

# **INFLUÊNCIA DE DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NA COESÃO, RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E ÓXIDOS DE Fe, Si E Al EM SOLO DE TABULEIRO COSTEIRO DE ALAGOAS<sup>(1)</sup>**

**Apolino José Nogueira da Silva<sup>(2)</sup> & Mário Sérgio Vaz Cabeda<sup>(3)</sup>**

## **RESUMO**

**A tensão de cisalhamento e a coesão do solo constituem importantes propriedades físicas do solo, podendo ser influenciadas pelo sistema de manejo e óxidos de Fe, Si e Al do solo. Os efeitos de diferentes sistemas de manejo de solo cultivado com cana-de-açúcar na tensão de cisalhamento, ângulo de atrito interno, coesão do solo e nos teores de óxidos de Fe, Si e Al de um Argissolo Amarelo Coeso foram estudados em quatro áreas da Usina Triunfo, no Estado de Alagoas. Os tratamentos abrangeram: uma área irrigada, uma área não irrigada, uma com aplicação de vinhaça e uma sob floresta nativa, como condição original. Amostras foram tiradas de cada área a 0,2-0,4 m e 0,4-0,8 m de profundidade. Os sistemas sequeiro e irrigado promoveram os maiores aumentos na coesão, ângulo de atrito interno e resistência ao cisalhamento do solo. Os teores de água e de óxidos no solo influíram nos valores de coesão do solo, tendo sido os maiores valores deste atributo obtidos em solos com teores de água mais baixos e solos com maiores teores de óxidos.**

**Termos de indexação: cana-de-açúcar, vinhaça, formação Barreiras, ângulo de atrito interno.**

---

<sup>(1)</sup> Parte de Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em junho de 2004 e aprovado em abril de 2005.

<sup>(2)</sup> Professor da Escola Agrícola de Jundiá, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. Caixa Postal 07, CEP 59280-000 Macaíba (RN). E-mail: ajndas@ufrnet.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). E-mail: mscabeda@uol.com.br

**SUMMARY:** *INFLUENCE OF DIFFERENT USE AND MANAGEMENT SYSTEMS ON COHESION, SHEAR STRENGTH AND Fe, Si AND Al OXIDES IN COASTAL TABLELAND SOILS OF ALAGOAS STATE, BRAZIL*

*The shear tension and soil cohesion are important soil physical properties. They are affected by management systems and the content of Fe, Si and Al oxides in the soil. The effects of different sugarcane management systems on the shear tension, angle of internal friction, soil cohesion, and the contents of Fe, Si and Al oxides in a Cohesive Yellow Argisol were studied in four areas of the Triunfo mill in Alagoas State, Brazil. The treatments consisted of an area cultivated with irrigation and another without irrigation, a site with vinasse application. A native forest area was included as reference for the original conditions. Samples were collected from each site at depths of 0.2–0.4 m and 0.4–0.8 m. The areas cultivated with and without irrigation promoted the greatest increase in soil cohesion, angle of internal friction and soil shear strength. The water and oxide contents affected the soil cohesion; the highest soil cohesion values were obtained in soils with the lowest water and the highest oxide contents.*

*Index terms: sugarcane, vinasse, Barreiras formation, angle of internal friction.*

## INTRODUÇÃO

As características coesivas e friccionais entre as partículas do solo são os fatores que determinam a resistência do solo ao cisalhamento (Pinto, 2000), sendo esta definida como a tensão máxima cisalhante que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. De acordo com McCormack & Wilding (1979), a resistência do solo ao cisalhamento é influenciada pela forma e distribuição de partículas do solo, estrutura, densidade, teor de água, tipo de argilomineral, tipo e quantidade de cátions presentes e forças de repulsão e atração entre partículas. Em solos de textura arenosa, a resistência ao cisalhamento depende basicamente do atrito entre as partículas, cujo ângulo de atrito interno depende da forma dos grãos, distribuição de diâmetro dos grãos e grau de compactação do solo. Para solos argilosos, a resistência ao cisalhamento depende não só do atrito entre partículas, mas também da coesão do solo e da sua estabilidade estrutural (Lebert & Horn, 1991).

A coesão do solo é resultado da atração eletrostática entre as superfícies de partículas que estão muito próximas, e, ou, resultante do efeito de agentes cimentantes (óxidos e argila) (Mitchell, 1976; Kímpe et al., 1983). Outra parcela da coesão do solo é resultado da tensão superficial da água nos capilares do solo, que tende a aproximar as partículas entre si, sendo uma parcela da resistência ao cisalhamento de solos parcialmente saturadas (Fredlund & Rahardjo, 1993).

A eluviação de argila dispersa dos horizontes superficiais para horizontes subsuperficiais do solo é um processo natural, denominado argiluviação (Fanning & Fanning, 1989; Cabrera-Martinez,

1989). No entanto, a migração de partículas de argila para horizontes subsuperficiais é um processo significativo em solos cultivados, graças às modificações na estrutura do solo causadas pelos sistemas de manejo, que deixam a fração argila num maior grau dispersão, em relação às condições originais do solo (Nielsen et al., 1972). A migração de argila fina para subsuperfície pode provocar mudanças importantes nas propriedades físicas do solo, bem como originar camadas mais adensadas, aumento da coesão do solo e restrição à penetração de raízes (Mullins et al., 1990; Silva, 2003). A deposição de argila nas paredes dos poros e sobre os grãos de quartzo causa um arranjo mais compacto de partículas, aumentando o adensamento das camadas subsuperficiais (Mitchell, 1976; Souza, 1996).

Além da argila dispersa, óxidos de ferro, silício, alumínio e matéria orgânica eluviam e acumulam em camadas subsuperficiais do solo (Duncan & Franzmeier, 1999). Este fenômeno decorre da co-migração dos óxidos com a fração argila do solo, como verificado por alguns autores (Almeida et al., 1997; Silva, 2000; Nunes et al., 2002). Franzmeier et al. (1996) enfatizam que compostos de ferro e silício presentes em camadas superficiais movem-se através do perfil do solo, graças às variações do pH da solução, que promovem a dispersão da fração argila e sua co-migração com óxidos.

