

RENATO PAIVA DE LIMA

**MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E SUAS RELAÇÕES  
COM ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS EM ARGISSOLO AMARELO  
DISTROCOESO**

Recife-PE

2013

RENATO PAIVA DE LIMA

**MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E SUAS RELAÇÕES  
COM ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS EM ARGISSOLO AMARELO  
DISTROCOESO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção Grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

Co-orientador

Prof. Dr. Veronildo Souza de Oliveira

Recife-PE

Julho, 2013

Ficha catalográfica

L732a      Lima, Renato Paiva de  
              Modelos de capacidade de suporte de carga e suas  
relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo  
distrocoeso / Renato Paiva de Lima. –  
Recife, 2013.  
58 f. : il.

Orientador: Mário Monteiro Rolim.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento  
de Tecnologia Rural, Recife, 2013.  
Referências.

1. Atributos físicos e mecânicos do solo
2. Compactação do solo
3. Análise multivariada
4. Compressibilidade do solo I. Rolim, Mário Monteiro,  
orientador II. Título

CDD 630

RENATO PAIVA DE LIMA

**MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA E SUAS RELAÇÕES  
COM ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS EM ARGISSOLO AMARELO  
DISTROCOESO**

Dissertação defendida e aprovada em 18 de julho de 2013 pela Banca Examinadora:

Orientador:

---

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim  
UFRPE

Examinadores:

---

Prof. Dr. Veronildo Souza de Oliveira  
UFRPE

---

Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira  
UFRPE

---

Djail Santos  
UFPB

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde, conduta e disciplina, para que assim pudesse conduzir meus estudos com seriedade e dedicação, resultando em bom desempenho acadêmico e consequentemente no sucesso de minha pesquisa.

A minha família, irmãos, Rodrigo e Bárbara, primos, Ramon, Amanda, Raissa, Renan, Brigitt, aos tios, Luciene, Eveline, Léo, Lupa, Vinicius, Giovane. Em especial aos meus pais-avós, Maria Soledade, Lamartine Gomes de Lima e Elnaã Araujo Paiva, bem como meu falecido pai-avô, José Emiliano, que sempre me incentivam pela busca de mais conhecimento. A eles dedico o meu amor e a minha gratidão.

A minha companheira de todas as horas, Dayane, pela estrutura emocional e compreensão nos momentos de dificuldade.

Agradeço ao professor Mario Rolim, pelo apoio, orientação e pela oportunidade de realizar estudos na área da mecânica dos solos. Ao professor Veronildo, pela compreensão e co-orientação no desenvolvimento do trabalho.

Aos companheiros de pós-graduação, meus parceiros, Marcos, Luiz, Vinicius e Cleene. Aos amigos de laboratório, Andréa, Mara, Daniel, Uilka, Adriana e Eduardo. Os demais colegas de curso, Taty Keyte, Taty Paty, Diogo, Rafael, Alan, Wellington, Nadialan, Rochele, Jessika, dos quais levarei muitas saudades.

Aos amigos, de hoje e sempre, Anderson, Jonas César, Laís, Nona, Johab, Bruno Antônio, Drica Carvalho, Morgana, pelo apoio e torcida pelo meu sucesso, bem como pelo apoio emocional nos momentos de dificuldade.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e a Universidade Federal Rural de Pernambuco, pelo acolhimento e dedicação dos docentes na construção do conhecimento.

## DEDICO

Ao meu falecido pai-avô, por todo apoio,  
educação e disciplina me passados durante  
minha trajetória.

Ao meu falecido amigo-irmão, Vitão,  
companheiro durante toda minha  
graduação.

Agradeço pela contribuição e significância  
em minha vida.

Aos senhores eu dedico.

*Eu fiz bandeira desses trapos.*

*Eu devorei concreto e asfalto.*

*Humberto Gessinger*

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
CAPÍTULO I - Introdução Geral .....	1
REVISÃO DE LITERATURA .....	3
Cultura da cana-de-açúcar .....	3
Solos coesos.....	3
Compactação e suas relações com atributos físicos e mecânicos do solo.....	5
Compressibilidade do solo e sua modelagem.....	8
CAPÍTULO II - Modelagem da compressibilidade em um Argissolo Amarelo distrocoeso.....	20
RESUMO .....	20
ABSTRACT .....	20
INTRODUÇÃO.....	21
MATERIAL E MÉTODOS.....	23
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS .....	36
CAPÍTULO III - Capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso .....	41
RESUMO .....	41
ABSTRACT .....	41
INTRODUÇÃO.....	42
MATERIAL E MÉTODOS.....	44
RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	88
CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Esquema ilustrativo da determinação da tensão de preconsolidação obtido a partir curva de compressão pelo método de Casagrande (Secco, 2003).....	9
<b>Figura 2.</b>	Esquema de amostragem na área experimental .....	24
<b>Figura 3.</b>	Modelos de capacidade de suporte de carga nas camadas de 0-0,20 (M1) (A) e 0,20-0,40 (M5) (B), em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar. ....	33
<b>Figura 4.</b>	Esquema de amostragem na área experimental. ....	45
<b>Figura 5.</b>	Scree plot para da análise de componentes principais nas camadas de 0-0,20 (A) e 0,20-0,40 m (B) .....	50



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Modelos lineares e não lineares ajustados para predição da tensão de pré-consolidação em diversas condições de solo e manejo.. .....	11
<b>Tabela 2.</b>	Caracterização física do solo da área experimental de Argissolo Amarelo Distrocoeso sob cultivo da cana-de-açúcar, Estação Experimental de cana-de-açúcar do Carpina (EECAC). .....	24
<b>Tabela 3.</b>	Estatística descritiva (n = 42) para as variáveis analisadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar. ....	27
<b>Tabela 4.</b>	Resultado da análise de regressão múltipla para o modelo $\sigma_p = a + b \times \theta + c \times DS + d \times RP + e \times CO + f \times AR + g \times LP + h \times LL + \varepsilon$ e $\sigma_p = a + c \times DS + d \times RP + \varepsilon$ , em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m .....	28
<b>Tabela 5.</b>	Resultado da análise do modelo multiplicativo não linear $\sigma_p = a_0 \times \theta^{a_1} \times DS^{a_2} \times RP^{a_3} \times CO^{a_4} \times TA^{a_5} \times LP^{a_6} \times LL^{a_7} + \varepsilon$ , nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, e dos modelos $\sigma_p = a_0 \times DS^{a_2} + \varepsilon$ , na camada de 0-0,20 m, e $\sigma_p = a_0 \times DS^{a_2} \times RP^{a_3} \times CO^{a_4} + \varepsilon$ , na camada de 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente .....	29
<b>Tabela 6.</b>	Resultados da análise do modelo de capacidade de suporte de carga, $\sigma_p = 10^{(b_0 + b_1 \theta)}$ , proposto por Dias Júnior (1994), em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m.....	30
<b>Tabela 7.</b>	Resultado da análise do modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010), $\sigma_p = c_0 \times \theta^{c_1} \times DS^{c_2}$ , em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.....	30
<b>Tabela 8.</b>	Modelos de capacidade de suporte de carga selecionados, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.....	31
<b>Tabela 9.</b>	Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar, Estação Experimental de cana-de-açúcar do Carpina	

	(EECAC).....	45
<b>Tabela 10.</b>	Estatística descritiva (n = 42) para as variáveis analisadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.....	48
<b>Tabela 11.</b>	Proporção da variação e variação acumulada da análise de componentes principais, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar .....	49
<b>Tabela 12.</b>	Coefficientes da análise de componentes principais, associado a cada variável, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar .....	51
<b>Tabela 13.</b>	Análise de regressão via componentes principais selecionados, camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar .....	51

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$  - erro aleatório

NP - número de parâmetros

$R^2$  - coeficiente de determinação

$R^2_a$  - coeficiente de determinação ajustado

EP - erro padrão

EPMA - erro percentual médio absoluto

CV - coeficiente de variação

GL - graus de liberdade

$\sigma_p$  - tensão de preconsolidação

$\theta$  - umidade do solo

DS - densidade do solo

RP - resistência à penetração

CO - carbono orgânico

TA - teor de argila

LP - limite de plasticidade

LL - limite de liquidez

DP - desvio padrão

## RESUMO

Modelos que predizem a tensão de pré-consolidação em Argissolo Amarelo distrocoeso são escassos na literatura, dada a importância desses solos para produção de cana-de-açúcar no Nordeste. O presente estudo teve como objetivos ajustar modelos de regressão lineares e não lineares e estudar as relações dos atributos físicos do solo na variação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). O trabalho foi realizado em área de Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar. Em um talhão, foram demarcados 42 pontos e coletadas amostras nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 pontos amostrais. Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas para obtenção das variáveis: umidade do solo ( $\theta$ ), densidade do solo (DS), resistência à penetração (RP), carbono orgânico (CO), teor de argila (TA), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL), além da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Foram ajustados quatro modelos para predição da  $\sigma_p$ : regressão linear múltipla, dois modelos não lineares e um modelo não linear de capacidade de suporte de carga, bem como, foi realizada análise de componentes principais, em cada uma das camadas estudadas, que após obtenção dos escores dos componentes principais retidos em cada camada de solo, um modelo de regressão linear múltiplo foi ajustado aos dados de  $\sigma_p$  para estabelecimento das relações. A  $\sigma_p$  média foi de 73,0 kPa; sendo o modelo de regressão linear múltipla o que melhor se ajustou as condições de solo e manejo da área nas duas camadas analisadas. Apenas a densidade do solo e a resistência à penetração contribuíram significativamente para variação da  $\sigma_p$  nos modelos com os melhores ajustes. A  $\theta$  e o CO apresentaram relações negativas com a  $\sigma_p$ , enquanto DS, RP, TA, LL e LP positivas. Maiores valores de  $\sigma_p$  estão associados a maiores valores de DS, RP, TA, LL e LP, assim como os menores a um aumento da concentração de CO e da  $\theta$ .

**Palavras-Chave:** compressibilidade, tensão de pré-consolidação, atributos físicos, modelagem

## ABSTRACT

Models that predict pre-consolidation stress in Ultisol are scarce, given the importance of these soils for the production of sugarcane in the Northeast. The current study aimed to fit linear and nonlinear regression models and study the relationship of soil physical attributes on pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ) variation. On a plot, 42 points were delimited to get samples in the layers 0-0.20 and 0.20-0.40 m, totaling 84 samples. Deformed and undeformed samples were collected to obtain the variables: water content ( $\theta$ ), bulk density (BD), soil resistance to penetration (RP), organic carbon (OC), clay content (C), plastic limit (PL) and liquid limit (LL), as well as the pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ). Four models were fitted to predict the  $\sigma_p$ : linear multiple regression, two nonlinear multiple model and charge supporter capacity model. Was also held for each layer a principal component analysis was performed and, after obtaining the scores for those components retained, a linear multiple regression model was fitted for the  $\sigma_p$  data to establishment of the relationships. The average of  $\sigma_p$  was 73.0 kPa. The multiple linear regression model was the best fit soil conditions and management of the area in the two analyzed layers. Only soil bulk density and penetration resistance contributed significantly to variation  $\sigma_p$  models with the best settings. The  $\theta$  and the OC showed negative relations with  $\sigma_p$ ; while BD, RP, C, LL and PL showed positive relation. Higher values of  $\sigma_p$  are associated with higher values of BD, RP, C, LL and PL, as well as smaller values are linked with the increase of OC concentration and  $\theta$ .

**Key words:** compressibility, pre-consolidation stress, physical attributes, modelling

## **CAPÍTULO I**

---

### **Introdução Geral**

## INTRODUÇÃO GERAL

Detentor de clima e solos propícios ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, o Brasil é o maior produtor mundial, atendendo tanto o mercado interno, como o externo, além de gerar renda e produzir energia renovável.

A imensa área plantada se concentra, principalmente, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, tendo São Paulo como maior produtor nacional. Na região Nordeste, a cana de açúcar é explorada com maior intensidade nos Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba.

No Nordeste, a cana-de-açúcar é cultivada em geoambientes denominados tabuleiros costeiros. Os tabuleiros costeiros comportam características peculiares quanto à propriedades dos solos, sendo umas das mais importantes, o caráter coeso. Este caráter coeso caracteriza solos que apresentam um incremento em sua resistência, quando secos, que pode restringir o crescimento das raízes, bem como dificultar operações mecanizadas.

Solos com caráter coeso apresentam elevada densidade e alta resistência à penetração, se tornando muitas vezes, um fator limitante ao desenvolvimento radicular das plantas. Estas características, associadas ao efeito das máquinas no solo por ocasião da mecanização, se tornaram umas das principais preocupações no manejo desses solos, principalmente pela formação de camadas compactadas.

Para se evitar compactação adicional, uma das principais recomendações técnicas atualmente utilizada é a realização de operações mecanizadas que apliquem pressões abaixo da capacidade de suporte de carga do solo. Para tanto, é necessário conhecer os processos inerentes a compressibilidade do solo, que fornecem indicadores para tomada de decisões e planejamento da mecanização.

Um dos indicadores de compressibilidade do solo, bastante utilizado, é a tensão de pré-consolidação. A tensão de pré-consolidação é um componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo, sendo, portanto, a maior pressão que pode ser aplicada ao solo a fim de evitar a sua compactação adicional.

A tensão de pré-consolidação é uma variável de difícil obtenção, devido a exigência na qualidade das amostras no campo, que são inderformadas, bem como pela estrutura e equipamento para realização dos ensaios, que nem sempre estão disponíveis nos centros de pesquisa.

Uma das formas para obtenção da capacidade de suporte de carga é através da construção de modelos para predição da tensão de pré-consolidação. Vários modelos têm sido apresentados na literatura (Dias Junior, 1994; Imhoff et al. 2004; Severiano et al., 2010), modelos lineares e não lineares, em função, principalmente da umidade do solo, densidade e resistência à penetração. No entanto, outros trabalhos têm apontado relações da compressibilidade com diversos outros atributos físicos e mecânicos do solo, sejam eles com relações diretas ou indiretas.

Modelos que predizem a tensão de pré-consolidação em Argissolo Amarelo distrocoeso são escassos na literatura, dada a importância desses solos para produção de cana-de-açúcar no Nordeste. A aplicação e construção de modelos específicos nestes solos, bem como o conhecimento das relações dos atributos físicos no processo compressivo, é, de fundamental importância para o planejamento da mecanização e dos efeitos destas operações no solo.

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivos ajustar modelos de regressão lineares e não lineares e estudar as relações dos atributos físicos do solo na variação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ).



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **Cultura da cana-de-açúcar**

O setor sucroalcooleiro tem sido um dos mais importantes na agricultura brasileira, produzindo álcool e açúcar em demanda mundial, sendo o detentor do sistema mais tecnológico na produção de cana-de-açúcar. Com condições de clima e solo favoráveis ao desenvolvimento da cultura, ocupa atualmente a terceira posição em área plantada no país, ficando atrás apenas da soja e do milho (Urashima et al., 2010; Freitas et al., 2011).

A previsão para safra 2013/14, é que a cana-de-açúcar continue sua expansão dentro do território brasileiro, com previsão de acréscimo na área plantada de cerca de 408 mil hectares, impulsionando, principalmente, pelo aumento da área plantada na região Centro-Sul (Conab, 2013).

Com toda essa área de produção, cresce a necessidade do uso da mecanização no setor sucroalcooleiro, principalmente na operação de colheita, onde o uso de máquinas pesadas é cada vez mais presente. Como consequência desse tráfego o crescimento das raízes e das plantas é negativamente alterado devido ao empobrecimento da qualidade física dos solos, culminando com a redução da produtividade e, ou, encurtando o ciclo de produção da cultura (Cavalieri et al., 2011).

Segundo Barros et al. (2011), nos últimos anos têm sido adotadas alternativas conservacionistas para as práticas de manejo do solo para minimizar o impacto dos conjuntos mecanizados no solo. Nesse sentido, a avaliação e monitoramento da qualidade física dos solos durante o período de cultivo da cultura, que é de pelo menos cinco anos, são estratégicos na definição de sistemas de manejo para diminuir a degradação estrutural e física dos solos (Cavalieri et al., 2011; Vasconcelos et al., 2012).

