

## REGRESSÃO QUADRÁTICA PARA TEORES DE ÁGUA EM FUNÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

**BARBARA BARRETO FERNANDES<sup>1</sup>; INDIAMARA MARASCA<sup>2</sup>; MURILO<sup>3</sup>  
BATTISTUZZI MARTINS; JEFFERSON SANDI<sup>4</sup> E KLEBER PEREIRA LANÇAS<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> Engenheira agrônoma, Rua Luis Carlos Da Silveira, 345, Tennis Clube, 19806-370, Assis – SP, Brasil. E-mail: babarretof@hotmail.com

<sup>2</sup> Engenheira agrônoma, Fazenda Cachoeira do Montividiu – 75915-000, Montividiu – GO, Brasil. E-mail: marasca\_7@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul – Unidade de Cassilândia. Rodovia MS 306 - km 6,4; 79540-000, Cassilândia, MS, Brasil. E-mail: mbm\_martins@hotmail.com

<sup>4</sup> Universidade La Salle de Lucas do Rio Verde. Av. Universitária, 1000, Parque das Emas - 78455-000, Lucas do Rio Verde, MT, Brasil. E-mail: jffsandi@gmail.com

<sup>5</sup> Departamento de Engenharia Rural na FCA/UNESP, Av. Universitária, 3780 - Altos do Paraíso, 18610-034, Botucatu, SP, Brasil. E-mail: kp.lancas@unesp.br

### 1 RESUMO

O trabalho teve por objetivo avaliar a influência do teor de água na avaliação de resistência mecânica a penetração do solo, medida através do índice de cone. O experimento foi realizado na UNESP/FCA, Botucatu/SP, sendo selecionadas duas classes de solo, o Nitossolo Vermelho distroférico e o Latossolo Vermelho. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, com os seguintes tratamentos de compactação: T0 = 0; T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4=5 e T5 = 10 passadas consecutivas de um trator agrícola. Utilizou-se um penetrômetro hidráulico-eletrônico para a amostragem da resistência mecânica do solo à penetração nas camadas de 0,00 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,30; 0,30 - 0,40 m em quatro condições de teor de água. Com o aumento do tráfego, maior foi a compactação. Porém para o solo argiloso, a partir de uma passada do trator, os valores de resistência à penetração tiveram reduzido aumento, não diferindo estatisticamente para a camada mais superficial (0-0,20 m) e para a camada de 0,20-0,40 m a partir de duas passadas. Para o solo de textura média, isto aconteceu a partir de uma passada para a camada mais superficial (0-0,20 m) e de cinco passadas para a camada de 0,20-0,40m.

**Palavras-chave:** resistência do solo, umidade, agregação.

**FERNANDES, B. B.; MARASCA, I.; MARTINS, M. B.; SANDI, J.; LANÇAS, K. P.  
QUADRATIC REGRESSION FOR WATER CONTENTS IN THE FUNCTION OF  
SOIL COMPACTION**

### 2 ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the influence of water content in the evaluation of mechanical resistance to soil penetration measured through the cone index. The experiment was carried out at UNESP / FCA, Botucatu / SP, being selected two classes of soil: a Nitossolo Vermelho distroférico and a Latossolo Vermelho. A completely randomized design was used, with the following compaction treatments: T0 = 0; T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4 = 5

and T5 = 10 consecutive passes of an agricultural tractor. A hydraulic-electronic penetrometer was used to sample the mechanical resistance of the soil to penetrate the layers; 0.00 – 0.10; 0.10 - 0.20; 0.20 - 0.30; 0.30 - 0.40 m in 4 water content conditions. With the increase in traffic, greater was the compression. However, for the clayey soil, from a tractor pass, the penetration resistance values had a small increase, not differing statistically for the most superficial layer (0 - 0.20m) and for the 0.20 - 0.40m layer from two passes. For medium textured soil, this happened from one pass to the most superficial layer (0 - 0.20m) and five passes to the 0.20 - 0.40m layer.

**Keywords:** soil resistance; moisture; aggregation.

### 3 INTRODUÇÃO

O aumento do tamanho e da carga das máquinas agrícolas, associado ao reduzido tempo de realização das atividades agrícolas, tem levado os agricultores a realizar atividades agrícolas sem respeitar as condições ideais de umidade do solo, resultando na compactação do solo (TREIN; MACHADO; LEVIEN, 2009).