O aumento do teor de argila e óxidos nas camadas subsuperficiais pode aumentar a coesão dos solos de tabuleiros, prejudicando o desenvolvimento radicular da planta. A interação da fração argila com óxidos de Fe, Si e Al promove uma ação cimentante, resultando num aumento da coesão quando o solo está com baixo teor de água (McKeague & Sprout, 1975; Steinhardt et al., 1982; Kímpe et al., 1983).

A influência de óxidos de ferro no desenvolvimento da coesão do solo foi constatada por Chartres et al. (1990), que verificaram redução significativa nos valores de coesão do solo e resistência ao cisalhamento após remoção dos óxidos de Fe de baixa cristalinidade com solução de oxalato de amônio, evidenciando o efeito desses óxidos como agentes cimentantes em horizontes adensados de solos da Austrália (Hardsetting soils). Nos solos coesos de Tabuleiros Costeiros do Brasil, a influência dos óxidos de Fe, Si e Al como agentes cimentantes nas camadas subsuperficiais também tem sido verificada por alguns autores (Jacomine, 1996; Ribeiro, 1998; Filizola et al., 2001; Giarola et al., 2001).

O desenvolvimento da coesão entre as partículas do solo também é fortemente influenciada pelo teor de água do solo. O aumento da coesão com a redução do teor de água do solo tem sido verificado por alguns autores (McKyes et al., 1994; Boeni, 2000). Arvidsson et al. (2001) verificaram um aumento da coesão do solo de 87 para 154 kPa em solo de textura média, quando diminuiu o teor de água no solo de 0,17 para 0,11 kg kg<sup>-1</sup>, evidenciando o grande efeito da umidade na coesão do solo. De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993), a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, havendo um conseqüente aumento da atração entre elas, resultando num acréscimo da coesão do solo.

Objetivou-se com este trabalho verificar o efeito de sistemas de manejo com cana-de-açúcar nos teores de óxidos no solo, no fracionamento de argila, na coesão, ângulo de atrito e resistência ao cisalhamento do solo, bem como avaliar o efeito do teor de água na coesão de um Argissolo Amarelo Coeso de Tabuleiros Costeiros.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no município de Boca da Mata no Estado de Alagoas, em áreas da Usina Triunfo Agroindustrial. Estudou-se um Argissolo Amarelo Coeso Latossólico textura média/argilosa, escolhido com base em levantamento pedológico realizado pela Usina (Prosped, 1992). Esse solo é derivado de sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras, cuja fração areia é constituída principalmente por quartzo e na fração argila predomina a caulinita, com baixos teores de óxidos de ferro (Jacomine et al., 1975). O clima da área de estudo é tropical chuvoso, com verão seco, sendo a precipitação média anual em torno de 1.200 mm (Nimer, 1989) e a temperatura média anual próxima de 29 °C. De acordo com Jacomine et al. (1975), o relevo da região é plano e suave ondulado, que é característico da unidade geomórfica dos Tabuleiros Costeiros.

Três sistemas de manejo do solo cultivado com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) foram selecionados, a saber: uma área sob cultivo de sequeiro, uma sob cultivo irrigado e uma área cultivada com aplicação de vinhaça. Esses manejos foram comparados entre si e em relação a uma testemunha absoluta, representada por solo em condições naturais (floresta subperenifolia). Todos os tratamentos estão situados numa mesma posição topográfica, em topo plano de platô costeiro. No quadro 1, estão apresentadas algumas características físicas e químicas do solo estudado.

No plantio da cana planta ou a cada 5–6 anos, quando da renovação do canavial, o preparo do solo consiste em subsolagem a 35 cm de profundidade,

**Quadro 1. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), carbono orgânico total (COT) e argila total nos horizontes coesos do Argissolo Amarelo estudado**

Camada	Sistema de uso e manejo			
	Mata	Sequeiro	Irrigado	Vinhaça
m				
			Ds, Mg m <sup>-3</sup>	
0,2–0,4	1,41	1,53	1,65	1,44
0,4–0,8	1,38	1,55	1,62	1,39
			Pt, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	
0,2–0,4	0,473	0,427	0,406	0,455
0,4–0,8	0,485	0,422	0,410	0,479
			COT, g kg <sup>-1</sup>	
0,2–0,4	17,1	8,8	10,8	14,1
0,4–0,8	5,8	5,8	6,6	7,6
			Argila total, g kg <sup>-1</sup>	
0,2–0,4	263,0	303,1	312,1	295,1
0,4–0,8	411,8	472,2	486,1	453,9

duas gradagens pesadas com profundidade de 25 cm e abertura de sulcos de 25 cm de profundidade com sulcador. Este preparo do solo é feito nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob os sistemas sequeiro, irrigado e com vinhaça. No plantio, os colmos são distribuídos manualmente no sulco, e, na colheita, são cortados manualmente e carregados para caminhão com carregadeira convencional. Em todas as áreas cultivadas, a cana-de-açúcar é queimada antes da colheita.

Na área com fertirrigação com vinhaça, são aplicados anualmente  $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça diluída por ciclo da cultura e a aplicação é feita por aspersor de  $150 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  de vazão. Também são aplicados  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  de torta de filtro na renovação do canal. Este manejo é aplicado há 25 anos consecutivos nesta área. Na área irrigada, é aplicada uma lâmina de 120 mm de água por ciclo da cultura, utilizando-se de aspersor de  $100 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  de vazão, sendo esse tratamento aplicado há 25 anos consecutivos. A adubação da cana planta é feita de acordo com análise do solo, sendo, geralmente, administrados 60, 90 e  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , respectivamente, e  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  de torta de filtro, e, na cana soca, 60 e  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$  respectivamente. A área de sequeiro é cultivada há 30 anos com este sistema de manejo e nunca foi irrigada ou fertirrigada. As doses de adubo e torta de filtro são as mesmas aplicadas na área irrigada.

As amostras foram coletadas ao acaso e, nas áreas cultivadas, foram retiradas num ponto situado a 40 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar. Com exceção das análises em que se utilizaram amostras indeformadas, as demais amostras foram pré-tratadas, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com abertura de 2 mm.

Para estudar a distribuição de óxidos de Fe, Si e Al ao longo do perfil do solo, amostras foram retiradas nas profundidades de 0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,8 m. Os óxidos de Fe, Al e Si livres foram extraídos com citrato-ditionito-bicarbonato de sódio e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, conforme Mehra & Jackson (1960). Os óxidos de Fe, Al e Si amorfos foram extraídos com oxalato ácido de amônio e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, conforme McKeague & Day (1966).

