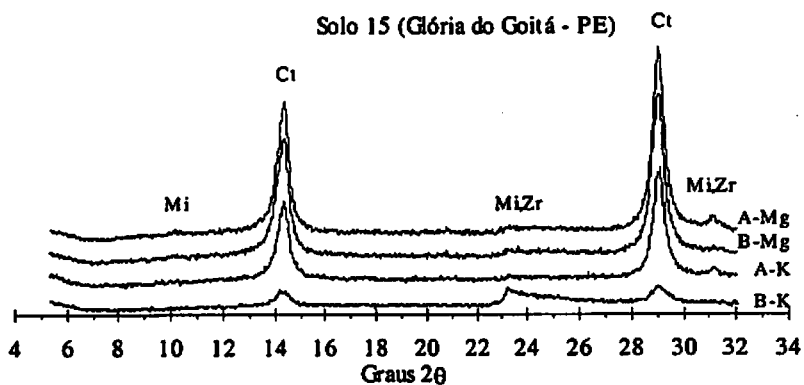
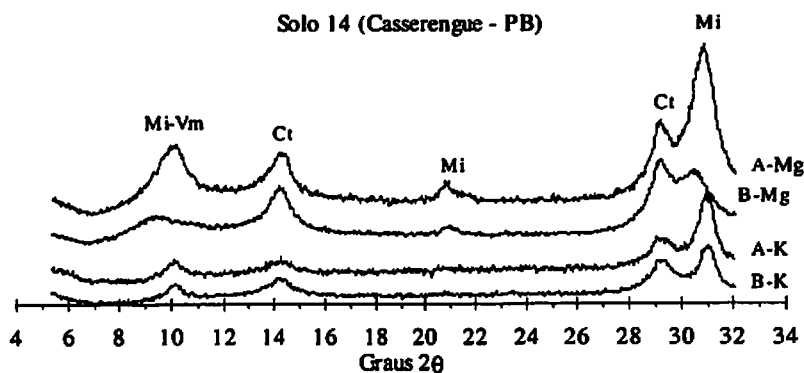
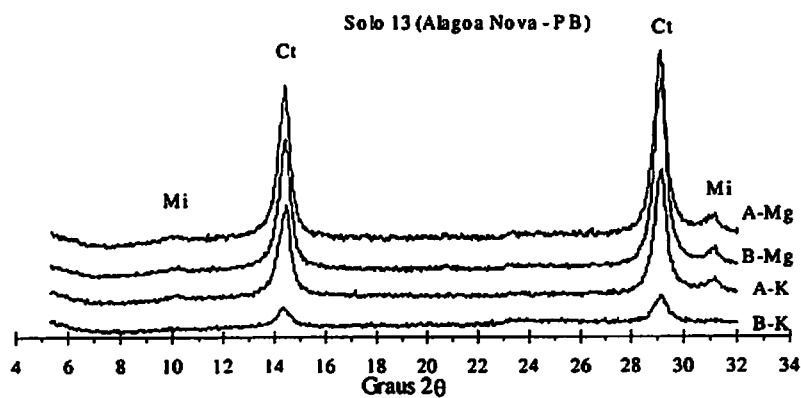


FIGURA 5A. Difractogramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 13, 14 e 15, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita; Zr: zirconita.

