



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Uso agrícola e atributos físico-hídricos de solo coeso

Rodolfo de Aquino Lira¹, Maria do Socorro Bezerra de Araújo², Brivaldo Gomes de Almeida³, Valério Ferreira Marcelo⁴

¹Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, PRODEMA-UFPE, rodolfo13@hotmail.com. ²Prof. do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE, socorro@ufpe.br. ³Prof. do Departamento de Agronomia da UFRPE, brivaldo.almeida@ufrpe.br. ⁴Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente PRODEMA-UFPE, valeriomarcelo@hotmail.com

Artigo recebido em 20/10/2016 e aceite em 22/12/2016.

RESUMO 20/10

Os Tabuleiros Costeiros ocupam uma extensa área no litoral brasileiro e devido a seu relevo plano favorável à mecanização, precipitação pluvial alta e proximidade com os grandes centros consumidores, são as áreas de uso agrícola intensificado. Os solos predominantes nessa área são em geral, profundos, de baixa fertilidade natural e às vezes apresentam uma camada adensada, configurando os solos coesos. Esta coesão afeta propriedades físicas, químicas e hídricas do solo, que interferem diretamente na produtividade das culturas e na renda dos agricultores. Os objetivos deste trabalho foram avaliar o efeito do uso agrícola sobre a resistência do solo à penetração de raízes em horizonte coeso de solo cultivado com cana-de-açúcar e estimar teores de água capazes de minimizar a coesão do solo. Foram coletadas amostras do horizonte coeso em perfil de solo de uma área cultivada e de uma com mata nativa. Nelas foram determinadas porosidade total (macro, meso, micro e criptoporosidade), densidade do solo, curva característica de retenção de água no solo e resistência do solo à penetração de raízes. O solo cultivado apresentou maior capacidade de retenção de água, indicando que o manejo influenciou na distribuição do tamanho dos poros. A resistência do solo à penetração de raízes foi um parâmetro sensível para medir diferenças de grau de coesão e a área com cultivo apresentou os maiores valores. Na área com mata nativa, a variação da umidade do solo não promoveu valores restritivos de resistência do solo à penetração das raízes.

Palavras-chave: cana-de-açúcar, capacidade de retenção de água, densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes, porosidade do solo

Agricultural use and physical-hydric attributes of cohesive soil

ABSTRACT-

Coastal Tablelands occupy an extensive area in the Brazilian coast and due to their flat relief favorable to mechanization, high rainfall precipitation and proximity to the large consumer centers, are intensively used with agriculture. The predominant soils in this area are generally deep, of low natural fertility and sometimes present a hard dense soil layer, configuring the cohesive soils. This cohesion affects soil physical, chemical and water properties, which directly interfere with crop productivity and farmers' income. The aims of this work were to evaluate the effect of the agricultural use on the soil resistance to root penetration into cohesive horizon of soil cultivated with sugarcane and to estimate water levels able to minimize soil cohesion. Samples were collected from the cohesive horizon in soil profile of one area cropped and one under native forest. In them were determined total porosity (macro, meso, micro and cryptoporosity), soil bulk density, water retention characteristic curve and soil resistance to root penetration. The cropped soil showed higher water retention capacity than the soil under forest, indicating that the management influenced the distribution of pore size. Soil resistance to root penetration was a sensitive parameter to measure differences in degree of and the area under cultivation had the highest values. In the area under native forest, soil moisture variation did not promote restrictive values of soil resistance to root penetration.

Keywords: sugar cane, water retention capacity, soil bulk density, soil resistance to root penetration, soil porosity

Introdução

Solos coesos são caracterizados por possuírem diferenças marcantes entre os graus de consistência do solo seco e úmido, principalmente em termos de incremento na sua resistência (Jacomine, 1996; Giarola et al., 2001). Eles ocorrem principalmente em áreas de Tabuleiros Costeiros, distribuídos por quase toda faixa litorânea brasileira.

Os Tabuleiros Costeiros são unidades de paisagem que, devido a seu relevo plano favorável à mecanização, precipitação pluvial alta e proximidade com os grandes centros consumidores, são áreas de uso agrícola muito intensificado. No Nordeste, eles têm sido ocupados principalmente pelas monoculturas da cana-de-açúcar, coco, cacau e citros, além de pastagens e culturas de subsistência (mandioca, batata doce, inhame e feijão caupi) (Jacomine, 2001). É, portanto, uma área de grande importância social e econômica para os estados onde há sua ocorrência, sendo geradora de emprego e renda.

Solos de áreas de Tabuleiros Costeiros também possuem importância ambiental, porque grande parte da reserva de Mata Atlântica está estabelecida nestas áreas. Limitações à manutenção ou restabelecimento destas reservas podem acarretar na exposição do solo, resultando na sua erosão, promovendo o assoreamento dos cursos d'água, além da diminuição das reservas hídricas, em locais com pontos de nascentes.

A Organização Internacional do Açúcar prevê, para 2020, que a produção de cana-de-açúcar no Brasil alcance 846 milhões de toneladas, ante a atual de 715,3 milhões de toneladas (IBGE, 2013). A importância agrícola e industrial dessa cultura se deve ao valor da produção e das suas múltiplas utilidades como matéria prima para produtos industrializados. Portanto, solos de Tabuleiros Costeiros, principalmente no Nordeste do Brasil, são áreas a serem consideradas na expansão da cultura da cana-de-açúcar.

Entretanto, alguns usos agrícolas têm sido inviabilizados nestas áreas em virtude das baixas produtividades e relação custo/benefício desfavorável. Os solos predominantes nelas são Latossolos Amarelos, Argissolos Amarelos e Neossolos Quartzarênicos, que em geral, são profundos, de baixa fertilidade natural (Araújo Filho et al., 2014) e muitas vezes ocorrem com uma camada adensada, configurando os solos coesos.

Em Pernambuco, em particular, a monocultura da cana-de-açúcar tem sido uma das principais fontes de divisas para o Estado. No entanto, a produtividade obtida encontra-se muito abaixo do real potencial que a cultura pode oferecer

e das produtividades obtidas no sudeste do país. Parte das limitações a altas produtividades pode ser devido à presença de horizontes coesos que ocorrem em grande parte de solos de Tabuleiros Costeiros, muito utilizados para o cultivo da cana em Pernambuco.

