



Indicadores de qualidade em Latossolos compactados e suas relações com o crescimento do sistema radicular do milho¹

Quality indicators in compacted Oxisols and their relationships with root growth maize

Karina de Vares Rossetti^{2*} José Frederico Centurion³

Resumo: A compactação dos solos, devido à intensificação do tráfego de máquinas nas atividades agrícolas, pode constituir um fator limitante ao crescimento das plantas. Objetivou-se com este trabalho avaliar as consequências dos diferentes estados de compactação em Latossolos sobre o sistema radicular do milho por meio de indicadores de qualidade no solo. Dois experimentos foram conduzidos no ano agrícola 2013/14, sendo um em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e o outro em Latossolo Vermelho eutrófico (LVef). O delineamento experimental empregado nos dois ensaios foi o de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas, foram aleatorizadas cinco formas de preparo do solo, sendo: SC= preparo convencional, sem tráfego adicional; C24 e C44= duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente, C210 e C410= duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. As subparcelas consistiram das camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. As variáveis avaliadas foram: densidade (Ds), macroporosidade (macro), microporosidade (micro), resistência do solo à penetração (RP) e variáveis radiculares do milho. Apesar da constatação da superioridade da RP no C410 (3,91 MPa) em comparação ao C24 (2,10 MPa), C44 (1,95 MPa) e C210 (2,44 MPa) no LVd, esse fato não interferiu na área (AR), diâmetro, comprimento (CR), matéria seca, densidade da massa seca da raiz e condição similar foi observada no LVef. Esse solo apresentou maior capacidade de suporte às compressões aplicadas, uma vez que todas as variáveis do sistema radicular do milho não foram alteradas.

Palavras-chave: Resistência à penetração. Aeração do solo. *Zea mays*.

Abstract: Soil compaction, due to the intensification of the traffic of machines in the agricultural activities, can be a limiting factor to the growth of the plants. The objective of this work was to evaluate the effects of different compaction states in Oxisols on the root system of maize by means of soil quality indicators. The field experiment was carried out in the 2013/14 growing season, in a randomized block design in Distrophic Red Latosol (DRL) and Eutrófic Red Latosol (ERL) in split-plots, with five treatments and four replications for each soil class. In the plots were randomized five ways of preparing the soil, being: SC= conventional tillage, no additional compaction; C24 and C44= passing a 4 t tractor 2 x and 4 x, respectively, C210 and C410= passing a 10 t tractor 2 x and 4 x, respectively. The subplots consisted of the soil layers 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m. The variables evaluated were: the bulk density (Ds), macroporosity (macro), microporosity (micro), penetration resistance (RP) and maize root variables. Despite the superiority of RP in C410 (3.91 MPa) compared to C24 (2.10 MPa), C44 (1.95 MPa) and C210 (2.44 MPa) in LVd, this fact did not interfere in the area (AR), diameter, length (CR), dry matter, dry mass density of the root and similar condition was observed in LVef. This soil presented greater capacity to support the applied compressions, since all the variables of the maize root system were not altered.

Key words: Penetration resistance. Soil aeration. *Zea mays*.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 12/09/2016 e aprovado em 20/06/2017

¹Trabalho proveniente da tese de Doutorado da primeira autora

²Doutora em Produção Vegetal pela Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Departamento de Solos e Adubos, Jaboticabal-SP, Brasil. krossetti@bol.com.br

³Professor Adjunto Aposentado da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Departamento de Solos e Adubos, Jaboticabal-SP, Brasil. jfcentur@fcav.unesp.br

INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas para que o solo exerça suas funções é a sua compactação, principalmente em sistema com intensa atividade agrícola (TROLDBORG *et al.*, 2013). De modo geral, as causas da compactação do solo devem-se, principalmente, ao aumento da massa dos maquinários, dos equipamentos ou dos animais, ao tráfego intensivo de máquinas e às operações ou conteúdo de água inadequado (quando não está no estado de friabilidade do solo). A compactação do solo, além de aumentar a resistência à penetração das raízes (BENGOUGH *et al.*, 2011), limita a profundidade e o volume de solo explorado em busca de água e nutrientes (VALENTINE *et al.*, 2012), reduz a porosidade total, a macroporosidade, a aeração e a capacidade de infiltração de água. Em solos com baixo conteúdo de água, a coesão das partículas e a resistência do solo à penetração são elevadas e reduzem a pressão hidrostática nas células das raízes e, conseqüentemente, reduz a força da coifa na região meristemática da raiz, para superar a resistência do solo.

