

# DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE SOLO COESO SOB A AÇÃO DE POLIACRILAMIDA: QUALIDADE FÍSICA AMBIENTAL

WATER AVAILABILITY OF COHESIVE SOIL UNDER  
THE ACTION OF POLYACRYLAMIDE: ENVIRONMENTAL PHYSICAL QUALITY

## *Valerio Ferreira Marcelo*

Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Recife (PE), Brasil.

## *Brivaldo Gomes de Almeida*

Professor adjunto pela UFRPE – Recife (PE), Brasil.

## *José Coelho de Araújo Filho*

Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Solos – Recife (PE), Brasil.

## *Wagner Luis da Silva Souza*

Doutor em Ciência do Solo pela UFRPE – Recife (PE), Brasil.

### **Endereço para correspondência:**

Valerio Ferreira Marcelo – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Dom Manuel de Medeiros, s/n – Dois Irmãos – 52171-900 – Recife (PE), Brasil – E-mail: valeriomarcelo@hotmail.com

## **RESUMO**

Os Tabuleiros Costeiros possuem camadas coesas de solos que alteram o estado da água nos seus poros, interferindo no desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Este estudo objetivou avaliar a ação dos condicionadores poliácridamida (PAM) e gesso no solo coeso de Tabuleiros Costeiros de Pernambuco via intervalo hídrico ótimo (IHO). As amostras foram subdivididas em três tratamentos — T0 (Controle), T1 (PAM) e T2 (PAM + gesso) —, com quatro repetições cada. Foram avaliadas a curva característica de retenção de água no solo; a densidade do solo; a resistência do solo à penetração de raízes (RP) e o IHO. As médias foram submetidas à ANOVA e ao teste de Tukey, pelo aplicativo Statistical Analysis System (SAS). O IHO foi eficiente em detectar alterações na disponibilidade de água do solo; o tratamento com PAM foi o que promoveu maior aumento dessa disponibilidade, e o valor crítico da RP para o IHO do solo coeso estudado ficou acima de 2 MPa.

**Palavras-chave:** IHO; polímero; densidade do solo.

## **ABSTRACT**

The Coastal Trays have cohesive layers of soils that alter the state of the water in their pores, interfering in the development of the root system of the plants. This study aimed to evaluate the action of polyacrylamide and gypsum conditioners on the cohesive soil of Pernambuco Coastal Traps via the least limiting water range (LLWR). The samples were subdivided into three treatments — T0 (Control), T1 (Polyacrylamide) and T2 (Polyacrylamide + Gypsum) —, with four replicates per treatment. The water retention characteristic curve; soil density; soil resistance to root penetration (RP) and LLWR were evaluated. The means were submitted to ANOVA and Tukey's test, by the Statistical Analysis System (SAS) application. The LLWR was efficient in detecting changes in soil water availability; being the treatment with polyacrylamide which promoted greater increase of this availability, being the critical value of the RP for the LLWR of the cohesive soil studied above 2 MPa.

**Keywords:** LLWR; polymer; bulk density.

## INTRODUÇÃO

Os Tabuleiros Costeiros são formações terciárias, com amplas superfícies planas e elevações de 30 a 150 m acima do nível do mar. Para Sobral *et al.* (2002), o termo é referente à topografia plana, do tipo tabular, apresentando ondulação suave com menor frequência.

Os Tabuleiros ocupam uma zona úmida costeira das Regiões Norte, Nordeste e Sudeste, sob clima de estações secas e úmidas bem definidas (JACOMINE, 2001). Essa unidade de paisagem apresenta irregularidade pluviométrica, pobreza de nutrientes e ocorrência das camadas coesas, que são limitações atribuídas aos solos relacionadas à estrutura (ARAÚJO, 2000). Os solos predominantes são os latossolos amarelos, os argissolos e alguns latossolos vermelho-amarelos (LEPSCH, 2007).

Os Tabuleiros possuem horizontes coesos, termo usado para diferenciar solos com horizontes extremamente duros sem a presença de água, e firmes ou friáveis se umedecidos (EMBRAPA, 2013).

A coesão ocorre nas áreas sob floresta e sob cultivo; por isso, a ocorrência indica ser um processo de transformação do seu material de origem (RIBEIRO, 1991). Os solos com horizontes coesos têm textura média a muito argilosa, são estruturalmente fracos e com disposição a formar blocos (EMBRAPA, 2013).

As camadas coesas de impedimento promovem alterações complexas no estado da água no solo, reduzindo sua disponibilidade às plantas, interferindo no processo de irrigação e em sua frequência e também na quantidade de lâminas de água a serem utilizadas. Os solos coesos ocorrem nos horizontes AB, BA, Bw e Bt, sendo os dois primeiros transicionais (EMBRAPA, 2013).

Stefanoski *et al.* (2013) apresentaram como indicadores primários da qualidade do solo os atributos densidade do solo, resistência do solo à penetração de raízes, agregação (>2 mm), textura, porosidade total, infiltração e condutividade hidráulica saturada.

O manejo do solo coeso requer práticas que reduzam a célere perda da água após o período das chuvas. As propriedades físicas dos solos e os fatores de crescimento das plantas, se arranjos de forma inadequada, podem elevar os custos de produção e resultar na perda da produtividade, sendo esses problemas concretos da cadeia produtiva (CINTRA; PORTELA; NOGUEIRA, 2004).