Para uma melhor produtividade, a cana-de-açúcar requer que o desenvolvimento radicular ocorra também em camadas mais profundas. Isto é mais crítico em solos pouco férteis e que oferecem grandes limitações ao enraizamento, caso de solos coesos que ocorrem nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste. A ocorrência de coesão pode afetar propriedades físicas e hídricas do solo em intensidade variável, a depender da posição que o solo ocupa na paisagem e da profundidade e grau de adensamento da camada, porque pode limitar o volume de solo explorado pelas raízes. Eventuais restrições impostas ao sistema radicular resultam em baixas produtividades, devido à falta de aeração no solo e absorção de água e nutrientes pelas plantas (Rezende, 2000).

Por outro lado, as etapas do cultivo, que incluem preparo do solo, plantio e colheita, podem influenciar no agravamento dos processos de coesão do solo, pelo aumento da compactação que pode ocorrer devido ao uso de máquinas e revolvimento do solo.. Efeitos do cultivo que indiquem este agravamento ainda são pouco estudados.

Sabe-se que a coesão é minimizada em determinadas faixas de umidade, sendo mais intensa quanto mais seco o solo estiver. Portanto, é importante o conhecimento do comportamento hídrico do solo e a avaliação da sua resistência mecânica numa ampla faixa de umidade, para que seja estabelecido o ponto crítico em que a coesão se manifesta ou é minimizada (Santana, 2002).

Como a coesão influencia diretamente o desenvolvimento das raízes (Cintra et al., 1997; Rezende, 2000) e limita a percolação de água pelo perfil do solo, avaliações importantes para se detectar efeitos do cultivo devem incluir a determinação de curvas de retenção de água no solo (Nascimento, 2009) e resistência do solo à penetração de raízes (Benghough e Mullins, 1990; Santana, 2002), além de outras propriedades correlacionadas, como porosidade e densidade do solo (Ribon e Tavares Filho, 2008)

Os objetivos deste trabalho foram avaliar o efeito do uso agrícola do solo sobre a sua resistência à penetração de raízes em horizonte coeso, quando cultivado com cana-de-açúcar e estimar os teores mínimos de água para reduzir o efeito da coesão no impedimento ao desenvolvimento do sistema radicular.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Itapirema (EEI), pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), situada no município de Goiana a 60 km do Recife, zona da mata norte do Estado de Pernambuco, com coordenadas geográficas de 07°37'30" S e 34°57'30" W.

Esse ambiente está sob área de Tabuleiros Costeiros, no limite estadual entre Pernambuco e Paraíba, e grande parte do território está inserida no domínio morfoestrutural dos depósitos sedimentares da bacia sedimentar da Paraíba, entre as sub-bacias de Olinda e Alhandra (Barbosa et al., 2004). O clima é classificado como tropical úmido do tipo As' na escala de Köppen, com maior pluviometria entre o outono e inverno (SECTMA, 2006). O regime de precipitação confirma as estações típicas, com inverno chuvoso no período de março a agosto, com precipitações entre 200 e 350 mm mensais, picos em maio, junho e julho; e com época mais seca nos outros meses, com precipitações em geral menores que 100 mm

mensais, o que resulta numa precipitação anual superior a 2000 mm.

Os solos dessa unidade geoambiental são representados pelos Latossolos e Argissolos nos topos dos tabuleiros; pelos Argissolos e Espodosolos nas pequenas depressões nos tabuleiros; pelos Argissolos concrecionários em áreas dissecadas e encostas e Gleissolos e Neossolos nas áreas de várzeas (BRASIL, 2005).

Amostragens do solo

Amostras de solo foram coletadas no horizonte coeso de um perfil classificado conforme Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013) como Argissolo Amarelo Distrocoeso epiáquico, cultivado com cana-de-açúcar (Figura 1). Foi utilizado o mesmo procedimento para amostragem de um perfil adjacente, com mesma classe de solo, sob mata nativa. O horizonte coeso amostrado em cada perfil foi selecionado com base nas características morfológicas no diagnóstico do fenômeno da coesão. Em ambos os perfis, o horizonte coeso, onde apresentou máximo adensamento, foi identificado como Bt.

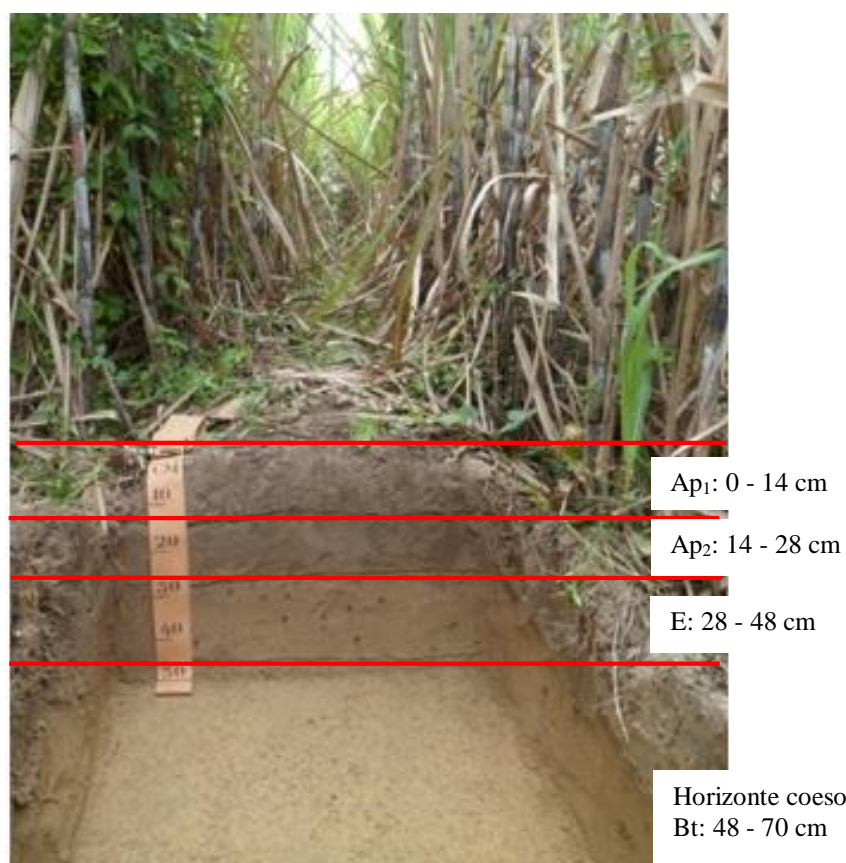


Figura 1. Distribuição dos horizontes do perfil do Argissolo Amarelo Distrocoeso epiáquico, sob cultivo de cana-de-açúcar, coletado na Estação Experimental de Itapirema, do Instituto Agrônomo de Pernambuco, Goiana-PE.