Assim, a persistência de práticas inadequadas de manejo que causam a compactação do solo pode possibilitar o surgimento de camadas compactadas e condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas. A opção para tentar reverter esse processo temporariamente pode ser a escarificação mecânica (NUNES *et al.*, 2014), que aumenta a porosidade do solo, conseqüentemente promove o decréscimo da densidade do solo e favorece o desenvolvimento radicular na camada superficial. Entretanto, esse benefício pode desaparecer em dois anos, dependendo da textura, do clima e do manejo da cultura.

Na compactação em Latossolo Vermelho distrófico de textura média, Freddi *et al.* (2009) afirmaram que houve aumento da produção de matéria seca das raízes, da densidade e do diâmetro radicular na camada de 0-0,10 m. Entretanto, esses autores observaram que mesmo tendo macroporos abaixo de 0,10 m³ m⁻³ não houve impedimento para o desenvolvimento radicular. Sob esse aspecto, Bergamin *et al.* (2010a) verificaram que a compactação adicional em Latossolo sob plantio direto influenciou negativamente o comprimento, a superfície e o diâmetro médio radicular do milho a 0,20 m de profundidade. Ressalta-se que as plantas têm comportamento diferenciado em relação à capacidade de penetrar em camadas coesas do solo e que as raízes sofrem essas alterações com a finalidade de explorar água e nutrientes das plantas em profundidade no solo. Neste sentido, Bergamin *et al.* (2010b) também constataram aumento na razão entre o córtex, que é a estrutura anatômica da raiz mais sensível à mudança no ambiente, e o cilindro vascular das raízes de milho com o aumento do tráfego do trator.

Nesse contexto, é imprescindível conhecer os níveis de compactação e a classe de solo que prejudicam o crescimento

do sistema radicular das plantas. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar as conseqüências dos diferentes estados de compactação no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho eutroférico sobre o sistema radicular do milho, por meio de indicadores de qualidade do solo, como: macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios experimentais foram realizados em Jaboticabal, SP, localizado entre as coordenadas geográficas de 21°14'05" S, 48°17'09" W, com altitude de 615 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21°C (Figura 1).

Os solos dos ensaios experimentais foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulinitico-hipoférico (LVd) e Latossolo Vermelho eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulinitico-oxídico (LVef) (EMBRAPA, 2013). No LVd e LVef cultivados e na mata nativa (MN) adjacente ao LVd e LVef apresentaram, respectivamente, na camada de 0,00-0,20 m, 348, 560, 380 e 550 g kg⁻¹ de argila, 598, 240, 618 e 180 g kg⁻¹ de areia, 54, 200, 2 e 270 g kg⁻¹ de silte, 2,89 (LVd) e 2,74 (LVef) Mg m⁻³ de densidade de partículas (EMBRAPA, 2011). As características químicas dos solos constam na Tabela 1.

Antes da instalação dos experimentos, foi realizado o preparo convencional do solo a 0,30 m de profundidade, por meio da gradagem de disco média de 18 discos de 660 mm (26"); grade leve off-set, modelo: ATCR, com sete discos em cada seção (duas), com discos de 0,61 m e distância entre discos de 0,23 m.

Em cada ensaio o delineamento experimental foi o de blocos casualizados em esquema de parcelas subdivididas (2 x 5), com quatro repetições. Os efeitos aleatorizados às parcelas foram: solo preparado no sistema convencional e sem tráfego adicional de trator- SC; duas (C24) e quatro (C44) passadas do trator de 4 t, respectivamente; duas (C210) e quatro (C410) passadas do trator de 10 t. As subparcelas consistiram das camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m. A parcela experimental apresentou cinco linhas de milho com 6 m de comprimento e com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. Considerou-se útil as três linhas centrais e desprezando-se 1,5 m de cada extremidade, totalizando cada área útil da parcela com 5,4 m².