Na perspectiva de melhorar as propriedades físico-hídricas dos solos, somados às práticas mecânicas, diversos condicionadores orgânicos e químicos são pesquisados, como as macrófitas aquáticas associadas a doses de fósforo (MACHADO *et al.*, 2014) e o gesso agrícola (sulfato de cálcio), subproduto da produção de ácido fosfórico, um condicionador fonte de cálcio e enxofre, corretor de solos sódicos e com potássio elevado (VITTI *et al.*, 2008).

Com relação à matéria orgânica, essa é muito mais relevante na função de condicionador de solo do que como fonte de nutrientes (SILVA, 2015). Somam-se também aos condicionadores as zeólitas, que atuam na retenção de água no solo, sendo classificadas como um grupo de tectosilicatos com 50 tipos de minerais de ocorrência natural (BERNARDI *et al.*, 2009).

Pode-se acrescentar à lista de condicionadores de solo os polímeros, que são alvo de pesquisas desde os anos de 1950. Na década de 1980, por sua vez, houve uma retomada mundial desses estudos, após o surgimento de uma nova geração de polímeros, diferenciados dos pioneiros, que eram fitotóxicos (MORAIS; BOTREL; DIAS, 2001). Os polímeros são macromoléculas de alta massa molar, formadas por monômeros. Esses reagem por adição ou condensação, produzindo polímeros com diferentes propriedades físico-químicas e mecânicas (GONÇALVES; COSTA, 2009).

A poliacrilamida (PAM) é um polímero à base de acrilamida — muito usada como condicionador de solos —, que atua no processo de retenção de água, preservando a umidade por maior tempo e reduzindo, dessa forma, a perda de nutrientes por lixiviação (BALENA, 1998; SANTOS *et al.*, 2009).

No Brasil, poucos são os estudos realizados com aplicação de PAM em solos com horizontes coesos oriundos de Tabuleiros Costeiros no Nordeste. As pesquisas recentes sobre o assunto podem ser encontradas em Almeida (2008), Almeida, Raiane e Almeida (2012), Melo (2013), Andrade (2014) e Marcelo (2015).

É importante compreender o comportamento das propriedades físicas do solo coeso quando ele é manejado com PAM e com essa substância associada a outro condicionador, como o gesso. Um indicador relevante para aferir a qualidade física do solo é o intervalo hídrico ótimo (IHO), por integrar vários indicadores relacionados

ao desenvolvimento das culturas (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

O IHO é eficiente para monitorar a compactação do solo (BEUTLER *et al.*, 2007), e, por este motivo, pode ser aplicado na avaliação de solos coesos.

O IHO constitui-se em um índice que integra fatores relacionados diretamente com o crescimento das plantas, como a porosidade da aeração (PA) — mais adequada quando seus valores são  $\cong 10\%$  —, a água no solo nas tensões entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) e o teor de água no solo, sendo sua resistência à penetração de raízes (RP)  $< 2$  MPa.

A pesquisa teve como principais objetivos avaliar o comportamento físico e físico-hídrico do solo coeso sob o uso de PAM com e sem gesso no ambiente dos Tabuleiros Costeiros. Este estudo partiu da hipótese de que tais condicionadores atenuam o caráter coeso, melhorando o desempenho ambiental desse solo em áreas de Tabuleiros Costeiros e promovendo a recuperação de áreas degradadas pelo manejo agrícola e pelo desmatamento. A qualidade ambiental do solo coeso foi avaliada por meio dos atributos que compõem o IHO: umidade na PA a 10%, umidade na qual a resistência do solo à penetração de raízes é  $< 2$  MPa, umidade na CC, umidade no PMP e densidade do solo.

## OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo avaliar a ação dos condicionadores PAM e gesso em solo coeso

de Tabuleiros Costeiros de Pernambuco por meio do IHO.

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com solo proveniente da Estação Experimental de Itapirema, pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), instalada no município de Goiana (PE), Zona da Mata Norte.

A área foi selecionada com base na melhor representação de solo coeso sob relevo plano (tabuleiro). O local já está bem referenciado, sendo espaço de pesquisas desenvolvidas em solos coesos desde 1960. Após a seleção, foi aberto um perfil em área sob cana-de-açúcar, cultivada há aproximadamente dois anos, tendo o coco como cultura anterior.

Na descrição do perfil, a separação dos horizontes foi realizada conforme Santos *et al.* (2005), seguindo-se a classificação do solo conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2013).

A seleção do horizonte para o estudo foi realizada baseando-se nas características morfológicas do caráter coeso. Escolheu-se o horizonte Bt1, que foi o que apresentou características de máxima coesão, ocorrendo na profundidade entre 48 e 70 cm, sendo o perfil do solo classificado como ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso abrupto.

As amostras foram coletadas em anéis volumétricos de aço 50x50 mm, inseridos em blocos não deformados retirados do horizonte de estudo. Após sua separação

do perfil — feita por meio do serrote, da pá reta e do macaco hidráulico (Figuras 1A e 1B) —, os blocos foram envolvidos em plástico bolha e fixados com fita de empacotamento, tendo sua base e seu topo devidamente identificados e sinalizados; as dimensões obtidas foram 45x45x22 cm — comprimento, largura e altura, respectivamente —, sendo a última correspondente à espessura do horizonte Bt1. Em seguida, os blocos foram acondicionados entre placas de isopor e transportados para o laboratório (Figuras 1C e 1D), diminuindo-se assim a possibilidade de perturbação da estrutura.