Foram retiradas 30 amostras no horizonte selecionado, em cada perfil (Figura 2), utilizando o amostrador tipo Uhland, adaptado para uma versão semiautomatizada (o equipamento está em processo de depósito de patente, junto ao Núcleo de Inovação Tecnológica-NIT, da UFRPE), onde o anel volumétrico (100 cm³) é inserido no solo gerando um mínimo de impacto. As amostras

foram acondicionadas em plástico bolha e transportadas para o laboratório. As amostras de solo foram desbastadas (toalete), cuidadosamente, para que ficassem exatamente com o volume interno do anel. Para realização dos ensaios físico-hídricos, as amostras coletadas em anel receberam na sua parte inferior um pano poroso fixado com uma liga de borracha, que envolveu a base do anel.



Figura 2. Forma de amostragem de solo do horizonte coeso, utilizando um cilindro metálico medindo 5 cm altura x 5 cm de diâmetro, para retirada de 30 amostras em Argissolo Amarelo sob mata nativa e sob cultivo com cana-de-açúcar, realizada na Estação Experimental de Itapirema, do Instituto Agrônomo de Pernambuco, Goiana-PE.

Análises do solo

Foram determinadas em laboratório, as seguintes características físicas:

Curva característica de retenção de água no solo (CCRAS)

As amostras contidas nos anéis (conjunto anel-amostra) foram saturadas por capilaridade, com água desaerada em bandejas plásticas, forradas com espuma de 20 mm de espessura. Em seguida, os conjuntos anel-amostra foram colocados em mesa de tensão, onde suas umidades foram equilibradas nas tensões equivalentes aos potenciais mátricos de: 10, 60 e 100 cca (Romano e Hopmans, 2002); e depois submetidas à câmara de pressão de Richards (Dane e Hopmans, 2002), sob os potenciais mátricos: 333; 500; 1.000; 5.000; 10.000 e 15000 cca.

Os dados da CCRAS, obtidos para cada amostra, foram ajustados pela equação (1), como

sugerido em van Genuchten (1980), e os parâmetros desta equação foram determinados utilizando-se o software “Retention Curve” – RetC, conforme van Genuchten et al. (1991).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \Psi)^n]^m} \quad (1)$$

Onde: θ é a umidade volumétrica atual do solo; θ_r , a umidade volumétrica residual; e θ_s , a umidade volumétrica de saturação, todas expressas em cm³ cm⁻³; Ψ , a tensão com que a água está retida no solo, em cca; α é o escalonador do Ψ (cm⁻¹); e n e m , são parâmetros empíricos da equação. Para o cálculo do valor de m , foi utilizada a expressão $m = 1 - 1/n$, conforme sugere van Genuchten (1980).

Resistência do solo à penetração de raízes (RP)

Após equilíbrio de cada tensão/potencial mátrico aplicado, cada conjunto anel-amostra foi pesado e imediatamente realizado os ensaios de

RP, utilizando-se de um penetrômetro eletrônico de bancada, que simula a penetração das raízes no solo por meio da inserção de agulha ao solo. O penetrômetro é acoplado a um computador para aquisição dos dados, operando com velocidade de penetração à 1 cm min⁻¹ com diâmetro do cone da base da agulha medindo 4 mm, e ângulo de inclinação de 30°.

Para melhor evidenciar os valores obtidos, foram utilizadas duas classificações de resistência do solo à penetração: uma específica para o cultivo de cana-de-açúcar com os respectivos valores de referência (Quadro 1) e outra para os cultivos em geral, onde foi utilizado o valor de referência igual a 2 MPa, normalmente utilizado como valor crítico (Taylor et al., 1966).

Quadro 1. Classes de resistência do solo à penetração de raízes (RP) para cana-de-açúcar e correspondente à pressão empreendida.

Classes	RP (MPa)
Baixa	0 - 2
Moderada	2 - 4
Alta	4 - 6
Muito Alta	Acima de 6

Fonte: Ribeiro (2010).

Porosidade total (Pt), umidade na macro, meso e microporosidade

Foram determinadas a macro, meso e microporosidade do solo, além da porosidade total, obtidas a partir dos ensaios em mesa de tensão e câmara de Richards.

A porosidade total do solo foi determinada pela umidade volumétrica de saturação, sendo o volume de poros correspondente ao volume de água de saturação. As amostras foram saturadas e, após a realização da CCRAS, foram secas em estufa a 105 °C, para quantificação do volume de poros obtido pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco, conforme a equação (2)

$$Pt = Vp/Vs \quad (2)$$

Onde, Pt é a porosidade total do solo, em cm³ cm⁻³; Vp, o volume de poros, em cm³; e Vs, o volume do solo, assumido como o volume interno do anel volumétrico (r² h), em cm³.

Os poros foram classificados com base na classificação de Prevedello (1996), onde: macroporos, são poros com raio > 150 m (que perdem água em tensões que 1 kPa); mesoporos, possuem raio entre 150 e 25 m (drenados com tensões entre 1 e 6 kPa); microporos, apresentam

raio entre 25 e 0,1 m (drenados com tensões entre 6 e 1.500 kPa).

Desse modo, a macroporosidade foi quantificada após a aplicação do potencial mátrico correspondente a -1 kPa ou 10 cca (mesa de tensão), sendo calculada pela relação entre o volume de água contido entre a saturação e equilibrada a -1 kPa (volume de macroporos) e o volume do solo, utilizando-se a equação (3).

$$MACRO = Vmacro/Vs \quad (3)$$

Onde, MACRO é a macroporosidade, em cm³ cm⁻³; Vmacro, o volume de macroporos, assumido como o volume de água retirado da amostra após aplicada e equilibrada a tensão de 1 kPa, em cm³; e Vs, o volume do solo, assumido como o volume interno do anel volumétrico (r² h), em cm³.