A compactação do solo devido ao manejo inadequado pode resultar em erosão do solo, sendo considerada uma das principais causas da degradação ambiental (TRETIN et al., 2018).

Rossetti e Centurion (2017) apontam que o tipo de solo também influencia diretamente na sua susceptibilidade à compactação, sendo resultado dos estudos, a conclusão de que o Latossolo Vermelho Distrófico é mais suscetível à compactação do que o Latossolo Vermelho Eutrófico, independente das pressões exercidas pelos tratores estudados, em razão dos baixos valores de umidade crítica de compactação.

Assim, sabendo-se que a compactação ocorre com maior ou menor severidade em locais manejados com auxílio da mecanização, é interessante utilizar meios que possam identificar a presença de camadas de solo compactadas e qual a sua profundidade. A resistência do solo à penetração medida através do uso de penetrômetro, é capaz de quantificar a força contrária exercida pelo solo em função da penetração de uma ponta metálica cônica e

padronizada que busca simular a resistência que o solo oferece à penetração das raízes (MOLIN; DIAS; CARBONERA, 2012; LIMA; LEON; SILVA, 2013). Porém ao se utilizar este tipo de equipamento é necessário cuidado pois segundo Ferrari et al. (2018), a umidade do solo influencia diretamente na resistência do solo das camadas superficiais.

A água no solo apresenta papel de destaque como lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas do solo, quando se aplicam forças sobre este, auxiliando seu adensamento. Porém os repetidos ciclos de contração e expansão do solo causados pela água, combinado com a ausência de forças externas, podem gradativamente diminuir a densidade do solo e, assim, reverter o processo de compactação, recuperando a estrutura de solos compactados (GUBIANI et al., 2015).

Torres et al. (2015) não constataram a presença de compactação do solo em superfície, porém encontraram faixas compactadas com índices acima de 2 MPa, na profundidade entre 0,30-0,40 m, em todos os tratamentos avaliados. Este tipo de cenário é indesejado pelos agricultores, pois a descompactação do solo em maior profundidade apresenta elevado custo operacional devido à elevada demanda energética (CORTEZ, 2013).

O trabalho teve por objetivo avaliar a influência do teor de água na avaliação de resistência mecânica à penetração do solo medida através do índice de cone.

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em duas áreas, sendo a primeira denominada como “Solo 1” e “Solo 2” na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas, localizada no município de Botucatu, no estado de São Paulo.

O Solo 1 foi classificado como Nitossolo Vermelho distroférrico (NVD) de textura argilosa, com 50 % de teor de argila e o Solo 2 foi classificado segundo a Classificação de Solos da Embrapa (2013), como Latossolo Vermelho (LV), com textura média, teores de argila entre 15 a 35 % e elevado grau de intemperização conforme os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (2013). Ambos os solos permaneceram em pousio durante os dois anos antecedentes.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, sendo os tratamentos de compactação realizados após o preparo do solo, em parcelas de 150 m<sup>2</sup> (5x30 m), quando o teor de água do solo estava próximo à capacidade de campo (2 dias após a chuva). Os tratamentos foram constituídos de acordo com a intensidade do tráfego: T0 = controle (sem passada do trator); T1 = 1; T2 = 2; T3 = 3; T4 = 5 e T5 = 10 passadas consecutivas do trator, em movimento unidirecional, no mesmo local.

Na primeira avaliação de resistência à penetração o solo encontrava-se com teor de água de 23,5%, a segunda com 17,07%, a terceira com 21,53% e a quarta com 19,14% de teor de água.

As amostragens de resistência do solo à penetração (RP) foram coletadas com

o auxílio de um penetrômetro hidráulico-eletrônico AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (2012), montado na Unidade Móvel de Amostragem do Solo (UMAS) desenvolvida pelo NEMPA, Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrícolas conforme descrito por Lanças e Santos Filho (1998).

Sendo analisadas as duas áreas (solo argiloso e solo de textura média) em função do teor de água do solo em diferentes profundidades de amostragem (0,00 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,30; 0,30 - 0,40 m) (EMBRAPA, 1997).