No laboratório, os blocos foram engessados — contidos — pelas bordas com ataduras embebidas em solução de gesso com água. Dessa maneira, os blocos mantiveram-se estruturados para suportar a etapa de coletas das amostras de solo com a inserção dos anéis volumétricos. Após a contenção com ataduras, os blocos foram previamente acondicionados em bandejas plásticas forradas com espuma de 20 mm e umedecidos com água destilada (Figura 1E). Nesses blocos, a coleta com anéis volumétricos foi realizada com amostrador tipo Uhland, porém sem o uso do martelo para impactar o anel ao solo. O procedimento contou com o auxílio de um braço mecânico movido por uma engrenagem de tração manual, que ajuda na inserção dos anéis com o mínimo de impacto, preservando a estrutura da amostra dentro do anel (Figura 1F).

As amostras de solo em anéis foram casualizadas e submetidas a três tratamentos:

- T0, realizado apenas com água destilada, representando a testemunha (controle);
- T1, feito com polímero aniônico à base de PAM, com concentração de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ; e
- T2, tratamento a base de PAM ( $100 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , P.A., com concentração de  $1,523 \text{ g L}^{-1}$ ).

O PAM utilizado é produzido pela Cytec com nome comercial “Poliacrilamida Superfloc A-130”; tem alta massa molecular —  $15,0 \text{ Mg mol}^{-1}$  — e 35% de densidade de carga (hidrólise). As quantidades de PAM e gesso utilizadas neste estudo foram baseadas nos trabalhos de Almeida (2008), Melo (2013) e Andrade (2014). Esses autores obtiveram melhor desempenho

dos condicionadores PAM e gesso aplicados em solos coesos sob condições semelhantes ao do solo objeto deste estudo.

Os condicionadores químicos foram aplicados nas amostras contidas nos anéis volumétricos por capilaridade, respeitando a seguinte sequência: os anéis contendo as amostras de solo, sem ter sido feito o toailete, foram postos para secar ao ar; em seguida, foram submetidos aos seus respectivos tratamentos. Para que isso ocorresse, bandejas plásticas foram forradas com espuma de 10 mm de espessura, utilizadas para reduzir o atrito das amostras e manter a superfície de contato úmida — local em que as soluções foram colocadas. Após a saturação da espuma, os anéis foram acondicionados nas bandejas com os respectivos tratamentos, dando início à saturação das amostras por capilaridade.



**Figura 1 – Sequência da amostragem dos solos: separação do bloco do perfil (A e B); acondicionamento do bloco (C, D e E); e inserção dos anéis volumétricos (F).**

O nível da solução elevou-se  $\cong 1$  cm a cada 30 min., chegando até 95% da altura dos anéis volumétricos, preservando essas condições por 48 horas. Passado esse período, os conjuntos anel-amostra saturados com seus respectivos tratamentos foram retirados e postos para secar ao ar, utilizando uma grade suspenso revestida por tela de nylon com malha 1 mm. Em seguida, procedeu-se o toailete das amostras — retirada do excesso de solo contido nas bordas do anel volumétrico.

A curva característica de retenção de água no solo (CCRAS) foi usada para obtenção de umidades em determinadas tensões preestabelecidas, sendo seus valores utilizados na quantificação da distribuição de tamanho de poros — macro, meso, micro e criptoporos.

A construção da CCRAS foi realizada nas amostras contidas nos anéis volumétricos por meio da mesa de tensão (até 10 kPa) — segundo Oliveira (1968) — e das câmaras de Richards (>10 kPa) — conforme metodologia sugerida em Dane e Hopmans (2002).

Após cada equilíbrio da tensão/pressão, as amostras foram pesadas e levadas à estufa (105°C, 24 h), e sua umidade volumétrica calculada conforme a equação (1).

$$\theta_{(\%) } = \frac{\left( \frac{\text{massa de água equilibrada}}{\text{a determinada tensão ou pressão}} \right)}{\text{Densidade da água}} \times 100 \quad (1)$$

Os resultados obtidos a partir da CCRAS foram ajustados por meio da equação (2), proposta por Van Genuchten (1980):

$$\theta_v = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi)^n]^m} \quad (2)$$

onde

$\theta_v$  é a umidade volumétrica atual do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );  
 $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );  
 $\theta_s$  é a umidade volumétrica de saturação do solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); expressa o parâmetro inversamente proporcional ao diâmetro médio dos poros ( $\text{cm}^{-1}$ );

$Y$  é o potencial mátrico aplicado, representado pela tensão que a água está retirada no solo (cca); e “n” e “m” são parâmetros empíricos da equação.

Para calcular o valor de m, utilizou-se a expressão  $m=1 - 1/n$ , para  $n>1$ , conhecida como restrição de Muallen, conforme sugere Van Genuchten (1980).

Os ensaios da RP foram realizados após o equilíbrio de cada tensão/pressão aplicada e seus respectivos pesos, direcionando cada conjunto anel-amostra ao penetrômetro de bancada para a inserção da agulha. Esse instrumento utilizado é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel para controle da velocidade ( $1 \text{ mm s}^{-1}$ ), uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste e uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, contendo na sua extremidade inferior uma haste com agulha de 4 mm de diâmetro de cone, que foi introduzida no solo na direção perpendicular.