Após equilibrada à tensão de 1 kPa, a umidade na mesoporosidade foi determinada aplicando-se a tensão correspondente à 6 kPa ou 60 cca, e calculada pela equação (4).

$$MESO = Vmeso/Vs \quad (4)$$

Onde, MESO é a mesoporosidade, em cm³ cm⁻³; Vmeso, o volume de mesoporos, assumido como o volume de água retirado da amostra após aplicada e equilibrada a tensão entre 1 kPa e 6 kPa, em cm³; e Vs, o volume do solo, assumido como o volume interno do anel volumétrico (r² h), em cm³.

Após equilibrada à tensão de 6 kPa, a umidade na microporosidade foi determinada aplicando-se a tensão correspondente à 1.500 kPa ou 15.000 cca, e calculada pela equação (5).

$$MICRO = Vmicro/Vs \quad (5)$$

Onde, MICRO é a microporosidade, em cm³ cm⁻³; Vmicro, o volume de microporos, assumido como o volume de água retirado da amostra após aplicada e equilibrada a tensão entre 6 kPa e 1.500 kPa, em cm³; e Vs, o volume do solo, assumido como o volume interno do anel volumétrico (r² h), em cm³.

Densidade do Solo (Ds)

A determinação da densidade foi realizada pelo método do anel volumétrico, conforme descrita em Grossman e Reinsch (2002), onde o solo contido em anel volumétrico é seco em estufa à 105 °C, até peso constante. A densidade do solo foi calculada por meio da equação (6)

$$D_s = M_s/V_s \quad (6)$$

Onde, D_s é a densidade do solo, expressa em $g\ cm^{-3}$; M_s , a massa de sólidos, representada pela massa do solo seco à $105\ ^\circ C$; V_s , o volume do solo, assumido como o volume interno do anel volumétrico ($r^2\ h$), em cm^3 .

Tratamento Estatístico

As médias dos parâmetros físicos analisados foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e para os parâmetros que apresentou diferenças significativas, foi aplicado o teste de Tukey, por meio do aplicativo SAS.

Resultados e discussão

Densidade do Solo com horizonte coeso sob efeito

Tabela 1. Densidade do solo dos horizontes coesos (Bt1) dos perfis de um Argissolo Amarelo sob mata nativa e cana-de-açúcar da Estação Experimental de Itapirema, pertencente ao Instituto Agronômico de Pernambuco, situada no município de Goiana – PE.

Tratamentos	Tensões								
	-----cca-----								
	10	60	100	333	500	1000	5000	10000	15000
	Densidade do solo								
	-----g cm ⁻³ -----								
Mata nativa	1,68a	1,67a	1,67a	1,67a	1,69a	1,68a	1,63a	1,66a	1,70a
Cana-de-açúcar	1,72a	1,70a	1,71a	1,69a	1,66a	1,71a	1,69a	1,69a	1,68a

Letras iguais na mesma coluna não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Quando solos sofrem preparo para cultivo, com o tempo a densidade pode ser alterada, devido a um aumento na compactação provocado pelo uso de máquinas. Especialmente em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, a D_s média dos horizontes superficiais encontrada situa-se na faixa $1,3$ a $1,8\ g\ m^{-3}$ (Araújo Filho et al., 2001). No presente trabalho, embora não tenha havido diferenças estatísticas entre áreas com cultivo e sob mata nativa, a área sob cana tendeu a apresentar valores mais altos (Tabela 1).

O conteúdo de matéria orgânica influencia o grau de compactação do solo, que também é influenciada por práticas de manejo. Portanto, é importante salientar que a área sob mata com coesão, mesmo tendo D_s mais alta em relação a áreas sob mata sem coesão, ainda pode ser mais favorável ao desenvolvimento de plantas do que a área com coesão que vem sendo cultivada, devido principalmente a seu maior aporte de matéria

do manejo

Os valores de densidade do solo (D_s) dos horizontes Bt1 dos perfis de solo da área sob mata nativa e da área sob cultivo foram altos em relação a solos sem coesão, mas estão dentro da faixa considerada normal para horizontes com caráter coeso, que é de $1,5$ a $1,8\ g\ m^{-3}$ (Jacomine, 2001). Estes resultados corroboram outras pesquisas utilizando solos coesos (Giarola et al., 2001; Zuffo et al., 2013; Melo et al., 2014). Comparando-se a as duas áreas, os valores de D_s para os solos sob vegetação nativa não apresentaram diferenças aos da área cultivada (Tabela 1), indicando que o manejo não está afetando a condição de coesão inicial do solo, em relação à densidade. Também não apresentaram diferenças entre áreas quando os solos foram submetidos a diversas tensões (Tabela 1).

orgânica, ausência do uso de máquinas e o não revolvimento do solo inerente ao preparo para o cultivo.

A manutenção da matéria orgânica no solo, promovendo tais efeitos na redução da D_s pode também ser observada em solos sob cultivo, mas dependerá do sistema de manejo adotado. De fato, pesquisas apontam que a maior quantidade de matéria orgânica e atividade biológica na superfície de solos sob plantio direto pode ser mais favorável ao crescimento e desenvolvimento de plantas, mesmo com densidade do solo igual ou maior do que se cultivados convencionalmente (Silva et al., 2000).

Em solos com cultivo de cana-de-açúcar, densidades muito altas podem comprometer a respiração das raízes e limitar seu desenvolvimento, prejudicando a produção e a produtividade da cultura (Lima et al., 2009). Isto se torna mais agravante quando a camada que sofre

aumentos de compactação é a superficial porque é nesta camada que as culturas têm maior desenvolvimento do sistema radicular para maior exploração nutricional do solo. A compactação altera a distribuição dos poros e a o desenvolvimento da cultura é mais afetado se suas raízes estiverem principalmente numa camada com grande número de poros pequenos (Fernandes et al., 1980).