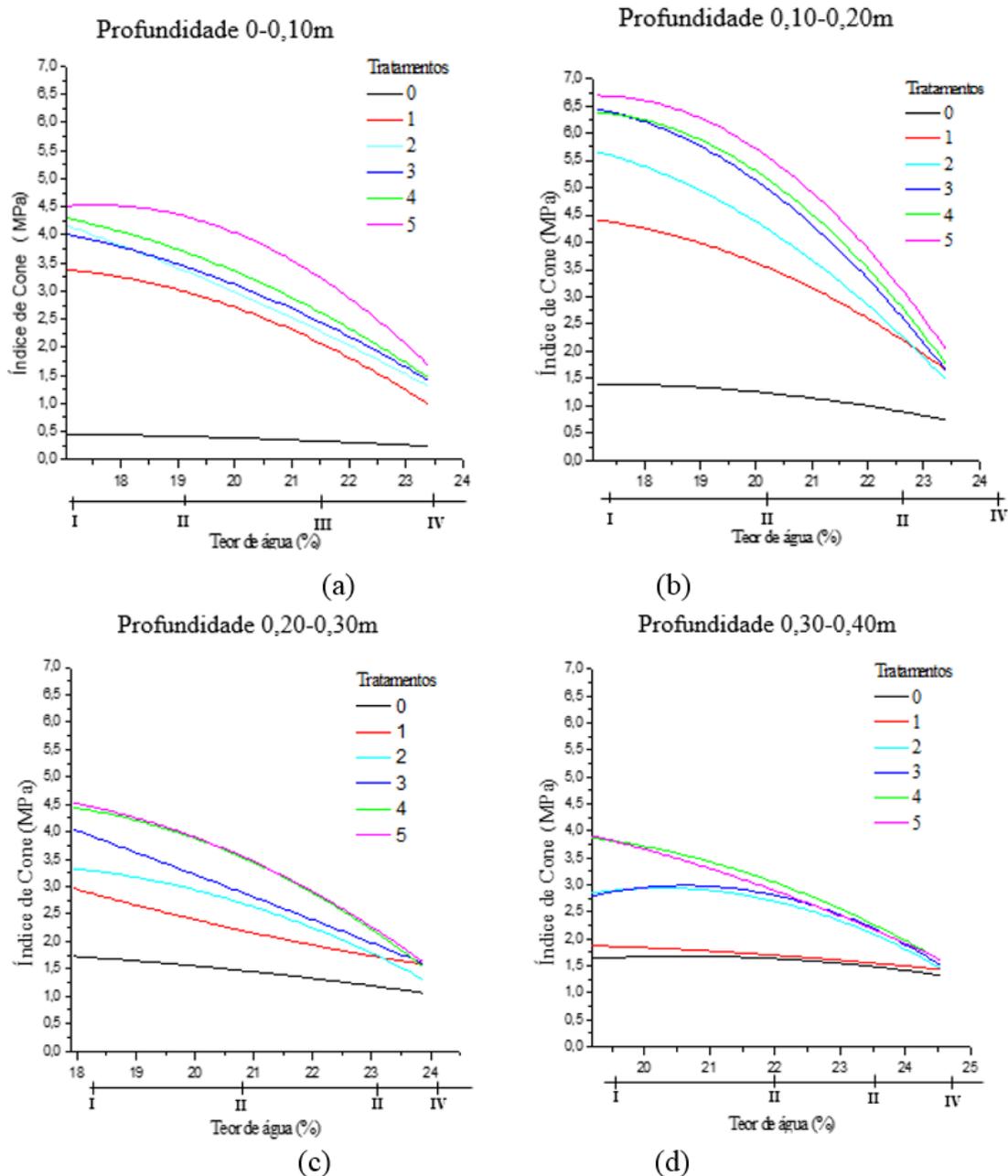
Os dados foram tabulados e submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa estatístico “MINITAB”, versão 16.0 (MINITAB, 2010). Na análise de variância, o Minitab separa as somas dos quadrados sequenciais em diferentes componentes que descrevem a variação devida a diferentes fontes. A soma dos quadrados sequencial para o modelo é a diferença entre a soma dos quadrados total e a soma dos quadrados dos erros. Ele é a soma de todas as somas dos quadrados para termos nos modelos propostos.

#### 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As regressões foram realizadas para avaliar o comportamento do IC (índice de cone) em função da variação do teor de água no solo. Os ajustes polinomiais de segunda ordem, do teor de água (%) e IC (MPa) do solo, em função do número de passadas do trator, nas profundidades 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, estão representados na nas Figuras 1 (Solo 1) e 2 (Solo 2).