Amostras de solo foram retiradas nas profundidades de 0–0,2, 0,2–0,4 e 0,4–0,8 m, para realização do fracionamento de argila por centrifugação, conforme Jackson (1965), sendo a argila fracionada em argila grossa (2–0,2  $\mu\text{m}$ ) e argila fina com diâmetro < 0,2  $\mu\text{m}$ .

Para o ensaio de cisalhamento direto, foram retiradas amostras indeformadas com auxílio de amostrador com anéis metálicos rígidos com 6,5 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura, nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m e nos quatro tratamentos estudados. As amostras foram coletadas em três

repetições distribuídas em posições aleatórias em cada tratamento e, posteriormente, acondicionadas com filmes de PVC e espuma para serem transportadas sem perturbação até o laboratório. O ensaio de cisalhamento foi realizado em equipamento de cisalhamento direto, sendo a amostra colocada em caixa bipartida na qual foram aplicadas as tensões (normal e cisalhante), com velocidade de deslocamento de  $0,3 \text{ mm min}^{-1}$ , até ocorrer a ruptura da amostra ao longo de um plano horizontal.

Para a umidade de  $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ , os parâmetros intercepto de coesão e ângulo de atrito interno foram determinados, conforme Lambe (1951), ajustando-se à equação de Coulomb (Equação 1) os valores de tensão de cisalhamento obtidos com a aplicação de tensões normais de 0; 104,1 e 208,1 kPa.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

em que:  $\tau$  tensão cisalhante (kPa);  $c$  = intercepto de coesão do solo (kPa);  $\sigma_n$  = tensão normal aplicada (kPa) e  $\phi$  = ângulo de atrito interno do solo ( $^\circ$ ).

Com adaptações no equipamento de cisalhamento direto, a coesão do solo foi determinada sem aplicação de tensão normal ( $\sigma_n = 0 \text{ kPa}$ ), para os teores de água de 0,08 e 0,14  $\text{kg kg}^{-1}$ .

Para as observações micromorfológicas das alterações na matriz do solo, amostras de solo foram preparadas por metalização com o elemento ouro e foram analisadas com microscópio eletrônico de varredura (MEV), com voltagem de aceleração de 15 kV, sendo usadas magnificações variando de 200 a 10.000 vezes. As micrografias foram obtidas por câmera acoplada ao MEV.

Os dados foram submetidos à análise de variância e a comparação das médias realizada pelo teste de Tukey a 5 % de significância, usando-se o software SANEST. As análises de regressão foram feitas com o software SigmaStat 2.03.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

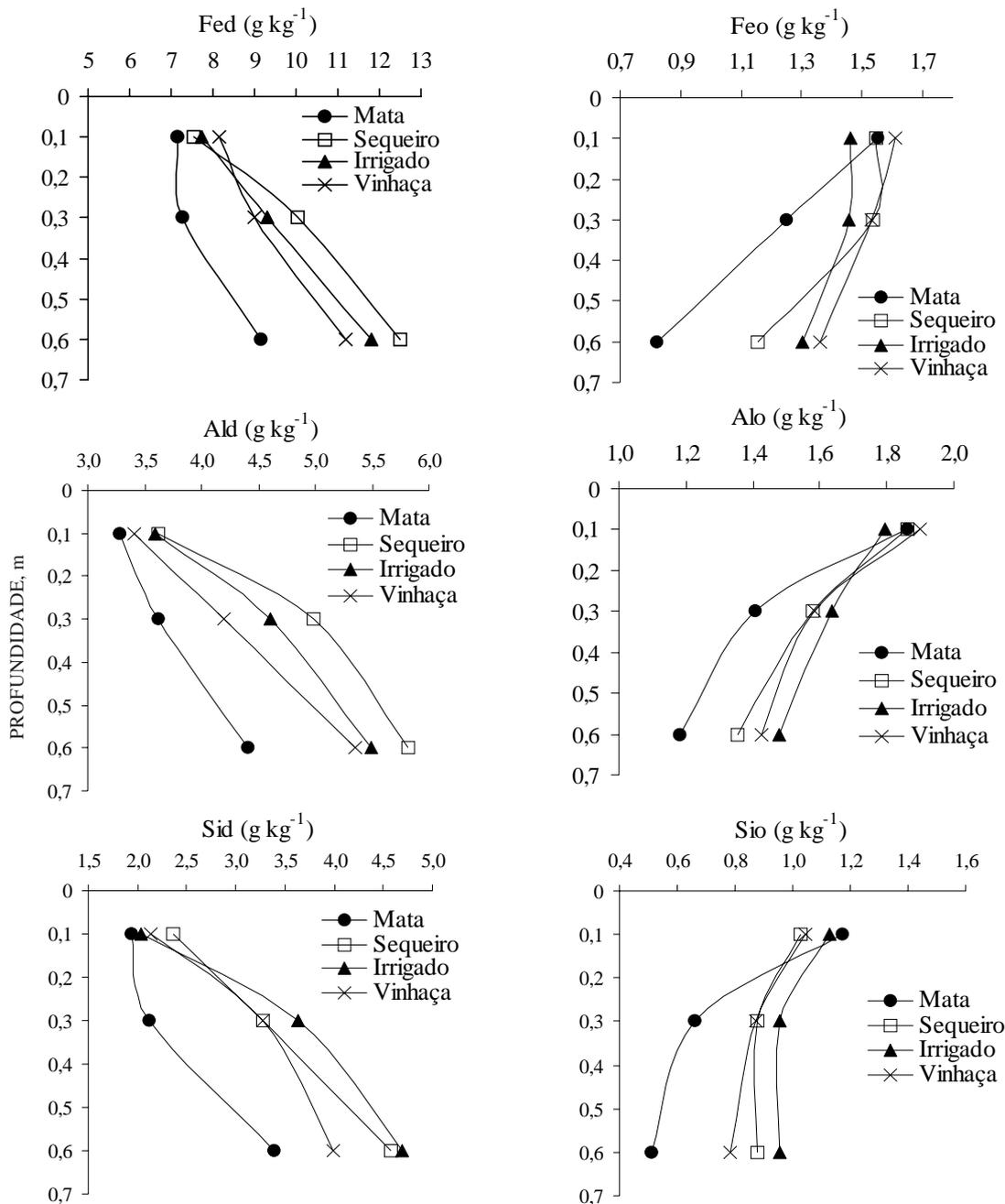
Os teores de óxidos de ferro, silício e alumínio extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed, Sid e Ald) mostraram-se compatíveis com os teores encontrados em solos similares de tabuleiros (Boulet et al., 1998; Filizola et al., 2001). Estes elementos aumentaram em profundidade nos quatro tratamentos estudados (Figura 1), o que tem sido verificado por outros autores (Silva, 2000; Nunes et al., 2002), em virtude do maior teor de argila nas camadas subsuperficiais (Quadro 1).