Dinâmica da água em solos coesos: disponibilidade e retenção

Os valores das curvas características de

retenção de água nos solos (CCRAS) sob mata nativa e cultivo de cana-de-açúcar indicam que o manejo influenciou a distribuição dos tamanhos dos poros e, conseqüentemente, o processo de retenção da água no solo. O comportamento distinto da água nos poros é observado em três faixas de tensões: água nos macroporos, sob tensões de até 10 cca; água nos mesoporos e parte do microporos, sob tensões de 10 a 333 cca; e água nos poros sob tensões a partir de 333 cca, especificamente nos microporos menores (Figuras 3a, b, c).

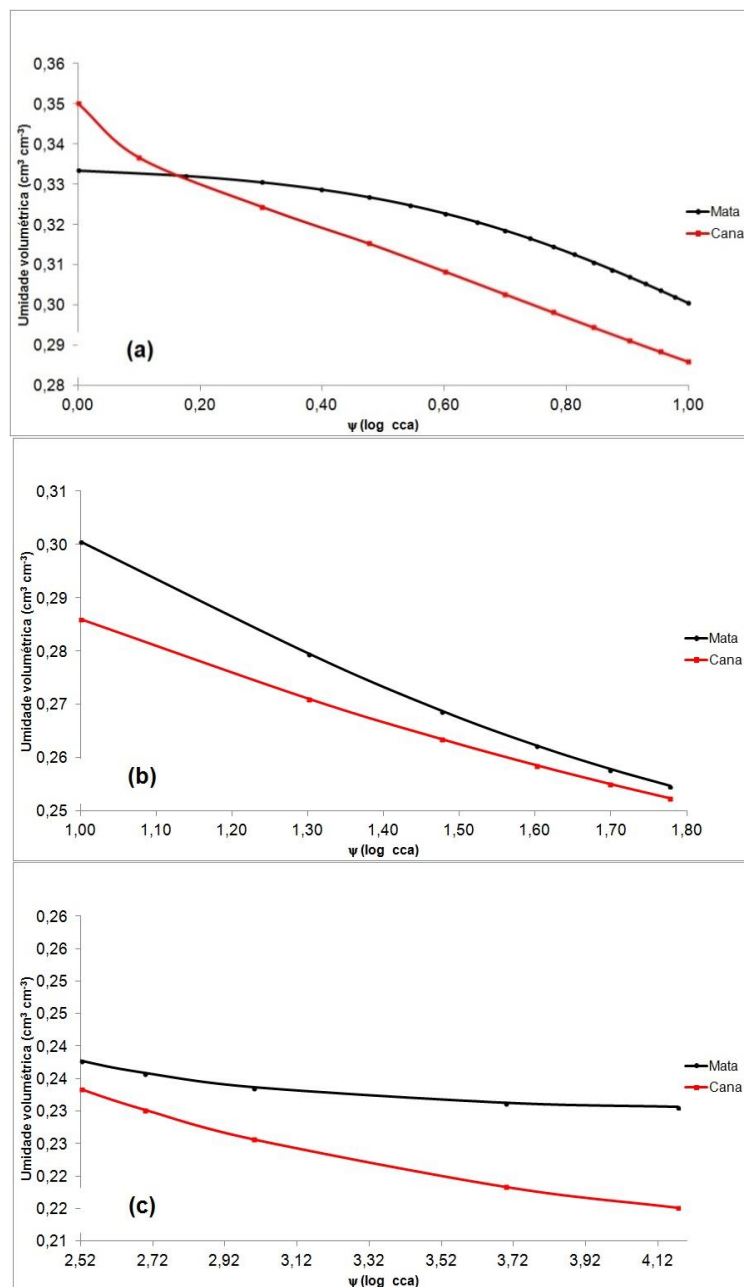


Figura 3. Curva de retenção de água do horizonte coeso de um Argissolo Amarelo sob mata nativa e cultivo com cana-de-açúcar, coletado na Estação Experimental de Itapirema, Goiana-PE, ajustada pelo modelo de Van Genuchten (1980): a) curvas entre a macroporosidade (0 à 10 cca); b) curvas na faixa úmida (10 à 333 cca); c) curvas na faixa seca (microporosidade, de 1000 a 15000 cca).

Foi observado que no solo coeso sob cultivo há uma maior quantidade de macroporos que no solo coeso sob mata nativa, indicado pela rápida drenagem da água com a baixa tensão aplicada (Figura 3a). No primeiro momento, fica bastante evidente que na faixa de até 1 kPa o solo sob cultivo apresenta maiores valores de umidade, devido à maior quantidade de macroporos quando comparados com o sob mata nativa.

Assim, o solo sob manejo de cana-de-açúcar, apesar de apresentar maior porosidade total (35%) que o solo coeso sob mata (33,5%), devido ao seu maior revolvimento durante subsequentes preparos do solo, é possível que este processo também tenha promovido uma maior quantidade de macroporos, conferindo-lhe uma maior drenagem inicial.

A aparente contradição, onde o solo sob mata, com maior aporte de matéria orgânica, apresenta porosidade menor que solos sob cultivo, pode ser explicada pela profundidade de ocorrência do horizonte coeso. Na área sob mata, o horizonte coeso encontra-se a 43 cm de profundidade e no sob cana-de-açúcar, a 48 cm. O efeito da matéria orgânica é mais evidente em horizontes superficiais, alterando pouco os horizontes mais profundos, e pode não ter influenciado a porosidade nesta camada.

Com relação ao comportamento da curva de retenção de água (CCRAS), após a tensão de

1kPa, isto é, quando a água não mais se encontra nos macroporos, nota-se que o solo sob mata retém mais água que o solo sob cana-de-açúcar (Figuras 3b e 7c), invertendo-se a tendência inicial. Este comportamento é devido ao solo coeso sob mata ter poros nas classes de meso e microporos com diâmetros menores que estas mesmas classes no solo coeso sob cana-de-açúcar.

Resultados similares foram observados por outros autores, onde os solos sob cultivo retiveram menos água que solos sob mata (Silva et al., 1986; Barzegar et al., 2002).