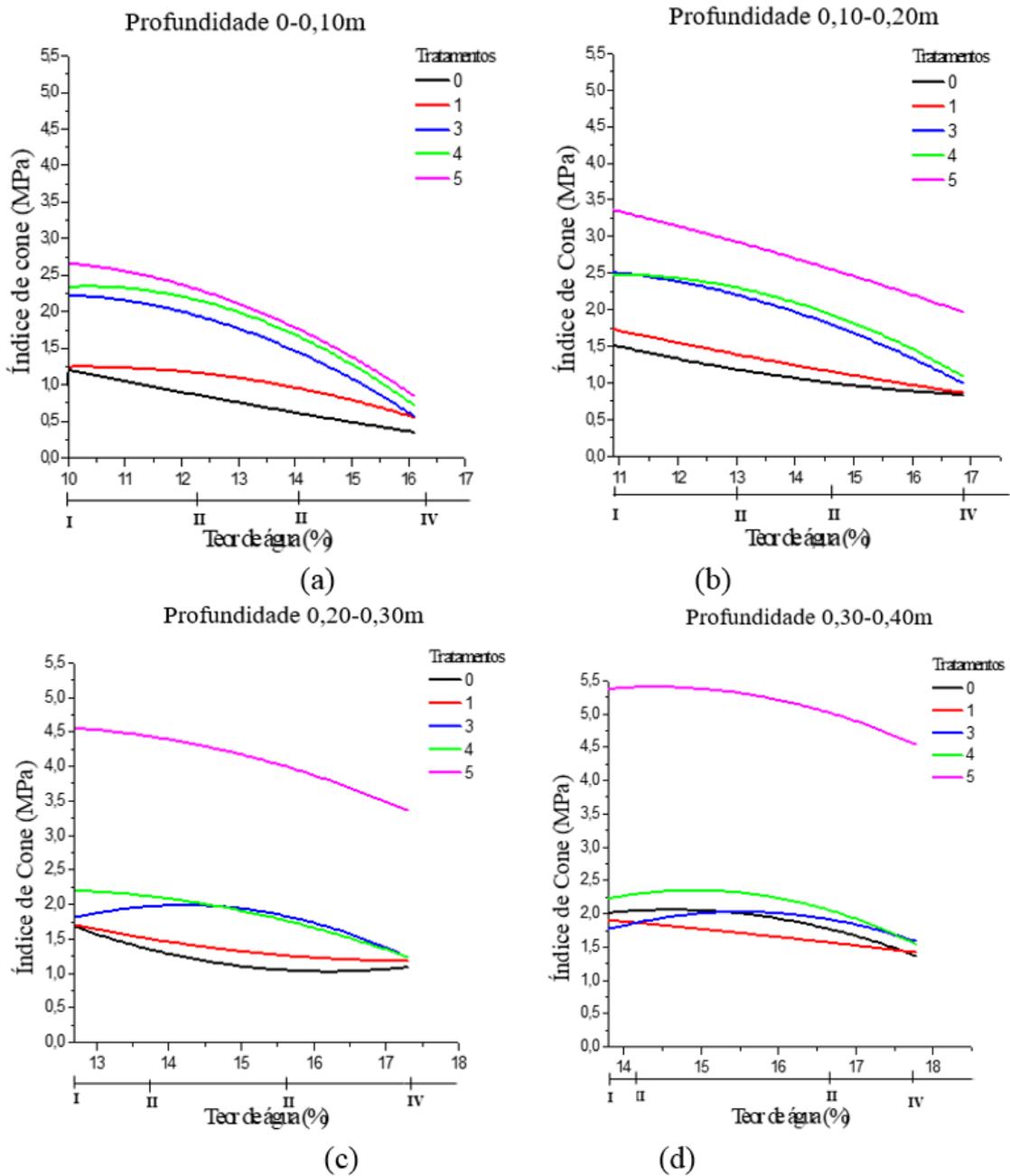
**Figura 1.** Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as

profundidades de 0-0,10 (a); 0,10-0,20 (b); 0,20-0,30 (c) e 0,30-0,40 (d) m do Solo 1.



Os Algarismos I, II, III e IV são referentes às diferentes amostragens de IC.