### **Solos coesos**

Em larga faixa litorânea que no Nordeste corresponde a aproximadamente 16 % da área total da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará são encontradas formações geológicas conhecidas por tabuleiros costeiros. Os Tabuleiros Costeiros são definidos como a própria etimologia indica, em função da predominância de formas tabulares e da proximidade do litoral. Essas áreas são de grande importância socioeconômica, devido à proximidade dos grandes centros urbanos, sendo utilizadas com a cultura da cana-de-açúcar ou dedicadas à produção de

alimentos. Nos Estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, essas áreas são exploradas pela cultura da cana-de-açúcar (Lima Neto et al., 2009; Lima et al., 2004).

Nestas formações, são detectadas diferenças marcantes entre os graus de consistência do solo seco e úmido (Jacomine, 1996; Giarola et al., 2001; Giarola & Silva 2002), resultando em solos que tornam-se duro, muito duro ou até extremamente duro, quando seco, e friável, quando úmido (Jacomine, 1996). Solos com estas características foram incorporados ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos por meio da adoção e utilização do designativo coeso.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2006) define o caráter coeso para distinguir solos com horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, muito resistente à penetração da faca ou martelo (Embrapa, 2006).

Por apresentarem características bastante peculiares, principalmente quando secos, estes solos vem sendo bastante estudados, tanto física, como quimicamente, e sua natureza pedogenética, ainda não é definida. Para caracterizar e identificar os possíveis mecanismos envolvidos na formação dos horizontes coesos de solos dos Tabuleiros Costeiros, Lima Neto et al. (2009) estudaram quatro perfis de solos da região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas: um Argissolo Amarelo, um Argissolo Acinzentado e dois Latossolos Amarelo, sob cultivo e floresta. Os autores observaram que o caráter coeso foi identificado em dois solos sob cultivo e dois solos sob vegetação nativa, ou seja, em dois ambientes distintos, o que sugere natureza pedogenética a estes solos quanto a essa característica.

Segundo Silveira et al. (2010), em termos de atributos físicos do solo, suas principais características são alta densidade, baixa permeabilidade e elevada resistência à penetração quando secos. Em consequência dessas características, o horizonte coeso funciona como uma forte limitação para a produção agrícola.

Vasconcelos et al. (2010) estudaram relações entre estabilidade de agregados e carbono orgânico em um solo coeso, cultivado com cana-de-açúcar, em Alagoas e concluíram que os diferentes sistemas de manejo promoveram alterações na distribuição e estabilização de agregados do solo na camada superficial que dependeu do teor de matéria orgânica e da ação dos ciclos sucessivos de umedecimento e secagem do solo, evidenciado a força do caráter coeso na alteração de atributos do solo.

Tentando conhecer as relações existentes entre atributos físicos em Argissolo Amarelo distrocoeso, Silveira et al. (2010) desenvolveram trabalho para caracterizar a

relação entre a umidade do solo e a resistência à penetração, com os resultados obtidos, os autores observaram elevado coeficiente de variação dos atributos estudados, indicando que o caráter coeso é susceptível a variabilidade, o que dificulta a padronização das características físicas do solo para o desenvolvimento uniforme das culturas.

Outro fator preocupante nestes solos é a compressibilidade, que tem sido potencializada pela intensificação da mecanização da cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de solos coesos. Oliveira et al. (2011) investigaram, em diferentes sistemas de manejo, a capacidade de suporte de carga em solos coesos de Alagoas cultivados com cana-de-açúcar. Os mesmos verificaram, para diferentes teores de água, médias de tensão de preconsolidação entre 140 e 57 kPa, frisando que a pressão de insuflagem de pneus dos conjuntos mecanizados é na ordem de 180 kPa, portanto, concluindo que, a mecanização nestes solos causaria compactação adicional.

### **Compactação e suas relações com atributos físicos e mecânicos do solo**

Com o intuito de se aumentar a produção dos sistemas agrícolas, normalmente, com o atual avanço da tecnologia agrícola, há uma intensificação na exploração do solo para obtenção de maiores produtividades, que podem levar a diferentes formas de degradação do solo em longo prazo, mesmo associadas às técnicas de conservação do solo (Cavaliere et al., 2011).

Dentro deste sistema, um dos principais problemas enfrentados pelas grandes unidades produtoras, em diversas regiões do país, são os níveis de compactação, fato observado em praticamente todos os sistemas de produção e manejo do solo, principalmente os que utilizam máquinas agrícolas (Ralisch et al., 2008).

Segundo Richart et al. (2005), a compactação do solo é o processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais.

Para Dalchiavon et al. (2011), a compactação pode reduzir a penetração das raízes, alterar o equilíbrio na proporção de gases do solo e a disponibilidade de água e nutrientes às plantas, o que seria consequência das alterações proporcionadas pelo em suas propriedades estruturais.

Na agricultura moderna, o efeito de máquinas e implementos agrícolas no solo, por ocasião do preparo do solo e colheita, é a principal causa da compactação do solo,

trazendo prejuízos para a produtividade das culturas e contribuindo com processos erosivos (Roque et al., 2011; Silva et al., 2011). Vários pesquisadores (Roque et al., 2011; Cavalieri et al., 2011) tem atribuído o aumento da compactação em áreas cultivadas ao aumento da mecanização. O efeito deste tráfego nas propriedades físicas e mecânicas do solo tem se elevado ainda mais com o aumento da massa das máquinas e equipamentos agrícolas, potencializando o processo de compressão do solo quando na realização de operações no campo (Keller et al., 2011; Vogelmann et al. 2012).

A compactação do solo é influenciada pela umidade do solo (Han et al., 2011; Gao et al., 2012), carbono orgânico (Vasconcelos et al., 2010; Braida et al., 2010) e textura (Ribon & Tavares Filho, 2008; Ampoorter et al., 2010; Lima et al., 2013), sendo a densidade do solo e a resistência à penetração atributos diagnósticos desse movimento mecânico (Freitas et al., 2012; Gao et al., 2012). Segundo Ribon & Tavares Filho (2008), as relações existentes entre os atributos físicos e a compactação são de fundamental importância para a escolha do sistema de preparo mais adequado ao crescimento e desenvolvimento das culturas.

Em estudo sobre o efeito do tráfego sob atributos físicos do solo, Roque et al. (2011) concluíram que a mecanização diminui a macroporosidade e aumenta a densidade do solo, fato também destacado por Pacheco & Cantalice (2011) e Vogelmann et al. (2012), principalmente nas entrelinhas de cultivo, demonstrando o efeito do maquinário na degradação da qualidade física do solo e na alteração de suas propriedades, levando a degradação.

Solos com diferentes classes texturais apresentam comportamentos distintos quanto às propriedades físicas, quando submetidos à compactação (Ribon & Tavares Filho, 2008; Lima et al., 2013; Ampoorter et al. 2010). Visando o diagnóstico da compactação, Lima et al. (2013) estudaram o efeito de diferentes classes texturais sobre resistência à penetração do solo em áreas de cana-de-açúcar trafegada por máquinas de colheita no estado no Mato Grosso. Os mesmos concluíram que o solo com maior diversidade de tamanhos de partículas, ou seja, maior variação de suas frações granulométricas, apresentou as maiores médias de resistência à penetração, atribuindo os resultados a maior facilidade de diferentes frações se rearranjarem no perfil no momento da aplicação da pressão pelos conjuntos mecanizados.

Outro efeito conhecido e de grande importância na compactação é a umidade do solo. Segundo Oliveira et al. (2011), as operações de colheita são as que, a cada ano, utilizam máquinas pesadas, conferindo ao solo pressões críticas que favorecem a

compactação, principalmente quando utilizadas em condições inadequadas de umidade, sendo esta uma das maiores preocupações para a agricultura moderna.

Han et al. (2011) simularam cinco cargas e cinco níveis de umidade do solo com o objetivo de caracterizar a perda de umidade em função da carga e da profundidade do solo. Os resultados mostraram que quanto menor a carga menor a perda de água no perfil, e esta diminui ainda mais com o aumento da profundidade do solo. No entanto, com o aumento das cargas, houve perda de água no perfil, o que evidencia o efeito da relação do peso das máquinas com os teores de umidade do solo.

A influência da umidade também é bastante utilizada nos modelos de resistência à penetração, atributo importante para se diagnosticar o estado de compactação do solo. Gao et al. (2012) avaliaram o efeito da variação do teor de água na resistência à penetração por meio de modelos matemáticos que incluíram também a densidade. Os autores conseguiram modelos que explicaram 60% da variabilidade em dados de campo e laboratório, e sugeriram as equações para o planejamento e tomada de decisões no momento do manejo da área.

O acúmulo de matéria orgânica tem sido outro fator importante nos estudos de compactação, podendo aumentar a resistência do solo à compactação e diminuir os efeitos das pressões aplicadas aos solos (Brida et al. 2006; Brida et al. 2010). Brida et al. (2010) verificaram a influência do teor de carbono orgânico na susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. Os autores concluíram que o teor de carbono orgânico afeta o coeficiente de compressão do solo, ou seja, a susceptibilidade à compactação. No entanto, a magnitude e o tipo de efeito são dependentes da textura do solo e de seus efeitos sobre a retenção de água, a coesão e a densidade do solo.

Em estudo sobre atributos físicos relacionados à compactação de solos, Luciano et al. (2012) constataram um aumento da umidade nos solos argilosos ou com maior teor de carbono orgânico total e atribuíram os resultados a alta retenção de água desses atributos, o que poderia alterar o comportamento compressivo do solo, aumentando a sua susceptibilidade à compactação. Os autores também enfatizaram a importância da consistência do solo como medida indireta da compactação. Foi observado um alto valor positivo na correlação entre o teor de argila e carbono orgânico total e a umidade ótima, que culminou por influenciar os limites de liquidez e de plasticidade, evidenciando o aumento nos valores deste com o aumento da matéria orgânica e o teor de argila do solo.

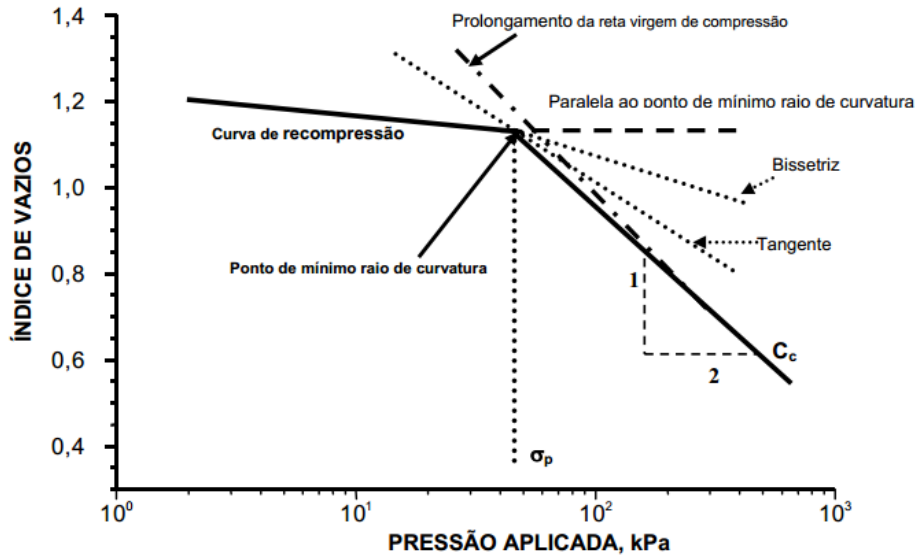
Em trabalho desenvolvido em solos coesos do Estado de Alagoas, Vasconcelos et al. (2010) estudaram limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. Os autores verificaram relação positiva entre os teores de carbono orgânico e o limite de liquidez e plasticidade do solo, ou seja, as medidas de consistência do solo apresentaram tendência de aumento em seus valores de umidade com o incremento do carbono orgânico total.

### **Compressibilidade do solo e sua modelagem**

A compressibilidade caracteriza-se pelo processo que descreve o decréscimo do volume de solo quando submetido a uma carga mecânica na presença ou não da água (Holtz & Kovacs, 1981; Horn & Lebert, 1994). Portanto, é importante que se entenda que existem dois grandes processos que envolvem a compressão de solos: a compactação e a consolidação. A compactação é a redução de volume por expulsão de ar, feita muito rapidamente por equipamento mecânico, enquanto a consolidação é um processo pelo qual o solo sofre deformações devido à expulsão de água e ar dos vazios como resultados de aplicação de tensões em solos não saturados (Holtz & Kovacs, 1981).

O processo de compressão do solo é analisado através da curva de compressão uniaxial. Pela aplicação do método de Casagrande (1936), é possível determinar a tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) com a utilização de um procedimento gráfico desenvolvido pelo autor (Holtz & Kovacs, 1981).

O método consiste em traçar a curva de compressão do solo, representada no eixo das abcissas pelo logaritmo da pressão aplicada, e no eixo das ordenadas, pelo índice de vazios (Figura 1).



**Figura 1.** Esquema ilustrativo da determinação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) obtido a partir da curva de compressão pelo método de Casagrande (Secco, 2003).

A curva obtida nesse ensaio é dividida em dois segmentos pela  $\sigma_p$ : um denominado curva de compressão secundária, em que as deformações são elásticas (reversíveis); e outro denominado de reta de compressão virgem, em que as deformações correspondentes são plásticas (irreversíveis) (Dias Junior & Pierce, 1996; Debiasi et al., 2008).

A região da curva de compressão secundária, também denominada de recompressão, pode ser utilizada para determinar o momento adequado em que o solo deve ser mobilizado ou trafegado, sem que ocorra compactação adicional (Dias Junior & Pierce, 1996), pois é este componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo (Kondo & Dias Junior, 1999). Assim, a maior pressão que pode ser aplicada ao solo a fim de evitar a sua compactação é a  $\sigma_p$  (Dias Junior & Pierce, 1996).

A tensão de pré-consolidação é influenciado por várias propriedades físicas e mecânicas do solo, com a maioria dos solos no Brasil, apresentando ampla variação destes atributos, seja por características naturais, ou em função do manejo adotado. No entanto, modelos que abrangem estas variáveis para estimativa da capacidade de suporte de carga são escassos na literatura (Imhoff et al., 2004). O estudo das relações entre as propriedades físicas e mecânicas do solo pode contribuir para o entendimento e desenvolvimento de funções de pedotransferência que auxiliem na predição da compactação (Susuki et al., 2008; Lozano et al., 2013).

Estratégias e recomendações para a prevenção da compactação do solo muitas vezes dependem de modelos de simulação. Tais modelos são capazes de prever a propagação de pressão, e conseqüentemente, evitar degradação no perfil do solo por efeito de certa carga mecânica (máquinas agrícolas) e de condições intrínsecas do solo (umidade do solo), servindo como planejamento e na tomada de decisões sobre situações de trânsito específicas no campo (Keller & Lamandé, 2010).

A tensão de pré-consolidação, apesar das dificuldades inerentes à sua obtenção, representa uma medida útil do estado mecânico do solo para o seu uso, manejo e planejamento de sistemas de mecanização. A estimativa da tensão de pré-consolidação, a partir de propriedades do solo facilmente mensuráveis, é, portanto, uma alternativa que pode ser utilizada para contornar as dificuldades (Lima et al., 2006; Pires et al. 2012).

Segundo Silva et al. (2010), a tensão de pré-consolidação depende de vários fatores, como: textura, estrutura e densidade do solo, sistema de manejo, matéria orgânica, ciclos de umedecimento e secagem, dentre outros. A relação destes fatores é o que tem justificado a elaboração de diversas funções (Pires et al., 2012; Braida et al., 2010) a partir de modelos envolvendo variáveis relacionadas à estrutura e processos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo.

