



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS



**COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DE UM
ARGISSOLO AMARELO DE TABULEIROS COSTEIROS
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

ISMAR LIMA DE FARIAS

2012



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS



ISMAR LIMA DE FARIAS

**COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DE UM ARGISSOLO
AMARELO DE TABULEIROS COSTEIROS CULTIVADO COM CANA-DE-
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração Produção em Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre” em Ciências.

Orientador

Prof. Dr. Pedro Roberto Almeida Viégas

SÃO CRISTÓVÃO

SERGIPE – BRASIL

2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Farias, Ismar Lima de

F224c Comportamento mecânico e hídrico de um argissolo
amarelo de tabuleiros costeiros cultivado com cana-de-açúcar
/ Ismar Lima de Farias ; orientador Pedro Roberto Almeida
Viégas. – São Cristóvão, 2012.

41 f. ; il.

Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas)–
Universidade Federal de Sergipe, 2012.

1. Solos. 2. Física dos solos. 3. Mecânica do solo. 4.
Umidade do solo. I. Viégas, Pedro Roberto Almeida, orient.
II. Título

CDU: 631.43

ISMAR LIMA DE FARIAS

**COMPORTAMENTO MECÂNICO E HÍDRICO DE UM ARGISSOLO
AMARELO DE TABULEIROS COSTEIROS CULTIVADO COM CANA-DE-
AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agroecossistemas, área de concentração Produção em Agroecossistemas, para obtenção do título de “Mestre” em Ciências.

APROVADA em 29 de fevereiro de 2011.

Profa. Dra. Maria Isidória Silva Gonzaga

Pesquisador Dr. Edson Patto Pacheco

Prof. Dr. Pedro Roberto Almeida Viégas

UFS

(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO

SERGIPE – BRASIL

DEDICO,

Aos meus pais Geraldo Alves de Farias e Maria Ivani Lima de Farias, que sempre acreditaram, me incentivaram e investiram na minha formação moral, intelectual e profissional, com seus exemplos de superação e história de vida.

A minha noiva Shaslene Santos Oliveira pela paciência, apoio e incentivos importantes em muitos momentos deste trabalho.

As minhas irmãs Maria Islene Lima de Farias e Islaine Lima de Farias por acreditarem e pelo apoio nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder saúde, disposição e lucidez.

A Universidade Federal de Sergipe, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, pela oportunidade e pelos ensinamentos.

A Fundação de Apoio a Pesquisa e Inovação Tecnológica – FAPITEC, pela bolsa concedida.

A Embrapa Tabuleiros Costeiros, pelo uso das estruturas e equipamentos necessários ao desenvolvimento desse trabalho de pesquisa.

Ao Professor Dr. Pedro Roberto Almeida Viégas, pelo apoio, ensinamentos, amizade e por ter aceitado me orientar em mais uma etapa da minha vida profissional.

Ao pesquisador Dr. Edson Patto Pacheco, pela carta de recomendação no momento da prova de seleção, co-orientação, ensinamentos, paciência, atenção, incentivos e oportunidades em mais um trabalho com enriquecimento profissional e pessoal. Meu muito obrigado.

Ao Pesquisador Antônio Carlos, pela carta de recomendação necessária para seleção do mestrado.

A Usina Coruripe, pela disponibilização de áreas cultivadas com cana-de-açúcar, bem como, todo apoio logístico para coleta de solo essencial para elaboração deste trabalho.

Aos Professores Dr. Alceu Pedrotti e Dr^a Maria Aparecida Moreira, pela participação e sugestões na ocasião do exame de qualificação.

Ao Pesquisador Dr. José Henrique de Albuquerque Rangel pela contribuição com o “Abstract”.

A professora Dr^a Maria Isidória Silva Gonzaga e ao Pesquisador Dr. Edson Patto Pacheco pelas contribuições prestadas como membros da banca examinadora da defesa de dissertação.

Aos bolsistas Jorge Luiz e Igor Abreu, pela colaboração e amizade durante a implantação e análises de laboratório.

Aos funcionários Roberto Alves e Ítalo Cliff do laboratório de Física do Solo da Embrapa Tabuleiros Costeiros pelo apoio e convívio.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da UFS-SE, pelo convívio e amizade.

Aos professores e funcionários do programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da UFS, pelos ensinamentos passados com dedicação e convívio com os alunos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram da realização de mais esse sonho realizado em minha vida profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	2
2.1 - Solos de Tabuleiros	2
2.2 – Atributos Mecânicos e Hídricos do solo.....	4
2.2.1 - Compactação do solo	5
2.2.2 - Densidade do solo	6
2.2.3 - Porosidade do solo	7
2.2.4 - Resistência Mecânica do Solo à Penetração	7
2.2.5 - Intervalo Hídrico Ótimo.....	8
2.3 – Descompactação do solo	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1 – Localização da Área de Estudo, Coleta de Solo e Caracterização Física e Química do Solo.....	10
3.2 - Análises dos Parâmetros Mecânicos e Hídricos.....	11
3.2.1 - Resistência do Solo à Penetração em Laboratório	11
3.2.2 - Curva Característica de Retenção de Água no Solo.....	12
3.2.3 - Densidade do Solo e Porosidade	13
3.2.4 - Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	13
3.3 - Análise dos dados.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1 – Comportamento mecânico e hídrico de um Argissolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas cultivado com cana-de-açúcar durante 14 anos.....	15
4.1.1 - Horizonte A ou Ap (0 a 0,20 m)	15
4.1.2 - Horizonte AB (0,20 a 0,40 m).....	17
4.1.3 - Horizonte Bt (0,40 a 0,60 m)	27
5. CONCLUSÕES	35
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

RESUMO

FARIAS, Ismar Lima de. **Comportamento mecânico e hídrico de um argissolo amarelo de tabuleiros costeiros cultivado com cana-de-açúcar**. Sergipe: UFS, 2012. 41p. (Dissertação – Mestrado em Agroecossistemas) *

O ecossistema de Tabuleiros Costeiros é de grande importância para a região Nordeste do país e é ocupado, principalmente, pelo cultivo da cana-de-açúcar. Esse ecossistema possui solos com horizontes coesos de origem pedogenética, apresentando adensamento que pode ser potencializado pelo uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas com umidade do solo inadequada. O desenvolvimento e aprofundamento radicular são prejudicados pelo adensamento, que diminui a capacidade de infiltração e a disponibilidade de água no perfil do solo, que associado aos períodos de estiagem resulta em queda na produtividade e longevidade das lavouras. Com isso, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento mecânico e hídrico de um Argissolo Amarelo de tabuleiros costeiros cultivado com cana-de-açúcar no estado de Alagoas. Para os ensaios de laboratório foram utilizados volumes de solo retirados nas profundidades de 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m, representando os horizontes Ap, AB e Bt de áreas de Argissolo Amarelo da Fazenda Progresso de propriedade da Usina Coruripe. Os tratamentos foram compostos por diferentes densidades do solo obtidas por meio de corpos de prova contidos dentro de anéis volumétricos, a partir de volumes de solo com estrutura não preservada. Os corpos de prova foram submetidos a ensaio de resistência à penetração em laboratório, com umidade referente às tensões utilizadas para construção da curva característica de retenção de água no solo, utilizadas pelo Laboratório de Física do Solo da Embrapa Tabuleiros Costeiros. O horizonte Ap não apresenta restrições ao desenvolvimento radicular, visto que a resistência a penetração em laboratório (RPL) não atingiu o valor considerado limitante. A D_s crítica para os horizontes AB e Bt com solo desestruturado foram 1,844 e 1,628 Mg m^{-3} , respectivamente. No solo com estrutura preservada observou-se D_s crítica de 1,617 e 1,619 para os mesmos horizontes. Contudo, a D_s em que começa a restrição ao desenvolvimento radicular pela $\theta_{rp} \geq 2000 \text{ kPa}$ foi 1,609 Mg m^{-3} com solo desestruturado e 1,494 Mg m^{-3} para o solo com estrutura preservada na profundidade de 0,20 a 0,40 m; na profundidade de 0,40 a 0,60 m essa D_s foi 1,453 e 1,273 Mg m^{-3} para o solo desestruturado e com estrutura preservada, respectivamente. A desestruturação mostrou-se benéfica ao comportamento mecânico e hídrico do solo para os horizontes AB e Bt do Argissolo Amarelo, ainda que continue com a mesma densidade, sugerindo mais estudos, principalmente em campo, que indiquem o manejo mais adequado para o desenvolvimento das culturas nesse solo.

Palavras chave: Densidade do solo, resistência à penetração, horizonte coeso, intervalo hídrico ótimo.

Comitê Orientador: Pedro Roberto Almeida Viégas – UFS (Orientador), Edson Patto Pacheco – EMBRAPA e Maria Isidória Silva Gonzaga – UFS

ABSTRACT

FARIAS, Ismar Lima de. **Mechanical and hydraulic behavior of a yellow argisil of the coastal tableland cultivated with sugar cane.** Sergipe: UFS, 2012. 41p. (Dissertation – Master Program in Agroecosystems)

The Coastal Tableland ecosystem is of great importance for the Brazilian Northeast region being mainly cultivated with the sugar cane crop. This ecosystem has soils with cohesive layer of geogenic origin presenting a dense layer that can become denser by an intensive use of agricultural machines and implements under insufficient soil moisture. The development and deepening of roots are restricted by this dense layer that reduce the water infiltration and availability in the soil profile, that associated to dry season periods has as a result the decrease of crops productivity and longevity. Therefore, the present work aimed to study the mechanical and hydraulic behavior of a Yellow Ultisol of the Alagoas coastal tablelands cultivated with sugar cane. Soil volumes were taken between 0,0 – 0,20m; 0.20 – 0.40m and 0.40 – 60m, representing respectively the Ap, AB and Bt horizons of a Yellow Ultisol of the Progresso Farm belonging to Coruripe Sugar Mill, and used in the laboratories trials. Treatments were composed by different soil densities, obtained by “test bodies” inside volumetric rings from soil volumes with preserved structure. The “bodies test” were submitted to laboratory resistance and penetration essays, with moisture referred to the tensions used in the construction of the characteristic curves of soil moisture retention used by the Embrapa Coastal Tablelands Soil Physic Laboratory. The Ap horizon does not present restriction to root development in view the laboratory penetration resistance (LPR) did not reach the limiting considered value. The critical D_s of AB and Bt horizons under disturbed soil were respectively 1.844 Mg m^{-3} and 1.628 Mg m^{-3} . In undisturbed soil it was observed a critical D_s of respectively 1.617 Mg m^{-3} and 1.619 Mg m^{-3} for the same horizons. However, the D_s where root development by $\theta_{rp} \geq 2000 \text{ kPa}$ restriction began, was 1.609 Mg m^{-3} for disturbed soil and 1.494 Mg m^{-3} for undisturbed soil in the 0.20 m – 0.40 m layer; in the 0.40 – 0.60 m layer the D_s was 1.453 Mg m^{-3} and 1.273 Mg m^{-3} respectively for undisturbed and disturbed soil. Soil disturbance showed to be benefic on the mechanic and hydraulic behavior of soil for the AB and Bt horizons of the Yellow Ultisol even keeping the same density, suggesting the necessity of new studies, mainly in field, to point out the soil most adequate management for crop progress.

Keywords: Soil density, penetration resistance, compact horizons, limiting water range.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande potencial na utilização de energias alternativas e renováveis que futuramente possam substituir o petróleo, destacando-se a utilização da cana-de-açúcar para produção do álcool. As áreas produtoras próximas ao litoral facilitam o escoamento da produção para exportação e tornam o país mais competitivo no mercado internacional. A região Nordeste é tradicional produtora de cana-de-açúcar, porém não consegue acompanhar a produção do estado de São Paulo, que tem melhores solos, clima mais regular e fortes investimentos em pesquisa, obtendo maiores produtividades que os estados nordestinos mais produtores. Segundo o IBGE (2011), a safra produzida no Brasil em 2010 ultrapassou 717 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, sendo 68,7 milhões de toneladas produzidas no Nordeste e 24,3 no estado de Alagoas. A área plantada no Nordeste corresponde a 13% do total brasileiro.

O cultivo da cana-de-açúcar ocupa, principalmente, esse ecossistema que possui solos com horizontes coesos de origem pedogenética agravados pelo uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas, facilitado pela topografia plana a suavemente ondulada, pouco afloramento de rochas e textura média. Contudo, esse horizonte coeso, segundo Jacomine (2001), apresenta-se frequentemente adensado, muito duro ou extremamente duro quando seco e normalmente friável quando úmido.

O desenvolvimento e aprofundamento radicular ficam prejudicados pelo adensamento natural, que diminui infiltração e armazenamento de água no perfil do solo e a porosidade de aeração, essencial ao bom desenvolvimento das raízes para a total expressão produtiva da cultura.

O uso intenso da mecanização agrícola em solos com umidade inadequada nas áreas produtoras de cana-de-açúcar tem agravado o problema com compactações adicionais ao solo, e conseqüentemente, diminui a qualidade física do mesmo. Com esse aumento na degradação física do solo associado a períodos de estiagem, ocorrem quedas na produtividade e longevidade das lavouras dessa região.

