

**ATRIBUTOS MECÂNICOS E
SALPICAMENTO DE PARTÍCULAS EM
AMOSTRAS DE LATOSSOLO VERMELHO-
AMARELO SOB EFEITO DE VINHAÇA**

LUIZ GUSTAVO FERNANDES JULIÃO

2009

LUIZ GUSTAVO FERNANDES JULIÃO

**ATRIBUTOS MECÂNICOS E SALPICAMENTO DE PARTÍCULAS EM
AMOSTRAS DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SOB EFEITO
DE VINHAÇA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Nilton Curi

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

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

Julião, Luiz Gustavo Fernandes.

Atributos mecânicos e salpicamento de partículas em amostras de latossolo vermelho-amarelo sob efeito de vinhaça / Luiz Gustavo Fernandes Julião. – Lavras : UFLA, 2009.

43 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Nilton Curi.

Bibliografia.

1. Compressibilidade. 2. Energia. 3. Resíduo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 631.81

LUIZ GUSTAVO FERNANDES JULIÃO

**ATRIBUTOS MECÂNICOS E SALPICAMENTO DE
PARTÍCULAS EM AMOSTRAS DE LATOSSOLO
VERMELHO-AMARELO SOB EFEITO DE VINHAÇA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 24 de julho de 2009

Prof. Dr. José Maria de Lima UFLA

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior UFLA

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Prof. Dr. Nilton Curi - UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

*“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para vitória
é o desejo de vencer.”
(Mahatma Gandhi)*

A minha mãe,

DEDICO.

Aos meus irmãos e sobrinhos, com amor,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois é o Criador de tudo e por enviar providências na minha existência.

À Fapemig, pelo financiamento da pesquisa.

À Capes, pela bolsa concedida durante o período do curso.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade de realização do Mestrado.

Ao professor Nilton Curi, pela visão de profissionalismo que me fez descobrir e pelas suas considerações nas horas certas visando o meu crescimento.

Ao professor José Maria de Lima, pela orientação, amizade, conselhos, sugestões, ensinamentos, apoio no trabalho e por oferecer-me a oportunidade de trabalhar e confiar na minha capacidade.

Aos professores Moacir de Souza Júnior e Geraldo César de Oliveira, pela atenção, prontidão e ajuda no experimento.

Ao professor Carlos Rogério de Mello, pelas críticas e sugestões visando à melhoria do trabalho.

Ao grande pai que tive dentro da UFLA, o doutorando Bruno Ribeiro, pelas sugestões, atenção, boa prosa e muita paciência.

Aos doutorandos Ciro Augusto de Souza Magalhães, César F. A. Júnior e Eduardo Severiano, pelo auxílio no final deste trabalho, muito obrigado mesmo.

À secretária da pós-graduação do DCS Daniela, pela amizade, gentileza, atenção e paciência.

Aos professores e funcionários do Departamento de Ciência do Solo, em especial Delanne, Dulce, Carlinhos, Márcia, Cleuza, Eliana, Pesão, Emerson,

Maria Alice e Dorotéo por terem me acolhido e me auxiliado nos experimentos, coletas e preparação do ambiente de trabalho e estudos.

À turma do Mestrado e do Doutorado, pela amizade, apoio, incentivo, pela troca de experiências e pelos momentos de descontração.

A minha mãe por oferecer aos seus filhos a oportunidade de escolhas.

Aos meus irmãos, pelo incentivo, apoio, paciência, espera, sobretudo nos momentos de ausência.

Aos meus eternos sobrinhos, pela alegria de viver e sentir-me como criança.

À Izamara, pela atenção, carinho e por fazer de mim um homem forte.

A todos os amigos do movimento espírita de Lavras, das juventudes Allan Kardec, Augusto Silva, Grupo da Prece e Fraternidade, da Cia Espírita Seareiros, do Grupo Espírita Luzes da Alma, dos Semeadores, do Gotas de Luz.

Aos grandes amigos de infância, hoje homens de bem Leandro Ferreira e André Luiz.

A todos vocês muito obrigado mais uma vez.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Vinhaça.....	3
2.2 Compactação em solos agrícolas.....	5
2.3 Resistência do solo à erosão hídrica.....	8
3 Material e métodos.....	12
3.1 Amostragem do solo.....	12
3.2 Caracterização física e química do solo.....	12
3.3 Caracterização da vinhaça.....	15
3.4 Ensaio de compressibilidade.....	17
3.4.1 Preparo das amostras e ensaios de compressão uniaxial.....	17
3.4.2 Ensaio de salpicamento no simulador de chuvas.....	18
3.4.3 Análise estatística.....	19
3.4.4 Ensaio de Proctor Normal.....	19
3.5 Ensaio de salpicamento de partículas.....	20
3.5.1 Ensaio com simulador de chuvas.....	20
3.5.2 Procedimento para o ensaio de salpicamento.....	23
4 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Efeito da vinhaça nos limites de consistência.....	25
4.2 Efeito da vinhaça no modelo de compressibilidade.....	26
4.3 Efeito da vinhaça no ensaio do Proctor Normal.....	28

4.4 Efeito da vinhaça na compressibilidade e quantidade de salpicamento.....	31
5 CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

RESUMO

JULIÃO, Luiz Gustavo Fernandes. **Atributos mecânicos e salpicamento de partículas em amostras de latossolo vermelho-amarelo sob efeito de vinhaça**. 2009. 43p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.*

Com aumento da produção de etanol e cachaça no Brasil, cresce também a produção de vinhaça, principal resíduo da industrialização da cana. Uma das formas de sua utilização é o seu descarte em solos como fertilizante líquido. A vinhaça pode alterar os atributos físicos do solo bem como seu comportamento compressivo e a resistência dos agregados do solo ao salpicamento. Assim sendo, os objetivos desse trabalho foram quantificar o efeito da vinhaça no comportamento compressivo e nos atributos mecânicos e avaliar o efeito da aplicação da vinhaça no salpicamento de partículas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA). A vinhaça foi proveniente de um alambique de cachaça artesanal. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0 a 3 cm e 60 a 63 cm. As amostras deformadas reservaram-se à caracterização física e química do solo. Das amostras indeformadas, parte foi saturada por capilaridade com vinhaça e a outra parte com água destilada por 48 horas e todas destinaram-se aos ensaios de compressibilidade e resistência ao salpicamento usando-se um simulador de chuvas. Os resultados indicam que a capacidade de suporte de carga do solo foi semelhante para as duas profundidades com e sem aplicação de vinhaça. Os limites de consistência não foram significativamente diferentes. No ensaio de Proctor Normal, as amostras que receberam vinhaça, independentemente da profundidade, tiveram valores de umidade ótima de compactação menores, resultando em economia de água e maior resistência do solo. Para o salpicamento, as amostras subsuperficiais na capacidade de campo propiciaram maior resistência e menor salpicamento na presença de vinhaça.

Comitê Orientador: Nilton Curi – UFLA (Orientador), José Maria de Lima – UFLA,
Moacir de Souza Dias Júnior – UFLA.

ABSTRACT

JULIÃO, Luiz Gustavo Fernandes. **Mechanical attributes and splash of particles of samples of red-yellow latosol (Oxisol) under effect of vinasse.** 2009.43p. Dissertation (Master degree in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras.*

With the increased production of ethanol and cachaça in Brazil, also increases the production of vinasse, main residue of the industrialization of sugarcane. One way of its utilization is its disposal in soil as liquid fertilizer. The vinasse can change the physical attributes of soil and its compressive behavior and the resistance of soil aggregates to splash. Therefore, the objectives of this study were to quantify the effect of vinasse on the compressive behavior and physical attributes, and to evaluate the application of vinasse on splash of particles of a Red-Yellow Latosol (Oxisol). The vinasse was obtained from a still of craft. Undisturbed and disturbed soil samples were collected at depths of 0 to 3 cm, and 60 to 63 cm. Disturbed soil samples were used for physical and chemical characterization of soil. Part of undisturbed soil samples was saturated by capillarity with vinasse and the other part with distilled water for 48 hours for testing the compressibility and resistance of aggregates to splash by using simulated rainfall. The results indicate that the capacity of load support of soil for both depths with and without application to vinasse was similar. The limits of consistency were not significantly different. In the Proctor Normal test the samples which received vinasse, regardless of the depth, had lower values of compaction optimum moisture, resulting in economy of water and higher soil resistance. For splash, the subsurface samples at field capacity provided more resistance and lesser splash in the presence of vinasse.

Guidance Committee: Nilton Curi – UFLA (Major Professor), José Maria de Lima – UFLA, Moacir de Souza Dias Júnior – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início da colonização do Brasil até os dias atuais, a monocultura canavieira vem sendo instalada em algumas importantes áreas agrícolas do país. No século XVI, para essa que foi a primeira atividade agroindustrial do Brasil, buscava-se terras férteis em locais de fácil escoamento da produção para a Europa. Isso fez com que a Zona da Mata Nordestina fosse a região de maior cultivo de cana-de-açúcar, o que resultou na destruição parcial da Mata Atlântica, principal ecossistema dessa região (Piacente, 2005).

Nessa atividade agro-industrial, sempre se buscou aumento da produção de açúcar. Atualmente, essa busca se dá em função, principalmente, da indústria do álcool combustível. A expansão da área plantada com cana-de-açúcar se deu de forma gradual, deixando em segundo plano a busca por maior produtividade ou a introdução de tecnologias mais eficientes nos processos produtivos de fabricação de açúcar e álcool (Piacente, 2005).

O Brasil, maior produtor mundial de açúcar e único país do mundo a implantar, em larga escala, um combustível alternativo ao petróleo tem hoje o reconhecimento mundial nessa iniciativa. Isso se dá em função das vantagens ambientais, sociais e econômicas desse biocombustível, despertando o interesse de países desenvolvidos. Para a safra 2008/2009, estima-se um aumento de 16% em relação à safra de 2007/2008, com aumento na produção de cana de 431 para 498 milhões de toneladas anuais (União da Indústria de Cana de Açúcar - Unica, 2009).