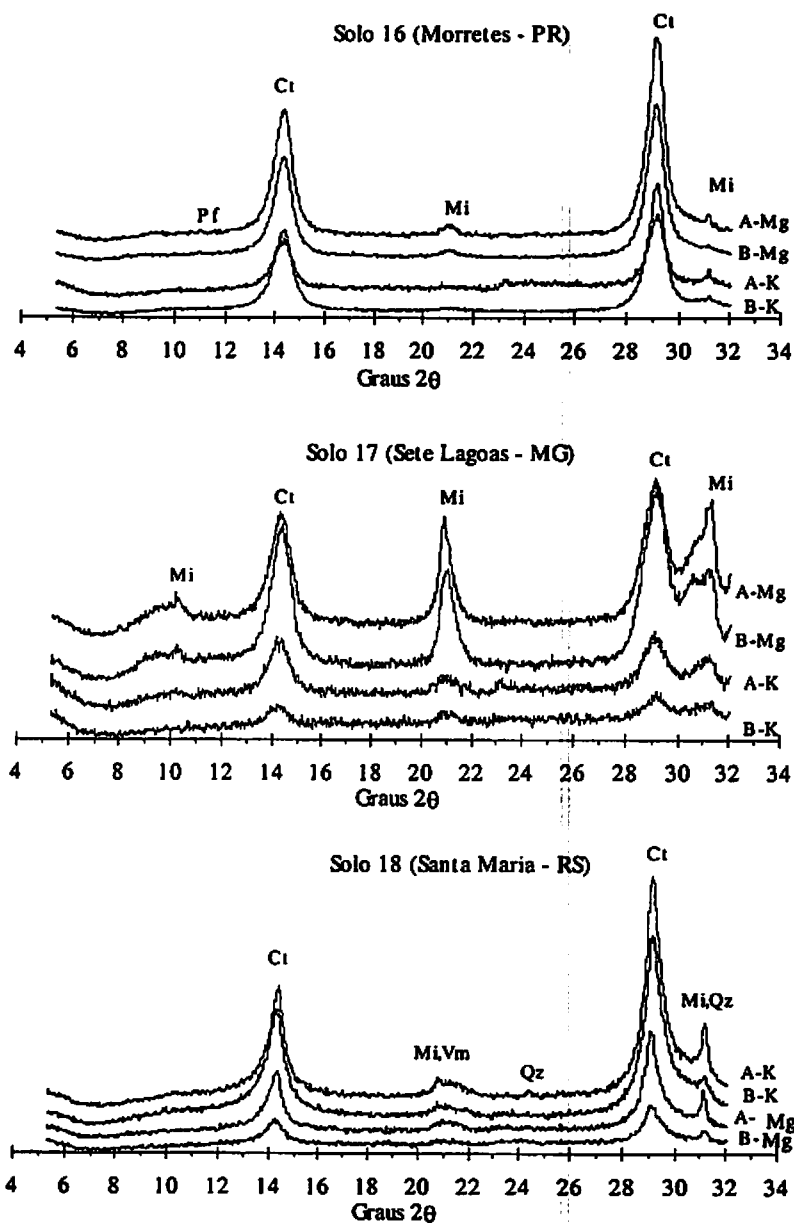


FIGURA 6A. Difratoqramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 16, 17 e 18, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita; Mi: mica; Vm: vermiculita; Qz: quartzo; Pf: pirofilita.

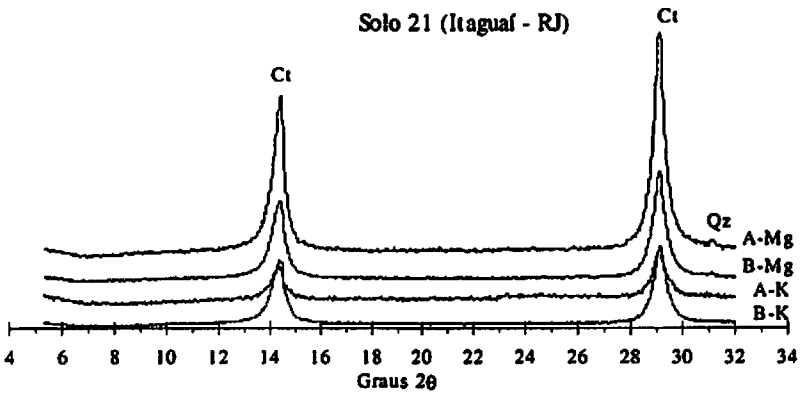
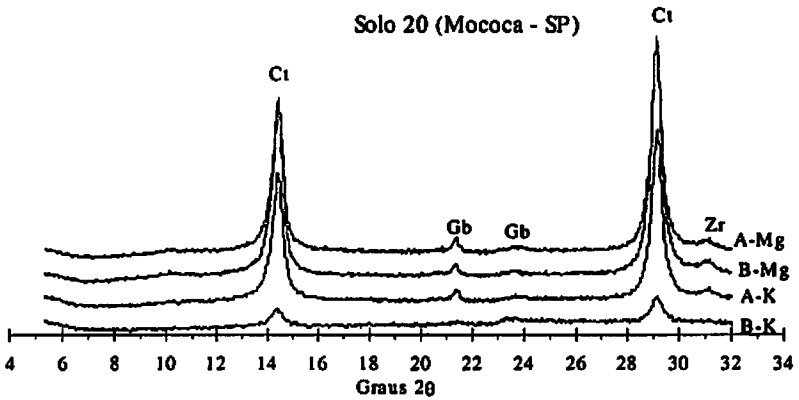
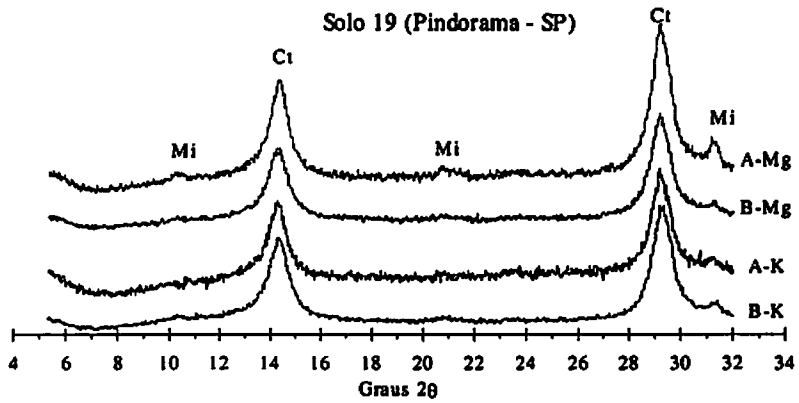