Normalmente, o preparo do solo para implantação de culturas perenes, semi-perenes e anuais é realizado com arado de aiveca ou de disco e grades pesadas que revolvem o solo de maneira superficial e intensa. No caso dos solos dos tabuleiros costeiros, essa prática pode transportar para a superfície material do horizonte coeso

subjacente, com características físico-químicas indesejáveis para o desenvolvimento das plantas (REZENDE, 2000). Uma alternativa seria o uso do manejo com revolvimento mínimo e o uso de equipamentos como escarificadores e subsoladores regulados para que não invertam as camadas do solo, mas quebrem as camadas adensadas, principalmente em maiores profundidades ou onde ocorram as camadas com coesão maior.

Os tabuleiros costeiros são de grande importância socioeconômica para o Nordeste brasileiro, devido sua considerável extensão geográfica e utilização como base de sustentação da produção agrícola nessa região, com destaque para a cana-de-açúcar (LIMA NETO et al., 2009). Por isso, deve-se direcionar a atenção para a necessidade de conservação e manejo adequados, que garanta o uso dessas áreas por mais tempo e diminua o impacto negativo provocado a esse ecossistema.

O presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico e hídrico de um Argissolo Amarelo de tabuleiros costeiros cultivado com cana-de-açúcar, no Estado de Alagoas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - Solos de Tabuleiros

Os solos de tabuleiros estão distribuídos em quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o Estado do Amapá até o Rio de Janeiro, com extensão até o vale do rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo. Além desta área, eles ocupam grande extensão no médio e baixo vale do rio Amazonas e afluentes, bem como nos Estados do Maranhão e Piauí. Nos últimos anos, os referidos solos foram constatados, também, na zona semi-árida de Pernambuco e Bahia, com extensão para o sul e para a região do Médio Jequitinhonha, em Minas Gerais. O termo “Tabuleiros Costeiros” é usado para designar uma forma de superfície tabular, dissecada por vales profundos e encostas com forte declividade. Algumas áreas possuem relevo suavemente ondulado, enquanto outras, onde houve forte dissecamento, a topografia chega a ser ondulada e até chega a ser fortemente ondulada, com elevações de topos planos (chãs) (JACOMINE, 2001).

Os solos dos tabuleiros costeiros ocupam, na região Nordeste, uma área estimada de 10.000.000 ha, o que corresponde a aproximadamente 16 % da área total da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará (Souza et al.,

2001). 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, o uso atual dominante é a cultura da cana-de-açúcar (Lima Neto et al., 2009), no qual a maioria dos solos é favorecida tanto pela topografia como pela textura média e profundidade adequada. No entanto, é comum encontrar nos solos deste ambiente o horizonte coeso, o qual compreende um horizonte pedogenético, adensado, muito duro ou extremamente duro quando seco e normalmente friável quando úmido (JACOMINE et al., 2001).

Os solos predominantes nos Tabuleiros Costeiros, Argissolos e Latossolos Amarelos, são pobres em matéria orgânica e nutrientes, tem baixa CTC, baixa saturação por bases, e apresentam aumento de acidez em profundidade. Embora, os solos sejam considerados profundos, a presença de camadas coesas reduz sua profundidade efetiva (SOUZA, 1996).

Entre os Latossolos e os Argissolos existem diferenças marcantes quanto ao teor de argila, quantidade de macroporos e de microporos e capacidade de retenção de água nas diferentes camadas do perfil que, por sua vez, influenciam no desenvolvimento radicular (POTAFÓS, 2005).

Nos Argissolos podem ser encontrados horizontes, entre 0,20 a 0,30 m de profundidade, que apresentam alta resistência mecânica à penetração, mesmo com teor de umidade próximo ao da capacidade de campo. Essa característica pedogenética, associada à redução da porosidade pelo adensamento natural, influencia direta e significativamente na diminuição da capacidade de infiltração e armazenamento de água, além de agir como impedimento físico ao desenvolvimento das raízes. Esses aspectos, associados com a irregularidade das chuvas e períodos de estiagem, resultam na queda da longevidade e produtividade das lavouras de cana-de-açúcar (PACHECO, 2010).

A camada coesa dos solos de tabuleiros costeiros é definida por Araujo Filho et al. (1999) como uma zona do perfil com densidade maior que outras camadas, e ocorre geralmente entre 0,20 e 0,80 m de profundidade, tem consistência dura e extremamente dura, quando seca, e friável quando úmida; os autores salientam que a umidade desses solos é um fator muito importante.

No caso particular dos solos de tabuleiros costeiros, o termo coeso com significado de tenaz, tem sido usado inclusive para destacar compacidade natural

(adensamento) de horizontes subsuperficiais associada a diferentes graus de coesão. Nos Latossolos e Argissolos Amarelos sob floresta primária, esses horizontes situam-se a profundidades variáveis, normalmente coincidindo com os horizontes AB e/ou BA. Entretanto, em solos cultivados podem aparecer próximo à superfície, após os primeiros 0,10 a 0,20 m, em decorrência da erosão (REZENDE et al., 2002).

A densidade média de camadas coesas situa-se entre 1,5 a 1,8 Mg m⁻³, enquanto nos horizontes superficiais, em condição natural, varia de 1,2 a 1,4 Mg m⁻³. Entretanto, especialmente na zona canavieira, a densidade média dos horizontes superficiais é muito afetada pelo manejo do solo, elevando-se para uma faixa de 1,3 a 1,8 Mg m⁻³. Nessas condições, os horizontes superficiais tornam-se compactados. Além da compactação (causada pelo uso e manejo) e da coesão (de natureza pedogenética), alguns solos, como os Argissolos Amarelos, Argissolos Acinzentados e Espodossolos, podem apresentar horizontes superficiais cimentados, do tipo fragipã (cimentação fraca) ou duripã (cimentação forte). Estes horizontes criam impedimentos físicos muito mais intensos que a coesão e, normalmente, restringem a drenagem interna dos solos (ARAÚJO FILHO, 2001).

O desenvolvimento do sistema radicular tem influência direta sobre algumas características da planta, tais como: resistência à seca, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância ao ataque de pragas do solo, capacidade de germinação e/ou brotação, porte (ereto ou decumbente), tolerância à movimentação de máquinas etc. (POTAFOS, 2005). Dessa forma, o impedimento do aprofundamento das raízes da cana-de-açúcar, causado pelo adensamento natural dos solos de tabuleiros costeiros e agravados pelo uso intensivo de máquinas agrícolas pesadas no plantio, manejo e colheita da cultura, pode resultar em menor rendimento produtivo e menor longevidade dessa lavoura (PACHECO, 2010).

2.2 – Atributos Mecânicos e Hídricos do solo

As mudanças nos atributos físicos do solo provocadas pelos diferentes sistemas de manejo e seus reflexos na estrutura do solo podem ser estudadas em associação com as mudanças na organização interna da matriz do solo, referente ao rearranjo das partículas e unidades estruturais, porosidade e estrutura do solo após o cultivo. Isto é importante para o melhor entendimento das mudanças nas propriedades físicas que ocorrem em decorrência do uso agrícola (SILVA E CABEDA, 2006).

De acordo com Silva et al. (2010), a qualidade do solo é uma característica individual de cada solo e pode ser medida através de suas propriedades e características ou através de medidas observadas indiretamente nos seus atributos, que servem de indicadores de qualidade. A qualidade física é um dos instrumentos que indicam se há degradação física do solo e possui vários indicadores, como: compactação, infiltração de água no perfil do solo, resistência a penetração, pressão de pré-compactação etc. Para quantificar a qualidade do solo é preciso medir esses atributos que servem de indicadores de qualidade.

O cultivo intensivo dos solos e a utilização de máquinas e equipamentos pesados na cultura da cana-de-açúcar levam à degradação das condições físicas e, principalmente ao incremento da compactação do solo (SOUZA et al., 2006). Portanto, a avaliação dos efeitos dos diferentes sistemas de manejo com a cana-de-açúcar nas propriedades físicas, químicas e micromorfológicas do solo torna-se necessária para minimizar os efeitos desta cultura nos solos de tabuleiros costeiros (SILVA, 2003).

2.2.1 - Compactação do solo

A compactação é um dos processos responsáveis pela degradação física do solo que pode ocasionar a perda da sustentabilidade da produção agrícola. Assim, é fundamental dispor de estratégias instrumentais para quantificar as propriedades físicas que são influenciadas pela compactação e utilizadas para avaliar a qualidade do solo (FIGUEIREDO et al., 2011).

Torres et al. (1993) define compactação como o aumento da densidade do solo provocada pelo rearranjo das partículas primárias (areia, silte e argila) e dos agregados, causado, principalmente, pelas operações de cultivo ou pela pressão de veículos e implementos de preparo do solo. Segundo Gupta et al. (1989), o termo compactação refere-se à compressão do solo não saturado que resulta no aumento da densidade em consequência da redução do seu volume, devido à expulsão de ar dos poros do solo. Figueiredo et al. (2000) definem que a compactação é uma consequência direta do manejo inadequado e a umidade é o fator que controla a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo.

A compactação é causada, em muitos casos, pelo uso intensivo de máquinas pesadas com o solo em condições de umidade inadequada. Este fato muitas vezes acontece na tentativa de se cumprir um cronograma de atividades agrícolas sem

observar as condições ideais de umidade e a capacidade do solo de suportar as pressões externas (SILVA, 2003). Segundo Silva et al. (2005), a topografia plana dos solos de tabuleiros costeiros na região Nordeste do Brasil favorecem o uso de mecanização nas áreas com cultivo de cana-de-açúcar. Isso pode agravar o problema de adensamento que esses solos possuem através do uso constante e intensivo de máquinas agrícolas.

As modificações que ocorrem na estrutura do solo, promovidas pela compactação são evidenciadas por alterações nos valores de vários atributos, como densidade do solo, resistência mecânica à penetração, porosidade total, porosidade de aeração, armazenagem e disponibilidade de água às plantas, dinâmica de água na superfície e no seu perfil, assim como na consistência e na máxima compactabilidade do solo (KLEIN et al., 1998).

2.2.2 - Densidade do solo

A densidade do solo em ambientes não cultivados é uma propriedade física que depende dos fatores e processos pedogenéticos. O uso pode compactar o solo, expresso pelo aumento da densidade devido ao pisoteio animal, tráfego de máquinas e implementos agrícolas, cultivo intensivo e sistema de manejo inadequado (HAMZA & ANDERSON, 2005).

A densidade do solo pode ser tomada como crítica a partir do momento em que a resistência deste à penetração atinge o valor de 2000 kPa (SILVA et al., 2008), isto é, em que o intervalo hídrico ótimo é igual a zero (KLEIN & CAMADA, 2007).

Quanto menor o valor de densidade crítica do solo (D_{sc}), aumenta-se a possibilidade de que a densidade do solo atinja valores maiores que esse, sugerindo maior frequência de condições físicas impeditivas às plantas (PETEAN et al., 2010).

A habilidade das raízes penetrarem no perfil diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam. Em solos com menor umidade, a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, com conseqüente redução da força na coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo (HAMZA & ANDERSON, 2005). Michelin (2005) define alguns níveis de densidade do solo estabelecidos como críticos para indicar a ocorrência de compactação, levando em consideração a faixa do teor de argila. Neste caso, para teores de 0-200, 200-300, 300-400, 400-500 e 500-600 g kg⁻¹ a densidade crítica deverá ser de 1,60, 1,55, 1,50, 1,45 e 1,40 g cm⁻³, respectivamente.

2.2.3 - Porosidade do solo

Segundo Kiehl (1979) um solo ideal para a produção agrícola deve apresentar $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total, sendo $1/3$ macroporos e $2/3$ microporos. Ainda de acordo com o autor, a maioria das plantas desenvolve satisfatoriamente seu sistema radicular quando o volume de macroporos está acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, ou seja, mesmo com a macroporosidade um pouco reduzida ainda é satisfatória ao crescimento radicular.

Uma vez que a porosidade total é formada pelo conjunto de macro e microporos, quaisquer alterações em suas estruturas afetam a porosidade, como um todo (CARVALHO et al., 2011). Tormena et al. (1998) confirmam que os macroporos são a classe de poros menos estáveis e sofrem colapso quando submetidos aos estresses aplicados pelos sistemas de preparo e tráfego, tornando-se facilmente instáveis, mediante compressibilidade, afetando a porosidade total.

Assim, um dos principais indicadores da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma pela união de agregados de maior diâmetro por forças eletrostáticas, pela atividade microbiana e crescimento de raízes. A estrutura do solo é modificada em função do manejo realizado, sendo que os macroagregados são destruídos e o solo apresenta uma estrutura maciça (TAVARES FILHO et al., 1999). Essa estrutura maciça pode impedir o crescimento de raízes e diminuir o volume de solo explorado pelo sistema radicular (OLIVEIRA et al., 2010).

2.2.4 - Resistência Mecânica do Solo à Penetração

A resistência do solo à penetração é uma medida do impedimento mecânico que o solo oferece às raízes, sendo um dos mais comumente citados fatores físicos que afetam seu crescimento (BENGOUGH & MULLINS, 1990). Para Silveira et al. (2010) é considerada a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade que este oferece à penetração das raízes. Por isso, sua quantificação representa um importante indicativo da dinâmica de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. O impedimento mecânico ao crescimento radicular é fortemente correlacionado com a resistência mecânica do solo medida com penetrômetros (BENGOUGH & MULLINS, 1990).