O parque sucroalcooleiro nacional possui 308 indústrias em atividade, sendo 81 destilarias autônomas e 227 usinas de açúcar e álcool (Piacente, 2005). Outra atividade que se encontra em franca expansão no Brasil é a produção de cachaça artesanal, com uma produção de 1,6 bilhões de litros por ano, sendo os estados de São Paulo e Minas Gerais como os principais produtores (Andrade,

2006). Concomitantemente ao aumento da produção de álcool e cachaça, aumenta-se a produção de vinhaça. Para cada litro de álcool são produzidos de dez a dezoito litros de vinhaça, cuja composição é bastante variável, dependendo principalmente da composição do vinho (Silva et al., 2007).

Em passado recente, a vinhaça era, em grande parte, despejada nos rios e lagoas nas proximidades das usinas e destilarias, apresentando um alto potencial poluidor. Esta prática é atualmente condenada. Aumentou-se, então, o descarte em solos. Milhões de litros de vinhaça são aplicados nas lavouras canavieiras como forma de descartar a vinhaça e a pretexto de se aproveitar o produto, com o argumento de fertilização do solo. Muitos estudos evidenciam o aumento de níveis de determinados nutrientes, principalmente o potássio (Vieira, 1983; Silva et al., 2007), outros mostram efeitos em dispersão de partículas e aspectos físico-químicos do solo (Ribeiro, 2009). Pouco ainda se sabe sobre o efeito em parâmetros de compressibilidade do solo e resistência de agregados ao salpicamento.

Nesse contexto, este trabalho testou a hipótese de que a utilização de vinhaça nos solos pode, além de elevar os teores de macro e micronutrientes, causar alteração na energia de agregação, facilitando a dispersão de partículas e favorecendo o seu deslocamento e/ou alterando seu comportamento compressivo, bem como sua resistência à compactação.

Tendo em vista a importância de se obter conhecimentos adicionais sobre o comportamento da vinhaça no solo, este trabalho tem como objetivos: i) quantificar o efeito da vinhaça no comportamento compressivo e nos atributos físicos; e ii) avaliar o efeito da aplicação da vinhaça no salpicamento de partículas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Vinhaça

Em 1975, o Governo Federal impôs um estímulo relevante à produção de álcool como combustível, iniciado com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Entretanto, somente após o segundo choque do petróleo, em 1979, é que houve um crescimento vigoroso em investimentos, subsídios e produtividade. Em vista disso, as áreas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) vêm aumentando continuamente, sobretudo na região Centro-Oeste do Brasil.

A produção de vinhaça segue, em escala ainda maior, a produção de álcool combustível, na razão de dez a dezoito litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido. Esse subproduto tem composição variável (Silva et al., 2007).

Independentemente da região onde é produzido o álcool e da matéria prima empregada nessa indústria, cana-de-açúcar na América do Sul e beterraba na Europa, por exemplo, a produção de vinhaça é muito maior do que a produção do álcool (Silva et al., 2007). A vinhaça tem, geralmente, cor marrom claro e conteúdo de sólidos totais variando de 2 a 4 %, quando ela é obtida do caldo da cana, e cor marrom escuro com conteúdo de sólidos totais variando de 5 a 10 %, quando produzida do melão da cana (Cortez et al., 1998).

Os efeitos da aplicação de vinhaça no solo são elevação do pH; aumento da disponibilidade de alguns íons, principalmente o potássio; aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); aumento da capacidade de retenção de água do solo e melhoria da estrutura do solo (Glória & Orlando Filho, 1983).

A vinhaça também pode ser utilizada no controle de plantas daninhas, por ser constituída por diversos ácidos orgânicos e alterar a quantidade e a emergência dessas plantas, alterando também a ação de herbicidas (Gloria & Orlando Filho, 1983; Quintela et al., 2002). No caso do uso visando a promover

a melhoria em sua fertilidade, deve-se levar em consideração o balanço de íons. As dosagens devem ser feitas a partir das características de cada solo, do contrário, pode ocorrer a lixiviação de vários desses íons, sobretudo do nitrato e do potássio. Vieira (1983) estimula o uso de vinhaça como fonte de nutrientes, porém, as quantidades não devem ultrapassar a capacidade de retenção de água do solo.

A questão da aplicação da vinhaça, ou de qualquer água residuária, ao solo deve centrar-se na hipótese de que o solo quando não saturado, se comporta como um filtro, apresentando grande capacidade de remoção dos componentes da vinhaça (Brito et al., 2007). Ainda, segundo esses autores, em relação a possíveis danos ambientais, os mesmos concluíram que, de maneira geral, a aplicação de vinhaça no solo não representou riscos.

Contudo, para evitar impactos, a Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 – Código Florestal, regulamenta a aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar, liberando a aplicação no solo, evitando o lançamento diretamente nos cursos d'água (CETESB, 2005). Dessa forma, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo, CETESB, estabeleceu critérios e procedimentos para sua aplicação no solo e normatizou a quantidade máxima do produto a ser lançada nos terrenos agrícolas, de acordo com a análise de solo, pela seguinte expressão:

$$\mathbf{m^3 \text{ de vinhaça/ha} = [(0,05 \times CTC - K_s) \times 3744 + 185] / K_{vi}}$$

em que:

0,05 = 5% da CTC

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$.

K_s = concentração de potássio no solo, expressa em $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$, à profundidade de 0 a 0,80 metros.

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ou $\text{meq}.100\text{cm}^{-3}$, para kg de potássio em 1 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade.

185 = massa, em kg, de K_2O extraído pela cultura por hectare, por corte.

K_{vi} = concentração de potássio na vinhaça, expressa em $\text{kg de } \text{K}_2\text{O m}^{-3}$.

2.2 Compactação em solos agrícolas

A agricultura moderna requer a adoção de tecnologias voltadas, principalmente, para as médias e grandes propriedades agrícolas, cuja exploração sustenta-se no cultivo com grande uso de mecanização. Esse manejo mais intensivo pode resultar na compactação de solos, devido ao tráfego de máquinas e equipamentos agrícolas, principalmente em condições de umidade inadequadas (Dias Júnior & Pierce, 1996; 1997; Dias Júnior, 2000; Silva et al., 2003; Severiano et al., 2008).

Estudos têm demonstrado que diferentes classes de solos apresentam comportamentos distintos quando submetidas ao processo de compactação. Isso se deve a vários fatores, tais como: energia de compactação, textura, matéria orgânica, umidade do solo, história de tensão, estrutura associada à mineralogia (Dias Júnior & Miranda, 2000; Ajayi et al., 2009).

Para uma mesma condição, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é o teor de água. Assim, quando os solos estão mais secos, a sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para sustentar pressões mais elevadas, sendo a compactação não significativa. No entanto, com o aumento da umidade, essa capacidade reduz, chegando a um nível crítico onde ocorre a compactação adicional, somente reversível com emprego de técnicas de descompactação (Dias Júnior, 1994).

A avaliação da compressibilidade do solo e da sua capacidade de suporte de carga, sob diferentes condições de umidade e sistemas de manejo, é de grande

importância não só para se determinar as pressões máximas que o solo pode suportar nessas condições, mas também para minimizar os riscos à compactação em solos cultivados (Silva & Cabeda, 2006).

A manutenção de condições físicas adequadas ao crescimento das plantas está relacionada com a preservação da estrutura do solo e pode ser alcançada por meio do conhecimento do comportamento compressivo do solo e monitoramento das operações mecanizadas (Severiano et al., 2008). Nesse caso, a melhoria da estrutura do solo beneficia as espécies cultivadas pelas modificações na dinâmica dos nutrientes no sistema solo-planta e nos fluxos de gases e água (Silva et al., 2006).

Importantes informações são obtidas com o Modelo de Capacidade de Suporte de Cargas (MCSC), por meio do qual se estima a pressão máxima que o solo suporta sem sofrer compactação adicional. Essa pressão máxima é conhecida como pressão de preconsolidação (Dias Júnior & Pierce, 1996). Assim sendo, a pressão de preconsolidação pode ser usada como um indicador quantitativo da sustentabilidade da estrutura dos solos (Dias Júnior, 1996).

Esse parâmetro pode ser obtido por meio do ensaio de compressão uniaxial e tem sido utilizado em estudos para monitoramento das alterações da estrutura dos solos quando estes são submetidos a diferentes sistemas de manejo e operações mecanizadas que podem compactar os solos (Larson et al., 1980; Dias Júnior, 1994; Kondo & Dias Júnior, 1999; Silva et al., 2001; Fritton, 2001; Silva et al., 2002; Lima et al., 2004; Imhoff et al., 2004; Dias Júnior et al., 2005; Silva & Cabeda, 2006; Severiano et al., 2008; Silva et al., 2008; Araújo Júnior et al., 2008; Silva, et al., 2009; Ajayi et al., 2009). O ensaio de compressão uniaxial permite obter a curva de compressão do solo (Figura 1), que é representada pela relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a correspondente densidade do solo ou índice de vazios (Casagrande, 1936; Larson et al., 1980; Holtz &

Kovacz, 1981; Horn & Lebert, 1994; Dias Júnior & Pierce, 1996; Dias Júnior, 2000; Fritton, 2001).

O modelo de capacidade de suporte de carga relaciona a pressão de preconsolidação com o conteúdo de água existente no solo (potencial matricial ou umidade). O modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Júnior & Pierce (1995, 1996) relaciona a pressão de preconsolidação com a umidade gravimétrica e sugere a pressão máxima que o solo pode suportar sem que ocorra compactação adicional para as diferentes umidades com base na pressão de preconsolidação.