Os ensaios de RP foram realizados nas amostras contidas nos anéis volumétricos, submetidas às seguintes tensões de água no solo: 1; 6; 10; 33; 50; 100; 500; 1000 e 1500 kPa.

A determinação da densidade do solo ( $D_s$ ) foi realizada pelo método do anel volumétrico, conforme descrito em Grossman e Reinsch (2002). Nesse procedimento, o solo contido nesses anéis é seco em estufa, a 105°C, até obter peso constante. Com isso, a  $D_s$  pôde ser calculada pela equação (3), apresentada a seguir:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (3)$$

onde

$D_s$  é a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$M_s$  é a massa do solo seco à 105°C; e

$V_s$  é o volume de sólidos, assumido como o volume do anel ( $V_{\text{anel}} = \pi r^2 h$ ).

Após a elaboração das CCRAS e da RP, onde se obtém o valor da umidade volumétrica na CC ( $\theta_{\text{CC à 33 kPa}}$ ) e no PMP ( $\theta_{\text{PMP à 1500 kPa}}$ ), foram estimados o conteúdo de água no solo em que a RP atinge o valor crítico ( $\theta_{\text{RP}}$ ), como também o conteúdo de água no qual a PA é de 10% ( $\theta_{\text{PA à 10\%}}$ ), umidades estas utilizadas na construção do IHO.

Desse modo, na determinação do IHO, realizou-se o ajuste da curva de RP pelo modelo não linear de Busscher (1990), conforme equação (4).

$$RP = a \cdot \theta_v^b \cdot Ds^c \quad (4)$$

onde

RP é a resistência do solo à penetração de raízes;

$\theta_v$  é a umidade volumétrica atual;

Ds é a densidade do solo; e

“a”, “b” e “c” são os parâmetros de ajuste do modelo.

A equação (4) deve ser linearizada, obtendo-se a equação (5), a seguir:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta_v + c \ln Ds \quad (5)$$

A CCRAS, que relaciona a variação de umidades em função dos potenciais mátricos aplicados (Y), foi ajustada conforme modelo não linear utilizado por Silva, Kay e Perfect (1994), na forma de log neperiano, conforme a equação (6):

$$\ln(\theta_v) = d + e \cdot Ds + f \ln |\Psi| \quad (6)$$

Onde

$\theta_v$  é a umidade volumétrica atual;

Ds é a densidade do solo;

$|\Psi|$  é o módulo do potencial mátrico; e

“d”, “e” e “f” são parâmetros de ajuste do modelo.

Uma vez definidos os parâmetros (“a”, “b”, “c”, “d”, “e” e “f”), foram determinados os valores críticos das umidades na CC, no PMP, na PA e na RP, por meio das equações (7), (8), (9) e (10), respectivamente.

$$\theta_{CC} = \exp(d + e \cdot Ds) 0,033^f \quad (7)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(d + e \cdot Ds) 1,5^f \quad (8)$$

$$\theta_{PA} = (1 - Ds/2,61) - 0.1 \quad (9)$$

$$\theta_{RP} = (5,0/a \cdot Ds^c)^{1/b} \quad (10)$$

onde

$\theta_{CC}$  é a umidade volumétrica na capacidade de campo equilibrada no potencial 33 KPa;

$\theta_{PMP}$  é a umidade volumétrica no ponto de murcha permanente para solos equilibrada à 1500 KPa;

$\theta_{PA}$  é a umidade volumétrica em que a PA é igual a 10%, e o valor 2,65 é a densidade de partícula (Dp) assumida ( $g \cdot cm^{-3}$ ); e

$\theta_{RP}$  é a umidade volumétrica na qual a resistência do solo à penetração de raízes atinge o valor de 5,0 MPa (que nesse estudo foi considerado valor crítico).

O IHO pode ser calculado considerando quatro possibilidades — conforme os valores das equações (11), (12), (13) e (14), como sugerem Wu *et al.* (2003) e Leão *et al.* (2004).

Se ( $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$ ), a equação empregada será:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (11)$$

Se ( $\theta_{PA} \geq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$ ), a equação empregada será:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP} \quad (12)$$

Se ( $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$ ), a equação empregada será:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP} \quad (13)$$

Se ( $\theta_{PA} \leq \theta_{CC}$ ) e ( $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$ ), a equação empregada será:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP} \quad (14)$$

Nos ensaios utilizou-se o delineamento em blocos casualizados. Foram realizadas quatro repetições por tratamento, totalizando 108 unidades — 9 tensões x

4 repetições x 3 tratamentos. As médias dos parâmetros físicos analisados foram submetidas à análise de variância (ANOVA), e aos parâmetros que apresenta-

ram diferenças significativas foi aplicado o teste de Tukey, por meio do aplicativo Statistical Analysis System (SAS) (1996).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os limites para formar o diagrama representativo do IHO foram a umidade volumétrica na CC ( $\theta_{cc}$ ) e a umidade volumétrica na qual a RP atingiu 5 MPa ( $\theta_{RP \text{ à } 5MPa}$ ). Os diagramas representativos do IHO para o solo sob tratamentos, onde umidades acima ou abaixo da área hachurada indicam condições limitantes ao crescimento de plantas e críticas ao seu desenvolvimento, quando a densidade do solo estiver acima do valor onde o IHO é nulo — isto é, densidade do solo crítica ( $Ds_c$ ) —, estão representados pelas setas em vermelho na Figura 2.