**Figura 2.** Regressão quadrática das diferentes amostragens de IC x Teor de água para as profundidades de 0-0,10 (a), 0,10-0,20 (b), 0,20-0,30 (c) e 0,30-0,40 (d) m do Solo 2.



Os algarismos I, II, III e IV são referentes às diferentes amostragens de IC (2017).

As equações das regressões representaram a variação da resistência à penetração em função do teor de água do

solo para os diferentes tratamentos e profundidades estando apresentadas nas Tabela 1 (Solo 1) e 2 (Solo 2).

**Tabela 1.** Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m para Solo 1

Camadas (m)	Tratamento	Função	R <sup>2</sup> (%)
	0	IC: $-0,31237 + 0,10264U - 0,00338U^2$	47,95

0-0,10	1	IC: $-7,83477 + 1,41251U - 0,04427U^2$	87,39
	2	IC: $6,05424 + 0,13735U - 0,01456U^2$	78,15
	3	IC: $-1,27879 + 0,8367U - 0,03086U^2$	68,8
	4	IC: $-2,83348 + 1,04844U - 0,03698U^2$	75,87
	5	IC: $-21,44113 + 2,95688U - 0,08415U^2$	69,45
0,10-0,20	0	IC: $-3,09329 + 0,53316U - 0,01579U^2$	45,81
	1	IC: $-7,33028 + 1,50836U - 0,04805U^2$	78,33
	2	IC: $-8,31406 + 1,90357U - 0,06347U^2$	76,89
	3	IC: $-16,80766 + 2,91349U - 0,09083U^2$	87,19
	4	IC: $-23,41032 + 3,55154U - 0,1058U^2$	83,42
0,20-0,30	5	IC: $-27,75573 + 4,02649U - 0,11766U^2$	86,78
	0	IC: $0,69422 + 0,18565U - 0,00714U^2$	45,76
	1	IC: $11,7922 - 0,68711U + 0,01086U^2$	58,76
	2	IC: $-7,09111 + 1,2726U - 0,03856U^2$	57,04
	3	IC: $10,113 - 0,28405U - 0,00304U^2$	80
0,30-0,40	4	IC: $-10,57885 + 1,83247U - 0,05549U^2$	73,31
	5	IC: $-7,17661 + 1,5091U - 0,04777U^2$	68,08
	0	IC: $-7,95871 + 0,93538U - 0,02271U^2$	10,48
	1	IC: $-0,13233 + 0,25096U - 0,00763U^2$	20,97
	2	IC: $-30,39873 + 3,29243U - 0,08129U^2$	43,00
0,30-0,40	3	IC: $-37,75024 + 3,95219U - 0,09586U^2$	55,5
	4	IC: $-11,92302 + 1,79815U - 0,05083U^2$	56,53
	5	IC: $-0,07385 + 0,70751U - 0,02605U^2$	67,67

**Tabela 2.** Funções estimadas por tratamento na profundidade 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m para solo 2

Camada (m)	Tratamento	Função	R <sup>2</sup> (%)
0-0,10	0	IC: $3,1255 - 0,22392U + 0,00318U^2$	57,05
	1	IC: $-0,87411 + 0,41141U - 0,02004U^2$	65,75
	3	IC: $-1,31098 + 0,74005U - 0,03868U^2$	74,13
	4	IC: $-2,92306 + 1,01514U - 0,04897U^2$	83,9
	5	IC: $-0,36856 + 0,67382U - 0,03712U^2$	66,34
0,10-0,20	0	IC: $4,84987 - 0,43034U + 0,0114U^2$	48,75
	1	IC: $4,17342 - 0,27445U + 0,00464U^2$	52,25
	3	IC: $0,14057 + 0,52184U - 0,02792U^2$	68,75
	4	IC: $-2,0846 + 0,83809 - 0,03851U^2$	67,02
	5	IC: $4,64767 - 0,0436U - 0,00682U^2$	56,63
0,20-0,30	0	IC: $15,09738 - 1,73656U + 0,05356U^2$	33,83
	1	IC: $8,19907 - 0,80126U + 0,02284U^2$	13,07
	3	IC: $-13,8382 + 2,22566U - 0,07828U^2$	54,49
	4	IC: $-3,06975 + 0,87126U - 0,03597U^2$	70,29
	5	IC: $-1,22382 + 0,9774U - 0,04118U^2$	23,5
0,30-0,40	0	IC: $-12,58147 + 2,00116U -$	23,06
	1	IC: $2,84025 - 0,02626U - 0,00303U^2$	4,69
	3	IC: $-18,73504 + 2,67272U - 0,08604U^2$	14,47
	4	IC: $-19,40942 + 2,91656U - 0,09775U^2$	51,7
	5	IC: $-10,16914 + 2,1611U - 0,07501U^2$	27,12

Nas diferentes profundidades notou-se a mudança dos valores de resistência à penetração em função da variação do teor de água do solo. Resultados estes que corroboram com os encontrados por Assis et al. (2009).