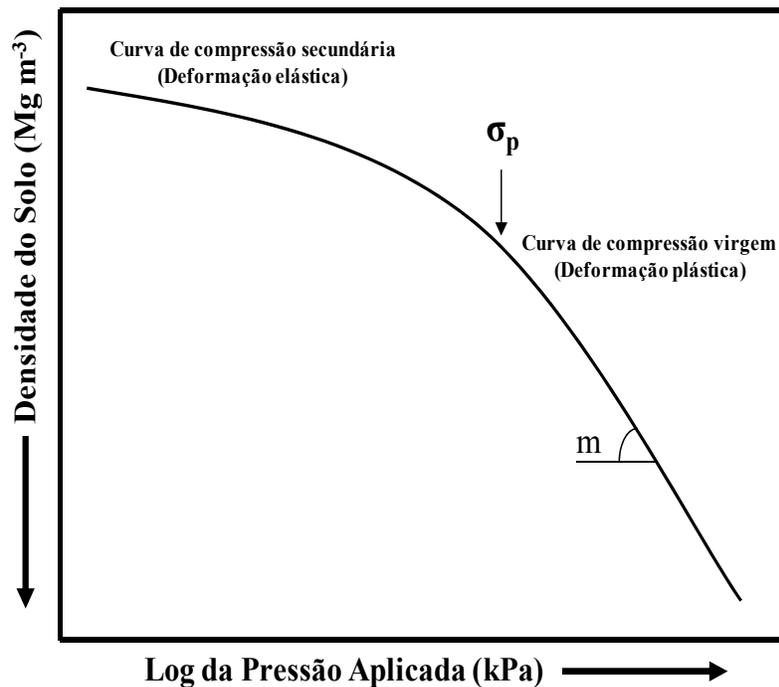


FIGURA 1 Curva de compressão do solo mostrando a curva de compressão secundária, curva de compressão virgem, a pressão de preconsolidação (σ_p) e o índice de compressão (m). Adaptado de Dias Júnior (1994).

A pressão de preconsolidação é a pressão que o sistema radicular deve vencer para o crescimento; assim, solos com elevada capacidade de suporte de carga podem ser adequados para o tráfego de máquinas, mas podem restringir o crescimento radicular (Romkens & Miller, 1971).

Além da umidade do solo, fatores que alteram o balanço de cargas nas superfícies das partículas, como adição de fosfatos (Silva, 1999) e vinhaça (Ribeiro, 2009), podem influenciar a capacidade de suporte de cargas dos solos. Esses efeitos se devem principalmente à alterações na relação entre a fase sólida do solo e a água.

2.3 Resistência do solo à erosão hídrica

A degradação do solo pode ser um dos principais problemas ambientais. Dentre os tipos de degradação, a erosão hídrica é considerada a principal, sendo facilitada e acelerada pelo homem, com suas práticas inadequadas de manejo agrícola (Carvalho et al., 2002).

O processo de erosão hídrica se inicia com o desprendimento das partículas do solo pelo impacto direto das gotas de chuva. A destruição dos agregados do solo e o transporte das partículas efetuado nesta fase estão diretamente relacionados com a energia da chuva (Lemos & Bahia, 1992) e com a força cisalhante do escoamento superficial (Amorim et al., 2000).

Desprendimento, transporte e deposição das partículas são três eventos seqüenciais que caracterizam o processo erosivo. O desprendimento é definido como a liberação de partículas dos agregados; uma vez desprendidas, as partículas ou pequenos agregados podem permanecer próximas ao agregado de origem ou ser transportados (Kinnel & Cummings, 1993; Amorim et al., 1999). Segundo Lemos & Bahia (1992), o desprendimento ou desagregação das partículas ocorre pelo efeito integrado da energia do impacto direto das gotas

d'água e da força cisalhante do escoamento superficial, constituindo, assim, o estágio inicial e mais importante do processo de erosão hídrica.

As partículas menores em suspensão obstruem os poros, formando o selamento superficial e diminuindo a permeabilidade e a infiltração de água no solo. O fenômeno de selamento superficial é decorrente da formação de uma camada superficial de maior densidade, pela destruição dos agregados dos solos causada pelo impacto direto das gotas de chuva, dispersão e entupimento dos poros (Schaefer et al., 2002).

A desagregação do solo pelo impacto direto das gotas de chuva é responsável pela maior parte do processo erosivo. A energia cinética no momento do impacto das gotas com a superfície do solo chega a ser mais de 250 vezes maior que a energia do escoamento superficial (Hudson, 1995). Guy et al. (1987) sugerem que 85% dos sedimentos da erosão hídrica têm origem no impacto das gotas de chuva e 15% são atribuídos ao escoamento superficial.

Diferentes classes de solo podem apresentar suscetibilidade diferenciada à erosão – erodibilidade -, mesmo para condições semelhantes de declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo. Essas diferenças são devidas às propriedades do próprio solo (Bertoni & Lombardi Neto, 1985). As propriedades do solo que mais influenciam a sua erodibilidade são aquelas que afetam a taxa de infiltração da água no solo e sua resistência ao cisalhamento (Carvalho et al., 2002).

Wischmeier & Mannering (1969) realizaram estudos em 55 solos dos EUA, durante cinco anos, e identificaram 15 propriedades físicas e químicas do solo que, de alguma forma, estariam relacionadas com as perdas de solo. Concluíram que a infiltração de água no solo e sua capacidade de resistir ao deslocamento e transporte pela ação erosiva da chuva e pelo fluxo de água são as propriedades que mais influenciam na sua erodibilidade.

Basicamente existem três maneiras diferentes de determinar a erodibilidade do solo. A primeira envolve condições de campo sob chuva natural, que é considerada onerosa e muito demorada. A segunda maneira é semelhante a primeira, porém baseia-se na quantificação da erodibilidade, em função das perdas de solo e da erosividade da chuva, sob condições de chuva simulada. A terceira maneira baseia-se em equações de regressão que contenham como variáveis independentes propriedades morfológicas, químicas e físicas do solo altamente correlacionadas à erodibilidade (Silva, 1994).

Atributos físicos e químicos do solo, principalmente textura, estrutura e agregação, pH, Δ pH e ponto de efeito salino nulo (PESN), bem como a constituição mineralógica e o teor e quantidade da matéria orgânica exercem influência direta na erodibilidade (Silva, 1994; Silva, 1995; Ribeiro, 2006).

Os Latossolos, notadamente os gibbsíticos argilosos, tendem a apresentar estrutura granular com elevada estabilidade intra-agregados, alta porosidade e elevada permeabilidade (Ferreira et al., 1999). Entretanto, a estrutura granular pode conferir menor coerência entre os agregados do solo, facilitando a desagregação, de acordo com observações de Silva et al. (1995).

A umidade antecedente do solo também pode afetar a desagregação e o salpicamento de partículas; entretanto, o seu efeito parece não estar ainda totalmente elucidado (Ribeiro, 2007). Em estudo para verificar a influência do aumento da umidade do solo na resistência dos agregados ao impacto de gotas de chuva simulada, Truman et al. (1990) verificaram que o aumento da umidade do solo até determinado conteúdo aumenta a resistência dos agregados. Vilela (1995), pesquisando um Latossolo Vermelho-Escuro sob irrigação por aspersão, conclui que os graus de umidade próximos à capacidade de campo induzem a um salpicamento máximo de partículas do solo.

Fatores que influenciam o balanço de cargas nas superfícies de partículas ou que afetam a resistência do solo à compactação podem também afetar a

resistência do solo à erosão. Entre esses fatores, conforme já mencionado, estão as práticas de manejo da fertilidade, principalmente a fosfatagem (Silva et al., 1999) e a adição de vinhaça (Ribeiro, 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, formado a partir do produto de alteração do gnaisse-granítico leucocrático, coletadas sob pastagem plantada degradada, em relevo suave ondulado, localizado no campus da Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. O clima local é do tipo Cwa (Classificação de Köppen), temperado chuvoso (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso (Antunes, 1986), temperatura média anual de 19,4° C e precipitação média anual de 1529,7 mm (Brasil, 1992).

A escolha deste solo se justifica pelo seu uso no meio agrícola para diversas culturas, incluindo a cultura da cana-de-açúcar para a produção de cachaça artesanal.

3.1 Amostragem do solo

Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas nas camadas de 0 a 3 cm, e de 60 a 63 cm de profundidade. As amostras deformadas reservaram-se à caracterização física e química do solo. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis de 6,35 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura com auxílio do amostrador de Uhland e destinaram-se aos ensaios de compressão uniaxial e resistência ao salpicamento utilizando-se simulador de chuvas.

3.2 Caracterização física e química do solo

As análises foram determinadas nas condições com e sem vinhaça. As amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade durante 48 horas (2 dias), para ambas condições: sem vinhaça e com vinhaça, sendo que as amostras que não receberam vinhaça foram saturadas com água destilada e as demais foram saturadas com vinhaça *in natura*.

As análises granulométricas foram feitas pelo método da pipeta (Day, 1965), empregando-se NaOH 1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação rápida de 20.000 rpm por 10 minutos. A fração areia foi dividida em: areia muito grossa (2 a 1 mm); areia grossa (1 a 0,5 mm); areia média (0,5 a 0,25 mm); areia fina (0,25 a 0,105 mm); e areia muito fina (0,105 a 0,053 mm) (Embrapa, 1997). Determinou-se também argila dispersa em água (ADA), segundo o método da Embrapa (1997).

A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras com estrutura indeformada coletadas com amostrador de Uhland (Blake & Hartge, 1986a) e a densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico (Blake & Hartge, 1986b).

Na fração terra fina seca ao ar (TFSA) foram determinados carbono orgânico, os elementos do complexo sortivo, pH em água (relação solo:solução 1:2,5) e os teores de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e P₂O₅ extraídos pelo ataque sulfúrico (Embrapa, 1997).