Observa-se, nos diagramas, duas retas para a RP: uma usando o limite de 2 MPa e a outra adotando 5 MPa. Por ser coeso, o solo já apresenta altos valores de RP, mesmo quando esse está praticamente saturado, onde os valores já atingem 2 MPa, o que impossibilita a construção da área que representa o IHO. Nessas condições, a  $\theta_{RP}$  ficou acima da  $\theta_{cc}$ ; portanto, só foi possível a construção do IHO quando os valores de  $\theta_{PR}$  foram 5 MPa. Dessa forma, a RP que melhor se ajustou para a condição do solo coeso em estudo, permitindo traçar as retas no diagrama do IHO, foi o valor de 5 MPa.

Esses altos valores de  $\theta_{PR}$  comprovam que os solos coesos em estudo apresentam uma elevada degradação, com baixa qualidade ambiental. Com relação a isso, Araújo, Tormena e Silva (2004) comentam que um solo em condição de degradação apresenta redução da disponibilidade de água para as plantas, tendo a taxa de difusão de oxigênio e a RP como fatores limitantes ao desenvolvimento delas, mesmo na faixa de potenciais em que há água disponível no solo.

Dias (2012), estudando a disponibilidade de água e sua relação com valores de RP em um latossolo amarelo coeso de Tabuleiro Costeiro do Recôncavo da Bahia sob pastagem, encontrou elevada  $Ds_c$  e faixa bastante estreita de IHO, com densidade crítica ( $Ds_c$ ) próxima a  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ . Naquela situação, o autor observou o início da transição da faixa da RP sobrepondo a umidade na CC, tendo como valor limitante a RP a 2 MPa.

Altos valores de RP não é um fato exclusivo de solos coesos, pois alguns autores relatam valores críticos bem acima dos tradicionais 2,0 MPa usados, como os observados por Ehlers *et al.* (1983) e Sine *et al.* (1985), onde considerou-se valores de até 7,0 MPa.

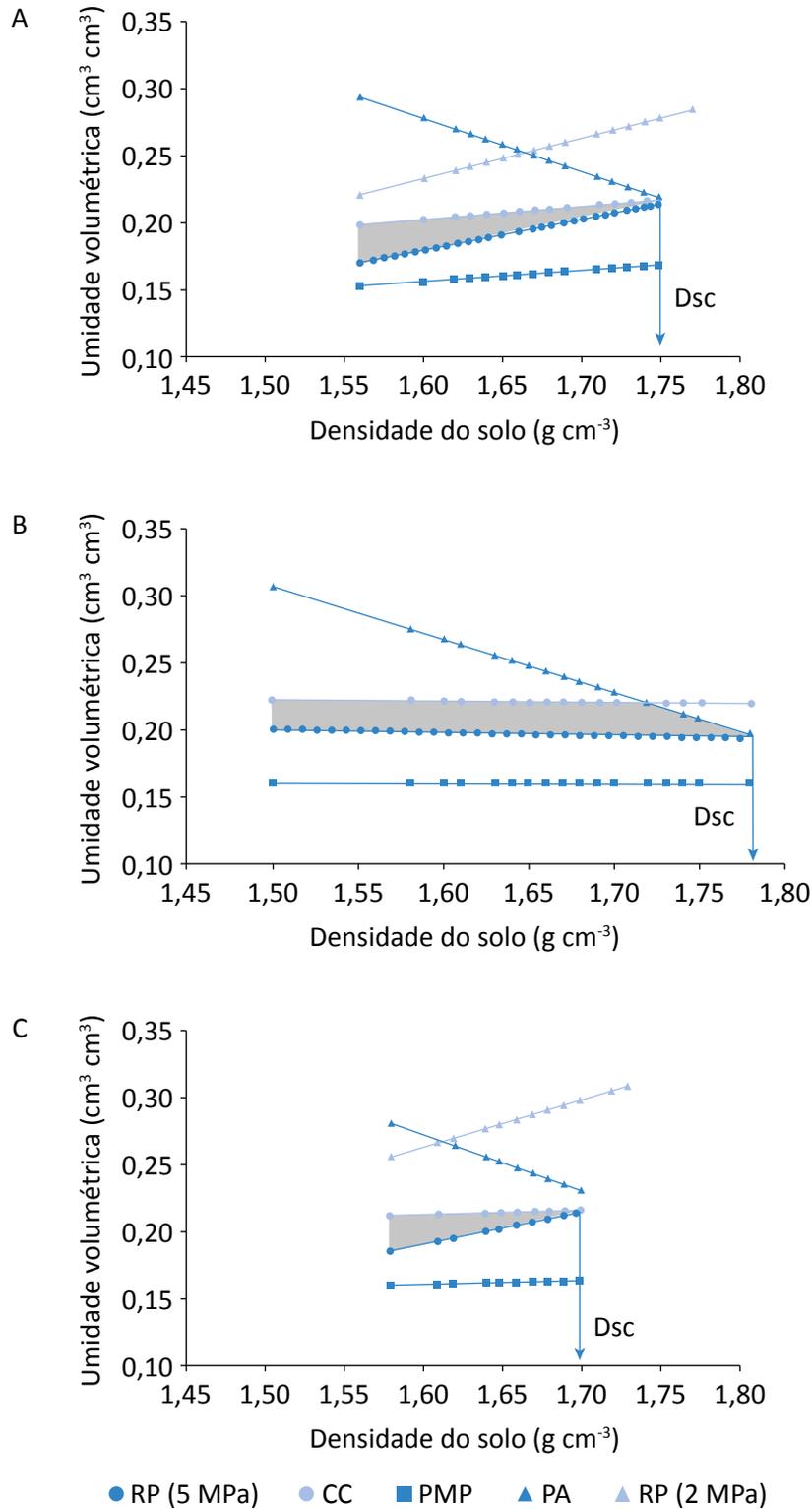
Nesse contexto, o uso do IHO para avaliação da qualidade física e estrutural do solo é um indicador que integra o efeito do potencial matricial, da PA e da RP em um único atributo, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao crescimento das plantas (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