A indução à compactação do solo foi realizada em novembro de 2013, dois dias após a precipitação pluvial, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo à capacidade de campo na camada de 0,00-0,20 m de profundidade, determinado conforme EMBRAPA (2011).

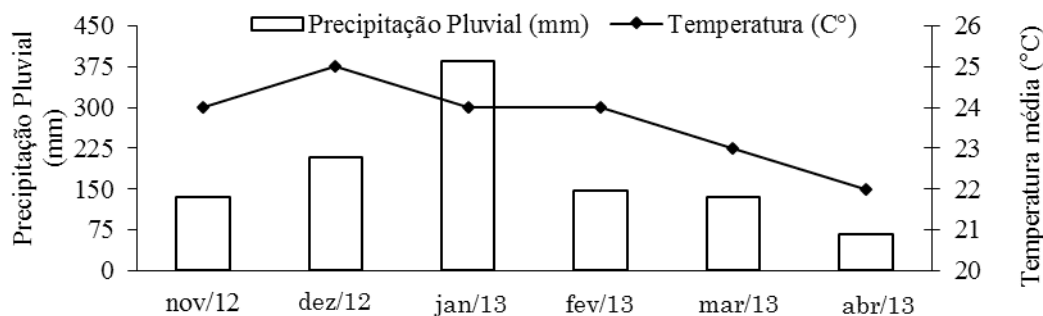


Figura 1 - Precipitação pluviométrica acumulada e temperatura média mensal durante o período de desenvolvimento da cultura de milho (2013/14).

Figure 1 - Cumulative rainfall and average monthly temperature during the period of development of the maize crop (2013/14).

Tabela 1 - Características químicas no LVd e no LVef na camada de 0-0,20 m, antes da implantação do experimento

Table 1 - Chemical characteristics of a LVd and LVef in the 0-0.20 m layer, prior to the implantation of the experiment

Solo	pH	MO	P resina	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	SB	CTC	V
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					%	
LVd ¹	5,6	14	40	2,0	21	17	20	40	60	67
MN	6,0	16	45	3,5	39	22	10	64	74	86
LVef ¹	4,9	24	61	2,7	30	12	27	45	72	62
MN	5,8	31	55	3,3	42	30	15	75	90	83

MO: matéria orgânica do solo; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases. MN: mata nativa; (1) cultivado: área submetida ao preparo convencional e à compactação do solo.

MO: soil organic matter; SB: sum of bases; CTC: cation exchange capacity; V: base saturation. MN: native forest; (1) cultivated: area under conventional tillage and soil compaction.

A compactação foi realizada por meio da passagem dos rodados desses tratores, perfazendo toda a superfície da parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. O número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento; o tráfego foi sobreposto ao anterior, de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes. Sendo os tratamentos constituídos como as parcelas e as camadas como parcelas subdivididas. Áreas de MN adjacentes de ambos os solos foram empregadas como padrão.

Para estabelecer os tratamentos SC e C24, utilizou-se o trator de 56 kW (70 cv), com pressão de inflação nos pneus dianteiros R1 de 83 kPa e nos pneus traseiros (R1 18.4-30) com 96 kPa, tração 4 × 2 e massa de 4 t, com distribuição de 30 % da massa total nas rodas diagonais dianteiras e 70 % nas rodas radiais traseiras. Para os tratamentos C210 e C410 foram utilizados uma pá carregadora de 105 kW (143 cv), tração 4 × 4, pneus 17.5 R 25, radial (L-3), massa de 10 t e com a concha vazia.

A semeadura do milho (híbrido simples Maximus) foi efetuada em dezembro de 2013, utilizando-se de uma

semeadora-adubadora de plantio direto com cinco linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de cinco a seis sementes por metro, com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. A adubação na semeadura foi baseada nos dados presentes na Tabela 1 e consistiu da aplicação de 250 kg ha⁻¹ da formulação N-P-K (8-28-16) e 30 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 t ha⁻¹, segundo recomendação de Raij *et al.* (2001). A adubação de cobertura foi realizada no estágio V6 da cultura com 230 kg ha⁻¹ da formulação N-P-K (30-0-10) em superfície, ao lado da linha de semeadura, com a mesma semeadora-adubadora utilizada na semeadura. Para os tratamentos culturais, utilizou-se o trator de 77 kW (105 cv), tração 4 × 2 TDA (tração dianteira auxiliar) e massa de 7 t, com pressão de inflação de 95 kPa nos pneus dianteiros (14.9-24R1) e 110 kPa nos traseiros (19.4-34R1), com distribuição de 40 % da massa total nas rodas radiais dianteiras e 60 % nas rodas radiais traseiras.