Ao analisar as diferentes profundidades notou-se a variação da intensidade da resistência à penetração em função da variação do teor de água do solo. Resultados semelhantes encontrados por Pereira et al. (2002) e que indicaram maiores valores de resistência do solo à penetração quando este apresentava menor teor de água, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de água.

Observa-se a necessidade de reformulação da norma EP542 da AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (2009), pois devido à correlação negativa do teor de água e IC, este modifica os valores da compactação do solo.

Esse estudo possibilitou a compreensão da relação entre as alterações do IC em função do teor de água do solo, foi observado um comportamento específico nessa relação, portanto há a possibilidade de desenvolver modelos para esse comportamento para diferentes condições e tipos de solo, o que permitirá padronizar o teor de água nas amostragens de resistência do solo a penetração, assim valores reais de impedimento do desenvolvimento da raiz no solo poderão ser estimados.

## 6 CONCLUSÕES

Com o aumento do tráfego, maior foi a compactação e teores de água mais baixo. Porém para o solo argiloso, a partir de uma passada do trator os valores de resistência à penetração tiveram reduzido aumento, não diferindo estatisticamente para a camada mais superficial (0-0,20m) e para a camada

de 0,20-0,40m a partir de duas passadas independente dos teores de água analisados.

Para o solo de textura média, isto aconteceu a partir de uma passada para a camada mais superficial (0-0,20m) e de cinco passadas para a camada de 0,20-0,40m.

O tráfego controlado é uma alternativa para que a compactação registrada com várias passadas fique em um único espaço.

Os maiores valores de resistência do solo à penetração foram observados quando

no solo o teor de água estava menor, tendendo a um decréscimo linear com o aumento do teor de água.

Os valores encontrados no experimento apresentaram comportamento diferente dos obtidos a partir da norma EP542 da AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (2009), pois devido à correlação negativa do teor de água e IC, este modifica os valores da compactação do solo.

## 7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Standard EP542**. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Standard S313.3**. Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2012.

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

CORTEZ, L. A. **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013.

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A. TANAKA, E. M. Análise da variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em diferentes profundidades. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 12, n. 2, p. 164-175, 2018.

GUBIANI, P. I.; JONG VAN LIER, Q.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão de um latossolo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 1, p. 100-108, jan./fev. 2015.

LANÇAS, K. P.; SANTOS FILHO, C. A. **Penetrômetro hidráulico-eletrônico equipado com DGPS para avaliação da compactação do solo**. La Plata: Editorial de la U.N.L.P., 998.

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J.; SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 1, p. 16-20, jan./fev. 2013.

MINITAB. **Statistical Software**. Version 16. State College: Minitab, 2010.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012.

PEREIRA, J. O.; SIQUEIRA, J. A. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, S. L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 171-174, 2002.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Compactação em Latossolos cultivados com milho submetidos a diferentes pressões induzidas por tratores. **Revista de Ciências Agroambientais**, Recife, v. 15, n. 1, p. 499-505, 2017.

TORRES, J. L. R.; COSTA, D. D. A.; SILVA NETO, O. F.; ARAUJO, A. S.; SILVA, V. R.; VIEIRA, D. M. S. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num latossolo sob semeadura direta há doze anos. **Global Science Technology**, Rio Verde, v. 8, n. 1, p. 131-140, 2015.

TREIN, C. R.; MACHADO, A. P.; LEVIEN, R. Compactação do solo por rodados: podemos evitá-la. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 8, n. 6, p. 114-116, 2009.

TRETIN, R.; MODOLO, A.; VARGAS, T.; CAMPOS, J.; ADAMI, P.; BAESSO, M. Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. **Acta Scientiarum –Agronomy**, Maringá, v. 40, n. 1, p. e35015, 2018.