Nas tabelas de 1 a 3 são apresentados os resultados da caracterização física e química do solo.

TABELA 1 Textura e fracionamento da areia do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Camada	Argila	Silte	Areia	AMG	AG	AM	AF	AMF
cm	----- g kg ⁻¹ -----							
0 - 3	499	166	335	49	72	88	102	24
60 - 63	567	109	324	17	102	100	87	19

AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; e AMF: areia muito fina.

TABELA 2 Caracterização do complexo sortivo dos horizontes Ap e Bw do Latossolo Vermelho-Amarelo.

Hor.	pH	P ¹	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB ²	t ³	T ⁴	V ⁵	m ⁶	MO	P-rem
	H ₂ O	Mg.dm ⁻³		-----cmol.c.dm ⁻³ -----								-----%-----	dag.kg ⁻¹	mg.dm ⁻³
Ap	5,7	2,5	28,0	2,8	0,4	0,2	4,8	3,3	3,5	8,1	41,0	5,7	3,1	17,0
Bw	5,3	0,9	6,0	1,0	0,1	0,4	6,3	1,1	1,5	7,4	15,1	26,0	2,1	9,7

¹ P Mehlich-1; ² S: soma de bases trocáveis; ³t: capacidade de troca catiônica efetiva; ⁴T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; ⁵ V: índice de saturação por bases; ⁶m: índice de saturação por alumínio; MO: matéria orgânica (1,724 x carbono orgânico); P-rem: fósforo remanescente.

14

TABELA 3 Ataque sulfúrico em amostras dos horizontes Ap e Bw do Latossolo Vermelho-Amarelo e relações correspondentes.

Horizonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Ki ¹	Kr ²	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃ ³
	-----%							
Ap	13,52	9,08	8,96	1,94	0,12	2,53	1,55	1,59
Bw	13,91	26,37	9,12	1,297	0,060	0,90	0,73	4,54

1/Ki: relação molecular SiO₂/Al₂O₃; 2/Kr: relação molecular SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃); 3/ relação molecular Al₂O₃/Fe₂O₃.

Foram determinados o limite de liquidez (LL), o limite de plasticidade (LP) e o limite de contração (LC), utilizando-se mercúrio, de acordo com Sowers (1965). Para verificar o efeito da vinhaça nestes limites, as amostras foram incubadas com vinhaça e sem vinhaça para as duas profundidades.

O limite de liquidez (LL) foi determinado pela equação 1:

$$1. U_l = a + b \cdot \log(x)$$

Onde:

LL = limite de liquidez (g kg^{-1}), grau de umidade correspondente a 25 golpes no equipamento de Casa Grande.

U_l : grau de umidade (g kg^{-1})

x : numero de golpes correspondentes no equipamento de Casa Grande.

a e b : parâmetros de ajuste

O limite de plasticidade foi obtido a partir da média de umidade de cinco bastonetes de 3 mm de diâmetro aproximadamente, quando estes apresentaram as primeiras fissuras e o limite de contração foi calculado em função da seguinte expressão (equação 2):

$$2. LC = [U_m - (V_i - V_f)/M_s] \cdot D_a$$

Onde:

LC : limite de contração (g kg^{-1})

U_m : umidade de moldagem (g kg^{-1})

V_i : volume inicial do corpo de prova (cm^3)

V_f : volume final do corpo de prova (cm^3)

M_s : massa de sólidos (g)

D_a :densidade da água (g cm^{-3})

3.3 Caracterização da vinhaça

A vinhaça foi proveniente de um alambique de cachaça artesanal localizado nas proximidades da cidade de Lavras, MG, e suas principais

características se encontram na Tabela 4. Os teores de potássio e sódio foram determinados após a digestão nitroperclórica e a leitura realizada no fotômetro de chama. Os teores de ferro, cobre, zinco, manganês, cálcio, magnésio e fósforo foram determinados depois da digestão de 5 mL de vinhaça in natura com ácido nitroperclórico. A condutividade elétrica e o pH foram determinados diretamente na vinhaça in natura. O carbono orgânico foi determinado depois da digestão de 0,5 mL de vinhaça in natura com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal. Todas as análises foram feitas com 3 repetições.

TABELA 4 Valores médios constituintes para caracterização da vinhaça.

pH	C. O. ¹	P	N	K	Ca	Mg	Cu	Mn	Fe	Zn	CE ²
	-----g L ⁻¹ -----					-----mg L ⁻¹ -----					dS m ⁻¹
3,0	2,86	0,69	0,98	1,84	0,01	0,7	16	1,9	23	8	5,7

¹ C. O. = Carbono orgânico; ² CE = Condutividade elétrica.

3.4 Ensaio de compressibilidade

3.4.1 Preparo das amostras e ensaios de compressão uniaxial

Para obtenção dos modelos de compressibilidade, as amostras indeformadas com diferentes umidades foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, de acordo com Bowles (1986), modificado por Dias Júnior (1994). Para obtenção das diferentes umidades em laboratório, inicialmente saturaram-se as amostras indeformadas, as quais foram secas ao ar no laboratório até se obter as umidades desejadas. Em seguida, foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial utilizando-se um consolidômetro da marca Boart Longyear (Figura 2). As pressões aplicadas a cada amostra obedeceram à seguinte ordem: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa (Holtz & Kovacs, 1981), sendo que cada nível de pressão foi aplicado até que 90% da máxima deformação fosse alcançada (Taylor, 1959), passando-se, então, ao próximo nível.

Após a realização do ensaio, as pressões de preconsolidação foram determinadas de acordo com Dias Júnior & Pierce (1995), a partir da curva de compressão do solo - CSS. As pressões de preconsolidação foram plotadas em função das umidades por meio do software Sigma Plot 10.0 (2006). As equações matemáticas foram ajustadas utilizando o modelo da forma proposta por Dias Júnior (1994), expresso pela equação $\sigma_p = 10^{(a + b U)}$, em que σ_p é a pressão de preconsolidação, U a umidade volumétrica do solo, e “a” e “b” os coeficientes de ajuste da regressão.

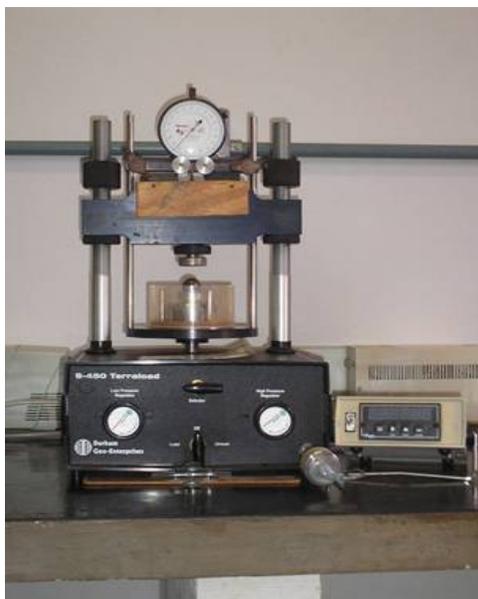


FIGURA 2 Consolidômetro da marca Boart Longyear utilizado no experimento.

3.4.2 Ensaio de salpicamento no simulador de chuvas

Para a quantificação da quantidade de material salpicado por gotas de chuva simulada, as amostras foram saturadas por 48 h, com vinhaça *in natura* ou com água destilada, ajustando-se a umidade das amostras para três condições de umidade: umidade no ponto de murcha permanente (PMP), umidade na capacidade de campo (CC) e a umidade de saturação (US). As umidades PMP e CC foram determinadas nas placas de Richards, a 15 e 0,33 atm, respectivamente (Tabela 5).

TABELA 5 Valores das umidades ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) obtidas para os ensaios de salpicamento utilizando-se simulador de chuvas.

Profundidade (cm)	PMP	CC
0 - 3	0,23	0,33
60 - 63	0,20	0,29

Em seguida, as amostras foram levadas para o consolidômetro e submetidas a duas pressões: 50 e 400 kPa, além das amostras testemunhas que não foram tensionadas. Esses tratamentos resultaram em duas condições de vinhaça (com e sem), três condições de umidade (PMP, CC e US) e três condições de pressão (0, 50 e 400 kPa), para duas profundidades de amostragem, com três repetições.

3.4.3 Análise estatística

Os valores de pressão de preconsolidação foram plotados em função das diferentes umidades, para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo. As equações de regressão (modelos de sustentabilidade da estrutura) foram obtidas utilizando-se o programa Sigma Plot 10.0 e as comparações das regressões foram realizadas seguindo o procedimento descrito em Snedecor & Cochran (1989), o qual permite testar as equações fornecidas através do Excel.

3.4.4 Ensaio de Proctor Normal

Na realização do ensaio de Proctor Normal foram utilizados 5 kg de solo provenientes das amostras deformadas, que foram previamente secos ao ar e peneirados em peneira de malha de 4,76 mm. O corpo de prova consistiu de três camadas, que foram submetidas a 25 golpes por camada com um soquete de 2,5 kg; cada camada ocupou 1/3 do volume do cilindro. Após compactado, o corpo

de prova foi extraído, coletando-se uma amostra do seu centro para a determinação da umidade e cálculo da densidade do solo.

Após a obtenção dos 6 valores de densidade do solo (D_s) e de umidade gravimétrica (U), plotaram-se os resultados de D_s em função da umidade (Stancati et al.,1981). Ajustou-se, a seguir, um polinômio de segundo grau, obtendo-se, então, a curva de compactação: $D_s = aU^2 + bU + c$. A umidade ótima (ou crítica) de compactação foi obtida pela expressão: $U_{ót.} = (-b/2a)$ e a densidade do solo máxima $D_{s_{máx.}} = (-\Delta/ 4a)$ (Miranda & Dias Júnior, 2000), sendo que $\Delta = b^2 - 4ac$.