Em dezembro de 2013, foram coletadas amostras indeformadas nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, utilizando cilindros de $53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro), em seguida foram saturadas durante 24 h e submetidas à tensão de -0,006 MPa em mesa de tensão. Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), com duas subdeterminações por amostra, na camada intermediária do cilindro, perfazendo 100 leituras por determinação, utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada por meio de um penetrômetro eletrônico estático com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} , cone com ângulo de 30° e com área da base de $4,909 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados. Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 105°C , durante 24 h, para determinação da densidade do solo (Ds). A macroporosidade (macro) foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade (micro) (EMBRAPA, 2011).

Durante o estágio de pendramento do milho, em março de 2014, foram retiradas três amostras por parcela e camada. Para isso, utilizou-se de um trado de caneco, distanciados de 0,20 m do eixo principal das plantas de milho. As imagens das raízes foram digitalizadas em um scanner de leitura ótica, na resolução de 400 dpi, que forneceram a área (AR), o diâmetro médio de raiz (DR) e o comprimento da raiz (CR) pelo software Delta-T Scan. A densidade de comprimento radicular (DCR) foi determinada por meio da divisão do CR pelo volume de solo coletado ($481,06 \text{ cm}^3$). Na sequência, as amostras foram secas em estufa a 65°C até massa constante, para determinação da massa de matéria seca da raiz (MSR), que foi dividida pelo volume de solo coletado, obtendo-se a densidade de massa seca de raiz (DMS).

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro Wilk e Levene, ambos a 5%, para verificação da normalidade dos resíduos e homocedasticidade das variâncias, respectivamente. Somente as variações radiculares do trabalho não apresentaram distribuição normal e homocedasticidade, havendo, portanto a necessidade de transformar os dados em $\sqrt{x + 0,5}$. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo software Assistat versão 7.5 beta; e quando significativa às médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere à RP, a micro no LVd e no LVef e a macro no LVef não houve diferença significativa quando comparou-se as camadas avaliadas com as compressões utilizadas ($F^{1 \times 2}$) (Tabela 2). Exceção averiguada nesse caso, somente para os atributos físicos, como macro e Ds no LVd e Ds no LVef (Tabela 3).

No LVef, a macro no C24, C44 e C410 foi inferior ao SC (Tabela 2). Constatou-se em ambos os solos, com exceção do C410 no LVd (0,00-0,10 m), valores de macro $> 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é o mínimo necessário para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas (REICHERT *et al.*, 2007). Verificou-se que a micro em ambos os solos, não foi sensível às modificações causadas pelo tráfego dos tratores e nem ao preparo convencional. Esse comportamento pode ser justificado por causa da forte influência da micro do solo com a textura e o teor de matéria orgânica. As características intrínsecas de cada classe de solo estão altamente relacionadas à micro do solo; e para que se tenha qualquer possível alteração na granulometria e no teor de matéria orgânica do solo é necessário um período de longa duração.

A RP aumentou com o aumento da compressão ao solo induzidos pelo tráfego de tratores, tanto no LVd como no LVef (Tabela 2). Dessa maneira, esses resultados concordam com os de Bergamin *et al.* (2010a). Oliveira *et al.* (2012) afirmaram que a RP também sofreu um acréscimo com o tráfego de trator de 11 t, em relação à condição sem tráfego na camada de 0,00-0,10 m em LVef. No LVd, os tratamentos C24, C44 e C210 não diferiram quanto a RP e apresentaram situação intermediária em comparação aos demais estados de compressão do solo (Tabela 2). Tanto no LVd como no LVef os valores da RP elevaram em mais de sete vezes do SC em comparação ao C410. Nos tratamentos C24, C44 e C210 no LVd e C44 e C410 no LVef a RP estão próximos a 2 MPa, não existindo diferença entre as médias desses tratamentos dentro de cada solo. O valor da RP de 2 MPa usualmente utilizada como crítico não pode ser apropriado para qualquer sistema de preparo. Sob esse aspecto, a RP de 2 MPa deve ser mantido para o sistema de preparo convencional (MORAES *et al.*, 2014). Conforme Freddi *et al.* (2007), a partir do valor de RP de 1,65 MPa em LVd, a produtividade do milho começou a decrescer.