Um dos modelos mais utilizados para estimativa da tensão de pré-consolidação é o proposto por Dias Júnior (1994). É um modelo não linear denominado “modelo de capacidade de suporte de carga” e foi desenvolvido para solos de clima temperado, predizendo a máxima tensão de pré-consolidação que o solo pode suportar para diferentes conteúdos de água (Iori et al., 2012; Silva et al., 2010). O modelo é expresso abaixo (1):

$$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)} + \varepsilon, (1)$$

em que,  $\sigma_p$  é tensão de pré-consolidação em kPa, “a” e “b” são parâmetros da equação, e “ $\theta$ ” o conteúdo volumétrico de água ( $\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$ ).

Através deste modelo, a capacidade de suporte de carga tem sido bastante estudada para as diferentes condições de solo e manejo no Brasil (Tabela 1). O principal resultado constatado com a aplicação deste modelo, é a redução da  $\sigma_p$  quando ocorre um aumento do conteúdo de água no solo, fato observado por Severiano et al. (2008), Debiase et al. (2008), Ajayi et al. (2009) e Iori et al. (2012).



**Tabela 1.** Modelos lineares e não lineares ajustados para predição da tensão de pré-consolidação em diversas condições de solo e manejo.

Modelos ajustados	Descrição e Autor
$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$	Modelo não linear para solos tropicais (Dias Júnior, 1994).
$\sigma_p = 10^{(2,9387 - 1,4868\theta)}$ , $R^2 = 0,81$	Argissolo e Cambissolo com 30 repetições (Iori et al., 2012).
$\sigma_p = 10^{(2,70 - 1,77\theta)}$ , $R^2 = 0,88$	Solo franco-argiloarenoso, com 660, 60 e 280 g kg <sup>-1</sup> de areia, silte e argila, respectivamente (Ajayi et al., 2009).
$\sigma_p = 10^{(3,26 - 7,36\theta)}$ , $R^2 = 0,88$ (LV); $\sigma_p = 10^{(2,91 - 2,89\theta)}$ , $R^2 = 0,73$ (C)	Latossolo Vermelho (LV) e Cambissolo (C) em sob cana-de-açúcar, respectivamente, 72 repetições (Severiano et al., 2008).
$\sigma_p = a\theta^b DS^c$ ; $\sigma_p = 2,64\theta^{-1,24} DS^{4,93}$ , $R^2 = 0,83$ (LV) $\sigma_p = 20,77\theta^{-0,91} DS^{3,43}$ , $R^2 = 0,72$ (C)	Modelo adaptado de Busscher (1990), colheita mecanizada em cana-de-açúcar sob Latossolo Vermelho e Cambissolo (Severiano et al., 2010).
$\sigma_p = 0,058RP$ , $R^2 = 0,97$ (L) $\sigma_p = 0,057RP$ , $R^2 = 0,97$ (C)	Condições de campo (C) e laboratório (L) em Latossolo Vermelho Amarelo, de textura franco-arenosa (Lima et al., 2006)
$\sigma_p = 179 RP$ , $R^2 = 0,99$ (L) $\sigma_p = 216 RP$ , $R^2 = 0,87$ (C)	Latossolo Vermelho (L) e Cambissolo (C) em pastagem e cultivo de café (Lima et al., 2010)
$\sigma_p = 20,615 + 51,428RP$ , $R^2 = 0,46$ $\sigma_p = 81,389 + 0,101A$ , $R^2 = 0,32$	Equação ajustada para diversos solos do Rio Grande do Sul, em diferentes sistemas de manejo. Resistência à penetração e teor de argila (Susuki et al., 2008)
$\sigma_p = 26,16 (DS)^{3,533}$ , $R^2 = 0,52$	Argissolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa sob diversas condições de manejo e tráfego de máquinas (Debiase et al., 2008).
$\sigma_p = -566,8 + 442,9DS + 4,3TA - 733,1\theta$ , $R^2 = 0,70$	Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar em topossequencia, ampla variabilidade textural e de carbono orgânico (Imhoff et al. 2004).
$\sigma_p = 7,71 + 112,21DS - 2,82\theta$ , $R^2 = 0,88$ , (AG) $\sigma_p = -220,68 + 191,45 DS + 2,77\theta$ (AN), $R^2 = 0,57$	Solos de textura (AG) e arenosa (AN) sob diversas condições de manejo (Saffih-Hdadi et al., 2009).

$\sigma_p$  - tensão de pré-consolidação;  $\theta$  - umidade do solo; DS - densidade do solo; RP - resistência à penetração; TA - teor de argila.

A principal limitação deste modelo é o fato da  $\sigma_p$  ser ajustada em função apenas do conteúdo de água no solo, quando a literatura aponta relação da capacidade de suporte de carga do solo com outras variáveis (Silva et al., 2010).

Alguns outros modelos, não lineares, têm sido aplicados para predição da  $\sigma_p$  em função de atributos físicos do solo. Severiano et al. (2010), na tentativa de incluir a mais variáveis da predição da  $\sigma_p$ , adaptou o modelo não linear proposto por Busscher (1990), construído para predição da resistência à penetração, na justificativa de ter encontrado elevada relação positiva da  $\sigma_p$  com a resistência a penetração. Portanto, neste modelo, para predição da capacidade de suporte de carga do solo, a resistência a penetração é substituída pela tensão de pré-consolidação como variável dependente, como segue a expressão abaixo (2):

$$\sigma_p = a\theta^b DS^c + \varepsilon \quad (2),$$

em que,

$\sigma_p$  - tensão de pré-consolidação (kPa);

$\theta$  - umidade do solo ( $g\ g^{-1}$ );

DS - densidade do solo ( $g\ cm^{-3}$ ), e

“a”, “b” e “c”, coeficientes de ajuste da equação de regressão.

Modelos lineares também têm sido ajustados para predição da  $\sigma_p$ , os simples, e os múltiplos. Lima et al. (2006) estudaram a relação da  $\sigma_p$  de forma linear em condições de campo e laboratório em Latossolo Vermelho Amarelo, de textura franco-arenosa, constando relação significativa e positiva entre as variáveis. Em solos sob diferentes sistemas de manejo, Lima et al. (2010) também encontraram comportamento linear da tensão de pré-consolidação em função da resistência à penetração. Neste caso os autores estudaram o comportamento das variáveis em três solos com diferentes condições texturais. No entanto, as condições distintas não alteraram a relação linear entre as variáveis.

Utilizando modelo linear múltiplo, Imhoff et al. (2004) estudaram o efeito da densidade do solo, umidade, teor de argila e carbono orgânico na  $\sigma_p$  em Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar em topossequencia. De acordo com os resultados obtidos, densidade do solo, umidade e teor de argila, afetaram significativamente a tensão de pré-consolidação.

Estudo semelhante foi realizado por Saffih-Hdadi et al. (2009), que estudaram o comportamento de solos com diferentes classes texturais na tensão de pré-consolidação utilizando regressão múltipla. No entanto, os autores se limitaram a estudar apenas o efeito da densidade e umidade do solo. De acordo com os resultados obtidos, foi possível modelar a tensão de pré-consolidação em função da densidade inicial e umidade do solo de forma linear. Dependendo do solo, os autores encontraram valores de 20 kPa para uma densidade de  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ , e de até 130 kPa para densidade em torno de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ .

Portanto, alguns modelos têm sido propostos para predição da tensão de pré-consolidação, sejam eles lineares ou não lineares em diversas condições de solos e manejo. No entanto, estes modelos possuem poucas variáveis, o que do ponto de vista prático é ideal para obtenção de uma variável estimada, mas, com bases nas muitas relações existentes entre a tensão de pré-consolidação e os atributos físicos do solo, outros modelos podem ser propostos, para solos específicos, facilitando o manejo e o planejamento agrícola.

### Referências

- Ajayi, A. E.; Dias Júnior, M. S.; Curi, N.; Araújo Júnior, C. F.; Aladenola, O. O.; Souza, T. T.; Inda Junior, A. A. Comparison of estimation methods of soil strength in five soils. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, v.33, p.487-495, 2009.
- Ampoorter, E.; Van Nevel, L.; De Vos, B.; Hermy, M.; Verheyen, K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, v.260, p.1664-1676, 2010.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Veiga, M.; Reinert, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.605-614, 2006.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, v.3, p.519-524, 1990.

- Casagrande, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: Conference on Soil Mechanics And Foundation Engineering, Cambridge, 1936. Proceeding. Cambridge. v.3, p.60-64, 1936.
- Cavaliere, K. M. V.; Carvalho, L. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L.; Tormena, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, p.1541-1549, 2011.
- Companhia Nacional de Abastecimento - Conab . Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2013. Brasília, 2013.17p.
- Dalchiavon, F. C.; Passos e Carvalho, M.; Nogueira, D. C.; Romano, D.; Abrantes, F. L.; Assis, J. T.; Oliveira, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no Cerrado brasileiro. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.41, p.8-19, 2011.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.2629-2637, 2008.
- Dias Júnior, M. S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. 1994. 114f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing. 1994.
- Dias Junior, M.S.; Pierce, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. Brasileira de Ciência do Solo, v.20, p.175-182, 1996.
- Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- Freitas, L; Casagrande, J. C.; Desuó, I. C. Atributos físicos e químicos de solos cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmento nativo. Holos Envolviment, v.11, p.137-146, 2011.
- Gao, W.; Watts, C. W.; Ren, T.; Whalley, W. R.. The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance. Soil & Tillage Research, v. 125, p. 14-22, 2012.
- Giarola, N. F. B.; Silva, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. Scientia Agricola, v.59, p.613-620, 2002.
- Giarola, N.F.B.; Silva, A.P.; Tormena, C.; Souza, L. da S.; Ribeiro, L. da P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.239-247, 2001.

- Han, W.; Shi, S.; Zhu, Z.; Xue, L.; Juanli, Z. A simulation test of the impact on soil moisture by agricultural machinery. *African Journal of Biotechnology*, v.10, p.16536-16540, 2011.
- Holtz, R.D.; Kovacs, W.D. An introduction to geotechnical engineering. Englewood, Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 733p.
- Horn, R.; Lebert, M. Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier. 1994. p.45-69.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal* v.68, p.17-24, 2004.
- Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Júnior, M. S; Lima, J. M. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de Cambissolo Háplico, Argissolo Amarelo e Gleissolo Háplico em Registro, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1448-1456, 2012.
- Jacomine, P.K.T. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: *Reunião técnica sobre solos coesos dos tabuleiros costeiros*, Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, EMBRAPA-CPATC & CNPMF / EAUFBA / IGUFBA, 1996. p. 13-26.
- Keller, T.; Lamandé, M.. Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil & Tillage Research*. v. 111, p. 54-64, 2010.
- Keller, T.; Lamandé, M.; Schøfjning, P. Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v.163, p.13-23, 2011.
- Kondo, M. K.; Dias Junior, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.497-506, 1999.
- Lima Neto, J. A.; Ribeiro, M. R.; Corrêa, M. M.; Souza Júnior, V. S.; Lima, J. F. W.; Ferreira, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de alagoas. *Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.1001-1011, 2009.
- Lima, C.L.R.; Silva, A.P.; Imhoff, S.; Leão, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.217-233, 2006.

- Lima, H. V.; Silva, A. P.; Jacomine, P. T. K.; Romero, R. E.; Libard, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.467-476, 2004.
- Lima, M. P. L.; Magalhães, C. A. S.; Oliveira, G. C.; Lima, J. M.. Structural quality of soils cultivated with coffee and pasture in an environmental protection area. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.709-716, 2010.
- Lima, R. P.; Leon, M. J.; Silva, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v.60, p.16-20, 2013.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p.61-68, 2013.
- Luciano, R. V.; Albuquerque, J. A.; Costa, A.; Batistella, B.; Warmling, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1733-1744, 2012.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 435-442, 2011.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- Pires, B. P.; Dias Júnior, M. S.; Rocha, W. W.; Araújo Júnior, C. F.; Carvalho, R. C. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo vermelho-amarelo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.635-642, 2012.
- Ralisch, R.; Miranda, T. M.; Okumura, R. S.; Barbosa, G. M.; Guimarães, M. F.; Scopel, E.; Balbino, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.381-384, 2008.

- Ribon, A.A.; Tavares Filho, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1817-1825, 2008.
- Richart, A.; Tavares Filho, J; Rodrigues Brito, O.; Llanillo, R. F.; Ferreira, R. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 26, p. 321-344, 2005.
- Roque, A. A. O.; Souza, Z. M.; Araujo, F. S.; Silva, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. *Ciência Rural*, v.41, p.1536-1542, 2011.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y.J.; Tang, A.M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Secco, D. Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto. 2003. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- Severiano, E.C.; Oliveira, G.C.; Dias Júnior, M.S.; Castro, M.B.; Oliveira, L.C.; Costa, K.A.P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.414-423, 2010.
- Silva, A. R.; Dias Júnior, M. S.; Leite, F. P.. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um Forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Árvore*, v.35, p.547-554, 2011.
- Silva, A.P.; Tormena, C.A.; Dias Júnior, M.S.; Imhoff, S.; Klein, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong van Lier, Q., ed. *Física do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.541-281.
- Silveira, D. C.; Melo Filho, J. F.; Sacramento, J. A. A. S.; Silveira, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo Distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.659-667, 2010.
- Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Lima, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.963-973, 2008.

- Urashima, A. S.; Ganem Júnior, E. J.; Marchetti, L. B. L.; Gagliardi, P. R. Incidência de *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* em variedades de cana-de-açúcar a serem empregados para multiplicação no Estado de São Paulo. *Summa phytopathol*, v.36, p.322-328, 2010.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525-536, 2012.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Silva, A. J. N.; Oliveira, V. S.; Silva, Y. J. B. S. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.639-648, 2010.
- Vogelmann, E. S.; Menten, M. I.; Reichert, J. M.; Rosa, D. P.; Barros, C. A. P.; Reinert, D. J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. *Ciência Rural*, v.42, p.291-297, 2012.



## **CAPÍTULO II**

---

### **Modelagem da compressibilidade em um Argissolo Amarelo distrocoeso**

## **Modelagem da compressibilidade em um Argissolo Amarelo distrocoeso**

**Resumo:** O presente estudo teve como objetivos ajustar modelos de regressão lineares e não lineares para predição da tensão de pré-consolidação em função de atributos físicos e mecânicos do solo. O trabalho foi realizado em área de Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar. Em um talhão, foram demarcados 42 pontos e coletadas amostras nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 pontos amostrais. Amostras deformadas e não deformadas foram coletadas para obtenção das variáveis: umidade do solo ( $\theta$ ), densidade do solo (DS), resistência à penetração (RP), carbono orgânico (CO), teor de argila (TA), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL), além da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Foram ajustados quatro modelos para predição da  $\sigma_p$ : regressão linear múltipla, dois modelos múltiplos não lineares e um modelo não linear de capacidade de suporte de carga. A  $\sigma_p$  média foi de 73,0 kPa; sendo o modelo de regressão linear múltipla o que melhor se ajustou as condições de solo e manejo da área nas duas camadas analisadas. Apenas a densidade do solo e a resistência à penetração contribuíram significativamente para variação da  $\sigma_p$  nos modelos com os melhores ajustes.

**Palavras-Chave:** solo coeso, tensão de pré-consolidação, atributos físico, modelagem

## **Compressibility modelling in an Ultisol**

**Abstract:** The current study aimed to fit linear and nonlinear regression models to predict the pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ) as a function of physical and mechanical soil attributes. The work was carried out in an area of Ultisol cultivated with sugarcane. On a plot, 42 points were delimited to get samples in the layers 0-0.20 and 0.20-0.40 m, totaling 84 samples. Deformed and undeformed samples were collected to obtain the variables: water content, bulk density (BD), soil resistance to penetration (RP), organic carbon, clay content, plastic limit and liquid limit, as well as the pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ). Four models were fitted to predict the  $\sigma_p$ : linear multiple regression, two nonlinear multiple model and charge supporter capacity model. The average of  $\sigma_p$  was 73.0 kPa. The multiple linear regression model was the best fit soil conditions and management of the area in the two analyzed layers. Only soil bulk density and penetration resistance contributed significantly to variation  $\sigma_p$  models with the best settings.