3.5 Ensaio de salpicamento de partículas

3.5.1 Ensaio com simulador de chuvas

O simulador de chuvas consistiu de um reservatório formador de gotas de 24 cm de diâmetro e 40 cm de altura, perfurado e com agulhas hipodérmicas no fundo (Marca Nipro – 20 x 5,5) em uma malha 12 x 12 cm e espaçadas 1,5 cm umas das outras (Figura 3). O reservatório foi instalado a uma altura de 4 m, apoiado em um tubo de PVC de 25 cm de diâmetro, fixado à parede por meio de braçadeiras. A função do tubo de PVC foi evitar a influência de correntes de vento na trajetória das gotas. O reservatório formador de gotas foi conectado a um reservatório de água na mesma altura, colocado sobre uma base fixa na parede, estabelecendo-se o sistema de vasos comunicantes (sistema de Mariotte). O objetivo foi obter uma carga constante de água dentro do reservatório formador de gotas durante a simulação de chuva (Ribeiro, 2006).

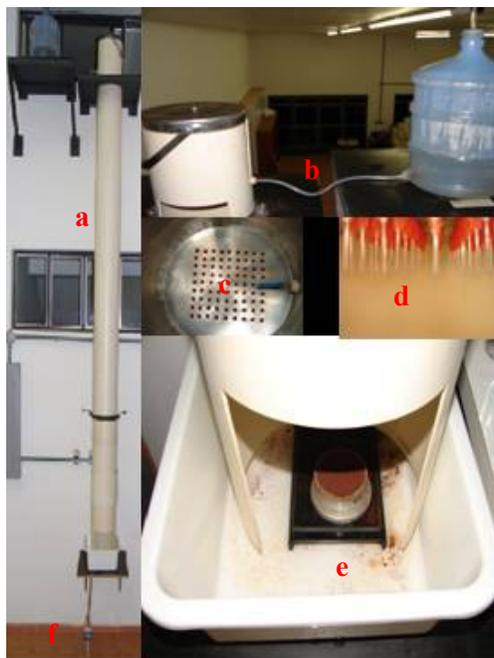


FIGURA 3 a. Representação esquemática do minissimulador de chuva. b. Reservatório de água interligado ao reservatório de gotas. c. Fundo do reservatório formador de gotas. d. Agulhas hipodérmicas. e. Local para colocação da amostra e coleta da água da chuva e do material salpicado. f. Garrafa tipo *Pet* para coleta de água e sedimentos.

Com a variação de alturas da carga de água no reservatório formador de gotas, obtiveram-se diferentes intensidades de precipitação, aumentando-se a intensidade com o aumento da carga de água no reservatório formador de gotas (Figura 4). A intensidade de precipitação foi calculada de acordo com a coleta realizada na base, em intervalos de tempos, utilizando-se um recipiente com abertura de igual diâmetro da amostra de solo utilizada, de acordo com a seguinte equação:

$$I = [V/S/t] \cdot 60$$

Em que:

I : intensidade de precipitação (mm h⁻¹)

V : volume de água coletado (L)

S : área de secção de coleta (m²)

t: tempo de teste (8 minutos; correspondente ao menor tempo onde se tem a probabilidade de ocorrência de chuvas erosivas na região de Lavras, MG).

A relação entre a intensidade e altura de água no reservatório foi utilizada como referência inicial para ajustar a intensidade de precipitação esperada. Periodicamente foi feita a retirada de bolhas de ar nas agulhas, bem como a medição da intensidade de precipitação, antes de cada ensaio.

Durante todo o ensaio foi aplicada chuva de intensidade de 150 mm h⁻¹, com tempo de duração de 8 minutos, correspondendo ao tempo de retorno de 10 anos. Esse valor foi obtido por meio da equação de chuvas intensas para o município de Lavras, MG (Mello et al., 2001). Com base na intensidade e duração da precipitação e nas características da chuva simulada (tamanho da gota, altura, tempo de queda e velocidade terminal da gota), foi calculada a energia cinética correspondente, expressa em MJ ha⁻¹.

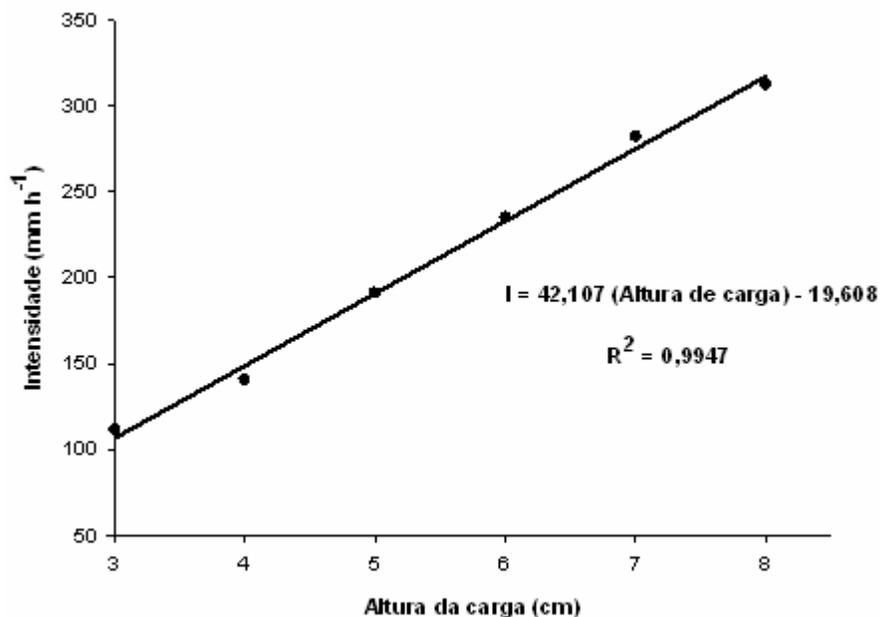


FIGURA 4 Relação da intensidade de precipitação com a carga de água no reservatório formador de gotas medida pelo pluviômetro.

A escolha da chuva de 150 mm h⁻¹ foi baseada em De Maria (1994), onde chuvas erosivas são aquelas em que, entre outros critérios, a energia cinética total seja superior a 3,6 MJ ha⁻¹. Assim sendo, o valor de energia cinética calculada está dentro do critério adotado.

3.5.2 Procedimento para o ensaio de salpicamento

Foram coletadas 108 amostras indeformadas, conforme descrição anterior. A quantidade total de amostras corresponde a duas profundidades de coleta (horizontes Ap e Bw); dois tratamentos (com e sem vinhaça); duas pressões de preconsolidação (50 e 400 kPa), além da testemunha; três umidades

(Ponto de murcha permanente – PMP - , Capacidade de campo – CC – e umidade de saturação – US), com três repetições.

Após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório, preparadas e saturadas com água destilada por 48 horas em uma bandeja, mantendo-se o nível de água a 2/3 da altura da amostra, repetindo-se o mesmo procedimento para as amostras saturadas com vinhaça. Em seguida, as amostras foram colocadas na projeção do tubo de PVC, de modo que o centro da amostra coincidissem com o centro do reservatório formador de gotas.

Todo o material de solo salpicado, juntamente com a água, foi recolhido em garrafas de plástico do tipo *Pet* com capacidade de dois litros. As garrafas permaneceram em descanso o tempo suficiente para que houvesse a decantação do sedimento. Em seguida, foi descartado o sobrenadante, transferindo-se o sedimento para béqueres com capacidade de 250 mL e levado à estufa a 105°C por 24 horas para obtenção da massa de sedimentos. Por fim, a quantidade de sedimentos foi relacionada com a área da amostra, sendo expressa em $t\ ha^{-1}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Efeito da vinhaça nos limites de consistência

Na Tabela 6 são apresentados os valores dos limites de consistência. Não houve diferenças significativas entre tais limites pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, ao analisar a zona de friabilidade, observa-se que as amostras que sofreram aplicação de vinhaça na profundidade de 60 – 63 cm apresentaram maior intervalo. Isso, do ponto de vista prático é relevante, pois representa uma faixa mais ampla de umidade em que podem ser trabalhadas, enquanto as outras amostras, principalmente aquelas onde se aplicou vinhaça na camada superficial ficam limitadas a uma faixa mais estreita de umidade.

TABELA 6 Limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), limite de contração (LC) e zona de friabilidade (ZF), para as camadas de 0 - 3 cm e 60 - 63 cm do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) sob influência da vinhaça (média de 3 repetições).

Vinhaça	LL	LP	LC	ZF ¹
	-----kg kg ⁻¹ -----			
	0-3 cm			
Sem	0,44	0,30	0,18	0,12
Com	0,45	0,24	0,16	0,08
	60-63 cm			
Sem	0,42	0,29	0,18	0,11
Com	0,43	0,27	0,12	0,15

¹ ZF = LP – LC.

4.2 Efeito da vinhaça no modelo de compressibilidade

Pela análise da Figura 5, verifica-se que a σ_p diminui em função do aumento dos teores de água no solo, independentemente da profundidade ou do tratamento estudado. Para verificar as possíveis alterações da estrutura do LVA causadas pelos diferentes tratamentos, os MCSCs foram comparados nas diferentes profundidades dentro de cada condição do tratamento (Tabela 7).