A macro nos tratamentos SC ao C210 sob compactações induzidas no LVd na camada de 0,00-0,10 m foram semelhantes entre si, sendo apenas o C410 inferior ao SC, C24 e C44 (Tabela 3). Além disso, a partir da profundidade de 0,10 m todos os tratamentos neste solo foram semelhantes entre si, exceto ao C410. Reforçando o fato de que a massa de 4 ou 10 t aliada a duas e quatro passadas de tratores não influenciou na macro do LVd. Resultado semelhante foi reportado por Soracco *et al.* (2015) para a macro, porosidade total e Ds do Argissolo (0-0,15 m) em comparação aos tratamentos sem tráfego de máquinas agrícola, com três e cinco passadas do trator de 3,8 t. Conforme esses autores, o efeito do tráfego de máquinas não proporcionou uma energia de compactação muito extrema e por isso as alterações dessas variáveis não persistiram depois de dois anos. Discordando desses resultados Bergamin *et al.* (2010a), afirmaram que a aplicação de maior número de passadas do trator nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m acarretou a redução da macro no PDC4 e PDC6 (plântio

direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5t em quatro e seis passadas, respectivamente) em 26 e 44%, respectivamente, quando comparados ao tratamento PD (plântio direto com compactação adicional).

A Ds do SC no LVd foi significativamente inferior a todos os tratamentos na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 3). Segundo Vogelmann *et al.* (2012), o tráfego adicional com uma pá carregadora (10 t) em semeadura direta por 13 anos elevou a Ds do Argissolo Vermelho-Amarelo em relação ao sistema de semeadura direta na camada de 0,00-0,10 m (respectivamente 1,68 e 1,56 Mg m⁻³). No LVd, a Ds no C44 e C410 sofreu um acréscimo e um decréscimo, respectivamente, da camada superficial (0,00-0,10 m) para

0,10-0,20 m (Tabela 3). Nota-se, também, que no LVef a Ds no SC foi inferior às compressões estudadas até 0,20 m, exceção ao C410 (0,10-0,20 m). Essas alterações observadas nas camadas em ambos os solos devem-se, segundo Silva *et al.* (2012), ao efeito benéfico temporário da escarificação em reduzir a Ds no solo. Foi estabelecido por esses autores que após seis meses de SC a Ds passou a ter um acréscimo em 20% e que tal comportamento estável ocorreu por mais um ano, tendendo a um estado de estabilização.

Resultado semelhante também foi constatado por Seki *et al.* (2015). Esses autores verificaram que 11 meses após o preparo do Nitossolo Vermelho distroférico, cultivado por 10 anos em sistema de plântio direto, não havia a persistência do

Tabela 2 – Efeito da compressão nas características físicas em LVd e LVef cultivados com milho, mata nativa e camadas

Table 2 - Effect of compression on the physical characteristics in LVd and LVef grown with maize, native forest and layers

Compressão	-----LVd-----		-----LVef-----		
	Micro m ³ m ⁻³	RP MPa	Micro m ³ m ⁻³	RP MPa	Macro m ³ m ⁻³
SC	0,213	0,56 c	0,317	0,37 b	0,285a
C24	0,201	2,10 b	0,357	1,92 a	0,171 b
C44	0,175	2,16 b	0,323	2,06 a	0,203 b
C210	0,206	2,34 b	0,333	1,85 a	0,216 ab
C410	0,215	3,96 a	0,352	2,67 a	0,178 b
Média	0,202	2,22	0,211	0,34	1,770
MN	0,210	0,94	0,244	1,58	0,398
F ¹	1,06 ^{ns}	17,79**	1,20 ^{ns}	19,44**	7,10**
CV (%) ¹	21,64	26,23	13,48	20,78	22,86
Camada					
0,00-0,10 m	0,212	1,88 b	0,328	1,90	0,219
MN	0,216	0,80	0,247	0,41	0,450
0,10-0,20 m	0,192	2,57 a	0,345	1,64	0,202
MN	0,204	1,05	0,205	1,36	0,385
Média das compressões	0,202	2,22	0,201	0,34	1,770
Média da MN	0,210	0,92	0,417	0,23	0,880
F ²	2,12 ^{ns}	8,20*	0,92 ^{ns}	2,07 ^{ns}	0,85 ^{ns}
F ^{1x2}	1,39 ^{ns}	0,49 ^{ns}	1,77 ^{ns}	1,57 ^{ns}	1,59 ^{ns}
CV (%) ²	21,93	23,88	17,08	22,14	29,05