A avaliação da resistência do solo à penetração com o uso de penetrômetros ou penetrógrafos é uma técnica simples e de fácil utilização, desde que sejam tomados cuidados na interpretação dos resultados, em virtude da influência de fatores, como conteúdo de água, densidade e textura do solo, nos valores de resistência. Com esses cuidados presentes, os resultados podem ser úteis na tomada de decisão quanto à compactação em níveis prejudiciais às plantas (REICHERT et al., 2010). Porém, a estimativa do comportamento mecânico do solo a partir de propriedades ou atributos de fácil obtenção apresenta dificuldades, visto que, dependem de fatores relacionados com as propriedades ou atributos de cada solo (SUZUKI et al., 2008).

A correção dos dados de resistência do solo à penetração no mesmo conteúdo de água pode reduzir problemas de interpretação de resultados obtidos em diversas condições de campo e sistemas de manejo (BUSSCHER et al., 1997). Nesse sentido, pesquisadores têm procurado desenvolver funções de pedotransferência que traduzam essa relação. Assim, modelos matemáticos que representam a dependência da resistência do solo à penetração e seu conteúdo de água ajudam a entender a relação entre essas duas variáveis, favorecendo o entendimento das propriedades mecânicas do solo que governam a compactação. Além disso, representam uma importante ferramenta para a padronização da resistência do solo à penetração quando obtida em diferentes condições de água no solo, o que contribui para a identificação das condições físicas do solo limitantes à produtividade das culturas (ALMEIDA et al., 2008).

2.2.5 - Intervalo Hídrico Ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) define uma região delimitada por limite superior e inferior de conteúdos de água, na qual são mínimas as limitações para o crescimento das plantas, associadas com o potencial matricial ou disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração das raízes (SILVA et al., 2010). É um indicativo da qualidade estrutural do solo (KAISER et al., 2009) e é considerado um moderno indicador da qualidade física do solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas (PETEAN et al., 2010).

O IHO integra três fatores diretamente associados com o crescimento das plantas: aeração, resistência do solo à penetração e água disponível às plantas. Devido a essa característica, o IHO é considerado um indicador multifatorial da qualidade física do solo (SILVA et al., 2006; TORMENA et al., 2007). No entanto, Leão et al. (2005)

argumentam que, para a definição dos limites críticos do IHO, é recomendado que se estabeleçam os valores dos limites críticos conforme as condições experimentais e o conhecimento dos processos ou fenômenos envolvidos.

O IHO tem sido utilizado na avaliação da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento de plantas em diferentes solos e sistemas de manejo, bem como aos processos associados à dinâmica do nitrogênio e da matéria orgânica do solo (SILVA et al., 2010). Nesse cenário, o IHO significa grande avanço nos estudos de biofísica do solo, sendo o indicador de qualidade física e estrutural do solo que melhor se correlaciona com o crescimento das plantas (TORMENA et al., 2007; PEREIRA et al., 2010).

A umidade do solo onde a sua resistência à penetração é considerada restritiva é o fator que mais reduz a amplitude do IHO em condições de solos agrícolas (IMHOFF et al., 2001), por apresentar maior variação com a alteração da densidade do solo. À medida que aumenta a densidade do solo, o IHO reduz, pois ocorre aumento acentuado da resistência à penetração com a menor variação da umidade do solo (KAISER et al., 2009). Em Latossolo sob mata nativa, Fontanela (2008) observou que a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi o limite inferior do IHO e, em áreas agrícolas, a resistência a penetração (RP).

2.3 – Descompactação do solo

A subsolagem é uma das operações mecanizadas de elevado custo e demanda energética por área dentre as operações mecanizadas de campo necessárias a cada etapa do processo produtivo, tradicionalmente utilizada pelos agricultores antes do preparo do solo na descompactação de camadas adensadas (SALVADOR et al., 2009). Esta prática aumenta a macroporosidade e reduz a densidade e a resistência do solo à penetração (ROSA et al., 2011), além de aumentar a infiltração de água no perfil do solo e facilitar a penetração do sistema radicular das plantas através das fendas provocadas pela subsolagem.

Segundo Galvão (2002), estudando o comportamento de diferentes sistemas de preparo de um Argissolo na usina Coruripe – AL, a subsolagem proporcionou melhorias na condutividade hidráulica saturada, reduziu a resistência do solo à penetração, a densidade do solo; aumentou a porosidade total a partir dos 0,40 m de profundidade. Além disso, o autor concluiu que o uso de herbicida para destruir a soqueira, somado a

subsolagem foi ainda melhor para a qualidade do solo medida pelos indicadores acima citados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Localização da Área de Estudo, Coleta de Solo e Caracterização Física e Química do Solo

Os volumes de solo, com estrutura não preservada utilizados nos ensaios, foram obtidos em uma área cultivada com cana-de-açúcar, localizada no paralelo 10°02'60" S e meridiano 36°10'31", da Fazenda Progresso, de propriedade da Usina Coruripe – Alagoas. O solo foi extraído nas profundidades de 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e de 0,40 a 0,60 m, representando os horizontes Ap, AB e Bt, respectivamente, do solo classificado como ARGISSOLO Amarelo Distrocoeso (Embrapa, 2006), relevo plano, textura média (leve)/argilosa, formado do sedimento grupo Barreiras, característico da unidade geomorfológica Tabuleiros Costeiros (Jacomini et al., 1975). O clima do local é tropical chuvoso com verão seco segundo Köppen. A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1.400 mm e temperatura média de 24,4°C.

A granulometria do solo foi determinada pelo método do densímetro de Boyoucos (EMBRAPA, 1997). Os teores de areia, silte e argila dos horizontes Ap, AB e Bt do Argissolo estudado estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Constituição granulométrica das amostras deformadas dos horizontes Ap, AB e Bt.

Frações (g Kg ⁻¹)	Tratamentos		
	Ap	AB	Bt
Argila	80	140	240
Silte	57	65	83
S+A	137	205	323
Areia	863	795	677
S+A = silte mais argila			

A tabela 2 é composta pelos teores de nutrientes e matéria orgânica nos horizontes Ap, AB e Bt do Argissolo Amarelo, representando o solo usado neste estudo.

TABELA 2. Atributos químicos do Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar por 14 anos.

HORIZONTES	M.O	pH em	Ca	Mg	H+Al	Al	P	K	Na
	(g.kg ⁻¹)	H ₂ O	(mmol _c .dm ⁻³)			(mg.dm ⁻³)			
Ap	34,60	5,25	27,50	6,67	36,26	1,00	56,57	213,40	37,70
AB	14,34	5,13	18,00	4,17	24,72	0,00	14,58	124,90	17,00
Bt	14,39	5,35	16,50	4,17	37,91	2,00	5,99	95,90	12,80

3.2 - Análises dos Parâmetros Mecânicos e Hídricos

Após seco à sombra e passado em peneira 4 mm, o solo foi utilizado para preencher anéis de PVC com diâmetro de 5,2 cm e altura de 2,0 cm, constituindo os corpos de prova, ou seja, as amostras utilizadas para realização das análises físicas do solo, as quais foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Tabuleiros Costeiros, sediada em Aracaju-SE. Massas de solo seco foram calculadas para preencher os anéis volumétricos, de forma a obter a densidade de campo (1,37 Mg m⁻³) para o horizonte Ap, e cinco níveis de densidade para os horizontes subsuperficiais: 1,4; 1,5; 1,6 ;1,7 e 1,8 Mg m⁻³ para o horizonte AB e 1,3; 1,4; 1,5; 1,6 e 1,7 Mg m⁻³ para o horizonte Bt. Esta estratégia foi utilizada considerando que por se tratar de um horizonte muito arenoso, a resistência a penetração do Ap não é um fator limitante ao desenvolvimento de raízes, sendo que, para a mesma área de estudo, Pacheco (2010) não observou valores de resistência a penetração superiores a 2000 kPa para o horizonte Ap, mesmo com umidade abaixo do ponto de murcha permanente.

3.2.1 - Resistência do Solo à Penetração em Laboratório

As amostras com umidade estabilizada em oito sucções de potenciais matriciais (-1, -4, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa) foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração em laboratório (RPL) utilizando um penetrógrafo de bancada da marca Marconi, equipado com célula de carga contendo haste com cone de 4 mm de diâmetro e ângulo de 45°. A velocidade de penetração constante foi calibrada para 10 mm min⁻¹, tendo cada ensaio a duração de 80 segundos. Para o cálculo da resistência à penetração média, de cada ensaio, foram considerados os dados de força de penetração entre 40 e

80 s, sendo que, o equipamento registra, por meio de software e PC, um dado de força de penetração (kgf) a cada segundo (PACHECO, 2010). Para cada profundidade e densidade foram realizadas três repetições de laboratório, totalizando 264 ensaios de resistência à penetração.

A RPL foi calculada dividindo a força de penetração média em kgf cm^{-2} , obtida através do equipamento, pela área do cone ($0,1275 \text{ cm}^2$) e transformada para kPa multiplicando o resultado da divisão por 98,0665.

3.2.2 - Curva Característica de Retenção de Água no Solo

O método utilizado para obtenção da curva característica de retenção de água do solo foi por dessorção (secamento) de amostras deformadas reconstruídas dentro de anéis volumétricos de forma que apresentem a mesma densidade da condição de campo para o horizonte Ap e cinco níveis de densidade para os horizontes subsuperficiais. Após a saturação por capilaridade durante 24 h, as amostras tiveram a umidade estabilizada em oito sucções de potenciais matriciais: -1, -4, -6, -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa. Para tensões de -1 a -10 kPa foi utilizada mesa de tensão, e câmaras de Richard para tensões de -33 a -1500 kPa (EMBRAPA, 1997). Após a estabilização da umidade para as tensões aplicadas (ocorrido entre 48 e 72 h), as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência à penetração em laboratório, pesadas em balança com precisão de 0,01 g (peso do solo úmido), transferidas para latas de alumínio e secas em estufa a 105°C por 24 horas, para determinação da umidade volumétrica, conforme equações descritas a seguir:

$$U_g = (PSU - PSS) / PSS$$

$$\theta = U_g * D_s$$

Em que:

U_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1});

PSU = massa da amostra úmida (kg);

PSS = massa da amostra seca (kg);

θ = umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}).

Os valores da umidade volumétrica foram ajustados segundo modelo de Van Genuchten, utilizando o programa CURVARET versão 2.16 (Departamento de

Agricultura – ESALQ), e plotados em função das tensões de sucção aplicadas. Para umidade de saturação foi considerada a porosidade total.

3.2.3 - Densidade do Solo e Porosidade

A densidade do solo (D_s) foi calculada dividindo a massa da amostra seca (PSS), em megagramas (Mg), pelo volume total do anel em m^3 . O volume total de poros (VTP), em ($m^3 m^{-3}$), foi calculado pela equação: $VTP = [1 - (D_s/D_p)]$, sendo que, a densidade de partícula era de $2,62 Mg m^{-3}$.

A microporosidade (VMicro) foi determinada por meio da umidade volumétrica da amostra submetida à tensão de sucção de $-6 kPa$. A macroporosidade (VMacro) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.2.4 - Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Para definir o limite superior do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foram obtidos o potencial matricial na capacidade de campo (θ_{cc}) e o valor crítico da porosidade de aeração (θ_{pa}), que foi considerado $0,10 m^3 m^{-3}$, já para o limite inferior foram definidos o potencial matricial limitante no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) e a umidade volumétrica referente à resistência do solo à penetração $\geq 2000 kPa$ (θ_{rp}). O IHO é obtido através da diferença entre o menor valor do potencial matricial (θ) limitante superior e o maior valor do θ limitante inferior.

Para obtenção do gráfico de intervalo hídrico ótimo (IHO), foram determinados os modelos exponenciais (Dias Junior, 2000) de resistência do solo à penetração em função do teor de umidade volumétrica ($RP = 10^{(a + b \cdot \theta)}$), por meio das quais, foram calculados os valores de umidade volumétrica, para qual a resistência do solo a penetração é considerada crítica (SILVA et al., 2010; TORMENA et al., 1998), ou seja, $\geq 2000 kPa$ ($\theta_{rp} = [\ln(2000/a)]/b$), para cada densidade do solo consideradas no estudo.

Onde:

θ_{rp} = resistência do solo à penetração;

2000 = resistência do solo considerada limitante ao desenvolvimento radicular (kPa);

$\ln$ = logaritmo neperiano;

a e b = coeficientes de determinação.

Por meio de modelos de regressão linear, foram ajustadas as curvas de θ_{rp} , θ_{pmp} , θ_{cc} e θ_{pa} em função da densidade do solo. Todos os coeficientes de ajuste das equações de regressão foram obtidos utilizando o programa SAEG 9.1, desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa.

Os Valores de VTP, θ_{cc} e θ_{pmp} foram estimados por meio da curva característica de retenção de água, e os valores de θ_{rp} estimados por meio dos modelos de regressão ajustados para estimativa da resistência do solo à penetração em função da umidade.