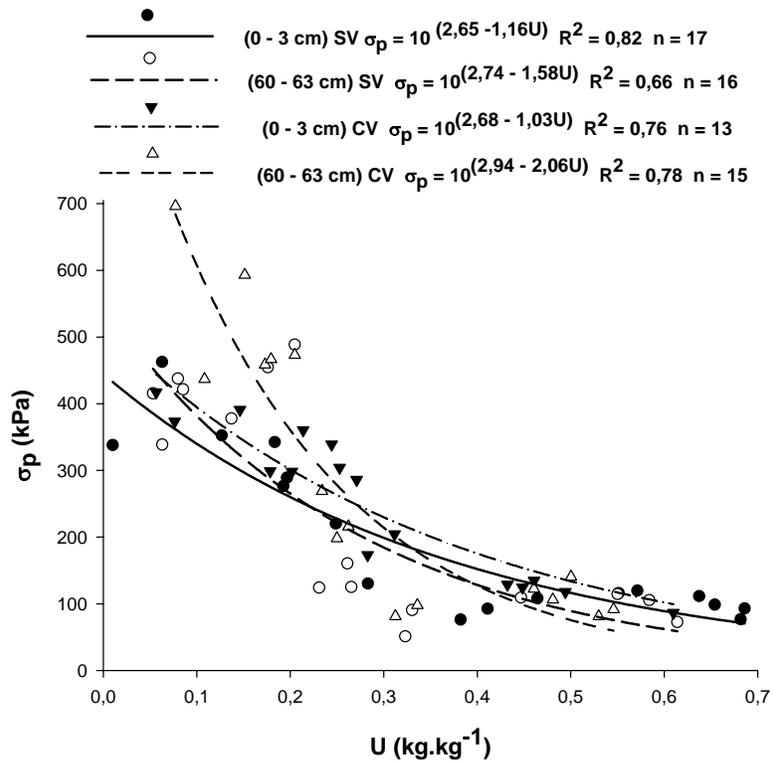


FIGURA 5 Modelo de capacidade de suporte de carga para o Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem nas profundidades de 0-3 cm e 60-63 cm, para as condições com (CV) e sem vinhaça (SV).

TABELA 7 Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga⁽²⁾ do Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem com e sem aplicação de vinhaça em duas profundidades.

Condição	Profundidade (cm)	F	F	
			Coefficiente angular, b	Intercepto da regressão, a
Sem vinhaça	0-3 x 60-63	H	ns	ns
Com vinhaça	0-3 x 60-63	H	ns	ns
Sem vinhaça x	0-3 e 60-63 x	H	ns	ns
Com vinhaça	0-3 e 60-63			

⁽¹⁾Snedecor & Cochran (1989); ⁽²⁾ $\sigma_p = 10^{(a + bU)}$; H: homogêneo; ns: não-significativo.

Nesta tabela pode-se visualizar a comparação entre as equações obtidas em cada profundidade e condição. Percebe-se que as equações não foram diferentes estatisticamente entre si e, portanto, a capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) da superfície e subsuperfície, podem ser representadas por uma única equação.

Devido a isso, uma nova equação foi ajustada, considerando-se todos os valores de σ_p e U, obtendo-se um único MCSC para as duas profundidades e condições, resultando em apenas uma curva que descreve a compressão do solo (Figura 6).

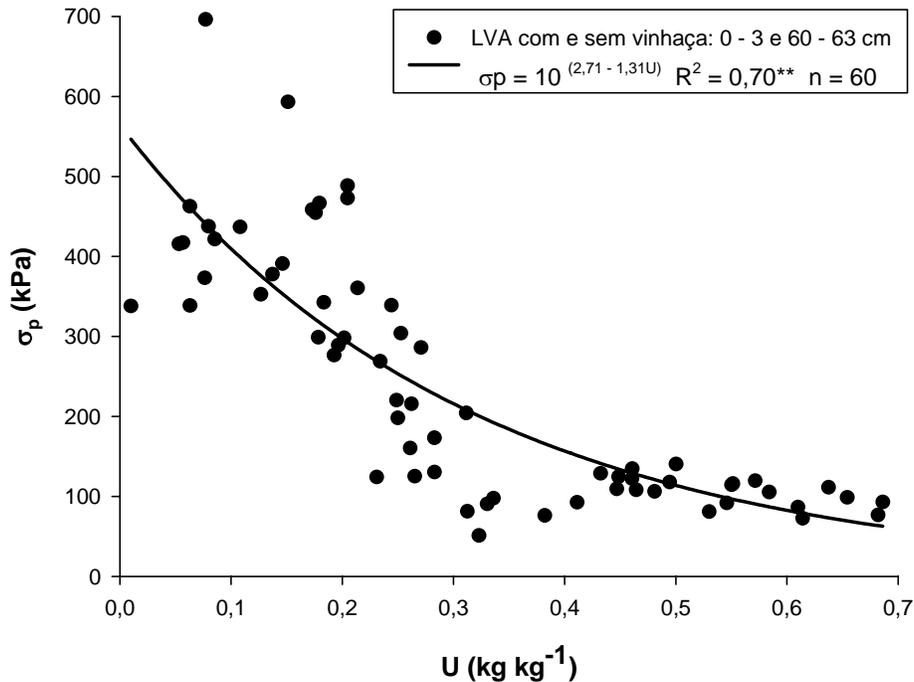


FIGURA 6 Pressões de preconsolidações (σ_p) em função da umidade (U) do Latossolo Vermelho-Amarelo, para as condições com e sem vinhaça, nas profundidades de 0 – 3 cm e 60 – 63 cm.

Os resultados apresentados na Figura 6 indicam uma homogeneidade quanto à CSCS, nas duas profundidades do LVA, quando submetido à condição com e sem vinhaça.

4.3 Efeito da vinhaça no ensaio de Proctor Normal

Na Figura 7, os valores de umidade correspondentes à densidade máxima, denominada umidade ótima de compactação (Stancati et al., 1981)

corroboram os resultados obtidos por Silva et al. (1986), Dias Júnior & Estanislau (1999), Dias Júnior & Miranda (2000) e Santos et al. (2005).

Comparando-se as curvas de compactação da Figura 7, observa-se que a umidade ótima de compactação das amostras que receberam vinhaça foi menor do que na condição sem vinhaça. Isso significa que, a aplicação de vinhaça, independentemente da profundidade, facilita a compactação a menores graus de umidade, especialmente na camada superficial. A umidade ótima de compactação cresce na seguinte ordem: 60 – 63 cm CV < 0 – 3 cm CV < 60 – 63 cm SV < 0 – 3 cm SV.

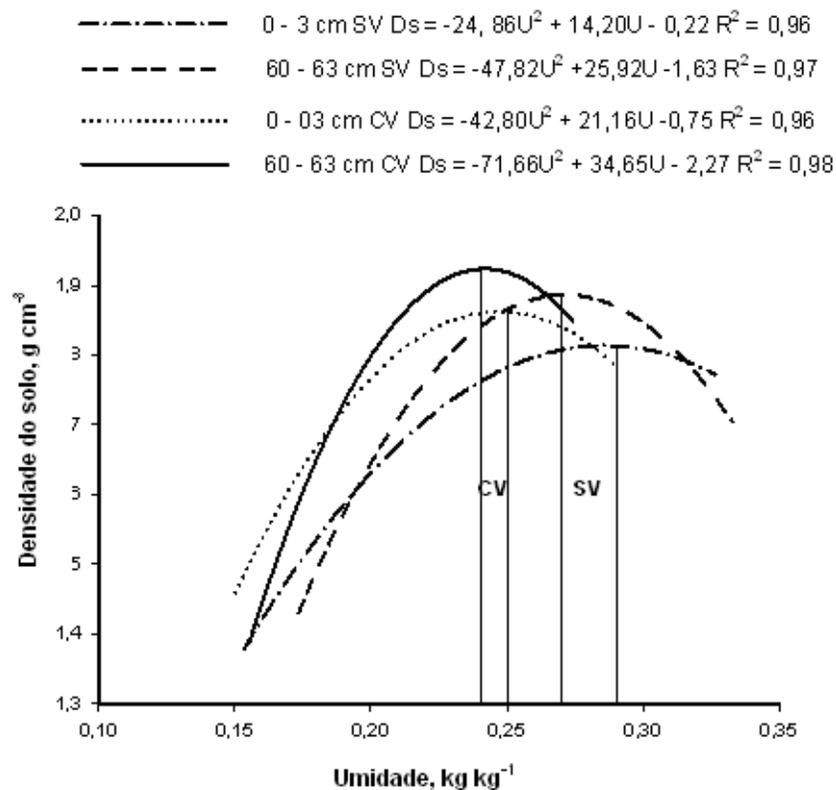


FIGURA 7 Curvas de compactação do LVA; 2 profundidades e 2 condições. SV = sem vinhaça; CV = com vinhaça.

TABELA 8 Densidade do solo, densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação para o LVA em duas profundidades, nas condições com (CV) e sem vinhaça (SV).

Profundidade -----cm-----	Condição	Dp	Ds	Ds _{máx}	U _{ót}	PMP	CC
			-----g cm ⁻³ -----		-----kg kg ⁻¹ -----		
0-3	SV	2,63	0,96	1,81	0,29	0,23	0,33
	CV			1,86	0,25		
60-63	SV	2,57	0,98	1,89	0,27	0,20	0,29
	CV			1,92	0,24		

Dp: densidade de partículas; Ds_{máx}: densidade do solo máxima; U_{ót}: umidade ótima de compactação.

As menores densidades do solo máximas encontradas na camada superficial mostram o efeito da matéria orgânica do solo em atenuar as forças de energia aplicadas no ensaio de Proctor Normal (Dias Júnior & Miranda, 2000; Mentges et al., 2007). A grande capacidade de retenção de água da matéria orgânica reduz a quantidade de água entre as partículas minerais do solo, sendo necessário maior teor de água para que a densidade máxima do solo seja atingida (Camargo & Alleoni, 1997).