**Key words:** cohesive soil, pre-consolidation stress, physical attributes, modelling

## Introdução

Ocupando atualmente a terceira posição em área plantada no país, a cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes da agricultura brasileira; dados da safra 2013/14, mostram que a cultura no Brasil continua em expansão, com previsão de acréscimo na área plantada em cerca de 408 mil hectares, equivalendo a 4,8% em relação à safra anterior (Conab, 2013). Parte da área plantada da cultura da cana-de-açúcar no nordeste situa-se em uma larga faixa litorânea dos Estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte, onde é encontrada uma unidade de formação geológica conhecida por Tabuleiros Costeiros (Jacomine, 1996).

Diferenças marcantes entre os graus de consistência do solo seco e úmido podem ser observadas em alguns horizontes de solo da faixa dos Tabuleiros Costeiros, na região Nordeste do Brasil (Jacomine, 1996; Giarola & Silva, 2002), solos que se tornam duro, muito duro ou até extremamente duro, quando seco, e friável, quando úmido (Jacomine, 1996), sendo esta característica designada de solos coesos.

Pela variação de suas propriedades, entre o estado úmido e seco, solos desta natureza têm apresentado problemas de compactação. Desse modo, para esses solos, o efeito de máquinas e implementos agrícolas, por ocasião do preparo do solo e colheita, são as principais causas da compactação, trazendo prejuízos para a produtividade das culturas e contribuindo com processos erosivos (Tang et al., 2011; Schäffer et al., 2010). Vários pesquisadores (Oliveira et al., 2011; Tang et al., 2011) tem atribuído o acréscimo da compactação em áreas cultivadas ao aumento da mecanização (Tang et al., 2011; Schäffer et al., 2010).

Para o controle da compactação em áreas mecanizadas, as pesquisas tem demonstrado que a principal ferramenta a ser utilizada é o conhecimento sobre a capacidade de suporte de carga do solo, obtidas pelo ensaio de compressibilidade (Keller et al., 2011; Chaplain et al., 2011). A compressibilidade caracteriza-se pelo processo que descreve o decréscimo do volume de solo quando submetido a uma carga mecânica na presença ou não da água (Horn & Lebert, 1994; Holtz & Kovacs, 1981), sendo a tensão de pré-consolidação, sua principal variável diagnóstico. A tensão de pré-consolidação é influenciado por várias propriedades físicas e mecânicas do solo; no

entanto, modelos que abrangem variáveis para estimativa da capacidade de suporte de carga são escassos na literatura (Imhoff et al., 2004; Saffih-Hdadi et al., 2009; Horn & Fleiger, 2009). A modelagem da capacidade de suporte de carga do solo, através de modelos de tensão de pré-consolidação, é uma ferramenta bastante útil para monitorar e controlar o processo de compactação em solos agrícolas, visando evitar suas graves consequências à estrutura física do solo (Lozano et al., 2013; Suzuki, 2008; Keller et al., 2011).

Um dos modelos de predição da tensão de pré-consolidação bastante utilizado é o proposto por Dias Júnior (1994), não linear, denominado “modelo de capacidade de suporte de carga”, predizendo a tensão que o solo pode suportar para diferentes conteúdos de água. Com base no modelo proposto por Dias Júnior (1994), seus parâmetros tem sido ajustados para as diversas condições de solo e manejo em função do teor de água (Ajayi et al., 2009; Debiase et al. 2008). Ajayi et al. (2009) aplicaram o modelo quando estudaram o efeito do teor de água na tensão de pré-consolidação em quatro solos de textura argilosa e três de textura arenosa, concluindo que solos argilosos apresentam maior capacidade de suporte de carga para um mesmo teor de umidade. Porém, a tensão de pré-consolidação diminuiu com o aumento do volume de água em todas as classes de solos analisadas.

Em outro estudo, por meio de modelo linear, Dias Júnior et al. (2004) encontraram equações significativas com  $R^2$  variando entre 0,88 e 0,99 para quatro classes de solo, demonstrando que independente das variações encontradas na textura do solo, a tensão de pré-consolidação pode ser estimada por meio da resistência à penetração, medida de fácil determinação no campo.

Outros modelos, que consideram mais variáveis, têm sido adaptados na tentativa de se conseguir o melhor ajuste para estimativa da tensão de pré-consolidação. É o caso do modelo não linear proposto por Busscher (1990), em que modela a resistência à penetração em função da densidade do solo (DS) e a umidade volumétrica ( $\theta$ ), utilizado por Severiano et al. (2010) para estimativa da capacidade de suporte de carga do solo, em uma adaptação, em que a resistência a penetração é substituída pela tensão de pré-consolidação como variável dependente.

Além de modelos não lineares, alguns estudos tem demonstrado relação linear de variáveis físicas com a tensão de pré-consolidação, como o de Lima et al. (2006), que encontraram relação positiva e linear entre tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e resistência à penetração, ou seja, valores superiores de  $\sigma_p$  estiveram associados ao incremento da

resistência à penetração. Por sua vez, Susuki et al. (2008), avaliaram a relação entre a capacidade de suporte de carga com propriedades físicas de solos do sul do Brasil; demonstrando com os resultados obtidos, que a densidade inicial não mostrou relação com a tensão de pré-consolidação.

Imhoff et al. (2004) estudaram por meio de regressão linear múltipla o comportamento da tensão de pré-consolidação em função da matéria orgânica, teor de argila, densidade do solo e umidade; que foi significativa e positiva com a densidade e teor de argila, e negativa com a umidade do solo. O conteúdo de matéria orgânica não influenciou significativamente a tensão de pré-consolidação.

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo ajustar modelos de regressão lineares e não lineares para predição da tensão de pré-consolidação em função de atributos físicos e mecânicos do solo.

### Material e Métodos

O experimento foi realizado no período de outubro de 2012 a março de 2013, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Carpina, na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, situando-se a 7° 51' 13'' de latitude sul e 35° 14' 10'' de longitude oeste do meridiano de Greenwich, com altitude de aproximadamente 180 m. O clima da região é caracterizado como megatérmico (As'), com precipitação de inverno e estação seca do verão até o outono, segundo classificação de Köppen. A precipitação pluviométrica apresenta médias de 1.400 mm. O solo da área é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, segundo Embrapa (2006), de classe textural-franco-arenosa, conforme a caracterização física (Tabela 2).

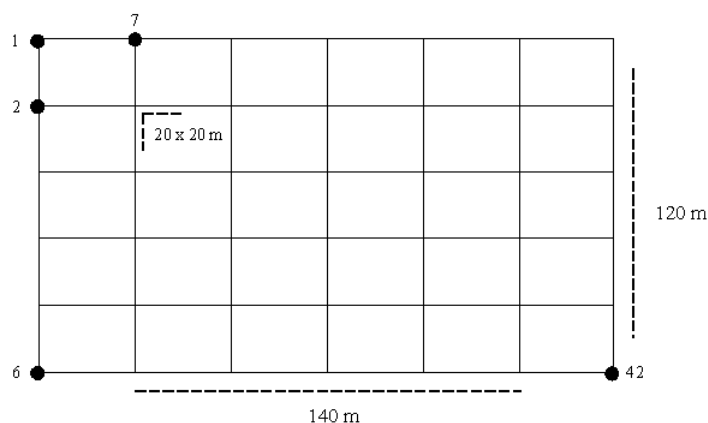
**Tabela 2.** Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar, Estação Experimental de cana-de-açúcar do Carpina (EECAC).

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Cc	Pm
	g kg <sup>-1</sup>			cm <sup>3</sup>	cm <sup>-3</sup>
0-0,20	824	32	144	0,17	0,06
0,20-0,40	812	30	158	0,21	0,06

Cc - capacidade de campo; Pm - ponto de mucha

A área experimental recebeu preparo convencional, com uma gradagem pesada e duas passadas com grade niveladora, logo após, sulcada com o espaçamento de 1,0 m. No momento da coleta, a área amostral encontrava-se plantada com as variedades RB962962, RB987010 e RB931011 de cana-de-açúcar, no quarto corte. Na colheita, a cana foi previamente queimada, sendo o corte manual e o carregamento mecanizado, utilizando-se carregadoras convencionais e caminhões trucados que trafegaram em paralelo por todo o talhão. O tráfego foi repetido durante os quatro ciclos da cultura.

Em um talhão, com aproximadamente 2,0 ha, foi implantado o esquema experimental, em que foram demarcados, com piquetes, 42 pontos, espaçados em 20 × 20 m (Figura 2) em uma área total de 120 × 140 m. As amostras foram coletadas nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 pontos amostrais. Foram coletadas amostras deformadas e não deformadas para obtenção das seguintes variáveis: umidade do solo ( $\theta$ ) ( $\text{cm cm}^{-3}$ ), densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ ), carbono orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ), teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), limite de plasticidade (%) e limite de liquidez (%), além da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) (kPa).



**Figura 2.** Esquema de amostragem na área experimental.

Amostras indeformadas foram coletadas utilizando um trado tipo Uhland, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, com base na relação massa/volume. As frações granulométricas (areia, silte e argila) foram obtidas pelo método do densímetro de Boyoucos, com dispersão de 50 g de terra fina seca ao ar com 25 ml de hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio. Também foi determinada a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico. O teor de carbono orgânico foi obtido pela

digestão da amostra em ácido sulfúrico e dicromato de potássio, todos conforme metodologia de Embrapa (1997).

Amostras deformadas foram coletadas para realização do ensaio do limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL) (aparelho de Casagrande), ambos determinados conforme normas da ABNT (1984a) e ABNT (1984b), respectivamente.

Amostras indeformadas também foram coletadas para determinação da  $\sigma_p$ , com uso de anéis metálicos de 0,025 m de altura e 0,065 de diâmetro. Na determinação da tensão de pré-consolidação, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando-se para tal, uma prensa de adensamento, tipo Bishop, da Solotest. Foram aplicadas cargas sucessivas e contínuas, equivalente às pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1600 kPa, durante 2 min, momento em que foi realizada a leitura, para cada uma das cargas, conforme MB-3336 da ABNT (1990). Logo após, as amostras foram encaminhadas à estufa para secagem a 105 °C, durante 24 h e determinada a umidade da amostra. Os dados foram analisados utilizando-se o software Compress (Reinert et al., 2003), optando-se pelo método de Casagrande para determinação dos valores de tensão de pré-consolidação.

Na avaliação da resistência à penetração (RP) foi utilizado um penetrômetro digital Falker, modelo PenetroLOG-PLG 1020, com aptidão eletrônica para aquisição de dados. O penetrômetro foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m de incremento de profundidade, trabalhando a velocidade de penetração constante. Os dados de RP foram analisados a uma profundidade até 0,40 m através do Software PenetroLOG.

Para as camadas de 0-0,20 e 0,2-0,4 m, nos 42 pontos amostrados, foram ajustados quatro modelos de regressão, para predição da tensão de pré-consolidação, conforme os procedimentos descritos abaixo:

a) Modelos de regressão linear

Um modelo de regressão linear múltiplo foi ajustado aos dados de tensão de pré-consolidação em função de atributos físicos do solo, de acordo com a equação 1,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1\theta + \beta_2DS + \beta_3RP + \beta_4CO + \beta_5TA + \beta_6LP + \beta_7LL + \varepsilon \quad (1),$$

em que  $y_i$  é a  $i$ -ésima observação de pré-consolidação ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta_j$  são os parâmetros do modelo ( $j = 0, 1, \dots, 7$ ),  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a observação  $y_i$ .

Os parâmetros  $\beta_j$  associados aos regressores do modelo foram submetidos ao teste t-Student para seleção dos atributos físicos do solo que afetam significativamente a  $\sigma_p$ . Com base apenas nas variáveis significativas, um submodelo de regressão foi construído e o teste t foi novamente aplicado para fins de confirmação e estimativa os parâmetros do modelo.

b) Modelos de Regressão Não Linear

Um modelo de regressão não linear múltiplo (Lyra et al., 2003) (2) também foi ajustado aos dados de  $\sigma_p$ , de acordo com a equação 2,

$$y_i = \beta_0 \times \theta^{\beta_1} \times DS^{\beta_2} \times RP^{\beta_3} \times CO^{\beta_4} \times AR^{\beta_5} \times LP^{\beta_6} \times LL^{\beta_7} + \varepsilon_i \quad (2),$$

em que  $y_i$  é a i-ésima observação de tensão de pré-consolidação ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta_j$  são os parâmetros do modelo ( $j = 0, 1, \dots, 7$ ), e  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a observação  $y_i$ . As estimativas de mínimos quadrados dos parâmetros  $\beta_j$  foram obtidas usando o algoritmo de Gauss-Newton. Com base apenas nos atributos significativos, um submodelo de regressão foi construído e o teste t foi novamente aplicado para fins de confirmação e estimativa dos parâmetros do modelo.

c) Modelo Dias Júnior (1994)

O terceiro modelo foi o proposto por Dias Júnior (1994), em que a  $\sigma_p$  é função da umidade do solo ( $\theta$ ), na forma logaritimica, conforme a equação 3,

$$y_i = 10^{(\beta_0 + \beta_1 \theta)} + \varepsilon_i \quad (3),$$

em que  $y_i$  é a i-ésima observação de tensão de pré-consolidação ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros do modelo, e  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a observação  $y_i$ .

d) Modelo de Busscher (1990) adaptado por Severiano et al. (2010)

No quarto modelo, a  $\sigma_p$  foi ajustada ao modelo não linear proposto por Busscher (1990) e que foi adaptado por Severiano et al. (2010) para predição da  $\sigma_p$ , conforme a expressão que se segue equação (4),

$$y_i = \beta_0 \times \theta^{\beta_1} \times DS^{\beta_2} + \varepsilon_i \quad (4),$$

em que há a substituição da variável dependente, ou seja, a resistência à penetração proposta por Busscher (1990), pela  $\sigma_p$  adaptada por Severiano et al. (2010).



Os ajustes dos modelos não lineares foram realizados com a função `nls()` do pacote *stats*, software R versão 2.15.2 (R Core Team, 2012), e seus parâmetros estimados pelo algoritmo de Gauss-Newton.

Os modelos foram comparados considerando os seguintes critérios: (NP) número de parâmetros, ( $R^2$ ) coeficiente de determinação múltiplo, ( $R^2$ ) coeficiente de determinação múltiplo ajustado para o número de parâmetros (P), (EP) erro padrão do modelo, isto é, a raiz quadrada do quadrado médio dos desvios de regressão e (EPMA) erro percentual médio absoluto.

### Resultados e Discussão

Em termos de variabilidade dos valores das variáveis analisadas (Tabela 3), destacam-se a RP (Mion et al., 2012; Lima et al., 2013) e o CO, seguido da  $\theta$ , descrito pelos elevados valores do CV, em comparação com as demais variáveis. A variabilidade dos atributos em estudos de estimativas por meio de regressão são muitos importantes, como destacaram Imhoff et al. (2004), que estimaram a  $\sigma_p$ , em áreas de topossequencia e ampla variação textural, o que garantiram a variabilidade dos dados para estimativa da variável dependente.

**Tabela 3.** Estatística descritiva (n = 42) para as variáveis analisadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.

Variável descritiva	$\theta$	DS	RP	CO	TA	LP	LL	$\sigma_p$
0-0,20 m								
Média	0,09	1,68	3,18	16,92	144,21	12,55	17,51	73,03
Mínimo	0,06	1,56	0,40	7,23	105,00	11,90	16,93	61,00
Máximo	0,12	1,88	6,54	28,92	181,40	13,11	18,14	95,90
Desvio padrão	0,02	0,07	1,46	6,98	17,12	0,26	0,29	9,38
CV	21,3	4,4	45,9	41,2	11,9	2,0	1,6	12,8
0,20-0,40 m								
Média	0,10	1,67	2,64	12,26	158,50	12,55	17,50	73,39
Mínimo	0,07	1,44	0,96	3,16	116,40	11,90	16,89	62,10
Máximo	0,14	1,87	5,68	22,14	206,40	13,11	17,99	96,50
Desvio padrão	0,02	0,09	1,04	4,84	22,56	0,26	0,25	8,94
CV	17,9	5,6	39,3	39,5	14,2	2,0	1,4	12,2

$\theta$  - umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); DS - densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ); RP - resistência à penetração (MPa); CO - carbono orgânico; TA - teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); LP - limite de plasticidade (%); LL - limite de liquidez (%);  $\sigma_p$  - tensão de pré-consolidação (kPa); CV (%) - coeficiente de variação.