3.3 - Análise dos dados

Foram realizadas análises de regressão utilizando o programa estatístico SAEG 9.1, da Universidade Federal de Viçosa (UFV), para obtenção dos parâmetros de ajuste “a” e “b” do modelo matemático de resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) em função da umidade volumétrica (θ), como modelo proposto por Dias Junior (2000): $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$.

A determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi realizada usando os critérios descritos por Wu et al. (2003):

- (a) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) $\Rightarrow$ IHO = $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$;
- (b) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) $\Rightarrow$ IHO = $\theta_{cc} - \theta_{rp}$;
- (c) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) $\Rightarrow$ IHO = $\theta_{pa} - \theta_{pmp}$;
- (d) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) $\Rightarrow$ IHO = $\theta_{pa} - \theta_{rp}$.

Em que θ_{pa} : umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; θ_{cc} : umidade do solo na capacidade de campo (água retida a -10 kPa); θ_{pmp} : umidade do solo no ponto de murcha permanente (água retida na tensão -1500 kPa); θ_{rp} : umidade do solo quando a resistência à penetração é $\geq 2.000 \text{ kPa}$ (obtido por meio da curva de RPL em função da umidade do solo); e IHO: intervalo hídrico ótimo.

Como parâmetro, foram geradas curvas de RPL em função da umidade volumétrica e IHO, para amostras indeformadas extraídas na mesma área de estudo, por meio de banco de dados utilizado por Pacheco (2010).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Comportamento mecânico e hídrico de um Argissolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas cultivado com cana-de-açúcar durante 14 anos

4.1.1 - Horizonte A ou Ap (0 a 0,20 m)

A Figura 1 representa as curvas de RPL em função da umidade volumétrica para a profundidade de 0 a 0,20 m do Argissolo.

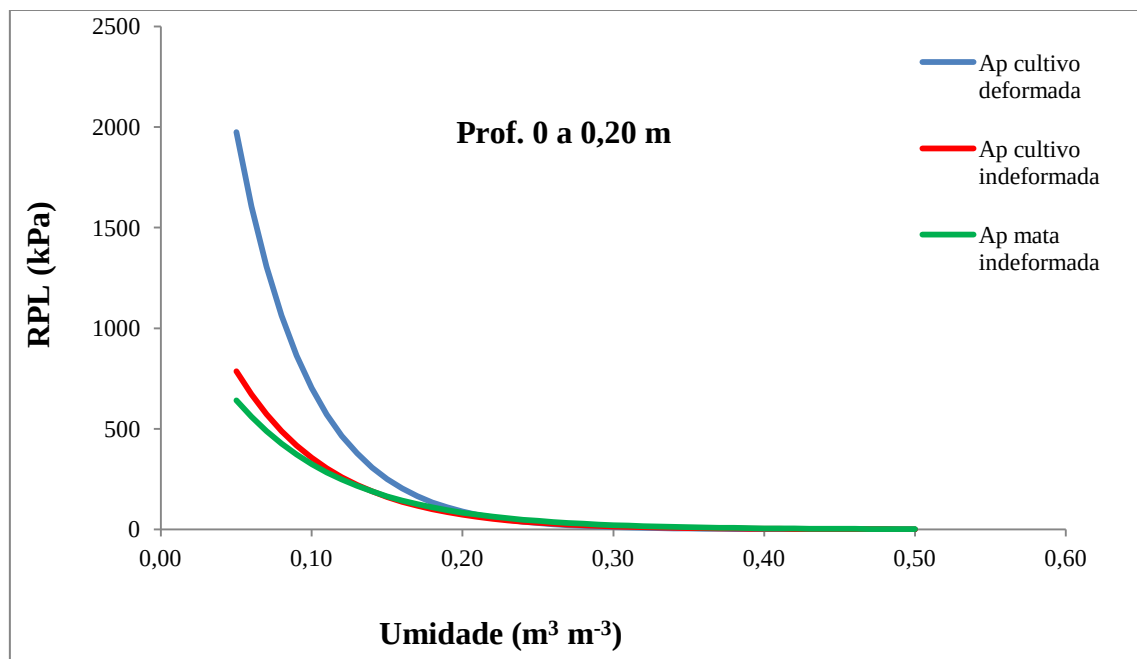


FIGURA 1. Curva de resistência à penetração em laboratório em função da umidade volumétrica do solo, na profundidade de 0 a 0,20 m, para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$.

A RPL apresentou variação em função da quantidade de água retida pelo solo, sendo que, quanto menor a umidade do solo maior é a RPL. Segundo Hillel (1980), Dias Junior (1994), Kondo & Dias Junior (1999) e Silva et al. (2002), esse

comportamento acontece porque a água atua de duas formas sobre a resistência do solo ao cisalhamento: diminuindo a coesão entre as partículas sólidas e formando filmes entre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre as mesmas. O resultando disso é um acréscimo exponencial da resistência do solo à penetração com a diminuição da umidade.

As amostras com estrutura deformada apresentaram maior RPL em umidades mais baixas em comparação às amostras com estrutura preservada, retiradas tanto na mata como na área cultivada. No entanto, a RPL da área cultivada e da mata com estrutura preservada apresentaram comportamento semelhante, apesar de terem uso distinto (Figura 1). Esse comportamento pode ser explicado pelo maior teor de matéria orgânica nesse horizonte do solo da mata, que promove agregação entre as partículas minerais.

As amostras com estrutura deformada apresentaram coeficientes lineares e angulares maiores que os das amostras com estrutura preservada, indicando maior amplitude de variação da RPL em função da umidade volumétrica do solo. A pequena diferença entre os coeficientes “a” e “b” das amostras indeformadas do horizonte Ap do solo da área cultivada e da mata pode ser atribuída ao aumento da densidade do solo (Ds) observada na área cultivada. (Tabela 3).

TABELA 3. Densidade do solo (Ds), coeficiente linear “a” e coeficiente angular “b” das equações de regressão para RPL em função da umidade volumétrica para a profundidade de 0 a 0,20 m (horizonte Ap).

Tratamentos	RPL = $10^{(a + b.u)}$			
	Ds(Mg m ⁻³)	a	b	R ²
Ap cultivado deformada	1,37	3,7444	-8,9769	0,9490
Ap cultivado indeformada	1,37*	3,2399	-6,8879	0,8489
Ap mata indeformada	1,21*	3,1024	-5,9064	0,7890

* Fonte: Pacheco (2010)

Na Figura 2 observa-se a umidade volumétrica dos tratamentos em função do potencial mátrico do solo, que parece estar relacionado com a densidade do solo, pois a mata além de apresentar densidade menor, apresenta maior quantidade de M.O e de macroporos, conforme descrito por Pacheco (2010).

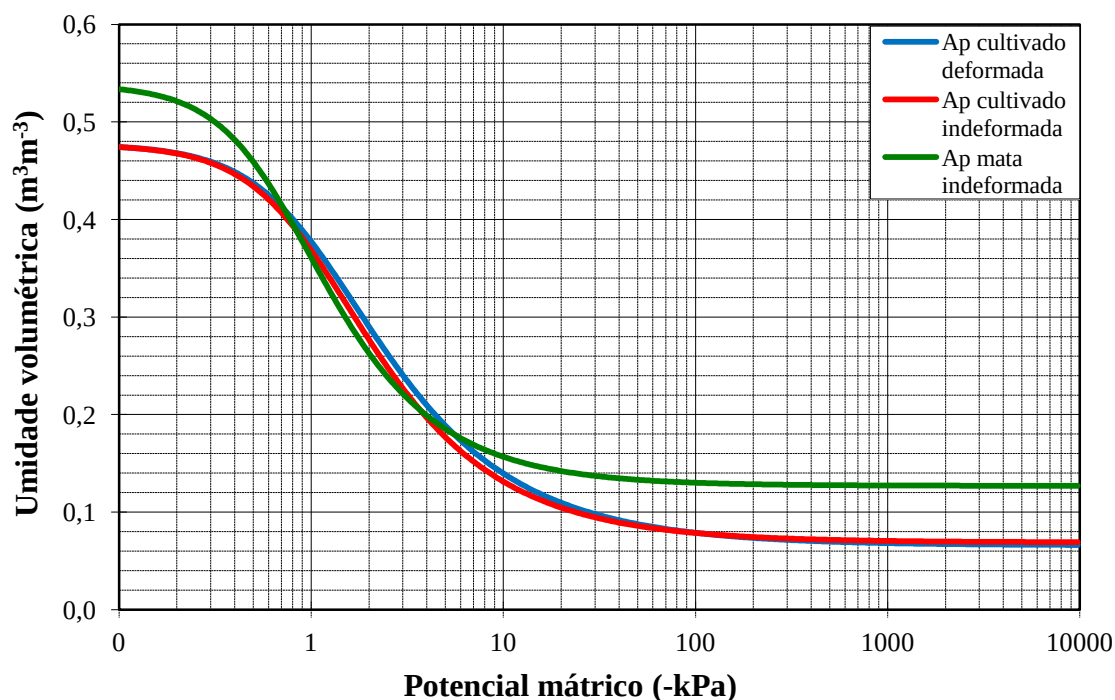


FIGURA 2. Curvas características de retenção de água do solo na profundidade de 0 a 0,20 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$.

Por se tratar de um horizonte superficial e arenoso, o horizonte Ap do argissolo estudado não apresenta maiores limitações para o desenvolvimento das culturas como alta coesão e densidade, portanto não foi objeto principal deste estudo, sendo que, maiores atenções foram direcionadas para os horizontes subsuperficiais AB e Bt.

4.1.2 - Horizonte AB (0,20 a 0,40 m)

As curvas de resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) em função da umidade volumétrica, para amostras provenientes de solo com estrutura não preservada nas densidades 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8 $Mg\ m^{-3}$ e, amostras de solo com estrutura preservada de uma área cultivada e de uma área de mata para a profundidade 0,20 a 0,40 m (horizonte AB) do Argissolo Amarelo, estão apresentadas na Figura 3.

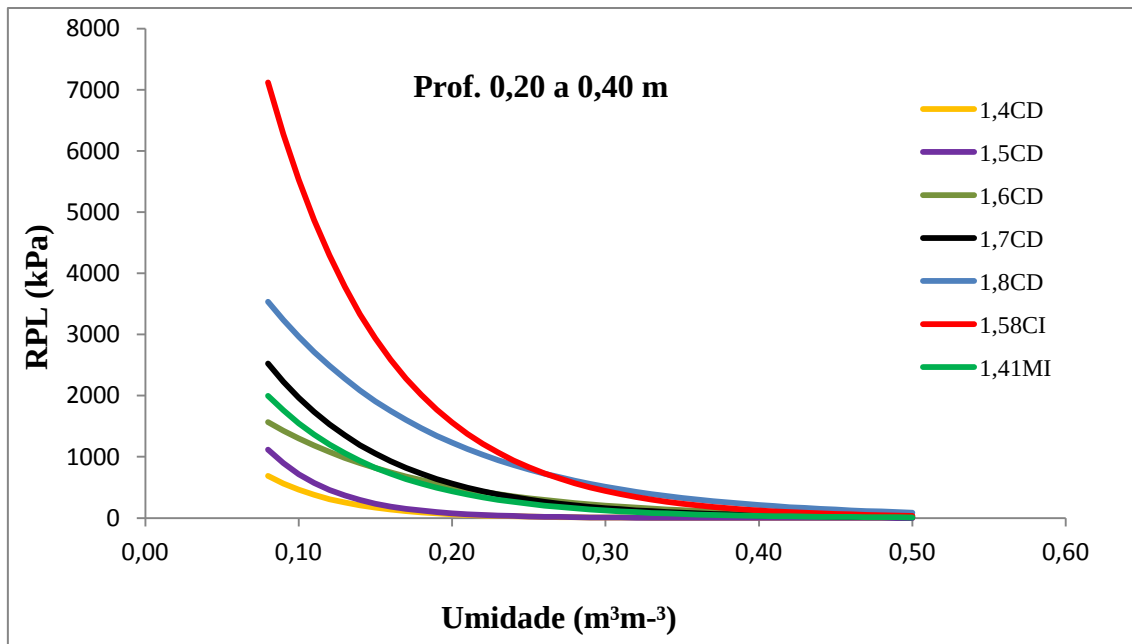


FIGURA 3. Curvas de resistência à penetração em laboratório em função da umidade volumétrica do solo na profundidade de 0,20 a 0,40 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$. Onde: 1,4CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,8CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,58CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,41MI = Amostras indeformadas da área de mata.

A RPL do horizonte AB para as cinco densidades do Argissolo com amostras reconstituídas apresentou variação crescente de acordo com o aumento da densidade (Figura 3). As amostras indeformadas da área cultivada apresentaram maior resistência à penetração em comparação com os outros tratamentos para umidades mais baixas. Apesar das amostras do tratamento 1,58CI apresentarem densidade do solo em média de $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$, as mesmas apresentaram RPL maior que as amostras reconstituídas do tratamento 1,8CD, com densidade de $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 3 e Tabela 4), mostrando que a desestruturação do solo proporcionou menor RPL, mesmo em densidades mais altas.