Os solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça apresentaram os maiores teores de Fed, Sid e Ald nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m em

relação ao solo da mata (Figura 1), o que indica a maior migração destes compostos nos solos cultivados com cana-de-açúcar. Os maiores teores de óxidos livres nas camadas subsuperficiais nos solos cultivados podem contribuir para um aumento da coesão nestes solos, já que eles agem como agentes cimentantes das partículas do solo (Mckeague & Sprout, 1975). Franzmeier et al. (1996) e Moody & Graham (1997) enfatizaram a importância dos óxidos de ferro, silício e alumínio livres como agentes cimentantes, ao observarem teores mais elevados destes compostos em horizontes adensados.

Os teores de óxidos de ferro, silício e alumínio de baixa cristalinidade (Feo, Sio e Alo) decresceram em profundidade em todos os tratamentos estudados (Figura 1). De acordo com Schwertmann & Kämpf (1983), os maiores teores de Feo na camada superficial deveram-se à complexação do ferro com a matéria orgânica do solo presente em maior quantidade nesta camada, o que inibe a cristalização dos óxidos.

Apesar do decréscimo em profundidade, os teores de Feo, Alo e Sio foram maiores nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação ao solo da mata nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m.

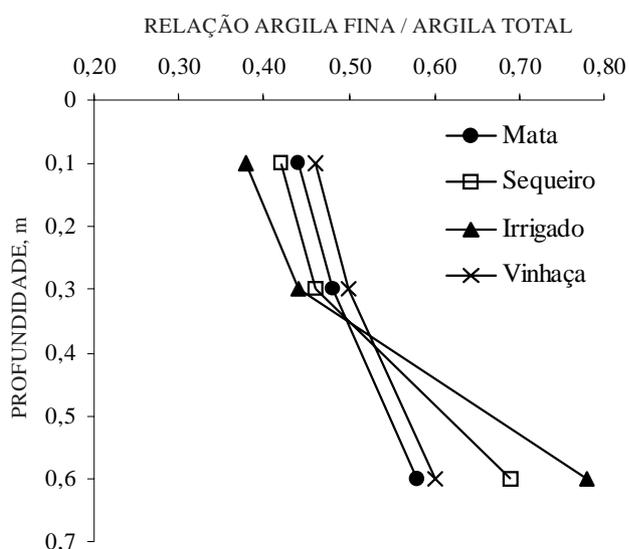


**Figura 1.** Distribuição de Fe, Al e Si ditionito (Fed, Ald e Sid) e Fe, Al e Si oxalato (Feo, Alo e Sio) em profundidade nos sistemas de uso e manejo estudados.

Estes óxidos contribuem para o aumento da coesão do solo, como verificado por Chartres et al. (1990).

Na figura 2, verificou-se um aumento da razão argila fina/argila total em profundidade em todos os tratamentos estudados, com valores máximos na camada de 0,4–0,8 m. O aumento desta razão da camada de 0–0,2 m para as camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m deveu-se à ocorrência de processos de translocação vertical de argila ao longo do perfil do solo (Floate, 1966; Cabrera-Martinez, 1989). Os maiores valores da razão argila fina/argila total na camada de 0,4–0,8 m em todos os solos estudados foram atribuídos à presença expressiva de cerosidade nas unidades estruturais desta camada, verificada na descrição do perfil do solo em campo (Silva, 2003).

O solo irrigado apresentou o menor valor da razão argila fina/argila total na camada de 0–0,2 m, o que



**Figura 2. Distribuição em profundidade da relação argila fina/argila total nos sistemas de uso e manejo estudados**

é resultado da maior eluviação da fração argila fina para as camadas subsuperficiais deste solo. Os maiores valores desta razão nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado na camada de 0,4–0,8 m indicam a maior migração de argila fina para camadas subsuperficiais destes solos.

A maior migração de argila fina para as camadas subsuperficiais dos solos cultivados contribuiu para o aumento dos teores de Fed, Ald e Sid em profundidade nestes solos. Os teores de argila correlacionaram-se significativamente com os teores de Fed ( $r = 0,82^{**}$ ), Ald ( $r = 0,90^{**}$ ) e Sid ( $r = 0,82^{**}$ ), indicando que uma proporção dos óxidos livres encontra-se associada à fração argila, havendo comigração para as camadas subsuperficiais. A correlação entre argila e óxidos, indicando a comigração para horizontes subsuperficiais, também foi verificada por outros autores (Gianluppi, 1979; Nunes et al., 2002).

A maior relação argila fina/argila total em profundidade promoveu um aumento da coesão dos solos de tabuleiros, já que a argila fina influenciou consideravelmente a coesão do solo, como enfatizado por alguns autores (Kimpfe et al., 1983; Chartres et al., 1990; Al-Shayea, 2001).

Os maiores teores de argila nas camadas subsuperficiais dos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado em relação ao solo sob mata nativa (Quadro 1) possivelmente contribuíram para o adensamento destes solos. Mitchell (1976) enfatizou que a argila dispersa migra através do perfil do solo e preenche os espaços porosos entre as unidades estruturais e grãos de areia, aumentando expressivamente, a densidade do solo de camadas subsuperficiais.