Valores próximos de  $\sigma_p$ , Tabela 3, foram obtidos por Saffih-Hdadi et al. (2009), em solos cultivados de diferentes classes texturais, bem como por Oliveira et al. (2011), em Argissolo Amarelo distrocoeso, que verificaram médias entre 60,0 e 130,0 kPa, aproximadamente, em duas profundidades analisadas sob a cultura da cana-de-açúcar. Enquanto Pacheco & Cantalice (2011), estudando a compressibilidade em Argissolo Amarelo distrocoeso, verificaram valores menores, entre 50 e 99 kPa, em solos cultivados com cana-de-açúcar, de 4 a 14 anos de manejo. Verifica-se que em ambos os trabalhos (Oliveira et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011), os autores, obtiveram valores muito próximos para  $\sigma_p$  em Argissolo Amarelo distrocoeso, podendo evidenciar uma característica natural destes solos e o nível de mecanização com relação à compressibilidade, variando apenas em função do estado dos atributos físicos e mecânicos do solo em função do manejo adotado.

Os resultados da análise de regressão múltipla dos efeitos dos atributos físicos do solo (Tabelas 4) na  $\sigma_p$  ( $\sigma_p = \theta + DS + RP + CO + TA + LP + LL$ ), nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m; indicam que das variáveis analisadas, no modelo completo, apenas a DS (c) e RP (d) apresentaram efeito significativo, com relações positivas com a  $\sigma_p$  nas duas camadas estudadas.

**Tabela 4.** Resultado da análise de regressão múltipla para o modelo  $\sigma_p = a + b \times \theta + c \times DS + d \times RP + e \times CO + f \times TA + g \times LP + h \times LL + \varepsilon$  e  $\sigma_p = a + c \times DS + d \times RP + \varepsilon$ , nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Estimativa	valor-p	Estimativa	valor-p
	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
a	-112,997	0,0169	76,407	0,1173
b	1,446	0,1388	0,332	0,5048
c	72,782	0,0018	40,943	0,0345
d	3,732	0,0005	3,805	0,0079
e	0,101	0,6523	-0,273	0,3400
f	0,562	0,2673	0,382	0,4042
g	-2,421	0,4045	-0,953	0,7673
h	3,443	0,2337	-4,304	0,1679
Indicadores de ajuste	R <sup>2</sup> = 0,94; EP: 2,602 (GL = 34)		R <sup>2</sup> = 0,88 EP: 3,322 (GL = 34)	
a	-48,203	0,1213	-17,818	0,3662
c	67,271	0,0017	48,704	0,0008
d	2,696	0,0133	3,831	0,0029
Indicadores de ajuste	R <sup>2</sup> = 0,90 EP: 3,002 (GL = 39)		R <sup>2</sup> = 0,86 EP: 3,327 (GL = 39)	

EP - erro padrão; GL - graus de liberdade.

A análise do modelo multiplicativo não linear na avaliação dos efeitos dos atributos físicos do solo em função da  $\sigma_p$  é apresentada na Tabela 5, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m; apenas a variável DS na camada de 0-0,20 m, e a DS, RP e CO na camada de 0,2-0,4 m, foram significativas, ou seja, apenas estas variáveis se ajustaram a  $\sigma_p$  de forma não linear.

**Tabela 5.** Resultado da análise do modelo multiplicativo não linear  $\sigma_p = a_0 \times \theta^{a_1} \times DS^{a_2} \times RP^{a_3} \times CO^{a_4} \times TA^{a_5} \times LP^{a_6} \times LL^{a_7} + \varepsilon$ , nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, e dos modelos  $\sigma_p = a_0 \times DS^{a_2} + \varepsilon$ , na camada de 0-0,20 m, e  $\sigma_p = a_0 \times DS^{a_2} \times RP^{a_3} \times CO^{a_4} + \varepsilon$ , na camada de 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Estimativa	valor-p	Estimativa	valor-p
	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
a0	2,340	0,5190	718,964	0,5303
a1	0,159	0,2400	0,073	0,2456
a2	2,243	<0,0001	1,005	0,0078
a3	0,024	0,3966	0,095	0,0391
a4	-0,048	0,3714	-0,097	0,0078
a5	0,135	0,2364	0,025	0,7895
a6	-0,824	0,1615	-0,291	0,5693
a7	1,316	0,0908	-0,751	0,2601
Indicadores de ajuste	$R^2 = 0,91$		$R^2 = 0,90$	
	EP: 2,973 (GL = 34)		EP: 3,116 (GL = 34)	
a0	18,234	<0,0001	51,253	<0,0001
a2	2,681	<0,0001	0,960	0,0083
a3	-	-	0,038	0,0520
a4	-	-	0,030	0,0081
Indicadores de ajuste	$R^2 = 0,89$		$R^2 = 0,88$	
	EP: 3,019 (GL = 40)		EP: 3,122 (GL = 38)	

A partir dos dados obtidos nas camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, Tabela 6, aplicou-se o modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Junior (1994), que ajusta a regressão para predição da  $\sigma_p$  em função da umidade do solo ( $\sigma_p = 10^{(b_0 + b_1\theta)}$ ). Com base na análise, verifica-se que a variável explicativa, no caso a  $\theta$ , foi significativa nas duas camadas analisadas.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise do modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010), aos dados obtidos nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, que ajusta a regressão da  $\sigma_p$  em função da  $\theta$  e DS ( $\sigma_p = c_0 \times \theta^{c_1} \times DS^{c_2}$ ). Verifica-se na análise, que apenas a DS do solo foi significativa no modelo adaptado por Severiano et al. (2010), nas duas camadas analisadas, e que a umidade do

solo não afetou a  $\sigma_p$  através do modelo, para as condições do solo e manejo deste estudo.

**Tabela 6.** Resultados da análise do modelo de capacidade de suporte de carga,  $\sigma_p = 10(b_0 + b_1\theta)$ , proposto por Dias Júnior (1994), em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Parâmetros	Estimativa	valor-p	Estimativa	valor-p
	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
b0	2,084	<0,0001	2,053	<0,0001
b1	-0,025	<0,0001	-0,018	<0,0001
Indicadores de ajuste	R <sup>2</sup> = 0,67 EP: 5,382 (GL = 40)		R <sup>2</sup> = 0,38 EP: 7,081 (GL = 40)	

**Tabela 7.** Resultado da análise do modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010),  $\sigma_p = c_0 \times \theta^{c_1} \times DS^{c_2}$ , em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Parâmetros	Estimativa	valor-p	Estimativa	valor-p
	0-0,20 m		0,20-0,40 m	
c0	13,250	0,0063	28,861	<0,0001
c1	0,075	0,3519	-0,034	0,5560
c2	2,990	<0,0001	1,976	<0,0001
Indicadores de ajuste	R <sup>2</sup> = 0,90 EP: 3,023 (GL = 39)		R <sup>2</sup> = 0,85 EP: 3,486 (GL = 39)	

Na Tabela 8, é apresentado o resumo dos modelos obtidos com as análises de regressão múltipla (M1 e M5), modelo multiplicativo não linear (M2 e M6), modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Júnior (1994) (M3 e M7) e do modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010) (M4 e M8).

Observa-se (Tabela 8) os modelos resultantes das análises, bem como os indicadores de ajustes de cada modelo ao conjunto de dados avaliados neste estudo, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. O M1 e o M5, que é a regressão linear múltipla, demonstram a  $\sigma_p$  em função da DS e da RP, em ambas as camadas analisadas, para um coeficiente de determinação de 0,90 e 0,89, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

O coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup>a) foi ligeiramente menor, em ambas as camadas, fato que ocorre em alguns dos modelos testados, no entanto, em termos

práticos, a alteração deste indicador de ajuste, ao menos neste estudo, não parece ser tão significativa ao ponto de se descartar o coeficiente de determinação sem o ajuste ( $R^2$ ).

**Tabela 8.** Modelos de capacidade de suporte de carga selecionados, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Modelo	Equação	NP	$R^2$	$R^2_a$	EP	EPMA
0-0,20 m						
M1	$\sigma_p = -48,203 + 67,271(DS)^{**} + 2,696(RP)^{**}$	3	0,90	0,89	3,00	3,14
M2	$\sigma_p = 18,234(DS)^{2,681^{**}}$	2	0,89	0,88	3,01	3,15
M3	$\sigma_p = 10^{(2,084 - 0,0250)^{**}}$	2	0,67	0,66	5,38	5,35
M4	$\sigma_p = 13,250(\theta)^{0,075}(DS)^{2,990^{**}}$	3	0,90	0,89	3,02	3,08
0,20-0,40 m						
M5	$\sigma_p = -17,818 + 48,704DS^* + 3,831RP^{**}$	3	0,86	0,85	3,32	3,43
M6	$\sigma_p = 51,253(DS)^{0,960^{**}}(RP)^{0,038^*}(CO)^{0,03^{**}}$	4	0,88	0,87	3,12	3,25
M7	$\sigma_p = 10^{(2,053 - 0,0180)^{**}}$	2	0,38	0,38	7,08	7,35
M8	$\sigma_p = 28,861(\theta)^{-0,034}(DS)^{1,976^{**}}$	3	0,85	0,85	3,48	3,55

\*\* : significativo a 1%; \* : significativo a 5%; NP - número de parâmetros;  $R^2$  - coeficiente de determinação;  $R^2_a$  - coeficiente de determinação ajustado; EP - erro padrão; EPMA - erro percentual médio absoluto (%). M1 e M4 - modelo de regressão múltipla; M2 e M6 - modelo multiplicativo não linear; M3 e M7 - modelo de capacidade de suporte de carga proposto por Dias Júnior (1994); M4 e M8 - modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010).

Comparando os dois modelos, M1 e M4, a análise nos mostra que o modelo da camada de 0-0,20 m (M1) foi melhor ajustado, não só pelo  $R^2$  e o  $R^2_a$ , que foram superiores aos da camada de 0,20-0,40 m, mas também pelos erros, observados nos valores do EP e do EPMA. Observa-se que os valores do EP e EPMA, são menores na 0-0,20 m do que na camada de 0,20-0,40 m, evidenciado, portanto, o erro do modelo. Apesar das diferenças nos ajustes dos modelos, ambas são semelhantes em termos de variáveis explicativas, que foram significativas, sendo a  $\sigma_p$  em função da DS e da RP nas duas camadas analisadas.

Imhoff et al. (2004) estimaram a  $\sigma_p$  em função de atributos físicos do solo em área de topossequencia sob Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e verificaram que houve linearidade significativa e positiva da DS com a  $\sigma_p$ . No entanto, no modelo, também foram incluídos o teor de argila e a umidade do solo, para um  $R^2$  de 0,70. Enquanto Saffih-Hdadi et al. (2009) modelaram a  $\sigma_p$  por regressão linear múltipla em solos de textura argilosa e arenosa, utilizando como variáveis explicativas a DS e a  $\theta$ .

Os autores concluíram que o modelo se ajustou melhor as condições de solo argiloso, fato observado pelos coeficientes de determinação, que foram de 0,88 e 0,57, para solos argilosos e arenosos, respectivamente.

A  $\sigma_p$  aumenta com o incremento da DS (Debiase et al., 2008; Saffih-Hdadi et al. 2009; Imhoff et al., 2004; Susuki et al., 2008), isto devido a correlação positiva obtida entre seus valores. Debiase et al. (2008) destacam que a  $\sigma_p$  diminui quando há um aumento do espaço poroso, principalmente macroporos, fato observado quando ocorre diminuição da densidade do solo. Enquanto Imhoff et al. (2004), acrescentam que a densidade do solo influencia as forças de atrito entre as partículas, modificando o deslocamento das mesmas por ocasião da aplicação de uma carga.

A relação linear da RP com a  $\sigma_p$  também é bastante descrita na literatura (Susuki et al., 2008; Lima et al., 2006), inclusive com resultados mais favoráveis que os obtidos para densidade do solo. Lima et al. (2006) estudaram a  $\sigma_p$  em função da RP em Latossolo Vermelho e Cambissolo sob pastagem e cultivo de café, em condições de campo e laboratório, obtendo valores de 0,99 e 0,87 para seus coeficientes de determinação, em laboratório e campo, respectivamente.

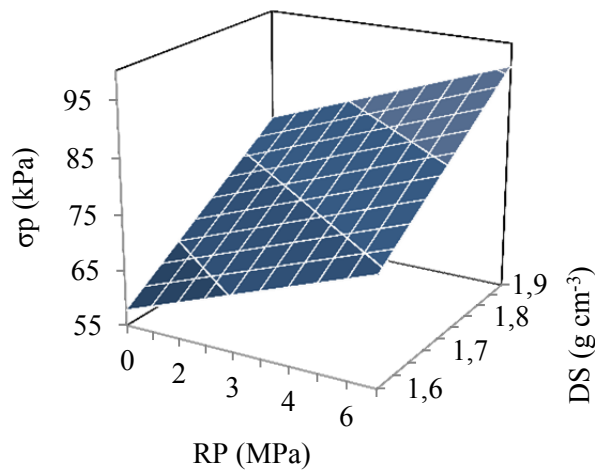
Outro fato a ser observado é a relação entre densidade e resistência à penetração, positiva e linear observada em diversos trabalhos na literatura (Chaplain et al., 2011; Severiano et al., 2010), e que, se tratando de atributos altamente correlacionados, podem aparecer juntos em modelos lineares como variáveis explicativas.

Na Figura 3 observa-se o comportamento da  $\sigma_p$  em função da DS e da RP. Verifica-se que, para os menores valores de  $\sigma_p$ , observam-se os maiores valores de RP e DS, corroborando com os resultados encontrados por Saffih-Hdadi et al. (2009) e Imhoff et al. (2004).

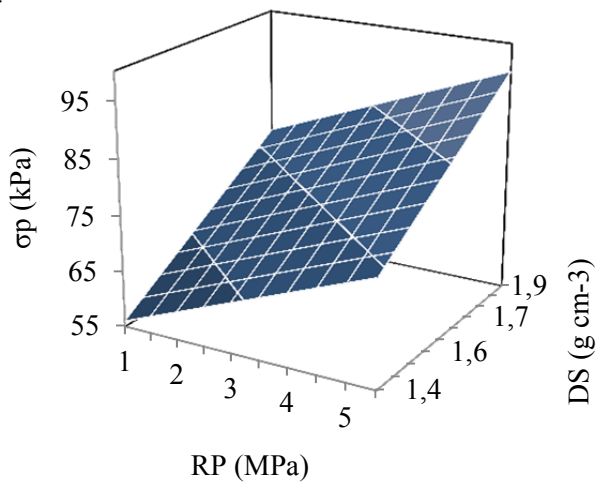
Considerando estes valores de  $\sigma_p$ , Oliveira et al. (2011) afirmam que a pressão de insuflagem de pneus dos conjuntos mecanizados é na ordem de 180 kPa, portanto, a mecanização nestes solos causaria compactação adicional nas condições atuais em que se encontram os atributos físicos e o manejo do solo na área.

O M2 e o M6, modelo não linear múltiplo, Tabela 8, aparecem como variáveis explicativas, a DS, na camada de 0-0,20 m (M2), e as variáveis DS, RP, e CO nas camadas de 0,20-0,40 m (M6). Os indicadores de qualidade do modelo, coeficiente de determinação e os erros, foram semelhantes ao M1 e M5, com valores próximos a 0,90 e 3,00, para o  $R^2$  e o EPMA, respectivamente, nas duas camadas analisadas.

A.



B.



**Figura 3.** Modelos de capacidade de suporte de carga nas camadas de 0-0,20 (M1) (A) e 0,20-0,40 (M5) (B), em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.

Debiase et al. (2008) encontraram relação não linear entre a  $\sigma_p$  e a DS em Argissolo Vermelho de textura franco-argilo-arenosa sob diversas condições de manejo e tráfego de máquinas, no entanto, o  $R^2$ , foi de 0,52, um pouco menor que os encontrados neste estudo, especificamente no M2, que foi de 0,89.