TABELA 4. Densidade do solo (Ds), resistência à penetração em laboratório com umidade no ponto de murcha permanente (RPLpmp), volume total de poros (VTP), volume de macroporos (VMacro), volume de microporos (VMicro), umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{pa}), umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade quando a resistência do solo a penetração é $\geq 2000 \text{ kPa}$ (θ_{rp}), água disponível (AD) e intervalo hídrico ótimo (IHO), para os sete tratamentos na profundidade de 0,20 a 0,40 m.

Tratamentos		1,4CD	1,5CD	1,6CD	1,7CD	1,8CD	1,58CI*	1,41MI*
RPLpmp	(kPa)	1822	1705	2998	5342	5521	5630	2985
VTP	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,466	0,427	0,389	0,351	0,313	0,397	0,462
VMacro	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,331	0,281	0,239	0,155	0,089	0,199	0,297
VMicro	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,135	0,147	0,150	0,196	0,224	0,198	0,165
θ_{pa}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,365	0,334	0,302	0,271	0,240	0,286	0,347
θ_{cc}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,122	0,127	0,132	0,137	0,142	0,191	0,150
θ_{pmp}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,065	0,071	0,078	0,084	0,091	0,130	0,100
θ_{rp}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,027	0,054	0,054	0,099	0,145	0,180	0,080
AD	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,057	0,056	0,054	0,053	0,051	0,061	0,050
IHO	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,057	0,056	0,054	0,038	0,000	0,011	0,050

1,4CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,8CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,58CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,41MI = Amostras indeformadas da área de mata.

*Fonte: Pacheco (2010)

Esses resultados convergem com os encontrados por Galvão (2002), que trabalhando com subsolagem em Argissolo Amarelo da Usina Coruripe, concluiu que a resistência à penetração máxima foi encontrada em profundidades maiores e com valores menores para os tratamentos com subsolagem, além disso, esse autor concluiu que o sulcamento em profundidade tende a diminuir a resistência do solo e promover o aumento da camada de menor compactidade.

Comparando as amostras deformadas observa-se que houve um aumento da RPL com o aumento da densidade do solo. Corroborando com Lebert & Horn (1991) que afirmam que a RP aumenta com a densidade devido ao maior número de contato entre as partículas do solo. O solo da área de mata, em umidades mais baixas (solo seco), apresentou valores de RPL_{pmp} entre os encontrados pelos tratamentos com densidade do solo de 1,6 e 1,7 Mg m⁻³, mesmo apresentando densidade de 1,41 Mg m⁻³ (Tabela 4). Isso pode ser explicado pela menor estruturação das amostras de solo deformado, deixando as partículas mais “soltas”. Com o solo seco, o tratamento 1,58CI também apresentou RPL_{pmp} maior que os tratamentos com amostras deformadas, apesar de D_s menor que a dos tratamentos 1,6CD, 1,7CD e 1,8CD (Tabela 4). Com o solo em umidades maiores possibilita o aumento da D_s sem que ocorra RP limitante ao desenvolvimento radicular, como também observado por Lima et al. (2007).

Segundo Lima et al. (2007), trabalhando com Argissolo vermelho distrófico pertencente ao departamento de solos da Universidade Federal de Santa Maria, quando a RP está em torno de 1,5 MPa, a densidade não pode ser inferior a 1,32 Mg m⁻³ nem superior a 1,69 Mg m⁻³ uma vez que se torna restritiva ao desenvolvimento da planta. No presente estudo, o solo da área cultivada (1,58CI) e da mata (1,41MI) apresentaram RPL maior que o citado por Lima et al., (2007), porém a densidade permaneceu entre os limites citados por este autor como restritivos ao desenvolvimento da planta (Tabela 4).

Verifica-se que o coeficiente linear do tratamento 1,58CI para a profundidade de 0,20 a 0,40 m foi o maior em comparação aos outros tratamentos, que apresentaram valores semelhantes, inclusive do tratamento 1,41MI. Já os coeficientes angulares dos tratamentos 1,58CI e 1,41MI tiveram valores bem próximos entre si e distintos dos outros tratamentos, principalmente do 1,4CD e 1,5CD, mas com exceção do 1,7CD. Comparando os tratamentos 1,58CI e 1,6CD que possuem densidades do solo muito próximas e são de áreas com mesmo uso (cultivo com cana-de-açúcar), verifica-se coeficientes linear e angular diferentes (Tabela 5) porém, aproximando o tratamento 1,6CD do 1,41MI e, ressaltando assim a diminuição da resistência mecânica do solo à penetração quando sua estrutura é perturbada (Figura 3).

TABELA 5. Densidade do solo (Ds), coeficiente linear “a” e coeficiente angular “b” das equações de regressão para RPL em função da umidade volumétrica para a profundidade de 0,20 a 0,40 m (horizonte AB).

Tratamentos	RPL = $10^{(a + b.\theta)}$		
	a	b	R ²
1,4CD	3,5386	-8,7423	0,8939
1,5CD	3,8221	-9,6674	0,9321
1,6CD	3,5184	-4,0415	0,8287
1,7CD	3,8373	-5,4330	0,8509
1,8CD	3,8539	-3,8179	0,8446
1,58CI*	4,2918	-5,4938	0,7143
1,41MI*	3,7409	-5,5069	0,7187

1,4CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,8CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,58CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,41MI = Amostras indeformadas da área de mata.

* Fonte: Pacheco (2010)

A umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) aumentou com o acréscimo da Ds para os tratamentos com amostras deformadas (1,4CD, 1,5CD, 1,6CD e 1,7CD), no entanto, os tratamentos que usaram amostras com estrutura preservada (1,58CI e 1,41MI) apresentaram maiores valores de θ_{pmp} , mesmo em relação aos tratamentos com amostra deformada de mesma densidade (Tabela 4).

A literatura sugere para a análise das curvas de retenção de água, que a degradação física do solo sempre conduz a uma mudança no formato das curvas (FREDDI et al., 2009). Segundo Dexter (2004), uma pequena inclinação indica um solo desestruturado e, portanto, uma elevada inclinação, um solo estruturado e que possui

muitos poros. Diferente dessa afirmação observa-se, nas curvas de retenção de água (CRA) dos tratamentos 1,6CD e 1,58CI, um comportamento distinto entre elas, apesar das Ds desses tratamentos estarem bem próximas, mas o 1,6CD tem mais macroporos e menos microporos, distinguindo o comportamento das CRA entre os dois tratamentos (Tabela 4), além disso, pode haver diferença nas classes de microporos dos dois tratamentos, como observado por Silva et al. (2005), que trabalhando com Argissolo amarelo da usina Triunfo em Alagoas, verificou um aumento da quantidade de microporos com diâmetro menor, ocasionado pelo preenchimento dos poros de maior diâmetro com argila iluvial e, conseqüentemente, maior retenção de água mesmo para tensões mais altas, em módulo, evidenciando o comportamento das CRA dos tratamentos 1,58CI e 1,6CD (Figura 4).

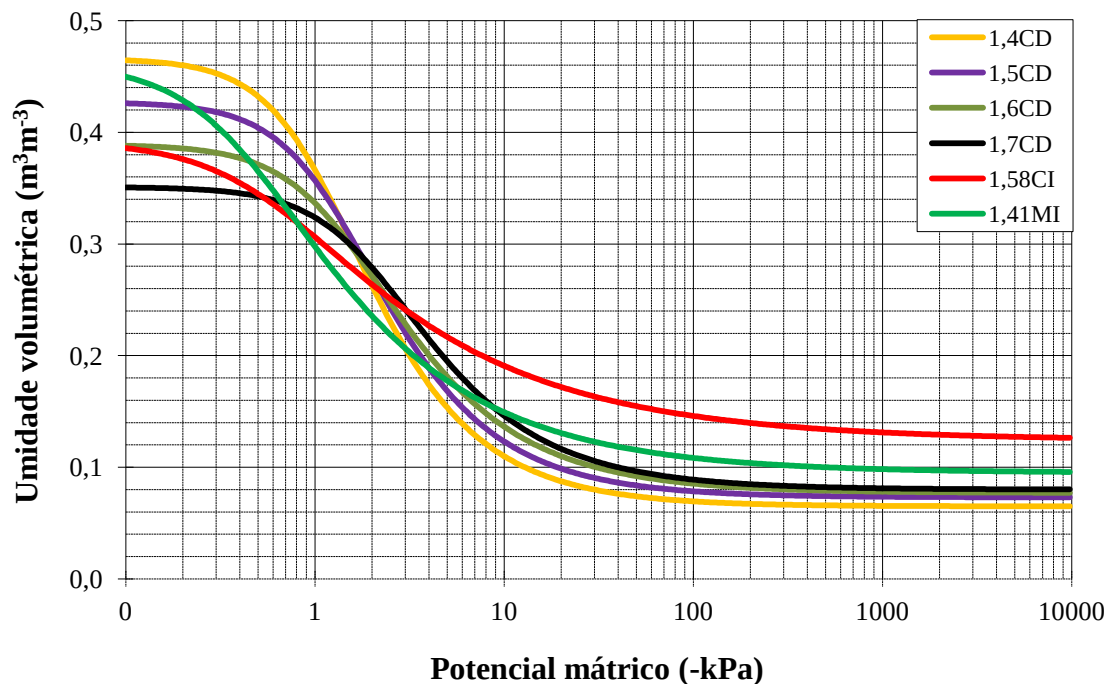


FIGURA 4. Curvas características de retenção de água do solo na profundidade de 0,20 a 0,40 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b.\theta)}$. Onde: 1,4CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,8CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,58CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,41MI = Amostras indeformadas da área de mata.

Outro fator que deve ser levado em conta para explicar o comportamento das CRA dos tratamentos 1,6CD e 1,58CI é a ocorrência de compactação e adensamento nas amostras indeformadas, e apenas compactação nas amostras deformadas, visto que, Curi (1993), afirma que a compactação do solo constitui na principal limitação física do solo para o desenvolvimento das plantas, resultante da ação antrópica do uso e manejo do solo, caracterizada pela diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, causando um rearranjo mais denso das partículas do solo. Ainda segundo o mesmo autor, a compactação do solo não pode ser confundida com adensamento, que é um fenômeno natural de horizontes de solos, e Silva (1996) reforça que esse adensamento é de origem pedogenética, no entanto a drástica redução da porosidade é consequência do adensamento ocasionado pela argila iluvial deslocada para subsuperfície e consequente preenchimento dos poros. Esse adensamento pode ser verificado principalmente nos horizontes B textural e B nítico, respectivamente, em Argissolos e Nitossolos (Embrapa, 2006).

Como é observado na Figura 4, há uma melhoria da qualidade desse horizonte com a desestruturação do solo, o que justificaria o uso de subsolagem como prática de manejo para essa profundidade. No entanto, são necessários mais estudos, principalmente ao nível de campo, que aprofundem o conhecimento dos efeitos do manejo usado para minimizar o problema dos horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros.

Verificou-se que o uso da CRA das amostras com densidade $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tratamento 1,8CD) não se fez necessário devido ao grande número de curvas na figura 4, podendo deixá-la confusa.

O volume total de poros (VTP) sofreu variação inversa em função da D_s , assim como a umidade volumétrica na porosidade de aeração (θ_{pa}), já para a umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) dos tratamentos 1,4CD a 1,8CD ocorreu aumento da umidade com o incremento da D_s . O tratamento 1,58CI apresentou θ_{cc} e θ_{pmp} maior que todos os outros tratamentos, apesar da D_s estar entre 1,5 e $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$ (1,5CD e 1,6CD). Comparando os tratamentos 1,6CD e 1,58CI, que possuem D_s muito próximas, o VMacro do tratamento 1,6CD é maior e o VMicro é menor (Tabela 4).

As Figuras 5 e 6 apresentam o intervalo hídrico ótimo (IHO) do horizonte AB do Argissolo Amarelo referente às amostras sem estrutura preservada e indeformada, respectivamente.