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho eutroférico (LVef). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) (¹)Variação referente aos tratamentos (parcelas). (²) Variação referente às camadas (subparcelas). * e **: Significativo a $p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$ pelo teste F, respectivamente, ns: não significativo.

SC: without compression, C24 and C44: two four past the tractor 4 t, respectively, C210 and C410: two four past the tractor 10 t, respectively. MN: native forest in Haplustox (LVd) and Eustrustox (LVef). Means followed by the same letter, vertically, do not differ by Tukey test ($p < 0.05$) (¹) Changes related to treatments (plots). (²) Changes related to layers (subplots). * And **: Significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$ by F test, respectively, ns: not significant.

Tabela 3 - Efeito da compressão na macroporosidade (macro) e densidade do solo (Ds) nos solos LVd e LVef e nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m**Table 3** - Effect of macroporosity (macro) and soil bulk density (Ds) on LVd and LVef and on the layers 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m

Camada (m)	Compressão					MN
	SC	C24	C44	C210	C410	
LVd						
Macro (m ³ m ⁻³)						
0,00-0,10	0,246 Aa	0,192 Aa	0,212 Aa	0,138 ABa	0,070 Bb	0,299
0,10-0,20	0,178 Aa	0,137 Aa	0,171 Aa	0,133 Aa	0,179 Aa	0,238
Média	0,120	0,164	0,191	0,135	0,124	0,268
	F ¹ = 2,99 ^{ns}	F ² = 0,72 ^{ns}	F ^{1x2} = 5,00 ^{**}	CV (%) ¹ = 26,31	CV (%) ² = 27,39	
Ds (Mg m ⁻³)						
0,00-0,10	1,43 Ca	1,72 Ba	1,66 BCb	1,74 Ba	2,02 Aa	1,32
0,10-0,20	1,62 Ba	1,84 ABa	1,98 Aa	1,78 ABa	1,77 ABb	1,62
Média	1,52	1,78	1,82	1,76	1,89	1,47
	F ¹ = 12,18 ^{**}	F ² = 3,56 ^{ns}	F ^{1x2} = 4,45 [*]	CV (%) ¹ = 16,48	CV (%) ² = 18,20	
LVef						
Ds (Mg m ⁻³)						
0,00-0,10	1,15 Cb	1,33 Ba	1,50 Aa	1,40 ABa	1,41 ABa	0,78
0,10-0,20	1,23 Ba	1,39 Aa	1,44 Aa	1,39 Aa	1,36 ABa	1,06
Média	1,19	1,36	1,47	1,39	1,38	0,92
	F ¹ = 12,97 ^{**}	F ² = 0,01 ^{ns}	F ^{1x2} = 3,52 [*]	CV (%) ¹ = 15,93	CV (%) ² = 13,60	

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 t, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente. MN: mata nativa em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Latossolo vermelho eutroférico (LVef). (1)Variação referente aos tratamentos (parcelas). (2)Variação referente às camadas (subparcelas). Letras maiúsculas referem-se à comparação de atributos do solo entre os tratamentos numa mesma camada (comparação na horizontal) e as minúsculas comparam médias de atributos do solo em camadas para um mesmo tratamento (comparação na vertical). * e **. Significativo a $p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$ pelo teste F, respectivamente, ^{ns}: não significativo.