Conforme Tormena, Silva e Libardi (1998), estabelecer limitantes de propriedades físicas do solo é complexo, porque envolve a necessidade de integrar variáveis relacionadas ao solo, ao clima e à planta. Do ponto de vista da qualidade do solo, o IHO mostrou-se mais elucidativo que a  $Ds_c$ , pois discutir apenas o seu alto valor — no caso  $1,70 \text{ g cm}^{-3}$  — levaria a diagnosticar limitações do solo apenas pela sua alta compactação, o que, na realidade, não é a maior restrição desse tipo de solo.

Desse modo, apesar do solo em estudo ser coeso, com alta  $Ds_c$  ( $1,70 \text{ g cm}^{-3}$ ), essa não é a condição mais limitante ao crescimento da planta, já que a  $Ds_c$  ficou acima desse valor — isto é,  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$  — no controle (T0) (Figura 2A). A partir da  $Ds_c$  em que o IHO for igual a zero, estabelece-se as condições de elevada restrição de crescimento radicular (TORMENA, 1999).

Nesse cenário, a adição de polímero (PAM) ao solo em estudo teve um resultado positivo, reduzindo sua coesão, comprovada pelo aumento da amplitude da  $Ds_c$ , passando de  $1,75$  (T0) para  $1,78 \text{ g cm}^{-3}$  (T1), o mesmo não ocorrendo com o T2 (Tabela 1).

Desse modo, os valores dos IHO evidenciam que o tratamento T1 (PAM) foi mais eficiente que o T2 (PAM + gesso) quando comparados ao T0 (controle), com maior disponibilidade de água às plantas. Logo, IHO T1 > IHO T0 > IHO T2.



RP: resistência do solo à penetração de raízes; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; PA: porosidade da aeração; Dsc: densidade crítica.

**Figura 2 – Diagramas do intervalo hídrico ótimo para os três tipos de tratamentos: controle – T0 (A); poliacrilamida – T1 (B); e poliacrilamida associada ao gesso – T2 (C).**

Assim, do ponto de vista dos valores de IHO, quando da aplicação do PAM ao solo coeso, suas condições físico-hídricas foram melhoradas, apresentando maior quantidade de água disponível (área hachurada) — conforme apresentado na Figura 2B (T1) —, indicando melhoria na qualidade desse solo — superior quando comparada à Figura 2A (T0).

Esse resultado concorda com Dias (2012), que, avaliando solos coesos pela ferramenta IHO, concluiu que o controle da qualidade física desses solos depende da conservação da água no perfil e na redução da RP.

Embora os limites superior e inferior do IHO tenham sido, respectivamente, CC e RP à 5MPa — sendo esses limites indicadores dos valores críticos de Ds e disponibilidade de água (SILVA & KAY, 1997) —, a aplicação do PAM modificou essa condição, alterando o limite superior (CC) a partir da Ds de 1,72 g cm<sup>-3</sup>, passando a ser limitado pela PA.

Esse fato significa que, acima dessa Ds, há uma redução nos tamanhos dos poros, promovendo redução dos espaços vazios, e, conseqüentemente, a diminuição de oxigênio aos processos metabólicos da planta (LAPEN *et al.*, 2004). Essa redução será máxima quando a Ds atingir 1,78 g cm<sup>-3</sup>, valor da Ds<sub>c</sub> para o solo coeso sob tratamento T1.

Com relação ao tratamento de PAM com gesso (T2, Figura 2C), os resultados comprovam que essa combinação não foi favorável ao aumento da disponibilidade de água, diminuindo-a quando comparada aos

demais tratamentos. Nesse caso, ao contrário do que se observa com os coesos da Austrália (*hardsetting*), país pioneiro no uso de PAM para redução de coesão (ALMEIDA, 2008), a ação da PAM aplicada isoladamente foi melhor quando comparada ao tratamento combinado (PAM + gesso).

De fato, alguns autores comentam em suas pesquisas que o gesso tem um papel fundamental na aplicação de PAM ao solo via sistema de irrigação, pois reduz a alta viscosidade desse polímero (YU *et al.*, 2003; MAMEDOV *et al.*, 2009). Entretanto, é importante ressaltar que, no caso dos *hardsetting* da Austrália, esses solos, além dos problemas da coesão, apresentam também o caráter salino, diferente dos coesos do Brasil, ácidos com pH, em água, normalmente entre 4,0 e 5,0 (GIAROLA & SILVA, 2002). Esse fato pode explicar o motivo da resposta negativa do tratamento com PAM + gesso, não sendo recomendado seu uso nos solos coesos do Brasil, já que não há a presença de sais o suficiente para classificá-los como *hardsetting*.