Resistência do solo à penetração de raízes: efeito do potencial mátrico em solo coeso

Os valores de resistência do solo à penetração de raízes (RP) aumentaram com a redução do potencial mátrico (Ψ) e, conseqüentemente, com a diminuição da umidade do solo (Tabela 2), comportamento esperado para este atributo do solo, pois a umidade influencia, de maneira inversamente proporcional, a resistência mecânica do solo (Ramos et al., 2013).

Realmente, as curvas de resistência à penetração evidenciaram o grau de coesão no perfil do solo. À medida que a umidade vai diminuindo os valores de RP vão aumentando, estabelecendo assim uma relação inversamente proporcional entre os valores de umidade e RP.

Tabela 2. Valores de resistência do solo à penetração de raízes, relacionados com potenciais de água no solo do horizonte coeso de um Argissolo Amarelo sob mata nativa e sob cultivo com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Itapirema, do Instituto Agrônomo de Pernambuco, Goiana - PE.

Tratamentos	Potenciais de água no solo								
	10	60	100	333	500	1000	5000	10000	15000
	Resistência do solo à penetração de raízes								
Mata Nativa	0,41Ab	0,72Ab	1,44Ab	1,51Aa	1,69Aa	2,10Aa	2,12Aa	2,16Aa	2,40Aa
Cana-de-açúcar	1,00Ab	1,09Ab	2,06Ab	2,54Ab	3,67Bb	4,26Ba	4,43Ba	4,76Ba	4,97Bab

Letras maiúsculas iguais na mesma coluna e letras minúsculas iguais na mesma linha, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de RP nos potenciais 10, 60, 100 e 333 cca não apresentaram diferenças entre as áreas com e sem cultivo. No entanto, é importante salientar que, embora estatisticamente não tenha

havido diferença entre as áreas, os valores de RP sob cultivo, nos potenciais 100 e 333 cca, já são classificados como moderados, por apresentarem indícios de impedimento ao crescimento radicular

(Figura 4), de acordo com a escala de classes de valores de RP para a cana-de-açúcar, desenvolvida

por Ribeiro (2010).

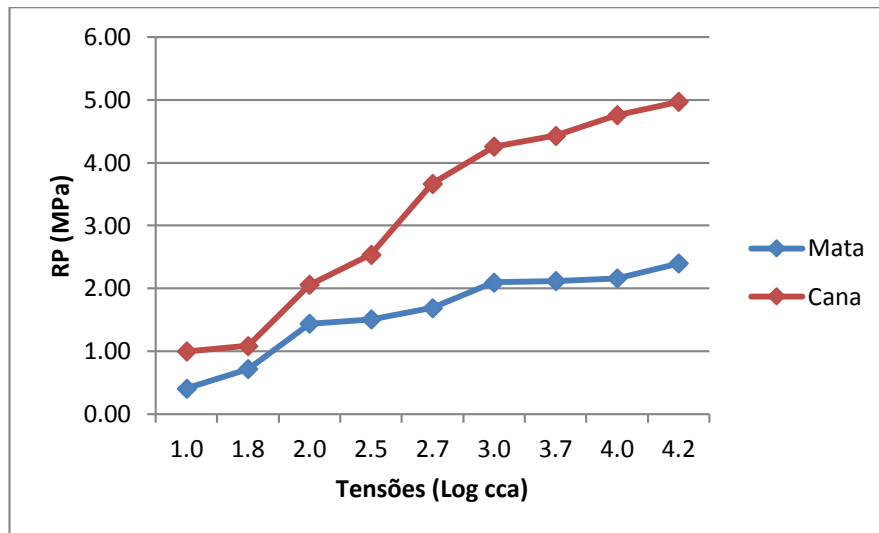


Figura 4. Curva da resistência do solo à penetração de raízes em função do potencial mátrico de um Argissolo Amarelo sob mata nativa e sob cultivo com cana-de-açúcar, na Estação Experimental de Itapirema, do Instituto Agrônomo de Pernambuco, Goiana-PE.

Ainda de acordo com a escala de classificação de RP, os valores de 0 a 2 MPa são considerados baixos, sem impedimento ao crescimento da planta; de 2 a 4 MPa, moderados, ou seja, começam a causar impedimentos ao crescimento da planta; valores de 4 a 6 MPa são classificados como altos, pois oferecem impedimento ao crescimento radicular; e por fim a faixa com valores de resistência do solo à penetração acima de 6 MPa, recebeu a classificação de muito alta (Taylor et al., 1966; Torres e Saraiva 1999; Roque et al., 2003).

No manejo de cana-de-açúcar, nos potenciais 500, 1000, 5000 e 15000 cca pode-se identificar valores entre 3,68 e 4,97 MPa (Figura 4), que são considerados de impedimento moderado à alto, onde coesão oferece impedimento ao crescimento radicular, de acordo com classificação desenvolvida por Ribeiro (2010).

Para o manejo de mata nativa, nos potenciais 10, 60, 100, 300 e 500 cca apresentaram valores de RP abaixo do considerado impeditivo ao sistema radicular, considerando o valor de RP igual a 2 MPa, que tem sido frequentemente utilizado como crítico (Taylor et al., 1966) para o crescimento das plantas (Richart et al., 2005; Reichert et al., 2007).

Na faixa mais úmida, principalmente entre a capacidade de campo (10 a 33 kPa) o solo deverá apresentar valores de RP não limitantes ao crescimento de plantas.

Os valores de RP, em ambos os sistemas,

na faixa da capacidade de campo apresentaram uma considerável redução. No entanto, apenas no manejo da mata nativa os valores foram abaixo de 2,0 MPa, não sendo considerados impeditivos ao desenvolvimento do sistema radicular. No cultivo da cana-de-açúcar, mesmo na capacidade de campo, os valores foram acima de 2,0 MPa, sendo considerados moderados de acordo com a classificação de Ribeiro (2010).

Silva e Carvalho (2007), avaliando o comportamento mecânico de solos coesos, registraram RP com valores entre 3,82 e 6,76 MPa; enquanto Giarola et al. (2001) encontraram, em solo com horizonte coeso de Tabuleiro Costeiro do município de Cruz das Almas (BA), RP com até 12,8 MPa.