FIGURA 7A. Difratoqramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 19, 20 e 21, tratadas com Mg e K. Ca: caulinita; Mi: mica; Gb: gibbsita; Zr: zirconita; Qz: quartzo.

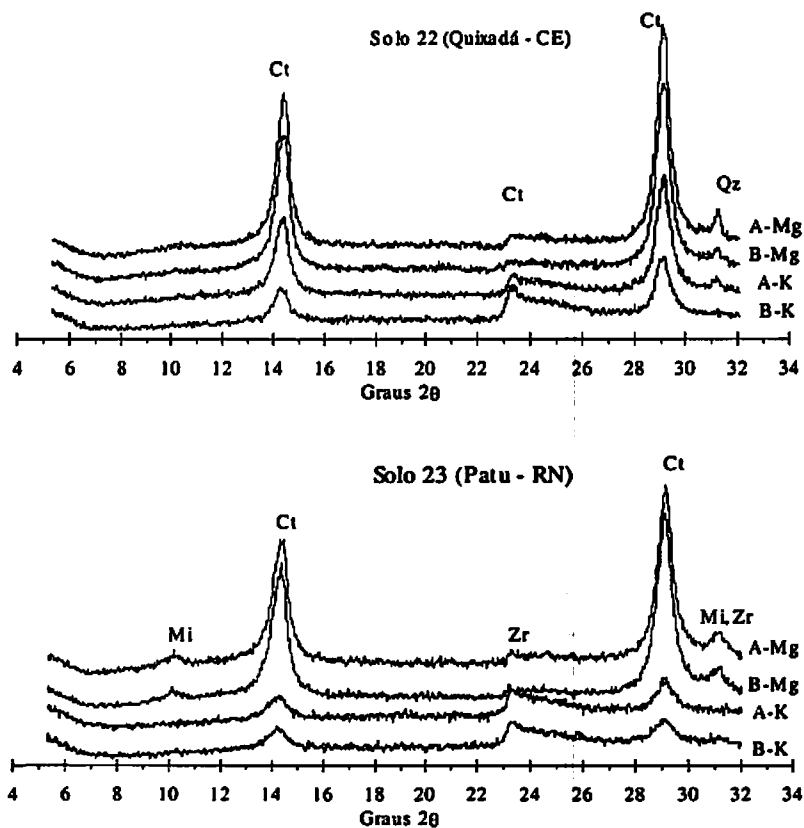


FIGURA 8A. Difratoqramas de raios X de amostras orientadas da fração argila dos horizontes A e B, dos solos 22 e 23, tratadas com Mg e K. Ct: caulinita, Mi: mica; Zr: zirconita; Qz: quartzo.