Houve efeito significativo da umidade do solo e dos sistemas de manejo com a cana-de-açúcar nos valores de coesão do solo nas duas camadas estudadas (Quadro 2). Verificou-se que a coesão aumentava significativamente com a redução do teor de água nos quatro sistemas de manejo estudados,

**Quadro 2. Coesão do solo (kPa) sob diferentes sistemas de manejo e umidade, em duas profundidades**

Teor de água	Sistema de uso e manejo			
	Mata	Sequeiro	Irrigado	Vinhaça
Camada de 0,2–0,4 m				
kg kg <sup>-1</sup>				
0,08	81,3 Ca	148,7 Aa	133,5 ABa	107,0 BCa
0,11	47,1 Bb	74,2 Ab	81,2 Ab	58,1 ABb
0,14	27,2 Ab	40,2 Ac	33,2 Ac	30,1 Ac
Camada de 0,4–0,8 m				
0,08	172,4 Ca	248,0 ABa	271,8 Aa	210,3 BCa
0,11	60,8 Bb	110,7 Ab	114,9 Ab	96,4 ABb
0,14	38,1 Ab	46,1 Ac	59,1 Ab	43,2 Ac

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste Tukey (5 %).

chegando a um valor cinco vezes maior quando o teor de água do solo passou de 0,14 para 0,08 kg kg<sup>-1</sup> na camada de 0,4–0,8 m (Quadro 2).

Silva et al. (2004) também observaram o aumento da coesão com a redução do teor de água do solo. Os autores verificaram o aumento da coesão de 46 para 102 kPa, quando determinada em solo de textura argilosa sob preparo convencional, com teores de água de 0,38 e 0,05 kg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Al-Shayea (2001) enfatizou que a distância entre as partículas mostrou-se reduzida com a diminuição do teor de água do solo, resultando numa maior atração entre elas e conseqüente aumento da coesão.

A coesão do solo foi influenciada significativamente pelos sistemas de manejo estudados, verificando-se maiores valores de coesão do solo nas três áreas cultivadas com cana-de-açúcar em relação ao solo da mata nas duas camadas estudadas. Com o teor de água de 0,14 kg kg<sup>-1</sup> não houve diferença significativa entre os valores de coesão do solo entre os sistemas de manejo na camada de 0,2–0,4 m, com os valores de coesão variando de 27,2 a 40,2 kPa. Com o solo nos teores de água mais baixos (umidades 0,11 e 0,08 kg kg<sup>-1</sup>), percebeu-se um aumento significativo da coesão nos solos cultivados em relação ao solo sob mata nativa, com o solo sob o sistema sequeiro apresentando a maior coesão (148,7 kPa) na camada de 0,2–0,4 m. Na camada de 0,4–0,8 m, os valores de coesão do solo tiveram a mesma tendência, com os solos cultivados sob os sistemas sequeiro e irrigado apresentando os maiores valores de coesão (248,0 e 271,8 kPa respectivamente), no teor de água de 0,08 kg kg<sup>-1</sup>.

A maior coesão do solo nas camadas subsuperficiais dos solos cultivados em relação ao solo da mata provavelmente reflete a maior densidade do solo verificada nestes solos (Quadro 1), resultante do tráfego de máquinas nas operações de cultivo da cana-de-açúcar. Rocha et al. (2002) também verificaram maiores valores de coesão do solo em solos com maior densidade. De acordo com Lambe & Whitman (1979), quando o solo apresentava um maior grau de compactação, as partículas estavam mais próximas uma das outras, favorecendo o desenvolvimento da coesão quando o solo estava com baixo teor de água.

Observações feitas com microscópio eletrônico de varredura mostram o arranjo da matriz do solo na camada de 0,2–0,4 m, observando-se no solo sob mata nativa uma estrutura aberta, com porosidade visível entre agregados (Figura 3a), com partículas primárias do solo formando microagregados distintos (Figura 3b). Na figura 3c, verificou-se a matriz do solo sob sequeiro com aspecto maciço em relação ao solo da mata, com porosidade visivelmente reduzida, alguns poros tipo fissuras e matriz do solo com aspecto de orientação de partículas de argila (Figura 3d), o que provavelmente é resultado de compressão do solo nas atividades de cultivo.

Esta alteração na microestrutura dos solos cultivados com cana-de-açúcar em relação ao solo sob mata nativa acarretou em maiores valores de coesão nesses solos (Quadro 2). D'Agostini (1992) verificou alteração na estrutura de agregados após aplicação de pressão compressiva, tornando-os mais densos e coesos. Este fenômeno também foi enfatizado por Utomo & Dexter (1981).

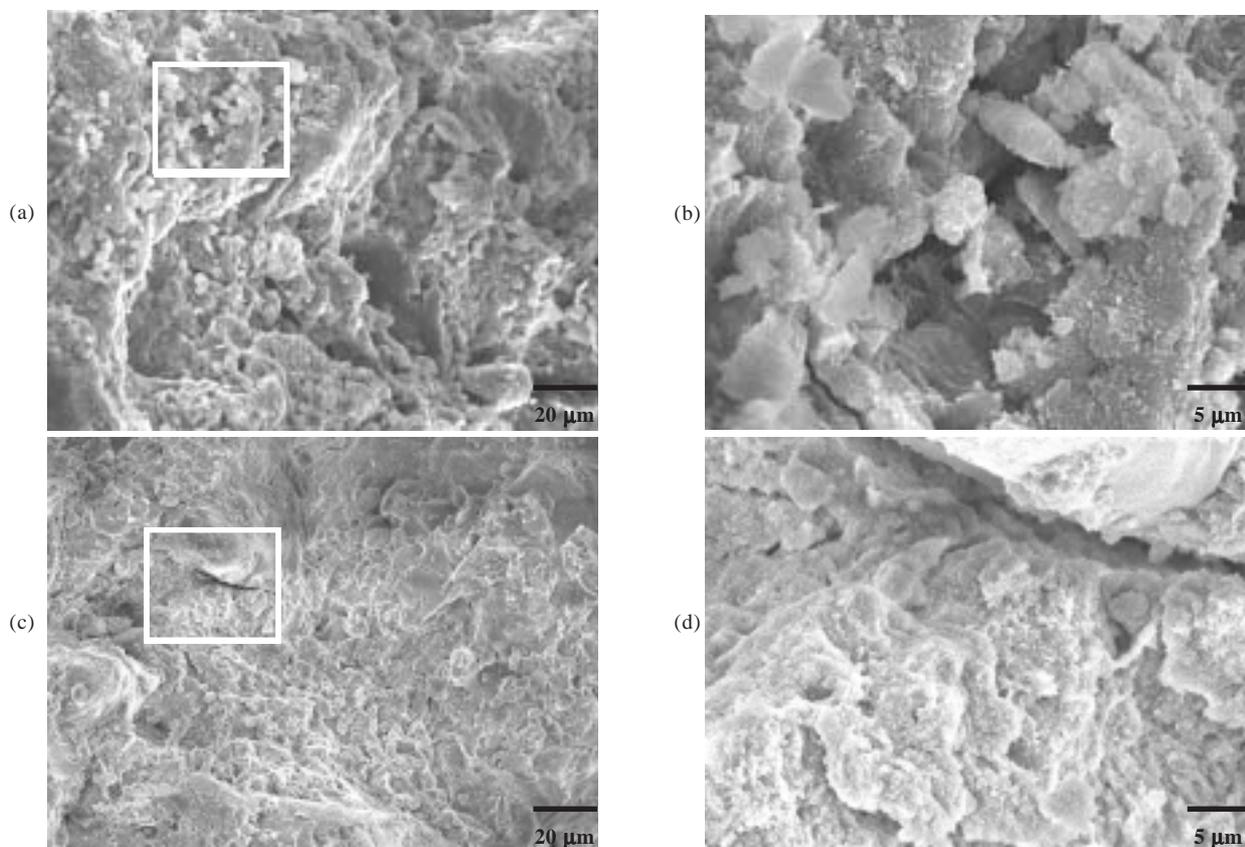
O solo com vinhaça apresentou uma maior coesão em relação ao solo da mata nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m (Quadro 2), apesar dos valores semelhantes de densidade do solo nestes dois solos (Quadro 1), o que possivelmente ocorreu considerando os maiores teores de argila (Quadro 1) e óxidos de Fe, Si e Al nas camadas subsuperficiais do solo com vinhaça, em relação ao solo da mata (Figura 1).