SC: without compression, C24 and C44: two four past the tractor 4 t, respectively, C210 and C410: two four past the tractor 10 t, respectively. MN: native forest in Haplustox (LVd) and Eutruxox (LVef). (1) Changes related to treatments (plots). (2) Changes related to layers (subplots). Upper case letters refer to compare attributes of the soil between treatments on the same layer (compare horizontal) and tiny comparing averages soil characteristics layered to the same treatment (comparison vertically). * And **: Significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$ by F test, respectively, ^{ns}: not significant.

efeito da escarificação. Neste estudo, devido provavelmente ao alto teor de argila, os valores da Ds no LVef estão abaixo do valor crítico de 1,44 Mg m⁻³, com exceção ao C44, como mencionado em Reichert *et al.* (2009). Porém, no LVd a Ds situou-se acima do crítico de 1,63 Mg m⁻³ nos tratamentos com compactação induzida. Em ambos os solos, os valores absolutos da Ds na MN foram inferiores em comparação aos tratamentos cultivados, concordando dessa maneira com os resultados de Torres *et al.* (2011) em Latossolo Vermelho. Segundo esses autores, também foi possível confirmar que o campo nativo também apresentou valores médios de Ds reduzidos em relação aos manejos cultivados, como o SC, a pastagem e a semeadura direta que apresentaram valores médios de Ds superiores ao da MN. Pode-se considerar neste estudo, que em razão da MN ser caracterizada como uma área sem ação antrópica, justificando, assim, a presença de

uma grande quantidade de raízes superficiais e profundas e, consequentemente, os baixos valores de Ds.

O efeito da compressão no sistema radicular do milho restringiu-se às variáveis CR e DCR e ao solo LVd (Tabela 4). O CR foi maior no nível de compactação C410 somente em comparação ao SC. Comportamento similar ocorreu para a DCR no LVd. Discordando do resultado de Bergamin *et al.* (2010b), que também notaram a influência negativa da compactação adicional no plantio direto sobre o CR em milho. Nesse caso, o resultado na DCR está em concordância com as observações de Foloni *et al.* (2003).

Todas as variáveis do sistema radicular do milho no LVef não sofreram efeito das compressões. Para todas as variáveis da raiz como AR, DR, CR, DCR, MSR e DMS em ambos os solos, não se verificou diferença estatística entre as camadas. Resultados inversos para MSR, DR e DCR foram observados

Tabela 4 - Área (AR), diâmetro (DR), comprimento (CR) e densidade de comprimento das raízes (DCR), massa seca de raízes (MSR) e densidade de massa seca de raiz (DMS) de milho cultivado em dois solos, LVd e LVef sob diferentes compressões e camadas

Table 4 - Area (AR), diameter (DR), length (CR) and density of root length (DCR), root dry matter (MSR) and dry bulk density of root (DMS) of maize cultivated in two soils, LVd and LVef under different compressions and layers

Compressão	AR	DR	CR	DCR	MSR	DMS
	mm ²	mm	mm	cm cm ⁻³	Mg	mg cm ⁻³
LVd						
SC	27,70	1,15	29,84 b	1,54 b	27,63	1,44
C24	48,16	1,10	55,70 a	2,64 a	30,26	1,55
C44	41,47	1,16	45,31 ab	2,17 ab	30,10	1,54
C210	47,98	1,17	50,86 ab	2,43 ab	29,15	1,50
C410	55,31	1,08	65,58 a	3,07 a	33,03	1,66
Média	44,12	1,13	49,45	2,37	30,03	1,54
F ¹	3,06 ^{ns}	0,87 ^{ns}	6,95**	6,76**	0,92 ^{ns}	0,94 ^{ns}
CV (%) ¹	33,00	8,93	24,90	22,60	13,66	10,88
Camada (m)						
0,00-0,10	42,04	1,12	47,66	2,70	29,14	1,50
0,10-0,20	46,21	1,14	51,26	2,44	30,93	1,57
Média	44,12	1,13	49,46	2,57	30,03	1,53
F ²	0,73 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,52 ^{ns}	2,60 ^{ns}	2,61 ^{ns}
F ^{1x2}	2,99 ^{ns}	1,26 ^{ns}	2,21 ^{ns}	2,19 ^{ns}	0,84 ^{ns}	0,88 ^{ns}
CV (%) ²	30,33	8,30	26,11	23,53	8,24	6,55
Compressão	AR	DR	CR	DCR	MSR	DMS
	mm ²	mm	mm	cm cm ⁻³	Mg	mg cm ⁻³
LVef						
SC	27,11	1,11	31,82	1,58	27,54	1,44
C24	33,53	1,06	41,55	2,03	28,95	1,50
C44	26,52	1,04	34,51	1,73	28,28	1,47
C210	32,77	1,12	36,99	1,84	28,55	1,48
C410	35,76	1,06	44,38	2,15	27,88	1,45
Média	31,14	1,08	37,85	1,87	28,24	1,47
F ¹	0,54 ^{ns}	1,39 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,93 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,48 ^{ns}
CV (%) ¹	43,56	6,54	34,94	30,95	6,90	5,24
Camada (m)						
0,00-0,10	33,50	1,07	40,76	1,98	27,96	1,46
0,10-0,20	28,78	1,08	34,94	1,75	28,53	1,48
Média	31,14	1,07	37,85	1,86	28,24	1,47
F ²	2,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	2,50 ^{ns}	2,03 ^{ns}	0,56 ^{ns}	0,51 ^{ns}
F ^{1x2}	1,32 ^{ns}	2,67 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,29 ^{ns}
CV (%) ²	28,83	6,82	26,61	23,49	7,39	5,57