Thomas et al. (1996) constataram o aumento da suscetibilidade à compactação de solos de textura média, refletida pela redução da umidade ótima de compactação, quando o sistema de manejo passou de plantio direto para preparo convencional. No presente estudo, a redução dos valores de umidade ótima de compactação nos solos com adição de vinhaça alerta para o fato de que esses solos podem sofrer compactação máxima, mesmo quando são trabalhados com teores de água mais baixos. Entretanto, do ponto de vista da engenharia civil, para a construção de estradas de terra pode se fazer o uso de vinhaça, pois haverá uma economia de água e maior resistência do solo.

O solo estudado, nas duas condições, apresentou valores semelhantes de $D_{S_{m\acute{a}x}}$ e $U_{\acute{o}t}$. No ensaio de Proctor Normal, as amostras são trabalhadas com estrutura não preservada, o que ajuda a explicar tais resultados.

4.4 Efeito da vinhaça na compressibilidade e quantidade de salpicamento

Na Figura 8 observa-se, de maneira geral, que há um aumento na quantidade de material salpicado, quando da aplicação da maior pressão de preconsolidação (400 kPa), sendo tal efeito mais destacado para as amostras com umidade equivalente à capacidade de campo e na umidade de saturação. Exceção deve ser registrada quando da aplicação de vinhaça nas amostras da camada de 60-63 cm, onde foi observada uma redução na quantidade de material salpicado quando as amostras foram mantidas com umidade equivalente à capacidade de campo.

A ocorrência de maior salpicamento nas amostras mais compactadas se deve às modificações na superfície das amostras. Com a aplicação de cargas na superfície, ocorre uma reorganização dos agregados, aumento da densidade do solo e redução do espaço poroso. Isso torna a superfície das amostras menos rugosas, dificultando a dissipação da energia proveniente do impacto das gotas de chuva. As gotas de chuva ao colidirem com solo têm sua energia cinética transformada em energia de cisalhamento, o que leva ao salpicamento das partículas (“splash”). Nas amostras menos compactadas a rugosidade da superfície ajuda a dissipar parte dessa energia.

Condições de superfície também têm efeito sobre o ângulo de salpicamento das partículas. Em condições menos compactadas e de maior rugosidade na superfície, as partículas tendem a serem salpicadas mais verticalmente, formando ângulos próximos de 45° com a superfície. Já em condições mais compactadas, as partículas são salpicadas mais horizontalmente, ou seja, mais rasantes com a superfície. A quantidade de material salpicado é

dependente da energia cinética das gotas de chuva e da resistência da superfície. Para uma mesma condição (no tocante aos atributos do solo), a quantidade de material salpicado, em mg/gota, aumenta com o ângulo de salpicamento (Al-Durrah & Bradford, 1982).

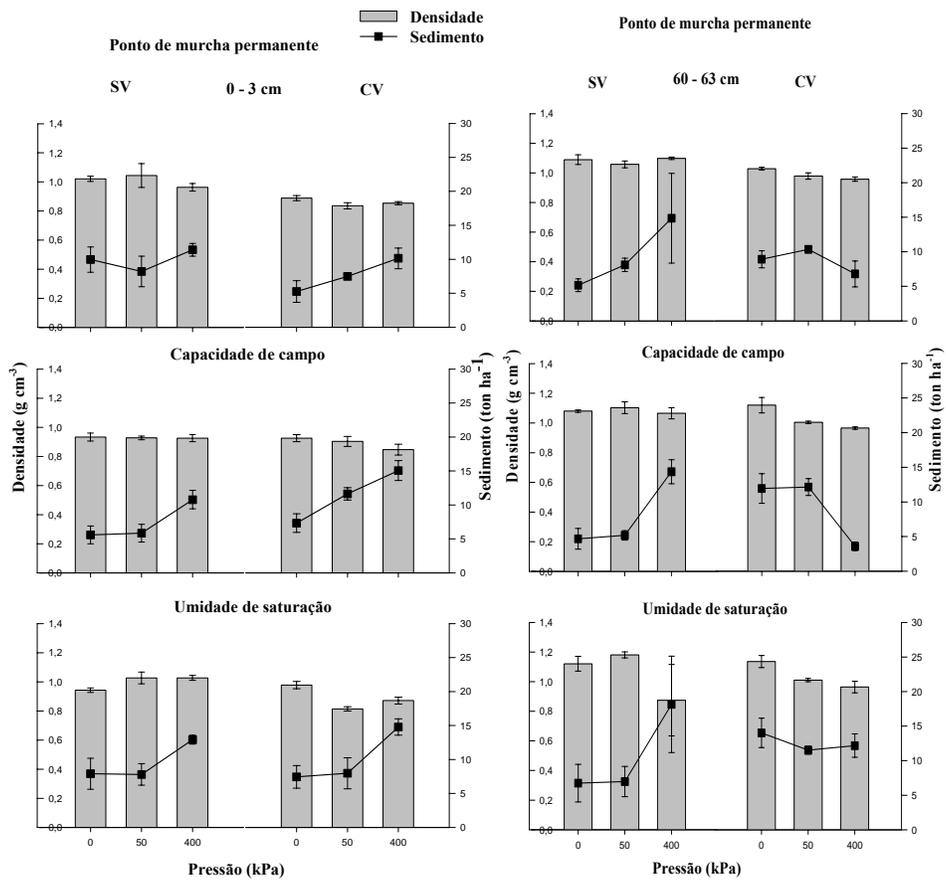


FIGURA 8 Densidade do solo e perdas de solo em função das umidades e pressões aplicadas nas amostras com (CV) e sem vinhaça (SV), para duas profundidades.

O efeito mais pronunciado do aumento da pressão aplicada sobre a maior quantidade de material salpicado nas amostras à capacidade de campo e na umidade de saturação, comparativamente àquelas com umidade equivalente ao ponto de murcha permanente, se deve ao fato de que com o aumento do grau de umidade do solo as amostras são mais facilmente compressíveis (Kondo & Dias Júnior, 1999; Dias Júnior et al., 2002; Silva & Cabeda, 2006; Silva et al., 2006; Araújo Júnior, 2008) tornando-se, portanto, mais compactadas e menos rugosas na superfície.

A presença de vinhaça condicionou as amostras ao maior salpicamento, na camada superficial e com umidade na capacidade de campo, não havendo diferença nas demais condições de umidade para essa camada. Já na camada subsuperficial, na condição de maior compactação (400 kPa), a vinhaça propiciou aumento da resistência da amostra. Isso se deve à maior facilidade de dispersão de partículas que, sob efeito da pressão, favorece melhor ajuste, aumentando a resistência. Esse fato aponta para a possibilidade de compactação em solo que recebe vinhaça e é submetido a tráfego intenso de máquinas.

Na Figura 9, a pressão de preconsolidação revelou-se menor que a pressão máxima aplicada no ensaio (400 kPa). Desse modo, há um aumento do material salpicado devido à destruição da estrutura natural do solo, em relação às amostras em que não foi adicionada vinhaça na profundidade de 60 – 63 cm. Já na superfície, a aplicação de vinhaça ou a ausência da mesma conferiu valores próximos de produção de sedimentos. Isso pode ser devido ao fato do tempo de contato entre vinhaça e solo que foi de apenas 48 horas. Talvez um tempo maior de incubação ocasionaria um efeito de agregação maior das partículas, ocorrendo uma maior coesão entre agregados e havendo menor produção de sedimentos.

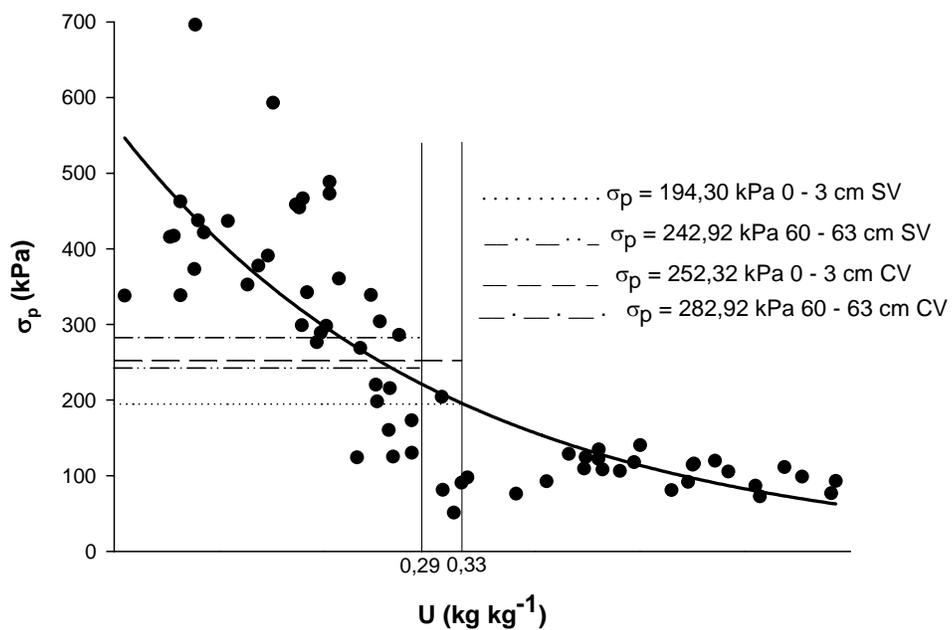


FIGURA 9 Valores médios de pressão de preconsolidação (σ_p) e umidade (U) na capacidade de campo, sem (SV) e com aplicação de vinhaça (CV), em duas profundidades.

5 CONCLUSÕES

Não houve diferença significativa para o Limite de Consistência com e sem a aplicação de vinhaça, nas duas profundidades estudadas.

A capacidade de suporte de carga do solo (CSCS) da superfície e subsuperfície com e sem aplicação de vinhaça teve o mesmo comportamento.

No ensaio de Proctor Normal, as amostras tratadas com vinhaça tiveram umidade ótima de compactação menor que aquelas sem vinhaça, independentemente da profundidade de amostragem, o que permite uma economia de água e maior resistência do solo, aspectos importantes do ponto de vista de engenharia civil, para a construção de estradas de terra.