Conforme pode ser observado, e também registrado por Sá et al. (2016), parece não haver acordo entre os pesquisadores quanto aos reais valores de RP que limitam o crescimento radicular. Neste sentido, Canarache (1990), comparando os valores de RP nos diversos sistemas, constatou que a área da mata nativa apresentou valores de RP abaixo do limite considerado crítico ao desenvolvimento das raízes, em todo o perfil analisado.

O estudo da coesão do solo a partir da RP evidencia que os solos dos Tabuleiros Costeiros podem estar inseridos na problemática da degradação e erosão do solo, considerando a necessidade agrícola nas últimas décadas, em resposta à demanda de produtividade agrícola.

A erosão acelerada do solo causada pelas atividades humanas é prejudicial no que refere à redução da produtividade agrícola e aos impactos no ambiente. Os efeitos da erosão sobre a produtividade das culturas são de preocupação global, porque os recursos do solo são finitos e são necessárias estimativas acuradas da produtividade do solo para o planejamento nacional (Williams et al., 1981).

Devido à presença de camada coesa, tem-se como alternativa ao abrandamento dessa limitação a prática de aração, gradagem e subsolagem, na tentativa de diminuir a coesão. Porém, em muitas dessas situações a degradação somente é detectada em seus estágios mais avançados, inviabilizando em alguns casos recuperação desses solos.

Do ponto de vista prático, esses resultados indicam a necessidade do uso de técnicas para a manutenção da umidade no solo próxima à

capacidade de campo como prática de manejo para o controle da resistência do solo à penetração e oferta de condições satisfatórias para um melhor desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas no solo coeso.

Umidade volumétrica em que a RP atinge o limite crítico (θ_{RPC})

Com base nos dados observados da umidade volumétrica (θ) e da RP (Tabela 3), fica evidente que na área de mata poderá ocorrer maior secamento do solo sem que haja valores restritivos de resistência à penetração das raízes. Pode-se concluir que devido ao efeito do manejo aumentando a compactação, há necessidade de se manter um teor mais elevado de água, com o intuito de evitar ou minimizar a resistência do solo ao crescimento radicular das plantas.

Tabela 3. Umidade volumétrica (m^3m^{-3}) em que a resistência do solo à penetração de raízes atinge o limite crítico de 2,0 MPa no horizonte coeso de um Argissolo Amarelo sob mata nativa e sob cultivo com cana-de-açúcar, da Estação Experimental de Itapirema, do Instituto Agrônomo de Pernambuco, Goiana-PE.

Tratamentos	Umidade	Resistência do solo à	Tensões
	volumétrica (θ)	penetração de raízes	
	---- $m^3 m^{-3}$ ----	-----MPa-----	----cca----
Mata Nativa	0,23	2,10	1000
Cana-de-açúcar	0,25	2,06	100

Dos parâmetros físico-hídricos estudados, a RP foi o mais sensível em diferenciar o comportamento hídrico dos coesos sob diferentes manejos. No solo sob mata nativa, um valor igual ou maior que $0,23 m^3m^{-3}$ de água, foi suficiente para garantir $RP \leq 2$ MPa; no entanto, no cultivo de cana-de-açúcar, a umidade não deverá ser inferior a $0,25 m^3m^{-3}$ para manter $RP \leq 2$ MPa. Isto resultará num maior gasto com irrigação no solo sob cultivo de cana-de-açúcar para que este não apresente restrições ao desenvolvimento da cultura, visto que na faixa da capacidade de campo a RP neste solo foi < 2 MPa.

Em estudo comparando-se mata nativa com outros usos do solo, Blainski et al. (2008), observaram que em solo sob mata somente valor de θ igual a $0,09 m^3m^{-3}$ foi suficiente para garantir a $RP \leq 2,0$ Mpa, enquanto que nos solos cultivados com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente, a θ não deveria ser inferior a 0,17; 0,21 e $0,22 m^3m^{-3}$ para manter $RP \leq 2,0$ MPa. Neste sentido, os resultados de Cotching e Belbin (2007)

mostraram que o manejo da água no solo é importante no controle da RP e que, em solos com estrutura degradada, a taxa de aumento da RP com o secamento do solo é maior do que em solos bem estruturados.

Conclusões

O solo cultivado apresentou maior capacidade de retenção de água, indicando que o manejo influenciou na distribuição do tamanho dos poros e poderá, conseqüentemente, influenciar no processo de disponibilidade de água às plantas.

A resistência do solo à penetração de raízes foi um parâmetro sensível para medir diferenças no grau de coesão entre os solos das duas áreas e o solo da área com cultivo apresentou os maiores valores, evidenciando o efeito negativo do manejo.

Na área com mata nativa, a variação da umidade do solo não promoveu valores restritivos de resistência do solo à penetração das raízes.

Embora não tenha havido diferença

estatística entre os valores de densidade das duas áreas, os solos coesos cultivados apresentaram tendência de aumento destes valores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FACEPE pela bolsa de pós-graduação do primeiro autor, ao CNPq pelo auxílio financeiro de pesquisa e pela bolsa de produtividade da segunda autora, ao Diretor da Estação Experimental de Itapirema, vinculada ao Instituto de Pesquisa Agrônômica de Pernambuco, pela disponibilidade da área de amostragem e ao Laboratório de Física de Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE, local dos ensaios físico-hídricos do solo.