No M6, camada de 0,20-0,40 m aparece além da variável DS, a RP e CO, com coeficiente de determinação semelhante ao M2, e baixos valores nos indicadores de erro. Este fato, nos leva a concluir, que a  $\sigma_p$  na camada de 0,20-0,40 m, também pode

ser obtida, com confiabilidade, pelo modelo não linear múltiplo, representado pelo M2 e o M6. A literatura apresenta alguns resultados que demonstram o efeito do CO em componentes estruturais do solo (Braida et al., 2010; Oliveira et al., 2011; Vasconcelos et al., 2012), como é o caso da  $\sigma_p$ . Vasconcelos et al. (2012) concluíram que o efeito do CO na  $\sigma_p$  ocorre indiretamente, ou seja, com o incremento do CO, ocorre maior poder de absorção de água e diminuição da densidade no solo, o que, teoricamente, ocasionaria a diminuição da  $\sigma_p$ .

Apesar da conhecida relação, são poucos os modelos que abrigam o CO como variável explicativa na modelagem da  $\sigma_p$ . Pereira et al. (2007) verificaram o efeito da matéria orgânica na tensão de pré-consolidação sob duas condições de densidade do solo e concluíram que quanto maior o seu valor, menor o efeito do carbono orgânico na tensão de pré-consolidação, ou seja, o efeito da matéria orgânica tem sido evidenciado indiretamente, através de outras variáveis físicas do solo (Gao et al., 2012; Arthur et al., 2013).

Portanto, o fato do carbono orgânico fazer parte do modelo M6, pode ser atribuído aos efeitos indiretos da DS e RP, que por através do manejo, podem influenciar a concentração de carbono. Braida et al. (2010) verificaram a influência do teor de carbono orgânico na susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo; concluindo que o teor de carbono orgânico afeta o coeficiente de compressão do solo, ou seja, a susceptibilidade a compactação.

O M3 e o M7, proposto por Dias Junior (1994), foi significativo para ambas às camadas analisadas. No entanto, os valores de  $R^2$  e os indicadores de erros, demonstraram que o modelo não se adequou a variação da umidade do solo na área, em comparação com os resultados obtidos no modelo linear múltiplo. Os coeficientes de determinação foram de 0,67 e 0,38, para um EPMA de 5,35 e 7,35, nas camadas de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. Schäffer et al. (2010) afirmam que é necessária uma adequação dos testes de compressibilidade para os diferentes teores de umidade, no entanto, é importante, também, que se conheça a capacidade de suporte de carga na umidade em que o solo é manejado na área.

O M4 e o M8 são o modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010), Tabela 8, para as equações ajustadas, nas 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Neste modelo, são utilizadas para estimar a  $\sigma_p$ , a umidade do solo e densidade, de forma não linear. Os resultados nos mostram que apenas a DS foi significativa no modelo, em ambas as camadas (M4 e o M8), e seus indicadores de qualidade, coeficiente de



determinação e EPMA, foram de 0,90 e 0,85, e 3,08 e 3,55, estando dentro dos melhores valores encontrados dentre todos os modelos analisados.

A umidade não sendo significativa dentro do modelo, nos leva a concluir que os valores dos indicadores de qualidade devem ser atribuídos a DS, que foi significativa e se ajustou bem ao modelo para estimativa da  $\sigma_p$ , no entanto, o fato do modelo ser função de duas variáveis, e uma não ter se ajustado na predição da  $\sigma_p$ , sugere que é importante consideramos que o modelo proposto por Busscher (1990) e adaptado por Severiano et al. (2010), não conseguiu se ajustar a  $\sigma_p$  para os dados obtidos e condições de manejo praticadas.

Severiano et al. (2010) aplicaram o modelo em Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico cultivados com cana-de-açúcar e obtiveram coeficientes de determinação de 0,83 e 0,72 para o Latossolo e o Cambissolo, respectivamente. Os autores tratam os resultados como um modelo com elevado poder de predição da  $\sigma_p$ , no entanto, os mesmos não apresentam a significância de cada variável dentro do modelo obtido, o que dificulta a comparação com os resultados obtidos.

Dentre todos os modelos analisados, é importante ressaltar que, algumas variáveis importantes para variação da  $\sigma_p$ , segundo a literatura (Saffih-Hdadi et al., 2009; Imhoff et al., 2004; Oliveira et al., 2011; Ajayi et al., 2009), não foram significativas, tais como a umidade e o teor de argila. Este fato se deve, provavelmente, a pequena variação demonstrada por estes atributos dentro da área experimental (Tabela 3). Imhoff et al. (2004) encontraram relação linear em modelo de regressão múltipla para estimativa da tensão de pré-consolidação com o teor de argila, umidade e densidade do solo. No entanto, utilizaram uma topossequência para maior obtenção de variabilidade, além de o solo utilizado pelos autores, Latossolo Vermelho, não permite uma comparação dos resultados obtidos em Argissolo Amarelo distrocoeso, que apresenta, diferentes condições físicas.

Dos modelos obtidos com as análises, os que mostraram se adequar melhor aos dados e condições de solo e manejo do estudo foram os obtidos por regressão linear múltipla (M1 e M5); neles, a estimativa da  $\sigma_p$  foi linear, a partir de variáveis conhecidamente relacionadas com a variável dependente (Saffih-Hdadi et al., 2009; Imhoff et al., 2004). Os indicadores de qualidade do M1 e M5 se apresentaram como os melhores obtidos dentre todos os analisados, alto coeficiente de determinação e erros relativamente baixos, se comparados aos demais. Ambas as equações, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, se apresentaram de forma semelhante, com as mesmas variáveis

(DS e RP), o que facilita a interpretação dos resultados. Outro fato, que reforça a escolha do modelo por regressão linear múltipla, são os resultados da literatura, que já obtiveram modelos lineares para estimativa da  $\sigma_p$  (Saffih-Hdadi et al., 2009; Imhoff et al., 2004; Susuki et al., 2008; Vasconcelos et al., 2012).

### **Conclusões**

O modelo de regressão linear múltipla foi o que melhor se ajustou as condições de solo e manejo da área nas duas camadas analisadas, sendo a tensão de pré-consolidação, em função da densidade do solo e da resistência à penetração.

### **Referências**

- Ajayi, A. E.; Dias Júnior, M. S.; Curi, N.; Araújo Júnior, C. F.; Aladenola, O. O.; Souza, T. T.; Inda Junior, A. A. Comparison of estimation methods of soil strength in five soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.487-495, 2009.
- Arthur, E.; Schjønning, P.; Moldrup, P.; Tuller, M.; Jonge, L. W. Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. *Geoderma*, v.193-194, p.236-245, 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. - NBR 6459/84 - Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 1984b. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 3336/90 – Solo - Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: 1990. 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7180/84 - Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro: 1984a. 3p.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.
- Busscher, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, v.3, p.519-524, 1990.
- Chaplain, V.; Defosse, P.; Richard, G.; Tessier, D.; Roger-Estrade, J. Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil & Tillage Research*, v.111, p.105-114, 2011.

- Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2013. Brasília, 2013.17p.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2629-2637, 2008.
- Dias Júnior, M. S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. 1994. 114f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing. 1994.
- Dias Junior, M. S.; Silva, A. R.; Fonseca, S.; Leite, F. P. Método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.805-810, 2004.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 1997. 370p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- Gao, W.; Ren, T.; Bengough, A. G.; Auneau, L.; Watts, C. W.; Whalley, W. R. Predicting Penetrometer Resistance from the Compression Characteristic of Soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.76, p.361-369, 2012.
- Giarola, N. F. B.; Silva, A. P. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. *Scientia Agrícola*, v.59, p.613-620, 2002.
- Holtz, R. D; Kovacs, W. D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1981.
- Horn, R.; Fleige, H. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research*, v.102, p.201-208, 2009.
- Horn, R.; Lebert, M. Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B.D.; van Ouwwerkerk, C. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, v.68, p.17-24, 2004.
- Jacomine, P.K.T. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: Reunião técnica sobre solos coesos dos tabuleiros costeiros, Cruz d as Almas, 1996. Anais. Aracaju, EMBRAPA-CPATC & CNPMF / EAUFBA / IGUFBA, 1996. p.13-26.

- Keller, T.; Lamandé, M.; Schjønning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v.163, p.13-23, 2011.
- Lima, C. L. R.; Silva, A. P.; Imhoff, S. C.; Leão, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.217-223, 2006.
- Lima, R. P.; Leon, R. P.; Silva, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v.60, p.16-20, 2013.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p.61-68, 2013.
- Lyra, M. R. C. C.; Silva, J. A. A.; Rolim, M. M. Uso da análise de regressão linear e não-linear na estimativa da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em plantio de cana-de-açúcar fertirrigado com vinhaça. *Revista de Ciências Agrárias*, v.40, p.155-166, 2003.
- Mion, R. L.; Nascimento, E. M. S.; Sales, F. A. L.; Silva, S. F.; Duarte, J. M. L.; Souza, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. *Semina: Ciências Agrárias*, v.33, p.2057-2066, 2012.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.435-442, 2011.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- Pereira, J. O.; Defossez, P. I.; Richards, G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science*, v.58, p.34-44, 2007.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Janeiro de 2013

- Reinert, D. J.; Robaina, A. D.; Reichert, J. M. Compress - Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29., Viçosa, MG, 2003. Anais... Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD ROM.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Schäffer, B.; Boivin, P.; Schulin, R. Compressibility of Repacked Soil as Affected by Wetting and Drying between Uniaxial Compression Tests. *Soil Science Society of America Journal*, v.74, p.1483-1492, 2010.
- Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Júnior, M. S.; Castro, M. B.; Oliveira, L. C.; Costa, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.414-423, 2010.
- Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Lima, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.963-973, 2008.
- Tang, A. M.; Cui, Y.; Richard, G.; Défossez, P. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. *Geoderma*, v.162, p.171-181, 2011.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525-536, 2012.

### **CAPÍTULO III**

---

**Capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos  
em Argissolo Amarelo distrocoeso**

## **Capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso**

**Resumo:** O presente trabalho teve como objetivo o estudo das relações dos atributos físicos do solo na variação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ). Em área de Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar foram demarcados 42 pontos e coletadas amostras nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 pontos amostrais. Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para obtenção das variáveis: umidade do solo ( $\theta$ ), densidade do solo (DS), carbono orgânico (CO), teor de argila (TA), limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL),  $\sigma_p$  e obtida a resistência à penetração (RP). Foi realizada análise de componentes principais em cada uma das camadas estudadas, em que, após obtenção dos escores dos componentes principais retidos em cada camada de solo, um modelo de regressão linear múltiplo foi ajustado aos dados de  $\sigma_p$  para estabelecimento das relações e construção do modelos via componentes principais. A  $\theta$  e o CO apresentaram relações negativas com a  $\sigma_p$ , enquanto DS, RP, TA, LL e LP positivas. Maiores valores de  $\sigma_p$  estão associados a maiores valores de DS, RP, TA, LL e LP, assim como os menores a um aumento da concentração de CO e da  $\theta$ .

**Palavras-Chave:** solo coeso, compressibilidade, atributos físicos, análise multivariada

## **Load carrying capacity models and their relationships with physical and mechanical attributes in Ultisol**

**Abstract:** The current work aimed to study the relationship of soil physical attributes on pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ) variation. The work was carried out in an area of Ultisol cultivated with sugarcane. On a plot, 42 points were delimited to get samples in the layers 0-0.20 and 0.20-0.40 m, totaling 84 samples. Deformed and undeformed samples were collected to obtain the variables: water content ( $\theta$ ), bulk density (BD), soil resistance to penetration (RP), organic carbon (OC), clay content (C), plastic limit (PL) and liquid limit (LL), as well as the pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ). For each layer a principal component analysis was performed and, after obtaining the scores for those components retained, a linear multiple regression model was fitted for the  $\sigma_p$  data to

establishment of the relationships. The  $\theta$  and the OC showed negative relations with  $\sigma_p$ ; while BD, RP, C, LL and PL showed positive relation. Higher values of  $\sigma_p$  are associated with higher values of BD, RP, C, LL and PL, as well as smaller values are linked with the increase of OC concentration and  $\theta$ .

**Key words:** cohesive soil, compressibility, physical attributes, multivariate analysis

## Introdução

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes da agricultura brasileira, ocupando uma imensa extensão territorial, sendo produzida para abastecer, com seus derivados, o mercado interno e externo, além de ser uma fonte renovável de energia (Urashima et al., 2010; Freitas et al., 2011, Conab, 2013). O Brasil é detentor da maior tecnologia para produção de cana-de-açúcar do mundo, sendo um país com clima e solo propícios para o desenvolvimento da cultura; na região Nordeste destacam-se como os maiores produtores os Estados de Alagoas, Pernambuco e Rio Grande do Norte, (Conab, 2013).

No Nordeste, a cana-de-açúcar é explorada, em sua maioria, nos tabuleiros costeiros, cujo, o solo abriga uma característica peculiar, denominada de caráter coeso que se caracteriza, quando secos, apresentam um incremento acentuado de resistência, a ponto de restringir o preparo do solo e o desenvolvimento das culturas, e se abrandam no momento em que são umedecidos (Jacomine, 1996).

Segundo Silveira et al. (2010), o caráter coeso, no solo quando seco, funciona como um fator limitante ao desenvolvimento da planta, bem como a operações mecanizadas, refletindo em perda de produtividade e demanda de energia para mecanização. Para tanto, as características de seus atributos físicos mais marcantes são: alta densidade, baixa permeabilidade e elevada resistência à penetração, quando secos (Vasconcelos et al., 2010; Jacomine et al., 1996). Como consequência, há os efeitos negativos da mecanização no solo, causando principalmente, compactação, por efeito da intensidade do tráfego nas áreas agrícolas, impulsionado, também, pelas características do solo (Roque et al., 2011; Cavalieri et al., 2011).

O processo de compactação do solo é influenciado, pela umidade do solo (Han et al., 2011; Gao et al., 2012), carbono orgânico (Vasconcelos et al., 2010; Braida et al., 2010) e textura (Ribon & Tavares Filho, 2008; Lima et al., 2013; Ampoorter et al., 2010),



além dos limites de consistência (Kondo & Dias Junior, 1999; Silva et al., 2003), sendo a densidade do solo e a resistência à penetração, atributos diagnósticos desse efeito mecânico do solo (Freitas et al., 2012; Gao et al., 2012). Segundo Gao et al. (2012), as relações existentes entre os atributos físicos e a compactação são de fundamental importância para a escolha do sistema de preparo mais adequado ao crescimento e desenvolvimento das culturas.

Nesse sentido a compactação do solo torna-se fator preponderante que pode ser compreendida pelo estudo da compressibilidade, principalmente após o emprego da colheita mecanizada em algumas regiões dos tabuleiros costeiros. A compressibilidade caracteriza-se pelo processo que descreve o decréscimo do volume de solo quando submetido a uma carga mecânica na presença ou não da água (Horn & Lebert, 1994; Silva et al., 2010), sendo, portanto, importante para caracterização dos efeitos causados pelas pressões impostas ao solo pelas máquinas agrícolas.

A variável importante que representa a compressibilidade do solo é a tensão de pré-consolidação. A tensão de pré-consolidação é um componente da curva de compressão que reflete a história de tensão do solo, sendo, portanto, a maior pressão que pode ser aplicada ao solo a fim de evitar a sua compactação (Dias Junior & Pierce, 1996; Silva et al., 2010).

Em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar, Oliveira et al. (2011) estudaram, em diferentes sistemas de manejo, a capacidade de suporte de carga em solos, através da tensão de pré-consolidação. Os autores observaram que, para diferentes teores de água, a médias de tensão de pré-consolidação variou entre 140 e 57 kPa, conforme os pontos amostrados; nestas condições, o solo sofreria compactação adicional, já que a pressão de insuflagem de pneus dos conjuntos mecanizados é na ordem de 180 kPa, bem acima da capacidade de suporte de carga apresentada pelo solo no estudo.