De maneira geral, houve um aumento na quantidade de material salpicado à medida que aumentou a pressão aplicada nas amostras.

A adição de vinhaça propiciou maior resistência e menor salpicamento das amostras subsuperficiais submetidas à pressão de 400 kPa, sendo esse efeito mais pronunciado com as amostras à capacidade de campo.

Os resultados deste trabalho apontam para a possibilidade de compactação em solos que recebem aplicação de vinhaça e são submetidos a tráfego intenso de máquinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJAYI, A. E.; DIAS JÚNIOR, M. de S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JÚNIOR, C. F.; VASCONCELOS JÚNIOR, A. I. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, Jan./Mar. 2009.
- ALAKUKKU, L.; WEISSKO, P. F.; CHAMEN, W. C. T.; TIJINK, F. G. J.; VANDER, J. P. L.; PIRES, S.; SOMMER, C.; SPOOR, G. Prevention strategies for field trafficinduced subsoil compaction: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1/2, p. 145-160, Oct. 2003.
- AL-DURRAH, M. M.; BRADFORD, J. M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 1086-1090, Sept./Oct. 1982.
- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influencia do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 124-130, jan./abr. 2000.
- ANDRADE, L. A. B. Cultura de cana-de-açúcar. In: ANDRADE, L. A. B. **Análises físico-químicas e avaliação da presença do cobre em aguardentes de cana por aluminossilicatos**. Lavras: UFLA, 2006.
- ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do estado de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 138, p. 9-14, jun. 1986.
- ARAUJO JÚNIOR, C. F.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B. S. Resistência à compactação de um latossolo cultivado com caféiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, n. 1, p. 23-32, jan./abr. 2008.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1985. 355 p.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986a. p. 363-375.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America-American Society of Agronomy, 1986b. p. 377-382.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma agrária. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84 p.

BRITO, F. L.; ROLIN, M. M.; SILVA, J. A. A.; PEDROSA, E. M. R.; Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 318-323, set./dez. 2007.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; CRUZ, E. S.; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 385-389, set./dez. 2002.

CASAGRANDE, A. The determination of the pré-consolidation load and its practical significance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, D-34., 1936, Cambridge. **Proceedings...** Cambridges: Harvard University, 1936. p. 60-64.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Vinhaça: critério e procedimentos para a aplicação no solo agrícola**. São Paulo: CETESB, 2005. 11 p.

CORTEZ, L. A. B.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, F. Biodigestion of vinasse in Brazil. **International Sugar Journal**, Glamorgan, v. 100, n. 1196, p. 403-413, Aug. 1998.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 545-567.

DE MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; DE SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, W. J. de. Atributos físicos de latossolos adubados durante cinco anos com bio sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 67-72, jan. 2004.

DIAS JÚNIOR, M. de S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 55-94.

DIAS JÚNIOR, M. de S. **Compression of three soils under long-term tillage and Wheel traffic**. 1994. 144 p. Thesis (Ph.D. in Soil and Plant Nutrition) – Michigan State University, East Lansing.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; ESTANISLAU, W. T. Graus de compactação e retenção de água de latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 1, p. 45-51, jan./abr. 1999.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; GOMES, A. N.; AZEVEDO, M. R. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas floretais. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 103-114, dez. 2002.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; MIRANDA, E. E. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 24, n. 2, p. 337-346, abr./jun. 2000.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182. jan./fev. 1996.

DIAS JÚNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Apr./June 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. p. 212.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 3, p. 507-514, jul./set. 1999.

FRITTON, D. D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 678-684, May 2001.

GLÓRIA, N. A. Uso agrônômico de resíduos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. p. 1-17.

GLÓRIA, N. A.; ORLANDO FILHO, J. **Aplicação de vinhaça como fertilizante**. São Paulo: Coopercucar, 1983. 38 p.

GUY, B. T.; DICKINSON, W. T.; RUDRA, R. P. The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 30, n. 5, p. 1378-1385, Sept./Oct. 1987.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **Na introduction to geotechnical engineering**. Englewood: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactibility and compressibility. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compactation in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. v. 11, p. 45-69.

HUDSON, N. **Soil conservation**. 3. ed. Ames: Iowa State University, 1995. 391 p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JÚNIOR, M. S.; TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 1, p. 11- 18, jan./fev. 2001.

KONDO, M. K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. 1998. 105 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

KONDO, M. K.; DIAS JÚNIOR, M. de S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 211-218, maio/ago. 1999.

LARSON, W. E.; GUPTA, S. C. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p. 1127-1132, Nov. 1980.

- LEMOS, M. S. S.; BAHIA, V. G. Erosividade da chuva. **Informe Agropecuario**, Belo Horizonte, v. 16, n. 176, p. 25-31, maio 1992.
- LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P., IMHOFF, S.; LIMA, H. V.; LEÃO, T. P. Homogeneidade da compactação de um latossolo vermelho-amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, n. 3, p. 409-414, dez. 2004.
- MARIA, I. C. de. Cálculo da erosividade da chuva. In: LOMBARDI NETO, F.; CASTRO, O. M. de; DECHEN, S. C. F.; VIEIRA, S. R.; MARIA, I. C. de. **Manual de programas de processamento de dados de campo e de laboratório para fins de experimentação em conservação do solo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1994.
- MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 693-698, out./nov. 2001.
- MENTGES, M. I.; FONTANELA, E.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade máxima pelo ensaio de proctor normal para seis solos em diferentes manejos e sua relação com o teste de compressão uniaxial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Resumos...** Gramado: Serrano Centro de Convenções, 2007. 1 CD-ROM.
- PASSARIN, A. L.; RODRIGUEIRO, E. L.; ROBAINA, C. R. P.; MEDINA, C.C. Caracterização de agregados em um latossolo vermelho distroférico típico submetido a diferentes doses de vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 6, p. 1255-1260, nov./dez. 2007.
- PIACENTE, F. J. **Agroindústria canavieira e o sistema de gestão ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá**. 2005. 181 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas.
- PIRES, B. S. **Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um latossolo sob diferentes usos e manejos**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

QUINTELA, A. C. R.; ANDRADE, L. A. B.; CORRÊA, J. B. D.; RESENDE, P. M.; VIEIRA, G. G. Controle de plantas daninhas em cana crua (cultivar RB835089) no sistema integrado palhicho, herbicida e vinhaça. **STAB**: açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v. 20, n. 4, p. 38-42, jul./ago. 2002.

RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo**. 2006. 65 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RÖMKENS, M. J. M.; MILLER, R. D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: A mathematical model. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 35, n. 1-3, p. 237-248, Apr. 1971.

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

SÁ, M. A. C. de; LIMA, J. M. de; CURI, N.; MASSAROTO, J. A.; MARQUES, J. J. G. S. M.; Estimativa da erodibilidade pela desagregação por ultra-som e atributos de solos com horizonte B textural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 691-699, jul. 2004.

SANTOS, G. A. dos; DIAS JÚNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E.; Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas do milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 740-752, jul./ago. 2005.

SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 5, p. 669-678, maio 2002.

SENGIK, E.; RIBEIRO, A. C.; CONDE, A. R. Efeito da vinhaça em algumas propriedades de amostras de solos de Viçosa (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-15, jan./abr. 1988.

SIGMA, P. **Scientific graphing software**: versão 10.0. San Rafael: Jandel Corporation, 2006. 92 p.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 3, p. 921-930, set./dez. 2006.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. W. F.; Alterações físicas e químicas de um argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 76-83, jan./abr. 2006.

SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 91-95, jan./abr. 1986.

SILVA, A. R.; DIAS JÚNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JÚNIOR, C. F. Modelagem da capacidade suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um latossolo amarelo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 1, p. 207-216, jan./abr. 2006.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, jan./abr. 2007.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 1, p. 329-337, jan./abr. 2006.

SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; MARQUES, J. J. G. S. M.; LIMA, L. A.; FERREIRA, M. M.; LIMA, J. M. Resistência ao salpico provocado por impacto químicas e mineralógicas. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 176-182, abr./jun. 1995.

SILVA, R. B.; LIMA, J. L.; DIAS JÚNIOR, M. de S.. Efeito da adsorção de fosfato em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 1, p. 219-226, jan./abr. 1999.

SILVA; R. B.; LANÇAS; K. P.; MIRANDA, E. E. V.; SILVA; F. A. M.; BAIO, F. H. R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State-Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 2, p. 265-270, May 2009.

SILVA, V. M. **Transformações do nitrogênio da vinhaça-¹⁵N e uréia-¹⁵N em dois solos (PV e LR), na presença ou não da palha de cana-de-açúca.** 1997. 92 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods.** 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989. 503 p.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório de mecânica dos solos.** São Carlos: USP, 1981. 208 p.

TAYLOR, H. M.; HENDERSON, D. W. Some effects of organic additives on compressibility of Yolo silt loam soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 88, n. 1, p. 101-106, Jan. 1959.

THOMAS, G. W.; HASZLER, G. R.; BLEVINS, R. L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the proctor test. **Soil Science**, Baltimore, v. 61, n. 3, p. 502-508, Mar. 1956.

TRUMAN, C. C.; BRADFORD, J. M.; FERRIS, J. E. Antecedent water content and rainfall energy influence on soil aggregate breakdown. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1385-1392, Sept./Oct. 1990.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE ACÚCAR. São Paulo: ÚNICA, 2009. Disponível em: <www.unica.com.br>. Acesso em: 22 jun. 2009:

VIEIRA, D. B. **As técnicas de irrigação.** Rio de Janeiro: Globo, 1983. 263 p.

VILELA, L. A. A. **Avaliação do impacto de gotas sobre a superfície de um latossolo vermelho-escuro irrigado por aspersão.** 1995. 76 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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