Nesse estudo, os parâmetros utilizados para as variáveis físico-hídricas do solo — RP, Ds e  $\theta_v$  — sob os respectivos tratamentos — T0, T1 e T2 — na determinação do IHO estão na Tabela 2.

Os parâmetros resultantes da regressão linear referentes aos tratamentos (T0, T1 e T2) para RP e v) empregados nos ajustes empíricos da equação estão nas Tabelas 3 e 4.

**Tabela 1 – Parâmetros do intervalo hídrico ótimo do solo coeso sob ação dos tratamentos.**

Tratamento	Limites do IHO (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )				Amplitude dos atributos			
	Superior		Inferior		Ds (g cm <sup>-3</sup> )		IHO (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	
	$\theta_{cc}$		$\theta_{RP} (\text{à } 5 \text{ MPa})$					
	mínima	Máxima	Mínima	máxima	Mínima	Máxima	mínima	máxima
T0	0,210	0,220	0,170	0,210	1,560	1,750	0,010	0,040
T1	0,220	0,220	0,196	0,200	1,500	1,780	0,020	0,024
T2	0,207	0,212	0,180	0,210	1,580	1,700	0,002	0,027

IHO: intervalo hídrico ótimo;  $\theta_{cc}$ : umidade volumétrica na capacidade de campo;  $\theta_{RP} (\text{à } 5 \text{ MPa})$ : umidade volumétrica na qual a resistência do solo à penetração de raízes atingiu 5 MPa; Ds: densidade do solo; T0: tratamento com água destilada; T1: tratamento com polímero aniônico à base de poliácrlamida; T2: tratamento a base de poliácrlamida e gesso.

**Tabela 2 – Distribuição estatística dos parâmetros utilizados como variáveis físico-hídricas dos solos sob tratamento.**

Variável	Média	Desvio-padrão	CV	Mínimo	Máximo
<b>Tratamento – T0</b>					
RP	5,556	5,995	89,902	1,070	15,790
Ds	1,677	0,048	2,841	1,560	1,774
$\theta_v$	0,212	0,043	20,393	0,145	0,301
<b>Tratamento – T1</b>					
RP	5,415	4,650	85,889	1,300	15,000
Ds	1,693	0,076	4,522	1,505	1,933
$\theta_v$	0,213	0,042	19,897	0,148	0,298
<b>Tratamento – T2</b>					
RP	5,836	4,821	82,597	1,410	15,600
Ds	1,672	0,034	2,031	1,585	1,726
$\theta_v$	0,205	0,038	18,706	0,136	0,283

CV: coeficiente de variação; RP: resistência do solo à penetração de raízes; Ds: densidade do solo;  $\theta_v$ : umidade volumétrica atual; T0: tratamento com água destilada; T1: tratamento com polímero aniônico à base de poliacrilamida; T2: tratamento a base de poliacrilamida e gesso.

**Tabela 3 – Parâmetros resultantes da regressão linear para ajustes dos valores de resistência do solo à penetração de raízes.**

Coeficiente		Erro padrão	F	Probabilidade
<b>Tratamento – T0</b>				
A	0,000472	0,000589	97,32	<.0001
B	-3,504000	0,402700		
C	6,904500	1,893200		
<b>Tratamento – T1</b>				
A	0,010500	0,996000	108,50	<.0001
B	-4,028800	0,328000		
C	-0,662600	1,461000		
<b>Tratamento – T2</b>				
A	0,003160	0,008290	61,34	<.0001
B	-2,810400	0,431700		
C	5,634300	4,695500		

T0: tratamento com água destilada; T1: tratamento com polímero aniônico à base de poliacrilamida; T2: tratamento a base de poliacrilamida e gesso.

**Tabela 4 – Parâmetros resultantes da regressão linear para ajustes dos valores da umidade volumétrica atual.**

Coeficiente		Erro padrão	F	Probabilidade
<b>Tratamento – T0</b>				
D	-26788	0,55130	1621,72	<.0001
E	0,5277	0,33220		
F	-0,0661	0,00572		
<b>Tratamento – T1</b>				
D	4,6011	5,36670	8,20	0,0003
E	-3,6319	3,30100		
F	-0,0679	0,09720		
<b>Tratamento – T2</b>				
D	-2,1274	0,61400	1910,21	>.0001
E	0,1976	0,36830		
F	-0,0703	0,00575		

T0: tratamento com água destilada; T1: tratamento com polímero aniônico à base de poliacrilamida; T2: tratamento a base de poliacrilamida e gesso.

## CONCLUSÕES

Os valores do IHO comprovam a eficiência desse atributo em avaliar a resiliência dos solos coesos sob tratamento com polímero em relação à disponibilidade de água para as plantas. O estudo também evidenciou que apenas o tratamento T1 com PAM aumentou a disponibilidade de água às plantas e que o valor crítico da RP para avaliar o IHO de solo coeso está acima de 2 MPa.

Embora os resultados sejam iniciais, considerando a complexidade e extensão do tema, o uso de

polímeros poderá contribuir na redução dos impactos ambientais da agricultura sob as faixas restritas ou os fragmentos restantes de mata atlântica, ainda presentes nos Tabuleiros Costeiros, quer pela elevação da produção — restringindo a necessidade de ampliação das áreas de cultivo —, quer pelas ações de reflorestamento — devido à ampliação da disponibilidade de água dos solos às plantas quando da adição de PAM.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, B. G. *Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo*. 105p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ALMEIDA, B. G.; RAIANE, S.; ALMEIDA, C. D. C. Uso de condicionadores químicos na redução da coesão de um solo *hardsetting* da Austrália. In: WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO E INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 4., 2012, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: INOVAGRI, 2012.