A tensão de pré-consolidação é uma variável difícil de ser medida, tanto pelas exigências na coleta do material, amostra indeformada, quanto nas condições laboratoriais para determinação de seus valores; equipamentos modernos e nem sempre comuns na maioria dos centros de pesquisa (Figueiredo et al., 2011). Algumas relações, entre atributos físicos do solo e a tensão de pré-consolidação, tem sido estabelecidas na tentativa de se prever a capacidade de suporte de carga do solo e auxiliar no planejamento agrícola. No entanto, muitas vezes, se propõem modelos que predizem a tensão de pré-consolidação em função de algumas variáveis (Dias Junior, 1994;

Severiano et al. 2010; Saffih-Hdadi et al., 2009), quando, dentro do sistema solo, existem outras relações que podem ser utilizadas para caracterizar o processo compressivo do solo (Silva et al., 2010; Vasconcelos et al., 2012).

Em muitos destes estudos (Dias Junior, 1994; Severiano et al. 2010; Saffih-Hdadi et al., 2009), tentam estabelecer relações entre a tensão de pré-consolidação, os testes estatísticos são realizados de forma univariada, quando na natureza, o fenômeno depende de muitas variáveis, com relações diretas e indiretas. Dessa forma, não basta conhecer a relação da variável dependente de forma isolada, ou seja, uma a uma, mas conhecê-las na sua totalidade, pois uma pode depender da outra e as informações são fornecidas pelo conjunto e não em sua individualidade (Freddi et al., 2008).

Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo o estudo das relações dos atributos físicos do solo na variação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) em um Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.

### **Material e Métodos**

O experimento foi realizado no período de outubro de 2012 a março de 2013, na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizada no município de Carpina, na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco, situando-se a 7° 51' 13'' de latitude sul e 35° 14' 10'' de longitude oeste do meridiano de Greenwich, com altitude de aproximadamente 180 m. O clima da região é caracterizado como megatérmico (As'), com precipitação de inverno e estação seca do verão até o outono, segundo classificação de Köppen. A precipitação pluviométrica apresenta média de 1.400 mm. O solo da área é classificado como Argissolo Amarelo distrocoeso, segundo Embrapa (2006), de classe textural-franco-arenosa, conforme a caracterização física do solo na Tabela 9.

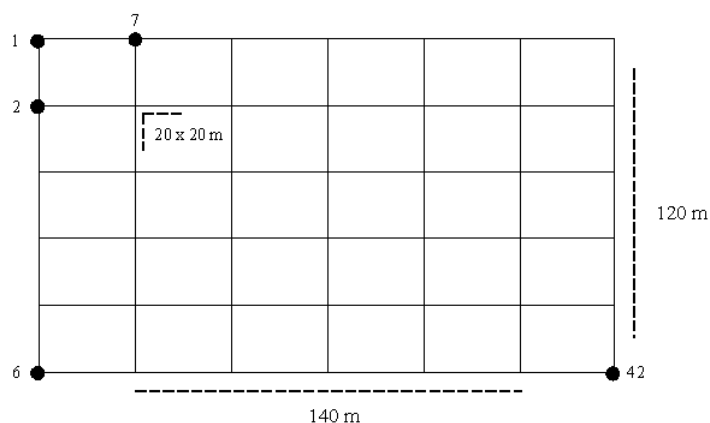
A área experimental recebeu preparo convencional, com uma gradagem pesada e duas passadas com grade niveladora, logo após, sulcada com o espaçamento de 1,0 m. No momento da coleta, a área amostral encontrava-se plantada com as variedades RB962962, RB987010 e RB931011 de cana-de-açúcar, no quarto corte. Na colheita, a cana foi previamente queimada, sendo o corte manual e o carregamento mecanizado, utilizando-se carregadoras convencionais e caminhões trucados que trafegaram em paralelo por todo o talhão. O tráfego foi repetido durante os quatro ciclos da cultura.

**Tabela 9.** Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar, Estação Experimental de cana-de-açúcar do Carpina (EECAC).

Camada (m)	Areia	Silte	Argila	Cc	Pm
	g kg <sup>-1</sup>			cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	
0-0,20	824	32	144	0,17	0,06
0,20-0,40	812	30	158	0,21	0,06

Cc - capacidade de campo; Pm - ponto de mucha

Em um talhão, com aproximadamente 2,0 ha, foi implantado um esquema experimental, em que foram demarcados, com piquetes, 42 pontos, espaçados em 20 × 20 m (Figura 4) em uma área total de 120×140 m; e coletadas nas camadas 0-0,20 e 0,20-0,40 m, totalizando 84 pontos amostrais. Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para obtenção das seguintes variáveis: umidade do solo ( $\theta$ ) (cm cm<sup>-3</sup>), densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>), densidade de partículas (g cm<sup>-3</sup>), carbono orgânico (g kg<sup>-1</sup>), teor de argila (g kg<sup>-1</sup>), limite de plasticidade (%) e limite de liquidez (%), além da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) (kPa).



**Figura 4.** Esquema de amostragem na área experimental.

Amostras indeformadas foram coletadas utilizando um trado tipo *Uhland*, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, com base na relação massa/volume. As frações granulométricas (areia, silte e argila) foram obtidas pelo método do densímetro de Boyoucos, com dispersão de 50 g de terra fina seca ao ar com 25 ml de hexametáfosfato de sódio tamponado com carbonato de sódio. Também foi determinada a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico. O teor de carbono orgânico foi obtido pela

digestão da amostra em ácido sulfúrico e dicromato de potássio, todos conforme metodologia de Embrapa (1997).

Amostras deformadas foram coletadas para realização do ensaio do limite de plasticidade (LP), limite de liquidez (LL) (aparelho de Casagrande), ambos determinados conforme normas da ABNT (1984a) e ABNT (1984b), respectivamente.

Amostras indeformadas também foram coletadas para determinação da tensão de pré-consolidação, com uso de anéis metálicos de 0,025 m de altura e 0,065 de diâmetro. Na determinação da tensão de pré-consolidação, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando-se para tal, uma prensa de adensamento, tipo Bishop, da Solotest. Foram aplicadas cargas sucessivas e contínuas, equivalente às pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1600 kPa, durante 2 min, momento em que foi realizada a leitura, para cada uma das cargas, conforme MB-3336 da ABNT (1990). Logo após, as amostras foram encaminhadas à estufa para secagem a 105 °C, durante 24 h e determinação da umidade da amostra. Os dados foram analisados utilizando-se o software Compress (Reinert et al., 2003), optando-se pelo método de Casagrande para determinação dos valores de tensão de pré-consolidação.

Na avaliação da resistência à penetração (RP) foi utilizado um penetrômetro digital Falker, modelo PenetroLOG-PLG 1020, com aptidão eletrônica para aquisição de dados. O penetrômetro foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m de incremento de profundidade, trabalhando a velocidade de penetração constante. Os dados de RP foram analisados a uma profundidade até 0,40 m através do Software PenetroLOG.

Nos 42 pontos amostrados das camadas de 0-0,20 e 0,2-0,4 m, uma análise de componentes principais (ACP) foi realizada, sendo o  $j$ -ésimo componente principal representado por,

$$CP_j = a_{j1}\theta + a_{j2}DS + a_{j3}RP + a_{j3}CO + a_{j4}TA + a_{j5}LP + a_{j6}LL,$$

em que  $\mathbf{a}'_j = (a_{j1} \quad a_{j2} \quad \dots \quad a_{j7})$  denota o  $j$ -ésimo autovetor, com a seguinte restrição  $\mathbf{a}'_j \mathbf{a}_j = 1 \quad \forall \quad j=1, 2, \dots, 7$ .

A ACP foi realizada com base na matriz de correlações, de forma que não houvesse influência das unidades de medida dos atributos na construção dos componentes principais. Assim, os componentes retidos na análise foram aqueles cujo autovalor ( $\lambda$ ) é, no mínimo, igual a unidade, isto é,  $\lambda \geq 1$ .

Após obtenção dos escores dos componentes principais retidos em cada camada de solo, um modelo de regressão linear múltiplo foi ajustado aos dados de tensão, de acordo com a equação,

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j CP_{ji} + \varepsilon_i$$

em que  $y_i$  é a  $i$ -ésima observação de tensão de pré-consolidação ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $CP_{ji}$  é o  $i$ -ésimo escore do  $j$ -ésimo componente principal retido ( $j=1, \dots, k$ ),  $\beta_0$  é a constante ou intercepto do modelo,  $\beta_j$  é o coeficiente de regressão associado ao  $j$ -ésimo componente principal,  $\varepsilon_i$  é o erro aleatório associado a observação  $y_i$ .

Os parâmetros  $\beta_j$  associados aos regressores do modelo foram submetidos ao teste t-Student para seleção dos componentes principais que contribuem significativamente a tensão de pré-consolidação. O grau de ajuste do modelo foi verificado por meio do coeficiente de determinação múltiplo ( $R^2$ ).

Uma vez identificados os componentes principais significativos, um modelo de predição da tensão foi construído em função dos atributos utilizados na ACP, visando interpretação prática, de acordo com a expressão:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 US_i + \hat{\beta}_2 DS_i + \hat{\beta}_3 RP_i + \hat{\beta}_4 CO_i + \hat{\beta}_5 TA_i + \hat{\beta}_6 LL_i + \hat{\beta}_7 LP_i,$$

em que:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \bar{\mathbf{x}}' \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V} \hat{\mathbf{a}}$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V} \hat{\mathbf{a}},$$

sendo:

$\bar{\mathbf{x}}$  é o vetor de médias dos atributos ( $\theta, \dots, LP$ );

$\mathbf{D} = \text{diag}(s_j)$  é a matriz diagonal de desvios padrão dos atributos,  $j = 1, 2, \dots, 7$ .

$\mathbf{V} = [\mathbf{a}_1 \quad \mathbf{a}_2 \quad \dots \quad \mathbf{a}_r]$  é a matriz de projeção ou de autovetores associados aos  $r$  componentes principais retidos na ACP;

$$\hat{\mathbf{a}}' = [\hat{\alpha}_1 \quad \hat{\alpha}_2 \quad \dots \quad \hat{\alpha}_r];$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}' = [\hat{\beta}_1 \quad \hat{\beta}_2 \quad \dots \quad \hat{\beta}_7].$$

A análise de componentes principais foi realizada com a função `princomp()`; os ajustes dos modelos de regressão foram realizados com a função `lm()`; ambas funções do pacote *stats*, software R versão 2.15.2 (R Core Team, 2012).

## Resultados e Discussão

A estatística descritiva das variáveis analisadas é apresentada na Tabela 10. A amplitude de variação das variáveis, indicada pelos seus respectivos coeficientes de variação (CV), principalmente da RP e CO, seguido da  $\theta$ , pode está relacionada com a mecanização praticada na área durante a colheita da cana, uma vez que, são utilizadas carregadoras convencionais e caminhões trucados que trafegaram por todo o talhão, operação repetida durante os quatro ciclos da cultura, que, provavelmente, alterou as condições estruturais do solo.

**Tabela 10.** Estatística descritiva (n = 42) para as variáveis analisadas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.

Variável descritiva	$\theta$	DS	RP	CO	TA	LP	LL	$\sigma_p$
	0-0,20 m							
Média	0,09	1,68	3,18	16,92	144,21	12,55	17,51	73,03
Mínimo	0,06	1,56	0,40	7,23	105,00	11,90	16,93	61,00
Máximo	0,12	1,88	6,54	28,92	181,40	13,11	18,14	95,90
Desvio padrão	0,02	0,07	1,46	6,98	17,12	0,26	0,29	9,38
CV	21,3	4,4	45,9	41,2	11,9	2,0	1,6	12,8
0,20-0,40 m								
Média	0,10	1,67	2,64	12,26	158,50	12,55	17,50	73,39
Mínimo	0,07	1,44	0,96	3,16	116,40	11,90	16,89	62,10
Máximo	0,14	1,87	5,68	22,14	206,40	13,11	17,99	96,50
Desvio padrão	0,02	0,09	1,04	4,84	22,56	0,26	0,25	8,94
CV	17,9	5,6	39,3	39,5	14,2	2,0	1,4	12,2

$\theta$  - umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); DS - densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ); RP - resistência à penetração (MPa); CO - carbono orgânico; TA - teor de argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); LP - limite de plasticidade (%); LL - limite de liquidez (%);  $\sigma_p$  - tensão de pré-consolidação (kPa).

O valor médio da  $\sigma_p$ , que representa o histórico da tensão máxima submetida por conjuntos mecanizados na área, ficou em torno de 73,0 kPa, atingindo valores máximos e mínimos próximos a 90,0 e 60,0 kPa, respectivamente, nas duas camadas analisadas, valores proximos aos encontrados em Argissolo Amarelo distrocoeso por Oliveira et al. (2011), em duas profundidades analisadas sob a cultura da cana-de-açúcar. Valores inferiores foram observados por Pacheco & Cantalice (2011), também em Argissolo

Amarelo distrocoeso, onde a  $\sigma_p$  foi em média, 50 e 99 kPa, em solos cultivados com cana-de-açúcar, de 4 a 14 anos de manejo. Solos com estas características, ou seja, com caráter coeso, tem apresentado valores médios semelhantes quanto a  $\sigma_p$ , principalmente os manejados com cana-de-açúcar, demonstrando que o manejo da cultura, juntamente com as características naturais do solo, apresentam valores médios de  $\sigma_p$  entre 50 e 150 kPa, como apontado na literatura (Oliveira et al., 2011; Pacheco & Cantalice, 2011).

Em outras classes de solo, Latossolos, Cambissolos e Argissolos Vermelhos, citadas na literatura em estudos de compressibilidade, Debiase et al. (2008) encontraram valores de  $\sigma_p$  semelhantes (Tabela 10) em diferentes sistemas de manejo. Enquanto Iori et al. (2012) verificaram valores bem superiores para as condições de umidade deste estudo, chegando a 400 kPa em modelos para Cambissolo e Latossolo.

Observam-se as variações dos resultados, Tabela 11, da análise de componentes principais nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m; verifica-se que, na camada de 0-0,20 m o CP1 reteve 78% (PV) da variabilidade total da área experimental, seguido pelo CP2, 12% da variabilidade; os componentes CP1 e CP2 retiveram juntos, 90% da variabilidade total. Os demais componentes apresentaram proporção da variação abaixo de 5%. Na camada de 0,20-0,40 m, o CP1 reteve 68% da variabilidade total, seguido pelo CP2, 15%, juntos, 83% de toda variabilidade da área experimental. Os demais componentes retiveram abaixo de 6% da variabilidade.

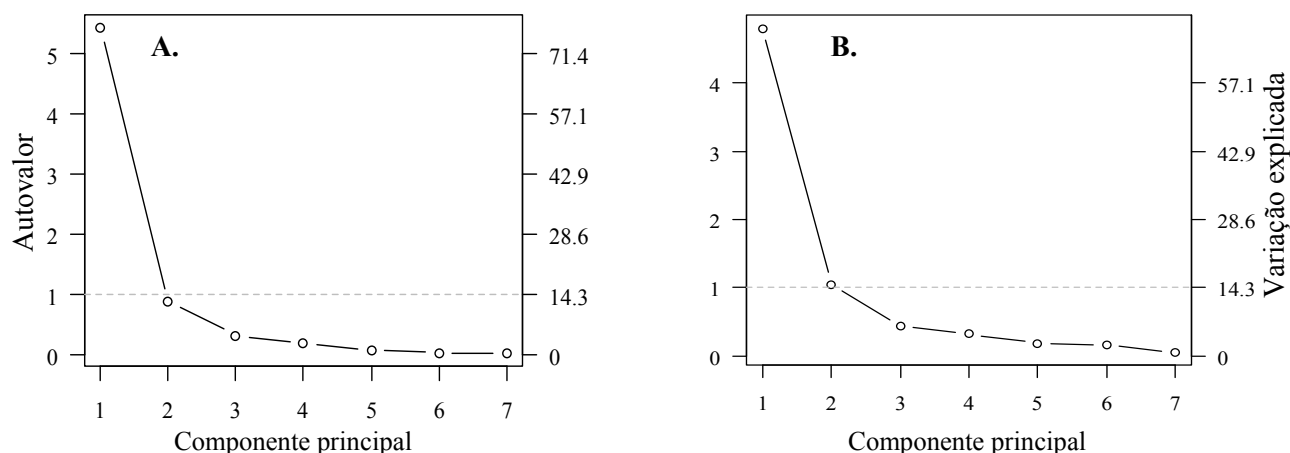
**Tabela 11.** Proporção da variação e variação acumulada da análise de componentes principais, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.