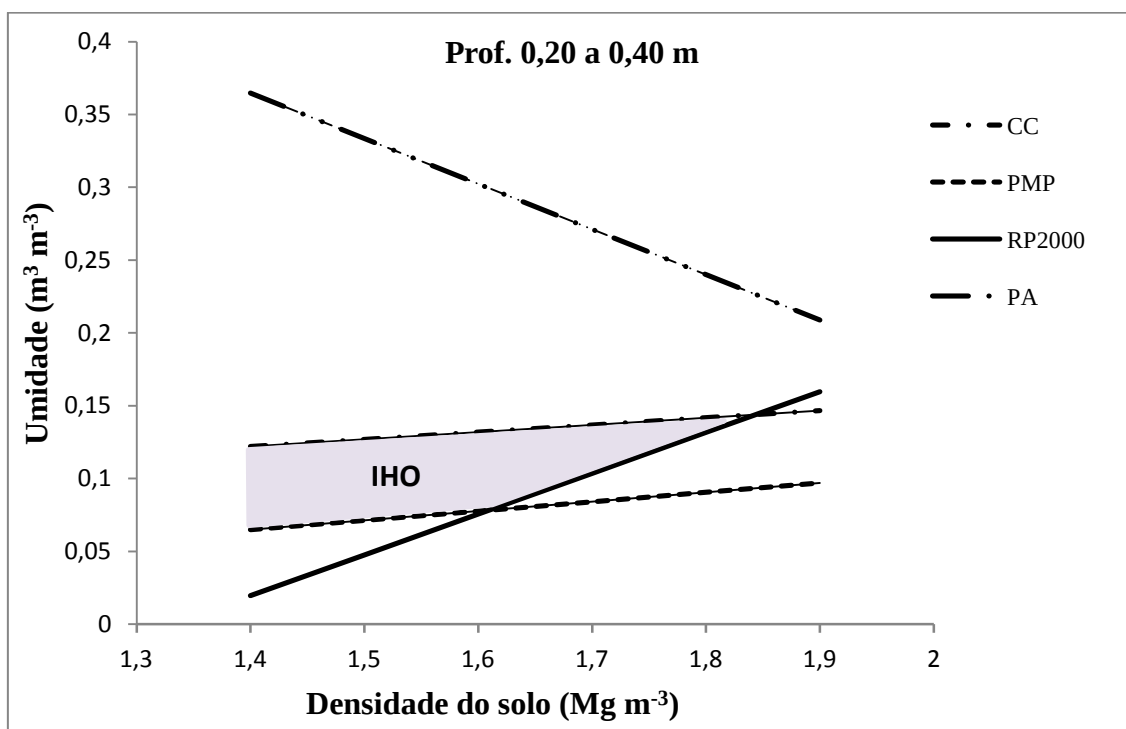


FIGURA 5. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo na profundidade de 0,20 a 0,40 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) de uma área cultivada com cana-de-açúcar. Onde: CC = amostras com umidade na capacidade de campo; PMP = amostras com umidade no ponto de murcha permanente; RP2000 = amostras com resistência à penetração em laboratório com resistência $\geq 2000 \text{ kPa}$; PA = amostras com umidade na porosidade de aeração.

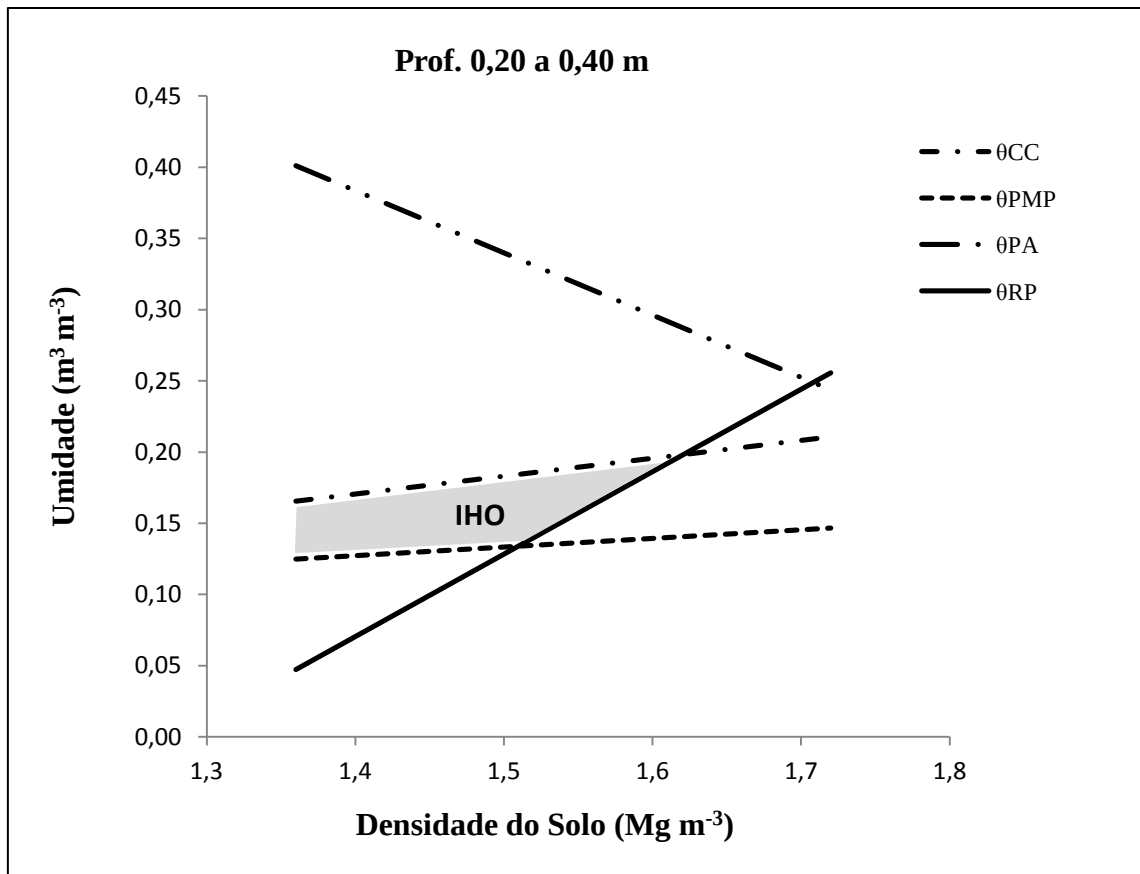


FIGURA 6. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo na profundidade de 0,20 a 0,40 m para amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar. Onde: CC = amostras com umidade na capacidade de campo; PMP = amostras com umidade no ponto de murcha permanente; RP2000 = amostras com resistência à penetração em laboratório com resistência $\geq 2000 \text{ kPa}$; PA = amostras com umidade na porosidade de aeração.

Na profundidade de 0,20 a 0,40 m, o IHO do solo desestruturado começa a apresentar restrição ao desenvolvimento radicular a partir da $D_s = 1,61 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 5), enquanto o IHO do solo com estrutura preservada começa a apresentar restrição a partir da $D_s = 1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 6). Neste estudo, esse fato ocorre quando a curva de umidade para resistência a penetração restritiva ($RP > 2000 \text{ kPa}$), segundo Tormena et al. (1998), cruza com a curva de umidade de ponto de murcha permanente em função da densidade do solo (Figuras 5 e 6). Portanto, tanto para as amostras de solo com estrutura preservada quanto perturbada, o comportamento segue o padrão da premissa “a” descrita por Wu et al. (2003), conforme pode ser aferido pelos valores da Tabela 4 e ilustrado pelo diagrama da Figura 7, ponto até qual o IHO é igual a água disponível.

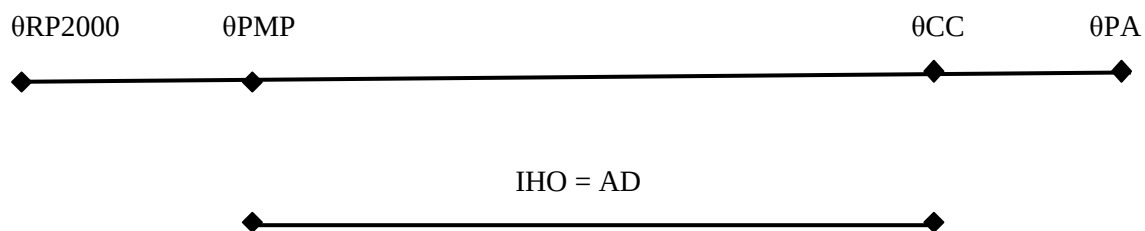


FIGURA 7. Condições descritas por Wu et al. (2003) para que a água disponível seja igual ao intervalo hídrico ótimo ($AD = IHO$), segundo a premissa “a” que diz: Se $(\theta_{pa} \geq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}) \Rightarrow IHO = \theta_{cc} - \theta_{pmp}$.

A partir da densidade do solo onde $\theta_{rp} > \theta_{pmp}$ o IHO passa a ser menor que a AD, (Figura 8), caracterizando a premissa “b” descrita por Wu et al. (2003). As compactações adicionais podem evoluir até uma densidade em que a umidade onde a resistência a penetração ≥ 2000 kPa seja igual a umidade da capacidade de campo. Essa densidade é conhecida como densidade crítica, não por déficit hídrico, mas sim pela resistência mecânica do solo a penetração de raízes. Portanto, antecedendo a esse ponto, deve ser levado em conta não só as tomadas de decisões relacionadas à irrigação, mas também em relação ao manejo do solo que envolva, por exemplo, subsolagem ou escarificação.

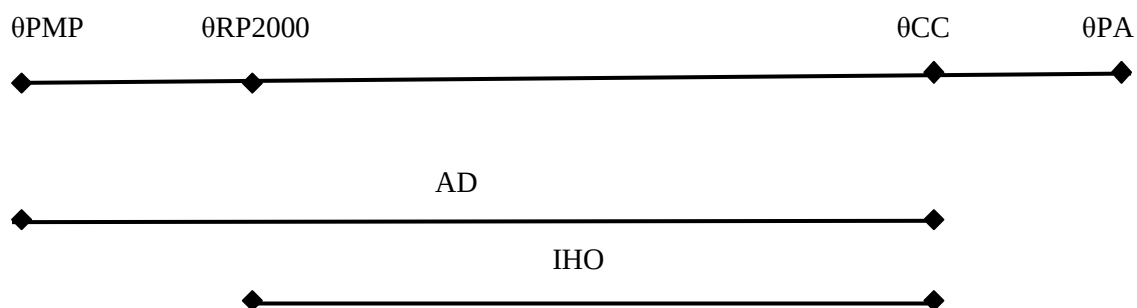


FIGURA 8. Condições descritas por Wu et al. (2003) para que o intervalo hídrico ótimo seja menor que a água disponível ($AD > IHO$), segundo a premissa “b” que diz: Se $(\theta_{pa} \geq \theta_{cc})$ e $(\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}) \Rightarrow IHO = \theta_{cc} - \theta_{rp}$, como descrito no item 5 da metodologia.

Para horizontes coesos, o efeito positivo da subsolagem sobre o desenvolvimento radicular pode ser explicado em parte pelo aumento da densidade crítica das amostras com estrutura preservada de $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ para $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$ das amostras deformadas, indicando efeito benéfico no comportamento mecânico e hídrico com a desestruturação do horizonte coeso do solo estudado. As amostras indeformadas da área cultivada apresentaram densidade média de $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 4), valor próximo da densidade crítica ($1,617 \text{ Mg m}^{-3}$), ou seja, esse solo já apresenta resistência mecânica ao desenvolvimento radicular, mesmo para umidades próximas da capacidade de campo. Esse fato pode ser comprovado pela diminuição da faixa de umidade adequada para o desenvolvimento radicular de $0,061 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (AD) para $0,011 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (IHO), para o horizonte AB do tratamento CI (Tabela 4).

4.1.3 - Horizonte Bt (0,40 a 0,60 m)

As curvas de regressão da resistência do solo à penetração em laboratório (RPL) em função da umidade volumétrica usando solo desestruturado (amostras reconstituídas), cultivado com cana-de-açúcar, nas densidades 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7 Mg m^{-3} e amostras com estrutura preservada de solo de uma área cultivada com de cana-de-açúcar e solo de uma área de mata, para a profundidade 0,40 a 0,60 m do Argissolo Amarelo podem ser visualizadas Figura 9.

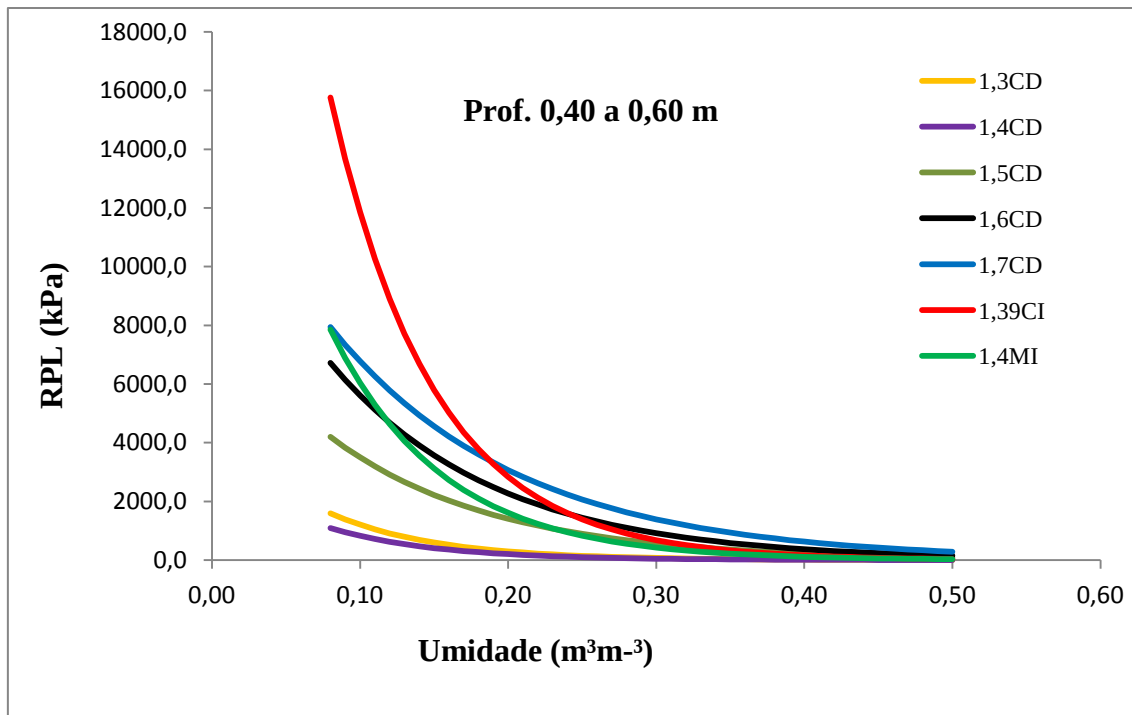


FIGURA 9. Curvas de resistência à penetração em laboratório em função da umidade volumétrica do solo na profundidade de 0,40 a 0,60 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$. Onde: 1,3CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,4CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,39CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,4MI = Amostras indeformadas da área de mata.