ANDRADE, K. R. *Atributos físico-hídricos de solos coesos da zona da mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos*. 115f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 337-345, 2004.

ARAÚJO, Q. R. *Solos de tabuleiros costeiros e qualidade de vida das populações*. Ilhéus: Editus, 2000. 97p.

BERNARDI, A. C. C.; MENDONÇA, F. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; MONTE, M. B. M. Disponibilidade de água e produção de arroz em função das doses de concentrado zeolítico. *Irriga*, v. 14, n. 2, p. 123-134, 2009.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; JOÃO, A. C. G. S.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, p. 1223-1232, 2007.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

CINTRA, F. L. D.; PORTELA, J. C.; NOGUEIRA, L. C. Caracterização física e hídrica em solos dos Tabuleiros Costeiros no Distrito de Irrigação Platô de Neópolis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 8, n. 1, p. 45-50, 2004.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). *Methods of soil analysis: Part 4 – physical methods*. Madison: American Society of America, 2002. p. 671-720.

DIAS, C. B. *Propriedades físicas e intervalo hídrico ótimo de um latossolo amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro*. 42f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil e Tillage Research*, v. 3, p. 261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros. *Plano diretor do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros (CPATC)*. Brasília: EMBRAPA, SPI, 1994. 37p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013. 353p.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e *hardsetting*. *Scientia Agrícola*, v. 59, n. 3, p. 613-620, 2002.

GONÇALVES, I. D. T. F.; COSTA, I. C. Aplicação de polímero superabsorvente para proteção de encostas de barreiras. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., Belém, 2009. *Anais...* Belém, 2009.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Eds.). *Methods of soil analysis: physical methods*. Madison: Soil Science of Society of America, 2002. p. 201-228.

JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos do Brasil. In: CINTRA, F. L. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. *Anais...* Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p. 161-168.

LAPEN, D. R.; TOPP, G. C.; GREGORICH, E. G.; CURNOE, W. E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil & Tillage Research*, v. 78, p. 151-170, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 415-422, 2004.

- LEPSCH, I. F. *Formação e conservação dos solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 177p.
- MACHADO, K. S.; MALTONI, K. L.; Montibeller, C. S.; Cassiolato, A. M. R. Resíduos orgânicos e fósforo como condicionantes de solo degradado e efeitos sobre o crescimento inicial de *Dipteryx alata Vog*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 541-552, 2014.
- MAMEDOV, A. I.; SHAINBERG, I.; WAGNER, L. E.; WARRINGTON, D. N.; LEVY, G. J. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM, of two molecular weights, and phosphogypsum. *Australian Journal of Soil Research*, v. 47, n. 8, p. 788-795, 2009.
- MARCELO, V. F. *Manejo da qualidade física de solo coesos em tabuleiro costeiro de Pernambuco*. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.
- MELO, D. V. M. *Qualidade de solos coesos dos Tabuleiros Costeiros de Pernambuco em função do uso de poliacrilamida*. 75 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.
- MORAIS, O.; BOTREL, T. A.; DIAS, C. T. S. Efeito do uso de polímeros hidroretentores no solo sobre o intervalo de irrigação na cultura da alface (*lactuca sativa L.*). *Engenharia Rural*, v. 12, p. 73-80, 2001.
- OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 3, p. 197-200, 1968.
- RIBEIRO, L. P. *Primeiras avaliações sobre a gênese dos solos coesos da região de Cruz das Almas-BA*. Salvador: UFBA, 1991. 22p.
- SANTOS, F. L.; CASTANHEIRA, N. L.; MARTINS, O. C.; REIS, J. L. Control with anionic polyacrylamide of runoff and erosion induced by irrigation on Alentejo soils: surface and sprinkler irrigation (center pivot). *Revista de Ciências Agrárias*, v. 32, n. 1, p. 344-359, 2009.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005.
- SENE, M.; VEPRASKAS, M. J.; NADERMAN, G. C.; DENTON, H. P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 49, p. 422-427, 1985.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 877-883, 1997.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, J. *Adução orgânica*. EMBRAPA/AGEITEC, 2015. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/pimenta/arvore/CONT000gn0k9bxa02wx5ok0liq1mq28xtscp.html>>. Acesso em: 15 fev. 2015.
- SOBRAL, L. F.; IVO, W. M. P. M.; RANGEL, J. H. A.; CINTRA, F. L. D. Avaliação crítica da história de uso dos solos nos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil. In: ARAÚJO, Q. R. (Org.). *500 Anos de uso do solo no Brasil*. Ilhéus: Editus, 2002. 605 p.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE – SAS. *SAS/STAT: User’s guide*, version 6.11. 4. ed. Cary, 1996. v. 2. 842 p.
- STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, n. 12, 2013.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

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, n. 4, p. 573-581, 1998.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, set./out. 1980.

VITTI, C. G.; LUIZ, P. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. *Uso do gesso em sistemas de produção agrícola*. Piracicaba: GAPE, 2008.

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

YU, J.; LEI, T.; SHAINBERG, I.; MAMEDOV, A. I.; LEVY, G. J. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, p. 630-636, 2003.