		0-0,20 m						
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
PV		0,78	0,12	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01
PA		0,78	0,90	0,94	0,97	0,98	0,99	1,00
		0,20-0,40 m						
		CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
PV		0,68	0,15	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01
PA		0,68	0,83	0,89	0,93	0,97	0,99	1,00

PV: proporção da variação (%); PA: proporção acumulada (%); CP: componente principal.

O CP1, na camada de 0-0,20 m, reteve praticamente 80% da variabilidade total, valor recomendado (Manly, 2008), em termos de variação acumulada, para interpretação da

variação das variáveis no estudo, além de apresentar autovalor maior que a unidade, critério utilizado para escolha do componente (Figura 5A).



**Figura 5.** Scree plot para da análise de componentes principais nas camadas de 0-0,20 (A) e 0,20-0,40 m (B).

Na camada de 0,20-0,40 m, os componentes CP1 e CP2, juntos obtiveram 83%, retendo grande parte da variabilidade total da área, além de ambos os componente apresentarem autovalor maior que a unidade (Figura 5B). Portanto, em termos de informação de variabilidade, para elaboração do modelo, foi utilizado o CP1, na camada de 0-0,20 m, e CP1 e CP2, de 0,20-0,40 m.

Na Tabela 12 observam-se os coeficientes, de cada componente, associados a cada uma das variáveis, obtidos na análise, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m. Na camada de 0-0,20 m, no CP1, verifica-se, basicamente, um contraste entre os coeficientes associados a  $\theta$  e CO, contra as demais variáveis, ou seja, há uma relação inversa entre os atributos.

O valor do coeficiente, atribuído a variável, representa a importância do atributo na variabilidade dentro da área experimental. Verifica-se que, praticamente não há diferença entre as variáveis, sendo todas, igualmente importante na interpretação da variabilidade, segundo os respectivos coeficientes do componente. Para o CP1 na camada de 0,20-0,40 m foi verificado a mesma relação obtida no CP1 da camada de 0-0,20 m, ou seja,  $\theta$  e CO apresentam relação negativa com as demais variáveis; enquanto no CP2, 0,20-0,40 m, verifica-se que os coeficientes associados as variáveis mais representativos, são a  $\theta$ , LL e LP, com relações positivas entre si.



**Tabela 12.** Coeficientes da análise de componentes principais, associado a cada variável, nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.

Variáveis	0-0,20 m	0,20-0,40 m	
	CP1	CP1	CP2
$\theta$	0,394	0,330	0,498
DS	-0,411	-0,432	-0,110
RP	-0,405	-0,413	-0,163
CO	0,393	0,412	0,259
TA	-0,378	-0,405	0,066
LL	-0,303	-0,321	0,558
LP	-0,349	-0,312	0,576

Em função dos componentes principais selecionados, CP1 na camada de 0-0,2 m, e CP1 e CP2 de 0,20-0,40 m, que retiveram a maior porcentagem da variabilidade contida na área experimental, foi realizada análise de regressão via componente principal para o ajuste do modelo de predição da  $\sigma_p$  em Argissolo Amarelo distrocoeso, conforme a Tabela 13.

**Tabela 13.** Análise de regressão via componentes principais selecionados, camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em Argissolo Amarelo distrocoeso cultivado com da cana-de-açúcar.

Modelo	Equação	R <sup>2</sup>	EP
	0-0,20 m		
M1	$\sigma_p = - 95,21 - 0,77\theta + 19,73DS + 1,00RP - 0,20CO + 0,80TA + 4,32LL + 4,34LP$	0,83	3,89
	0,20-0,40 m		
M2	$\sigma_p = - 89,74 - 0,64\theta + 16,32DS + 1,40RP - 0,30CO + 0,62TA + 4,46LL + 4,36LP$	0,80	4,01

R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação; EP - erro padrão; M1 - Modelo 1; M2 - Modelo 2.

Portanto, o M1, para a camada de 0-0,20 m, e o M2, para camada de 0,20-0,40 m, foi construído de acordo com a variabilidade retida em cada componente, que através da elaboração do modelo, o peso de cada variável foi redistribuído em função da variação da  $\sigma_p$ .

O fato do modelo da camada de 0,20-0,40 m ter apresentado dois componentes principais, refletiu nos indicadores de desempenho dos mesmos. Verifica-se que o valor

de  $R^2$  é ligeiramente maior, e o erro padrão menor no M1, diferente do M2, que apresenta coeficiente de determinação menor e erro padrão maior. No entanto, os indicadores de desempenho, principalmente o coeficiente de determinação, são satisfatórios.

Saffih-Hdadi et al. (2009) ajustou modelos de regressão para predição da  $\sigma_p$  com duas variáveis, densidade e umidade, em solos de textura arenosa e argilosa, e os coeficientes de determinação variando de 0,79 a 0,97, foram considerados satisfatórios.

Analisando os coeficientes dos modelos de regressão, verifica-se que as relações apresentadas pelos coeficientes das variáveis na análise de componentes principais se mantiveram, ou seja,  $\theta$  e CO apresentam relação negativa com as demais variáveis, porém, dentro do modelo, foram atribuídos novos pesos aos coeficientes das variáveis de acordo com a variação da  $\sigma_p$ .

Com base nas relações apontadas pelos coeficientes no M1 e M2, modelos de predição da  $\sigma_p$ , na camada de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, verifica-se que os atributos com valores negativos dentro da equação são a  $\theta$  e o CO, e os valores positivos, representam a DS, RP, AR, LL e LP, ou seja, os menores valores de  $\sigma_p$  estão associados a maiores valores  $\theta$  e do CO. Por outro lado, quanto maiores os valores de  $\sigma_p$ , maior a contribuição da DS, RP, AR, LL e LP.

No entanto, nestes modelos, M1 e M2, observa-se que a DS do solo apresentou o maior coeficiente dentre todas as variáveis analisadas, sendo a mesma, responsável pela maior variação da  $\sigma_p$  dentro do modelo, como observado por Vasconcelos et al. (2012), estudando compressibilidade do solo em Argissolo Amarelo distrocoeso observaram relação positiva e linear com a densidade do solo, assim como verificado neste estudo, demonstrando que quanto maior a densidade do solo, maior os valores de  $\sigma_p$ .

Imhoff et al. (2004) e Saffih-Hdadi et al. (2009) também verificaram efeito da DS na variação da  $\sigma_p$  em modelos de regressão linear múltiplos. Imhoff et al. (2004) comentam que quanto maior a densidade do solo maior a capacidade de suporte de carga do solo, portanto, maior os valores de  $\sigma_p$ . Os autores atribuem estes resultados a resistência que o solo oferece quando suas partículas estão mais próximas e com menor espaço poroso, o que dificulta a deformação.

As demais relações entre os atributos físicos obtidos no M1 e no M2 podem ser encontradas na literatura. A  $\theta$  foi positivamente relacionada com os teores de carbono orgânico do solo, e, portanto, afetaram conjuntamente a  $\sigma_p$ , ao ponto de, quando houve

mais CO e  $\theta$ , se observou menores de  $\sigma_p$  de acordo com a estimativa do modelo. Resultados semelhantes foram encontrados por Braida et al. (2010), que estudaram os efeitos do acúmulo de matéria orgânica nos indicadores de compressibilidade do solo, e concluíram que o acúmulo de matéria orgânica no solo está associado a alterações da susceptibilidade à compactação do solo, e desta maneira, um aumento do teor de CO, por resultar em aumento da quantidade de água retida em uma mesma tensão, reduziria a compressibilidade por aumentar o grau de saturação do solo.

Segundo Tavares et al. (2012), o aumento da umidade do solo em função da matéria orgânica estaria ligado a tendência de aumento na área superficial específica do solo. Enquanto Arthur et al. (2012) observaram correlação negativa entre carbono orgânico e densidade do solo, corroborando com os dados obtidos, nos coeficientes do CP1, nas duas camadas (Tabela 4).

A DS, RP, AR, LL e LP foram positivamente relacionadas e inversamente proporcionais aos valores de CO e  $\theta$ , o que conseqüentemente, um aumento dessas variáveis, acima da média (Tabela 10), elevou a  $\sigma_p$ .

Um dos principais atributos que faz parte do M1 e M2 citados na literatura com relação linear com a  $\sigma_p$  é a resistência à penetração. Em solos cultivados com café e pastagem em área de proteção ambiental, Lima et al. (2010) encontraram comportamento linear da tensão de pré-consolidação em função da resistência à penetração; neste caso os autores estudaram o comportamento das variáveis em três solos com diferentes condições texturais. No entanto, as condições distintas não alteraram a relação linear entre as variáveis, corroborando os resultados encontrados.

Com relação ao teor de argila, que no M1 e M2, está relacionado aos maiores valores de  $\sigma_p$ , Susuki et al. (2008) e Imhoff et al. (2004) verificaram relação positiva entre  $\sigma_p$  e o teor de argila. Imhoff et al. (2004) assinalam que o efeito da argila na  $\sigma_p$  está ligado as forças de coesão entre as partículas, que dificultam a separação e o deslocamento das frações granulométricas, aumentando a capacidade de suporte de carga.

Analisando os limites de consistência, liquidez e plasticidade, nos dois modelos, sua relação positiva com a  $\sigma_p$ , deve ser indireta, em função da argila, como destacam Tavares et al. (2012), que encontraram maiores valores nos limites de liquidez e plasticidade quando estudaram estes atributos em profundidades, atribuindo as variações a elevação nos teores de argila no perfil. Ou seja, um aumento no teor de

argila elevaria a capacidade de absorção de água no solo e conseqüentemente resultaria na elevação dos limites de consistência do solo.

Vários modelos de regressão têm sido ajustados para predição da  $\sigma_p$ , sejam múltiplos, ou modelos simples, lineares e não lineares todos eles, em função de atributos físicos do solo. Dias Junior et al. (1994) propôs um modelo não linear de capacidade de suporte de carga em função da umidade do solo. Severiano et al. (2010) adaptaram um modelo proposto por Busscher (1990) para predição da resistência à penetração em função da densidade do solo e da umidade e aplicaram na estimativa da  $\sigma_p$ , ou seja, são modelos que incorporaram poucas variáveis, quando, claramente, a  $\sigma_p$  apresenta relações diretas ou indiretas com outros atributos físicos do solo, que podem auxiliar no entendimento do comportamento da  $\sigma_p$ .

Neste caso, em função dos componentes principais, e seus respectivos coeficientes, observa-se que outras variáveis podem ser utilizadas para predição da  $\sigma_p$ , além do mais, se observa as variáveis relacionadas positiva e negativamente, bem como a contribuição de cada uma das mesmas para variação da  $\sigma_p$ .

### **Conclusões**

1. A  $\theta$  e o CO apresentaram relações negativas com a  $\sigma_p$ , enquanto DS, RP, TA, LL e LP positivas.
2. Maiores valores de  $\sigma_p$  estão associados a maiores valores de DS, RP, TA, LL e LP, assim como os menores a um aumento da concentração de CO e da  $\theta$ .

### **Referências**

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. - NBR 6459/84 - Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: 1984b. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 3336/90 – Solo - Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: 1990. 13 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 7180/84 - Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro: 1984a. 3p.

- Ampoorter, E.; Van Nevel, L.; De Vos, B.; Hermy, M.; Verheyen, K. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction. *Forest Ecology and Management*, v.260, p.1664-1676, 2010.
- Arthur, E.; Schjønning, P.; Moldrup, P.; Tuller, M.; Jonge, L. W. Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. *Geoderma*, v.193-194, p.236-245, 2013.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.131-139, 2010.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE*, v.3, p.519-524, 1990.
- Cavaliere, K. M. V.; Carvalho, L. A.; Silva, A. P.; Libardi, P. L.; Tormena, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.1541-1549, 2011.
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2013. Brasília, 2013. 17p.
- Debiasi, H.; Levien, R.; Trein, C. R.; Conte, O.; Mazurana, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2629-2637, 2008.
- Dias Júnior, M. S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. 1994. 114f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing. 1994.
- Dias Junior, M. S.; Pierce, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Brasileira de Ciência do Solo*, v.20, p.175-182, 1996.
- Embrapa. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa, 1997. 370p.
- Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- Figueiredo, G. C.; Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Giarola, N. F. B.; Moraes, S. O. Almeida, B. G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.389-402, 2011.

- Freddi, O. S.; Ferraudo, A. S.; Centurion, F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.953-961, 2008.
- Freitas, L.; Casagrande, J. C.; Desuó, I. C. Atributos físicos e químicos de solos cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmento nativo. *Holos Envolviment*, v.11, p.137-146, 2011.
- Gao, W.; Watts, C. W.; Ren, T.; Whalley, W. R. The effects of compaction and soil drying on penetrometer resistance. *Soil & Tillage Research*, v.125, p.14-22, 2012.
- Han, W.; Shi, S.; Zhu, Z.; Xue, L.; Juanli, Z. A simulation test of the impact on soil moisture by agricultural machinery. *African Journal of Biotechnology*, v.10, p.16536-16540, 2011.
- Horn, R.; Lebert, M. Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B. D. & van Ouwerkerk, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science of American Journal*, v.68, p.17-24, 2004.
- Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Júnior, M. S.; Lima, J. M. Pressão de pré-consolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de Cambissolo Háplico, Argissolo Amarelo e Gleissolo Háplico em Registro, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1448-1456, 2012.
- Jacomine, P. K. T. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: *Reunião técnica sobre solos coesos dos tabuleiros costeiros*, Cruz das Almas, 1996. Anais. Aracaju, EMBRAPA-CPATC & CNPMF/EAUFBA/IGUFBA, 1996, p.13-26.
- Kondo, M. K.; Dias Junior, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.497-506, 1999.
- Lima, M. P. L.; Magalhães, C. A. S.; Oliveira, G. C.; Lima, J. M.. Structural quality of soils cultivated with coffee and pasture in an environmental protection area. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.709-716, 2010.
- Lima, R. P.; Leon, R. P.; Silva, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Revista Ceres*, v.60, p.16-20, 2013.

- Manly, B. F. J. *Metodos Estatisticos Multivariados: uma introdução*. 3ª Edição. Bookman, 2008, 229 p.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.435-442, 2011.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.417-428, 2011.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. Janeiro de 2013
- Reinert, D. J.; Robaina, A. D.; Reichert, J. M. Compress - Software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade dos solos e seus parâmetros. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29, Viçosa, MG, 2003. Anais... Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD ROM.
- Roque, A. A. O.; Souza, Z. M.; Araujo, F. S.; Silva, G. R. V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. *Ciência Rural*, v.41, p.1536-1542, 2011.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y. J.; Tang, A.M.; Chaplain, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil & Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Júnior, M. S.; Castro, M. B.; Oliveira, L. C.; Costa, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II - quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.414-423, 2010.
- Silva, A. P.; Tormena, C. A.; Dias Júnior, M. S.; Imhoff, S.; Klein, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong van Lier, Q., ed. *Física do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.541-281.
- Silva, R. B., M. S. Dias Junior, F. L. Santos; C. A. B. Franz. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada

- por meio da pressão de preconsolidação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.961-971, 2003.
- Silveira, D. C.; Melo Filho, J. F.; Sacramento, J. A. A. S.; Silveira, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.659-667, 2010.
- Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M.; Lima, C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.963-973, 2008.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R.; Montenegro, A. A. A.; Magalhaes, A. G.; Barreto, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.1206-1214, 2012.
- Urashima, A. S.; Ganem Júnior, E. J.; Marchetti, L. B. L.; Gagliardi, P. R. Incidência de *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* em variedades de cana-de-açúcar a serem empregados para multiplicação no Estado de São Paulo. *Summa phytopathol*, v.36, p.322-328, 2010.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.525-536, 2012.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Silva, A. J. N.; Oliveira, V. S.; Silva, Y. J. B. S. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.639-648, 2010.