A RPL do horizonte Bt para o solo desestruturado nas cinco densidades estudadas apresentou variação crescente com o aumento da Ds, sendo que, os tratamentos 1,3CD e 1,4CD apresentaram praticamente o mesmo comportamento (Figura 9).

As amostras de solo com estrutura preservada da área cultivada (1,39CI) apresentaram maior RPL que todos os outros tratamentos em condições de umidade mais baixas, corroborando com os resultados obtidos para o horizonte subjacente AB. Mesmo apresentando densidade do solo muito semelhante, os tratamentos 1,39CI, 1,4CD e 1,4MI apresentaram comportamento de RPL distintos (Figura 9 e Tabela 6). Portanto, pode-se inferir que a desestruturação do solo melhorou seu comportamento

físico quanto à facilidade de penetração de raízes, mesmo quando comparado com o solo da área de mata, como também foi observado para o horizonte AB, o que justifica a operação de subsolagem na reforma de canaviais, ou mesmo na implantação de áreas novas, prática frequentemente utilizada pela Usina Coruripe.

TABELA 6. Densidade do solo (Ds), resistência à penetração em laboratório com umidade no ponto de murcha permanente (RPLpmp), volume total de poros (VTP), volume de macroporos (VMacro), volume de microporos (VMicro), umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{pa}), umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), umidade quando a resistência do solo a penetração é $\geq 2000 \text{ kPa}$ (θ_{rp}), água disponível (AD) e intervalo hídrico ótimo (IHO), para os sete tratamentos na profundidade de 0,40 a 0,60 m.

Tratamentos		1,3CD	1,4CD	1,5CD	1,6CD	1,7CD	1,39CI*	1,4MI*
RPLpmp	(kPa)	2798	2653	4644	7896	---**	7496	6214
VTP	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,504	0,466	0,427	0,389	0,351	0,469	0,466
VMacro	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,298	0,242	0,181	0,137	0,078	0,204	0,221
VMicro	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,206	0,224	0,246	0,252	0,273	0,265	0,245
θ_{pa}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,407	0,370	0,334	0,298	0,262	0,358	0,359
θ_{cc}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,182	0,193	0,205	0,216	0,228	0,238	0,217
θ_{pmp}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,120	0,125	0,130	0,134	0,139	0,173	0,157
θ_{rp}	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,064	0,066	0,162	0,214	0,254	0,224	0,184
AD	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,062	0,069	0,075	0,082	0,089	0,065	0,060
IHO	($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,062	0,069	0,043	0,002	0,000	0,013	0,031

1,3CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,4CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,39CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,4MI = Amostras indeformadas da área de mata.

** Resistência a penetração superior à capacidade nominal da célula de carga do penetrógrafo

*Fonte: Pacheco (2010)

Os tratamentos com estrutura deformada (1,3CD, 1,4CD, 1,5CD, 1,6CD e 1,7CD) apresentaram coeficientes lineares e angulares menores que os das amostras com estrutura preservada, indicando menor amplitude de variação da RPL em função da umidade volumétrica do solo (Tabela 7).

TABELA 7. Densidade do solo (Ds), coeficiente linear “a” e coeficiente angular “b” das equações de regressão para RPL em função da umidade volumétrica para a profundidade de 0,40 a 0,60 m (horizonte Bt).

Tratamentos	RPL = $10^{(a + b.\theta)}$		
	a	b	R ²
1,3CD	3,6915	-6,0975	0,8565
1,4CD	3,5268	-3,3966	0,7329
1,5CD	3,9386	-3,9477	0,7288
1,6CD	4,1420	-3,9308	0,7406
1,7CD	4,1747	-3,4379	0,8106
1,39CI	4,6941	-6,2061	0,7245
1,4MI	4,3542	-5,7370	0,5215

1,3CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,4CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD = Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,7CD = Densidade 5 das amostras deformadas da área cultivada; 1,39CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,4MI = Amostras indeformadas da área de mata.

A θ_{pmp} dos tratamentos com solo desestruturado 1,3CD a 1,7CD foi menor que os tratamentos com estrutura do solo preservada, inclusive com Ds próximas, como é o caso dos tratamentos 1,4CD, 1,39CI e 1,4MI (Tabela 6). Esse comportamento não ocorreu com o horizonte AB em que os solos com estrutura preservada apresentaram valores maiores de θ_{pmp} (Tabela 4).

As CRA apresentam comportamento distinto entre os tratamentos 1,4CD (solo desestruturado) e os tratamentos 1,4MI e 1,39CI (solo com estrutura preservada) (Figura 10), apesar de possuírem Ds igual a 1,40; 1,39 e 1,40 Mg m⁻³, respectivamente. Como observado na Figura 10, a CRA do 1,4CD possui uma inclinação maior que as CRA dos solos com estruturas preservadas, que possuem Ds praticamente iguais.

Os tratamentos 1,39CI e 1,4CD possuem Ds e VTP semelhantes, contudo verifica-se que a desestruturação do solo proporcionou aumento da macroporosidade e redução da microporosidade, aproximando o solo com estrutura deformada 1,4CD da condição natural representada pela mata (Tabela 9). Estudando um Latossolo Amarelo distrocoeso dos Tabuleiros costeiros da usina Clotilde no município de Rio Largo, litoral de Alagoas, Vasconcelos (2009) também verificou que a compactação do solo proporcionou uma desestruturação de agregados maiores e, conseqüentemente, alterações no sistema poroso, no geral, transformando ambientes de macroporos em microporos. Comportamento semelhante também pode ser observado no horizonte AB (Tabela 4). Silva et al. (2005), estudando três diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar: um sob cultivo de sequeiro, um sob cultivo irrigado, uma área cultivada com aplicação de vinhaça e uma área de mata, verificaram a redução da macroporosidade e conseqüente aumento da microporosidade das áreas cultivadas em comparação ao solo da mata, acarretando alterações no traçado das CRA de um Argissolo Amarelo da usina Triunfo em Alagoas.

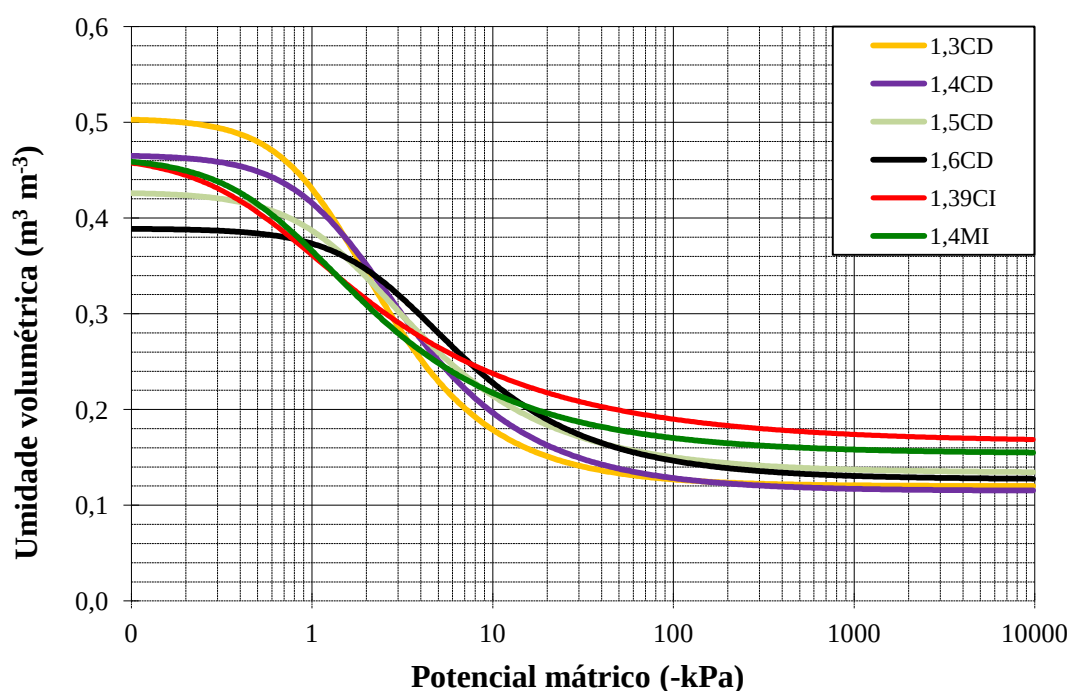


FIGURA 10. Curvas características de retenção de água do solo na profundidade de 0,40 a 0,60 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) e amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar e solo de uma área de mata: $RPL = 10^{(a + b \cdot \theta)}$. Onde: 1,3CD = Densidade 1 das amostras deformadas da área cultivada; 1,4CD = Densidade 2 das amostras deformadas da área cultivada; 1,5CD = Densidade 3 das amostras deformadas da área cultivada; 1,6CD =

Densidade 4 das amostras deformadas da área cultivada; 1,39CI = Amostras indeformadas da área cultivada; 1,4MI = Amostras indeformadas da área de mata.

A porosidade total do horizonte AB (Tabela 4) foi menor que a porosidade total do horizonte Bt (tabela 6), como descrito por Lima Neto et al. (2009), que trabalhando com Argissolo Amarelo Distrocoeso típico verificou que a porosidade total foi inferior para os horizontes com caráter coeso, consolidando a presença do horizonte coeso nos Argissolos de Tabuleiros Costeiros, corroborando com Lima et al. (2004), que trabalhou com a identificação e caracterização de horizontes coesos de tabuleiros costeiros do Estado do Ceará.

A RPL na umidade de pmp dos tratamentos com amostras indeformadas (1,4MI e 1,39CI) é maior que os tratamentos com estrutura do solo deformada, considerando os tratamentos com Ds iguais ou próximas, tanto para o horizonte AB, quanto para o Bt. Corroborando com os dados encontrados por Galvão (2002), em um estudo de influência da subsolagem sobre alguns atributos físicos do solo em um Argissolo Amarelo distrófico da usina Coruripe – AL, que verificou redução da RP quando o solo foi desestruturado pela subsolagem. No entanto, a θ_{pmp} dos tratamentos 1,39CI e 1,4MI também é consideravelmente maior, ou seja, para atingir RPL altas os tratamentos com amostras deformadas precisam estar mais secas, como pode ser observado pela θ_{rp} . Isso é uma vantagem, pois aumentou o IHO dos solos com estrutura deformada (Tabelas 4 e 6).

Observou-se que houve um aumento na θ_{cc} do solo com estrutura deformada em decorrência do acréscimo do VMicro e, conseqüente decréscimo do VMacro, além disso, verifica-se que a θ_{pa} é bem maior que a θ_{cc} (Tabelas 4 e 6), indicando que a θ_{pa} não está causando limitações ao desenvolvimento radicular nos horizontes AB e Bt (Figuras 5, 6, 11 e 12).

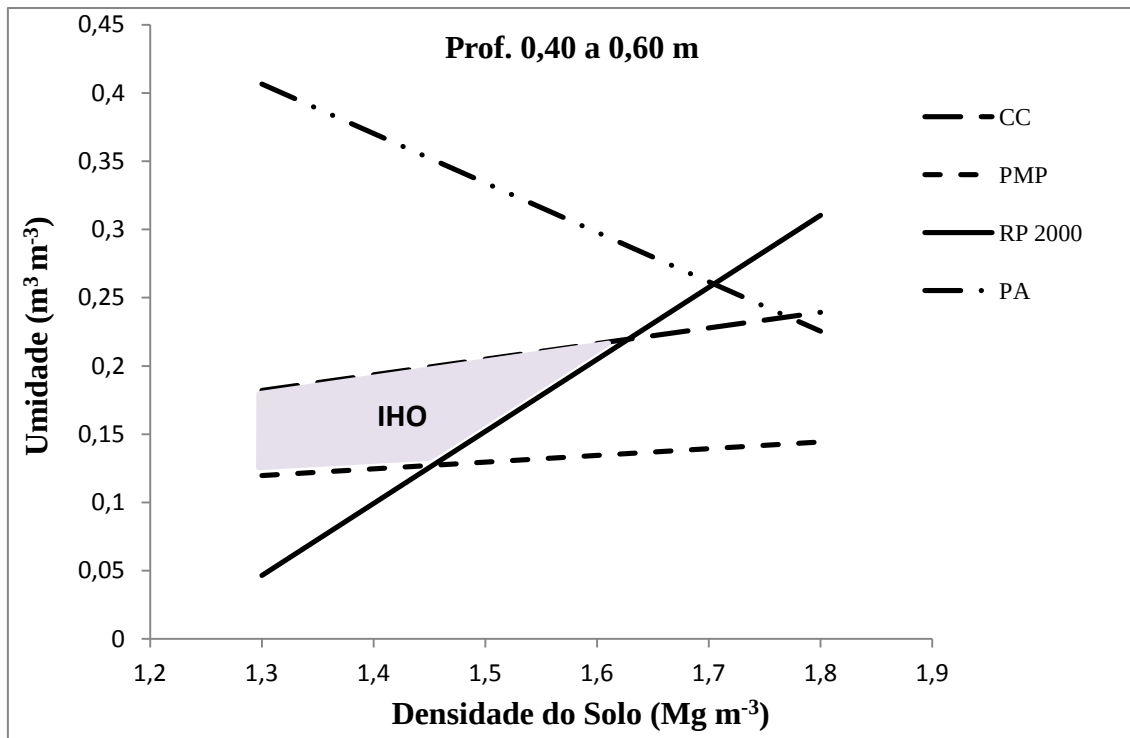


FIGURA 11. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo na profundidade de 0,40 a 0,60 m para amostras com estrutura não preservada (amostras reconstituídas) de uma área cultivada com cana-de-açúcar. CC: amostras com umidade na capacidade de campo; PMP: amostras com umidade no ponto de murcra permanente; RP2000: amostras com resistência à penetração em laboratório com resistência ≥ 2000 kPa; PA: amostras com umidade na porosidade de aeração.