Referências

- Araújo Filho, J.C., Carvalho, J., Silva, F.B.R., 2001. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos dos tabuleiros do nordeste do Brasil. Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
- Araújo Filho, J.C., Araújo, M.S.B., Marques, F.A., Lopes, H.L., 2014. Solos, in: Torres, F.S.M., Pfaltzgraff, P.A.S. (Org.), Geodiversidade do Estado de Pernambuco. CPRM, Recife. Disponível: <file:///C:/Users/User/Downloads/GeodiversidadePEcap.7.pdf>. Acesso:
- Barbosa, J.A., Souza, E.M., Lima Filho, M.F., Neumann, V.H., 2003. A estratigrafia da bacia Paraíba: uma reconsideração. Estudos Geológicos 13, 89-108.
- Barzegar, A.R., Yousefi, A., Daryashenas, A., 2002. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. Plant Soil 247, 295-301.
- Bengough, A.G., Mullins, C.E., 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. Journal of Soil Science 41, 341-58.
- Blainski, E., Tormena, C.T., Fidalki, J., Guimarães, R.M.L., 2008. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. Revista Brasileira de Ciência do Solo 32, 975-983.
- BRASIL, 2005. Ministério de Minas e Energia. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea – Estado de Pernambuco: diagnóstico do município de Goiana. CPRM, PRODEEM, Recife.
- Canarache, A., 1990. Penetrometer: a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. Soil Tillage Research 16, 51-70.
- Cintra, F.L.D., Libardi, P.L., Silva, A.P.da, 1997. Tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camadas coesas dos solos. Boletim Informativo da SBCS 18, 81-95.
- Cotching, W.E., Belbin, K.C., 2007. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in North-West Tasmania. Australian Journal Soil Research 45, 147-152.
- Dane, J.H., Hopmans, J.W., 2002. Pressure plate extractor, in: Dane J.H., Topp E.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis Part 4: physical methods, SSSA Book Ser. 5, SSSA, Madison, pp. 688–690.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília.
- Fernandes, J., Furlani Neto, V.L., Stolf, R., 1980. O subsolador alado como implemento de preparo de solo para a cana-de-açúcar. Brasil Açucareiro 96, 33-40.
- Giarola, N.F.B., Silva, A.P., Tormena, C., Souza, L.S., Ribeiro, L.P., 2001. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting. Estudo de caso. Revista Brasileira de Ciência do Solo 25, 239-247.
- Grossman, R.B., Reinsch, T.G., 2002. The solid phase, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), SSSA book series: 5. Methods of soil analysis Part 4-Physical methods. Soil Science Society of America Inc, Madison, pp. 201-415.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. Produção agrícola municipal 2013. Disponível: [ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_\[anual\]/2011/pam2011.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_Agricola_Municipal_[anual]/2011/pam2011.pdf). Acesso: 12 jan. 2014.
- Jacomine, P.K.T., 1996. Distribuição geográfica, característica e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. Reunião Técnica sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
- Jacomine, P.K.T., 2001. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. Workshop Coesão em Solos dos Tabuleiros Costeiros, Aracaju.
- Lima, R.P., Leon, M.J., Gonzaga, B.A.B.S., Santos, R.F., 2009. Resistência a Penetração e Densidade do Solo como Indicativos de Compactação do Solo em Área de Cultivo da Cana-de-Açúcar. Disponível: http://www.falker.com.br/artigos/CBCS_UFP_B_RP_CompactacaoCana-de-Acucar.pdf.

- Acesso: 10 out. 2014.
- Melo, D.V.M., Almeida, B.G., Souza, E.R., Silva, L.S., Jacomine, P.K.T., 2014. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 476-485. doi:10.1590/S0100-06832014000200012.
- Nascimento, P.S., 2009. Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos em planilha de manejo de irrigação. Dissertação (Mestrado). Cruz das Almas, UFRPB.
- Prevedello, C.L., 1996. Física do Solo com Problemas Resolvidos. Saeafs, Curitiba.
- Ramos, M.R., Curcio, G.R., Dedecek, R.A., Melo, V.F., Uhlmann, A., 2013. Influência da posição na encosta na manifestação do caráter coeso em solos da formação Macacu, no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 837-845. doi: 10.1590/S0100-06832013000400002.
- Reichert, J. M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., 2007. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação, in: Ceretta, C.A., Silva, L.S., Reichert, J.M. Tópicos em Ciência do Solo. SBCS, Viçosa, v. 5. pp. 49-134.
- Rezende, J.O., 2000. Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo. SEAGRI-SPA, Salvador. (Série Estudos Agrícolas, 1).
- Ribeiro, C.A., 2010. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). Dissertação (Mestrado). Jaboticabal, FCAV.
- Ribon, A.A., Tavares Filho, J., 2008. Estimativa da resistência mecânica a penetração de um latossolo vermelho sob cultura perene no Norte do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 1817-1825.
- Richart, A., Filho, J.T., Brito, O.R., Llanillo, R.F., Ferreira, R., 2005. Compactação do Solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, 26, 321-344.
- Romano, N., Hopmans, J.W., 2002. Suction table, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 4-Physical methods*. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, pp. 692-698.
- Roque, C.G., Centurion, J.F., Alencar, G.V., Beutler, A.N., Pereira, G.T., Andrioli, I., 2003. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. *Acta Scientiarum (UEM)* 25, 53-57.
- Sá, M.A.C., Santos Junior, J.D.G., Franz, C.A.B., Rein, T.A., 2016. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com o uso da escarificação entre linhas de plantio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51, 1610-1622. doi:0.1590/S0100-204X2016000900061.
- Santana, M.B., 2002. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores da coesão em dois solos dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. Dissertação (Mestrado). Viçosa, UFV.
- SECTMA. Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente, 2006. Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. SECTMA, Recife.
- Silva, A.J.N., Carvalho, F.G., 2007. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo de Tabuleiro Costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 31, 853-862.
- Silva, A.P., Libardi, P.L., Camargo, O.A., 1986. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 10, 91-95.
- Silva, V.R., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2000. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural* 30, 795-801.
- Taylor, H.M., Robertson, G.M., Parker, J.J., 1966. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science* 102, 18-22.
- Torres, E., Saraiva, O.F., 1999. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas. Embrapa Soja, Londrina. (Circular Técnica, 23).
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science of Society America Journal* 44, 892-898.
- van Genuchten, M.T.H., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils. US Salinity Laboratory and USDA Agricultural Research Service, California.
- Williams, J.R., Allmaras, R.R., Benard, K.G., Lyles, L., Moldenhauer, W.C., Langdale, G.W., Meyer, L.G., Rawis, E.J., Darby, G., Daniels, R., Magleby, R., 1981. Soil erosion effects on soil productivity: a research perspective. *Journal of Soil and Water Conservation* 36, 82-90.
- Zuffo, V.J., Pires, F.R., Bonomo, R., Vitória, E.L., Celin Filho, A., Santos, E.O.J., 2013. Effects of tillage systems on physical properties of a

cohesive yellow argisol in the northern state of
Espírito Santo, Brazil. Revista Brasileira de

Ciência do Solo 37, 1372-1382. doi:
10.1590/S0100-06832013000500026.