A influência de atributos como densidade do solo, teor de argila e agentes cimentantes (óxidos de Fe, Si e Al) no desenvolvimento da coesão do solo tem sido enfatizada na literatura (Mitchell, 1976; Chartres et al., 1990; Franzmeier et al.; 1996). No presente estudo, considerando os três teores de água, a coesão do solo correlacionou-se significativamente com os atributos densidade do solo ( $r = 0,53^*$ ), teor de argila ( $r = 0,43^{**}$ ), Fed ( $r = 0,42^{**}$ ), Sid ( $r = 0,44^{**}$ ) e Ald ( $r = 0,39^{**}$ ), evidenciando a influência destes atributos na coesão do solo.

No quadro 3, estão apresentados os valores do ângulo de atrito interno do solo no teor de água de 0,11 kg kg<sup>-1</sup>. Verificou-se um aumento significativo do ângulo de atrito interno nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação ao solo de mata nativa na camada de 0,2–0,4 m, não havendo diferença entre as áreas cultivadas.

Os maiores valores do ângulo de atrito interno do solo nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar refletem os maiores valores de densidade do solo, como verificado pela correlação entre estes atributos na figura 4. A maior densidade dos solos cultivados resulta num maior número de pontos de contato entre as partículas do solo e conseqüente aumento do atrito entre elas (Ashburner & Sims, 1984).

Este aumento nos valores do ângulo de atrito interno nos solos cultivados refletiu as mudanças ocorridas na estrutura do solo, provocadas pelo cultivo nas áreas com cana-de-açúcar. A camada de 0,2–0,4 m dos solos cultivados apresentou estrutura em blocos angulares e subangulares, enquanto o solo da mata apresentou estrutura predominantemente granular, com os agregados mais arredondados (Silva, 2003). Rocha et al. (2002), trabalhando com várias classes de solos, verificaram que solos com estrutura em blocos apresentaram maior ângulo de atrito interno e maiores valores de resistência do solo ao cisalhamento direto. De acordo com Lebert & Horn (1991), a estrutura em blocos promoveu maior entrosamento entre as unidades estruturais, resultando em aumento do número de contatos entre



**Figura 3.** Micrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura (MEV) em amostras de solo na camada de 0,2–0,4 m. (a) solo sob mata nativa mostrando estrutura porosa; (b) ampliação da foto “a” mostrando poros entre partículas primárias e microagregados; (c) solo sob sequeiro mostrando aspecto coeso na matriz do solo; (d) ampliação da foto “c” mostrando superfície adensada com aspecto de orientação de partículas e poros tipo fissuras.

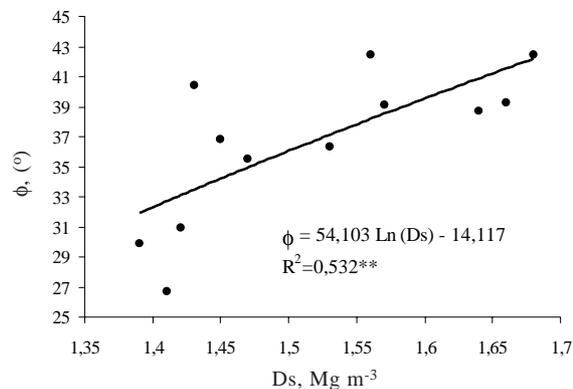
**Quadro 3.** Valores de ângulo de atrito interno do solo de ( $\phi$ ) acordo com os sistemas de manejo e profundidades no teor de água de  $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$

Camada	Sistema de uso e manejo			
	Mata	Sequeiro	Irrigado	Vinhaça
m	$\phi$ (°)			
0,2–0,4	29,18 Ba	39,32 Aa	40,15 Aa	37,62 Aa
0,4–0,8	24,75 Ab	27,29 Ab	28,02 Ab	27,07 Ab

Letras maiúsculas iguais, na mesma linha, e minúsculas iguais, na mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste Tukey (5 %).

si e, conseqüentemente, em aumento do ângulo de atrito interno do solo.