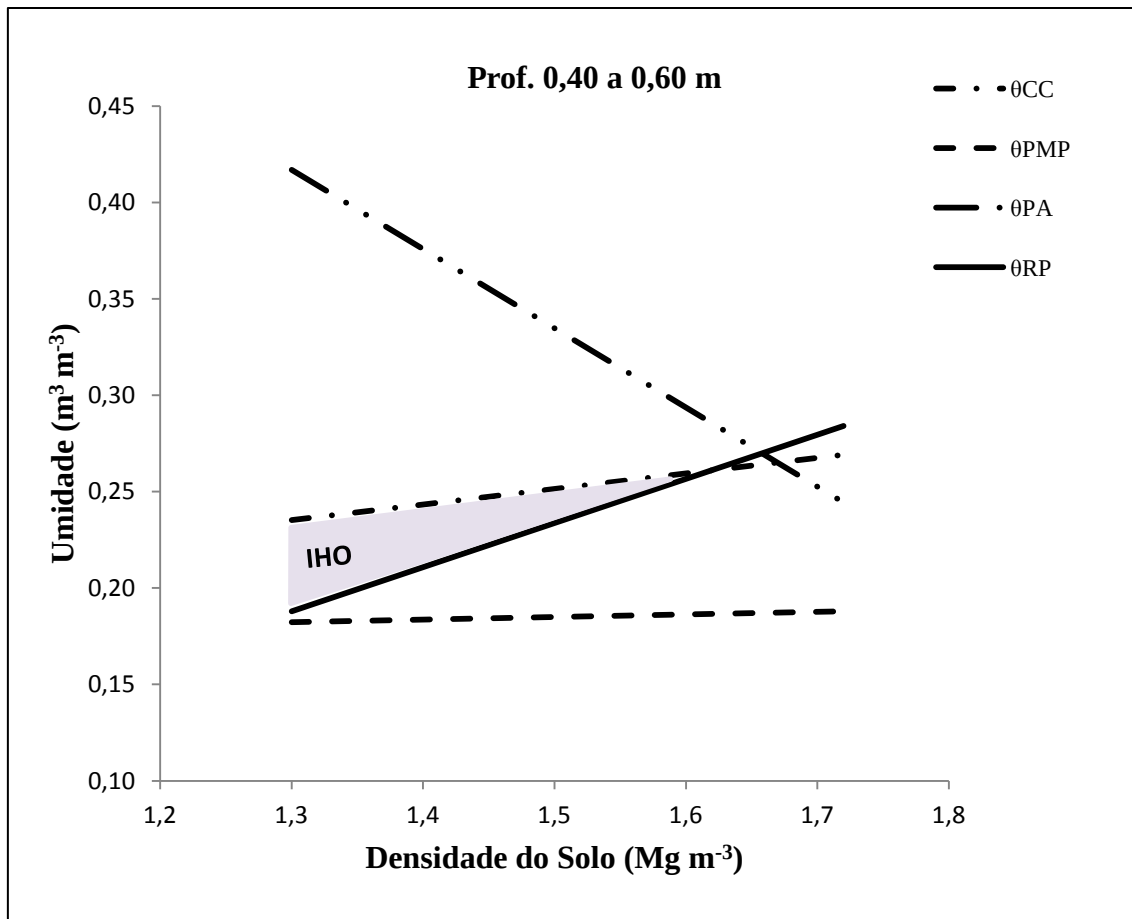


FIGURA 12. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo na profundidade de 0,40 a 0,60 m para amostras com estrutura preservada de uma área cultivada com cana-de-açúcar. CC: amostras com umidade na capacidade de campo; PMP: amostras com umidade no ponto de murcra permanente; RP2000: amostras com resistência à penetração em laboratório com resistência $\geq 2000\text{kPa}$; PA: amostras com umidade na porosidade de aeração.

Verificando a AD não é possível observar limitações hídricas no horizonte Bt desse Argissolo (Tabela 6), porém com o IHO começa a ocorrer uma restrição ao desenvolvimento radicular provocado pela θ_{rp} a partir da $D_s = 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para o solo com amostras desestruturadas (Figura 11), enquanto para o solo com estrutura preservada essa D_s é de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 12). Isso ocorre quando a curva da umidade para que ocorra resistência a penetração acima de 2000 kPa , de acordo com Tormena et al. (1998), cruza com a curva de θ_{pmp} em função da densidade do solo. Portanto, como para o horizonte AB, o Bt também segue o padrão da premissa “a” descrita por Wu et al. (2003), conforme ilustrado pelo diagrama da Figura 7 e aferido pelos valores da tabela, ponto até qual o IHO é igual a AD.

A partir da densidade do solo onde as curvas de $\theta_{rp} = \theta_{pmp}$ o IHO passa a ser menor que a AD, (Figura 8), caracterizando a premissa “b” descrita por Wu et al. (2003). As compactações adicionais podem evoluir até uma densidade em que a umidade onde a $RP \geq 2000$ kPa seja igual a θ_{cc} . Essa densidade é conhecida como densidade crítica, não por déficit hídrico, mas sim pela resistência mecânica do solo a penetração de raízes. A D_s crítica do horizonte Bt, diferentemente do AB, foi semelhante entre os solos com estrutura preservada e deformada (1,62 e 1,63 Mg m⁻³, respectivamente) (Figuras 11 e 12).

Os dados acima citados comprovam que houve uma melhoria no IHO do solo com estrutura deformada, levando em conta tratamentos com densidades iguais ou até um pouco maiores, como pode ser observado pela grande diferença nos valores de IHO (Tabela 6) e que também é visto no horizonte AB (Tabela 4).

5. CONCLUSÕES

O horizonte Ap não apresenta restrições limitantes ao desenvolvimento radicular, visto que a resistência a penetração em laboratório (RPL) não atingiu o valor considerado limitante.

A desestruturação do solo reduziu a RPL, a θ_{cc} , θ_{rp} , a θ_{pmp} e aumentou o IHO dos horizontes AB e Bt do Argissolo Amarelo em comparação ao solo com estrutura preservada, cultivados com cana-de-açúcar.

A desestruturação mecânica subsuperficial do Argissolo Amarelo estudado pode aumentar o IHO em densidades maiores, devido ao aumento da densidade crítica dos horizontes AB e Bt, melhorando assim, o comportamento mecânico e hídrico desse solo.

Trabalhos futuros devem ser realizados ao nível de campo, com o objetivo de verificar o efeito de práticas de descompactação do solo sobre o comportamento mecânico e hídrico de horizontes pedogenéticos adensados de Argissolos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2235-2243, 2008.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. e. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos de tabuleiros costeiros do Nordeste do Brasil. In: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC, 2001. p. 19-46.

ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. B. R e; SILVA, S. S. L. Solos dos tabuleiros costeiros: horizontes coesos e cimentados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, 1999, Brasília, **Anais...** Brasília: SBCS, 1999, 1 CD.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA PESQUISA DA POTASSA E DO FOSFATO - POTAFOS, Cana-de-açúcar: ambientes de produção. **Encarte de informações agronômicas**, n. 110, p. 1-5, 2005.

BENGOUGH, A. G. & MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **Journal Soil Science**, 41:341-358, 1990.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R. & SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a Coastal Plain soil. **Soil Tillage Research**, 43:205-217, 1997.

CARVALHO, L. A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C. A.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.9, p.940-949, 2011.

CURI, N. (Coord.). **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory. Effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120:201-214, 2004.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, 1:56 94, 2000.

DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 114p. 1994, (Tese de Doutorado)

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.487-493, 2000.

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**, 35:389-402, 2011.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2008. 72p. (Tese de Mestrado)

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em latossolo vermelho. I – características de planta, solo e índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:793-803, 2009.

GALVÃO, A. S. **Rendimento de cana-de-açúcar e alguns atributos físicos de um argissolo afetado pelo sistema de preparo do solo**. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2002, 75p. (Dissertação de Mestrado)

GUPTA, S. C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S. A. Compaction effects on soil structure. **Advanced Agronomy**, v.41, p.331–338, 1989.

HAMZA, M. A. & ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage Research**, 82:121-145, 2005.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980, 413p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; DIAS JUNIOR, M. S. & TORMENA, C. A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:11-18, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Banco de Dados Agregado – Sistema IBGE de recuperação automática – SIDRA, Disponível: <http://www.ibge.gov.br> – acessado em agosto de 2011.

JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, 2001, Aracaju. **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC, 2001. p.19-46.

JACOMINI, P. K. T; CAVALCANTI, A. C.; PESSOA, S. C. P.; SILVEIRA, C. O. **Levantamento exploratório. Reconhecimento de solos do Estado de Alagoas**. Recife: Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975, 531p. (Boletim Técnico, 35)

- KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L. & KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:845-855, 2009.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.
- KLEIN, V. A. & CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:221-227, 2007.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.18, p.45-54, 1998.
- KONDO, M. K.; DIAS JUNIOR, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.211-218, 1999.
- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E. & TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soil using SAS. **Agronomic Journal**, 97:1210-1215, 2005.
- LEBERT, M. & HORN, R. A method to predict the mechanical strenght of agricultural soils. **Soil Tillage Research**, 19:275-286, 1991.
- LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, v.37, p.1166-1169, 2007.
- LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; JACOMINE, P. T. K.; ROMERO, R. E.; LIBARDI, P. L. Identificação e caracterização de solos coesos no estado do ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:467-476, 2004.
- LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; LIMA, J. F. W. F. & FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1001-1011, 2009.
- MICHELON, C. J. **Qualidade física dos solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. Santa Maria: UFSM, 2005. 92p. Dissertação Mestrado
- OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.9, p.914-920, 2010.

PACHECO, E. P. **Estudo da compressibilidade e qualidade de um argissolo amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de alagoas**. Recife: UFRPE, 2010. 116p. Tese Doutorado.

PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, BEUTLER, A. N.; ALMEIDA, C. X.; PEREIRA, F. S. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.211-217, 2010.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A. & ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1515-1526, 2010.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: **Física do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 29-102, 2010.

REZENDE, J. O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI-SPA, 2000, 117 p. (SEAGRI/SPA, Série Estudos Agrícolas, 1)

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4 ed. Viçosa, NEPUT, 338p, 2002.

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; MENTGES, M.; BARROS, C. A. P.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A. Cultivo mínimo: Efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.11, p.1199–1205, 2011.

SALVADOR, N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L. Demanda energética na subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p.2501-2505, dez, 2009 ISSN 0103-8478.

SILVA, A. J. N. **Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 120p. (Tese de Doutorado).

SILVA, A. J. N. & CABEDA, M. S. V. Modificações na matriz de um Argissolo Amarelo Coeso sob diferentes sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.554–562, 2006.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. & LIMA, J. F. W. F. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um argissolo amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:833-842, 2005.

SILVA, A. J. N. **Caracterização de Latossolos Amarelos sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas**. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 1996. 133p. (Tese de Mestrado).

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. Indicadores da qualidade física do solo. In: **Física do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 241-281, 2010.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:1-10, 2008.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:9-15, 2002.

SILVEIRA, D. C.; FILHO, J. F. M.; 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**, 34:659-667, 2010.

SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; CALDAS, R. C. Identificação da coesão com base em atributos físicos convencionais em solos dos Tabuleiros Costeiros. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju, Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.169-190.

SOUZA, L. S. Uso e manejo dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS - pesquisa e desenvolvimento para os tabuleiros costeiros, 1996, Cruz das Almas, **Anais...** Aracaju: EMBRAPA-CPATC/EMBRAPA-CPNMF/ EAUFGA/IGUFGA, 1996, p.36.75.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C., CAVALCANTE, I. H. L.; JÚNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.128-134, 2006.

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**, 32:963-973, 2008.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R., GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.2, p.393-399, 1999.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GALERANI, P. R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 71p, 1993. (EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica, 12)

VASCONCELOS, R. F. B. **Comportamento mecânico de um Latossolo Amarelo não saturado sob diferentes sistemas de manejos culturais de cana-de-açúcar**. UFRPE, Recife, 132 p. 2009. (Tese de Doutorado)

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B. & MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, 114:401-414, 2003.