Na camada de 0,4–0,8 m, apesar da maior densidade do solo nas áreas sob os sistemas sequeiro e irrigado (Quadro 1), não houve diferença significativa entre os valores do ângulo de atrito interno do solo (Quadro 3), provavelmente pela



**Figura 4.** Ângulo de atrito interno do solo ( $\phi$ ) de acordo com a densidade do solo (Ds).

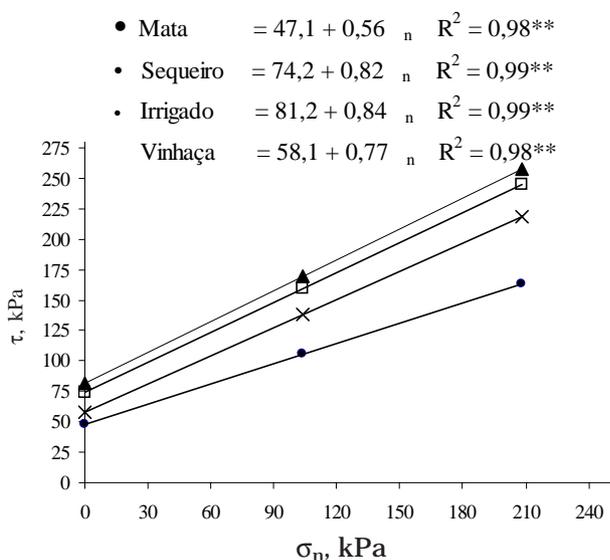
diferença pouco significativa entre as estruturas dos solos nas quatro áreas estudadas.

Verificou-se uma redução significativa no ângulo de atrito interno do solo em profundidade em todos os sistemas de manejo estudados, provavelmente por causa dos maiores valores de argila fina na camada de 0,4–0,8 m (Figura 2). Segundo Al-Shayea (2001),

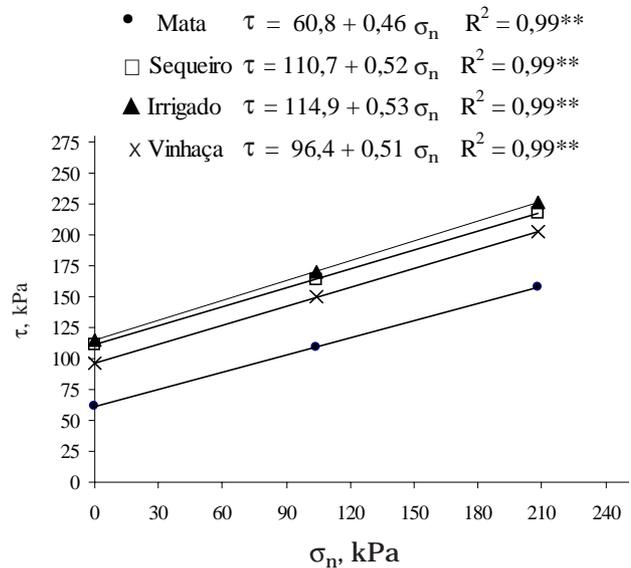
o ângulo de atrito interno do solo diminui com o aumento do teor de argila do solo, pois as partículas de argila revestem a superfície das partículas de areia, diminuindo a fricção entre estas.

Verificou-se um aumento nos valores da resistência ao cisalhamento nos solos sob os sistemas sequeiro, irrigado e vinhaça em relação ao solo da mata nas camadas de 0,2–0,4 m e 0,4–0,8 m (Figuras 5 e 6), principalmente a tensões normais ( $\sigma_n$ ) maiores que 100 kPa. Na camada de 0,2–0,4 m, a maior resistência ao cisalhamento dos solos cultivados em relação ao solo da mata reflete a influência das características coesivas e friccionais do solo, como constatado pelos maiores valores da coesão do solo (Quadro 2) e maiores valores do ângulo de atrito interno do solo (Quadro 3) nos solos cultivados (teor de água de 0,11 kg kg<sup>-1</sup>). Na camada de 0,4–0,8 m, a maior resistência ao cisalhamento dos solos cultivados em relação ao solo da mata refletiu os maiores valores de coesão do solo (Quadro 2), tendo, portanto, uma maior influência das características coesivas, já que não houve diferença significativa entre os valores do ângulo de atrito interno dos solos cultivados em relação ao solo da mata (Quadro 3).

Os maiores valores da resistência ao cisalhamento nos solos cultivados em relação ao solo da mata também refletiram os maiores valores de densidade destes solos (Quadro 1), possivelmente graças ao tráfego de máquinas nas atividades de cultivo da cana-de-açúcar. Estes resultados são similares aos encontrados por Zhang et al. (2001) e Rocha et al. (2002), que verificaram aumento da resistência ao cisalhamento com o aumento da densidade do solo.



**Figura 5. Resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) de acordo com a tensão normal ( $\sigma_n$ ) na camada de 0,2–0,4 m e teor de água de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> para os sistemas de manejo estudados.**



**Figura 6. Resistência ao cisalhamento ( $\tau$ ) de acordo com a tensão normal ( $\sigma_n$ ) na camada de 0,4–0,8 m e teor de água de 0,11 kg kg<sup>-1</sup> para os sistemas de manejo estudados.**

### CONCLUSÕES

1. Os sistemas de uso e manejo do solo influenciaram os teores de óxidos de ferro, silício e alumínio, observando-se os maiores valores destes atributos nas camadas subsuperficiais, sob os sistemas sequeiro e irrigado.
2. Os atributos relacionados com o cisalhamento do solo foram influenciados pelos sistemas de uso e manejo. A maior coesão do solo e o maior ângulo de atrito interno nos solos sob os sistemas sequeiro e irrigado promoveram maior resistência ao cisalhamento nestes solos, em relação ao solo da mata.
3. A coesão do solo aumentou com a redução do teor de água do solo e com o aumento dos teores de óxidos de ferro, silício e alumínio no solo.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Usina Triunfo, por permitir o uso de suas terras; aos engenheiros-agrônomo Arnaldo Jugurta (Usina Triunfo) e José Fernando Wanderley Fernandes Lima (UFRPE), pelo apoio logístico nas atividades de campo; ao professor Carlos Ricardo Trein, do Departamento de Solos da UFRGS, pelo auxílio nas análises de cisalhamento direto, e à professora Ruth Hinrichs do Departamento de Geociências da UFRGS, pelo auxílio nas observações com microscópio eletrônico de varredura.

## LITERATURA CITADA

- ALMEIDA, J.A.; KLANT, E. & KÄMPF, N. Gênese do contraste textural e da degradação do horizonte B de um Podzólico Vermelho-Amarelo da planície costeira do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:221-233, 1997.
- AL-SHAYEA, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. *Eng. Geol.*, 62:319-342, 2001.
- ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H. & SCHJONNING, P. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden. II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. *Soil & Till. Res.*, 60:79-89, 2001.
- ASHBURNER, J.E. & SIMS, B.G. Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza. San José, IICA, 1984. 473p.
- BOENI, M. Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 99p. (Tese de Mestrado)
- BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H.F.; ARAÚJO FILHO, J.C.; LEPRUN, J.C. & BARRETTO, F. Iron bands, fragipans and duripans in the northeastern plateaus of Brazil – properties and genesis. *Can. J. Soil Sci.*, 78:519-530, 1998.
- CABRERA-MARTINEZ, F.; HARRIS, W.G.; CARLISLE, V.W. & COLLINS, M.E. Partitioning of clay-sized minerals in coastal plains soils with sandy/loamy boundaries. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1584-1587, 1989.
- CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M. & RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hardsetting soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1060-1067, 1990.
- D'AGOSTINI, L.R. Variações temporais da coesividade entre agregados de solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 82p. (Tese de Doutorado)
- DUNCAN, M.M. & FRANZMEIER, D.P. Role of free silicon, aluminum and iron in fragipan formation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:923-929, 1999.
- FANNING, D.S. & FANNING, M.S.B. Soil morphology, genesis and classification. New York, John Wiley, 1989. 395p.
- FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, F.B.R. & LEPRUN, J.C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do Nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:947-963, 2001.
- FLOATE, M.J.S. A chemical, physical and mineralogical study of soil developed on glacial lacustrine clays in north central British Columbia. *Can. J. Soil Sci.*, 46:227-236, 1966.
- FRANZMEIER, D.P.; CHARTRES, C.J. & WOOD, J.T. Hardsetting soils in Southeast Australia: landscape and profile processes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1178-1187, 1996.
- FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. New York, John Wiley, 1993. 517p.
- GIANLUPPI, D. Morfologia e gênese de solos do Litoral-Norte do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1979. 106p. (Tese de Mestrado)
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.; SOUZA, L.S. & RIBEIRO, L.P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting. Estudo de caso. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:239-247, 2001.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: advanced course. 2.ed. Madison, University Wisconsin, 1965. 991p.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; PESSOA, S.C.P. & SILVEIRA, C.O. Levantamento Exploratório Reconhecimento de Solos de estado de Alagoas. Recife, Embrapa/Centro de Pesquisas Pedológicas, SUDENE-DRN, 1975. 531p. (Boletim Técnico, 35)
- JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: "Pesquisa e Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros", Cruz das Almas, 1996. Anais. Cruz das Almas, Embrapa/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.13-24.
- KIMPE, C.R.; LAVERDIERE, M.R. & DEJOU, J. Distribution of silica, sesquioxides, and clay in Quebec podzolic soils and their effects on subsoil cementation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:838-840, 1983.
- LAMBE, T.W. Soil testing for engineers. 2.ed. New York, John Wiley, 1951. 165p.
- LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. Soil mechanics. New York, John Wiley, 1979. 553p.
- LEBERT, M. & HORN, T. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil Till. Res.*, 19:275-286, 1991.
- McCORMACK, D.E. & WILDING, L.P. Soil properties influencing strength of Cranfield and Geeburg soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:167-173, 1979.
- McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soil. *Can. J. Soil Sci.*, 46:13-22, 1966.
- McKEAGUE, J.A. & SPROUT, P.N. Cemented subsoils (Duric Horizons) in some soils of British Columbia. *Can. J. Soil Sci.*, 55:189-203, 1975.
- McKYES, E.; NYAMUGAFATA, P. & NYAMAPFENE, K.W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. *Soil Till. Res.*, 29:357-366, 1994.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE, 7., London, 1960. Proceedings. London, 1960. p.317-327.
- MITCHELL, J.K. Fundamentals of soil behavior. New York, John Wiley, 1976. 422p.
- MOODY, I.E. & GRAHAM, R.C. Silica-cemented terrace edges, Central California Coast. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1723-1729, 1997.

- MULLINS, C.E.; MacLEOD, D.A.; NORTHCOTE, K.H.; TISDALL, J.M. & YOUNG, I.M. Hardsetting soils: behavior, occurrence and management. *Adv. Soil Sci.*, 11:37-108, 1990.
- NIELSEN, D.R.; JACKSON, R.D.; CARY, J.W. & EVANS, D.D. Soil water. Madison, American Society of Agronomy, 1972. 175p.
- NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE-DERNA, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 422p.
- NUNES, M.L.; KLAMT, E.; REICHERT, J.M. & DALMOLIN, R.S.D. Características de solos sistematizados em duas áreas cultivadas com arroz sob inundação. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:395-406, 2002.
- PINTO, C.S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo, Oficina de Textos, 2000. 247p.
- PROSPED. Levantamento detalhado dos solos da Usina Triunfo na escala de 1:10.000. Boca da Mata, AL, 1992. (Relatório Geral)
- RIBEIRO, L.P. Os Latossolos Amarelos do Recôncavo Baiano: gênese, evolução e degradação. Salvador, Secretaria de Planejamento e Tecnologia, 1998. 99p.
- ROCHA, W.W.; DIAS JÚNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V. & SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). *R. Bras. Ci. Solo*, 26:297-303, 2002.
- SCHWERTMANN, U. & KÄMPF, N. Óxidos de ferro jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo*, 7:251-255, 1983.
- SILVA, A.J.N. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 120p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, M.S.L. Caracterização e gênese do adensamento subsuperficial em solos de tabuleiros do semi-árido do Nordeste do Brasil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 126p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, R.B.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SANTOS, F.L. & FRANZ, C.A.B. Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:165-173, 2004.
- SOUZA, L.S. Uso e manejo dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: "Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros", Cruz das Almas, 1996. Anais. Cruz das Almas, Embrapa/CPATC/CNPMF/IGUFBA, 1996. p.36-74.
- STEINHARDT, G.C.; FRANZMEIER, D.P. & NORTON, L.D. Silica associated with fragipan and non-fragipan horizons. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:656-657, 1982.
- UTOMO, W.H. & DEXTER, A.R. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.*, 32:335-350, 1981.
- ZHANG, B.; ZHAO, Q.G.; HORN, R. & BAUMGARTL T. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil Till. Res.*, 59:97-106, 2001.