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4t, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 t, respectivamente em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e em Latossolo Vermelho eutrófico⁽¹⁾ Coeficiente de variação referente aos tratamentos (parcelas). ⁽²⁾ Coeficiente de variação referente às camadas (subparcelas). Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). **: Significativo a $p \leq 0,01$ pelo teste F, respectivamente, ns: não significativo.

SC: without compression, C24 and C44: two four tractor passed from 4t, respectively, C210 and C410: two four past tractor 10 t, respectively in Haplustox (LVd) and and Eustrustox (LVef). ⁽¹⁾ Coefficient of variation related to treatments (plots). ⁽²⁾ Coefficient of variation related to layers (subplots). Means followed by the same letter, vertically, do not differ by Tukey test ($p < 0.05$). **: Significant at $p \leq 0.01$ by F test, respectively, ns: not significant. teristics layered to the same treatment (comparison vertically). * And **: Significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$ by F test, respectively, ns: not significant.

por Freddi *et al.* (2009) em LVd na camada de 0,00-0,30 m, de acordo com o nível de compactação empregado.

Em ambos os solos, mesmo diante do aumento da Ds e da RP aliada a redução na macro nos tratamentos com compressão, o crescimento radicular não foi prejudicado, considerando-se o CR e a AR. Esse comportamento, embora contraditório, também foi comprovado por Freddi *et al.* (2007) na camada de 0,00-0,10 m. Apesar da constatação da elevada RP, sobretudo no C410 (3,91 MPa) do LVd, esse fato não interferiu na AR, DR, CR, MSR e DMS do LVd e em todas as variáveis do LVe. Deve-se levar em consideração que o crescimento de raízes pode ser inibido com valores de RP inferiores a 1 MPa em solos secos, contudo, com umidade suficiente, pode haver crescimento com RP variando entre 4 e 5 MPa. Para o período correspondente a este estudo, durante

o crescimento vegetativo, a precipitação pluviométrica acumulada foi de 291 mm (durante os meses de janeiro a março de 2014) e com alguns dias de estiagem (Figura 1). Mesmo assim, não houve impedimento ao enraizamento.

Outro resultado contraditório a esse é o de Lipiec *et al.* (2012) em Luvisolo. Nesse caso, mesmo com teor de argila de 70 g kg⁻¹ aliado ao tráfego de tratores com massas de 3; 5, 7 e 10 t ocorreram efeitos significativos da compactação no CR e alterações na anatomia radicular de cereais.

Na Figura 2, são apresentadas correlações entre algumas variáveis de raízes e a macro e microporosidade. Pode-se observar que a AR (Figura 2A), CR (Figura 2C) e MSR (Figura 2E) correlacionaram-se negativamente com a macro em ambos os solos e com a micro no LVd (Figuras 2B e 2D), para a camada de 0,00-0,20 m.

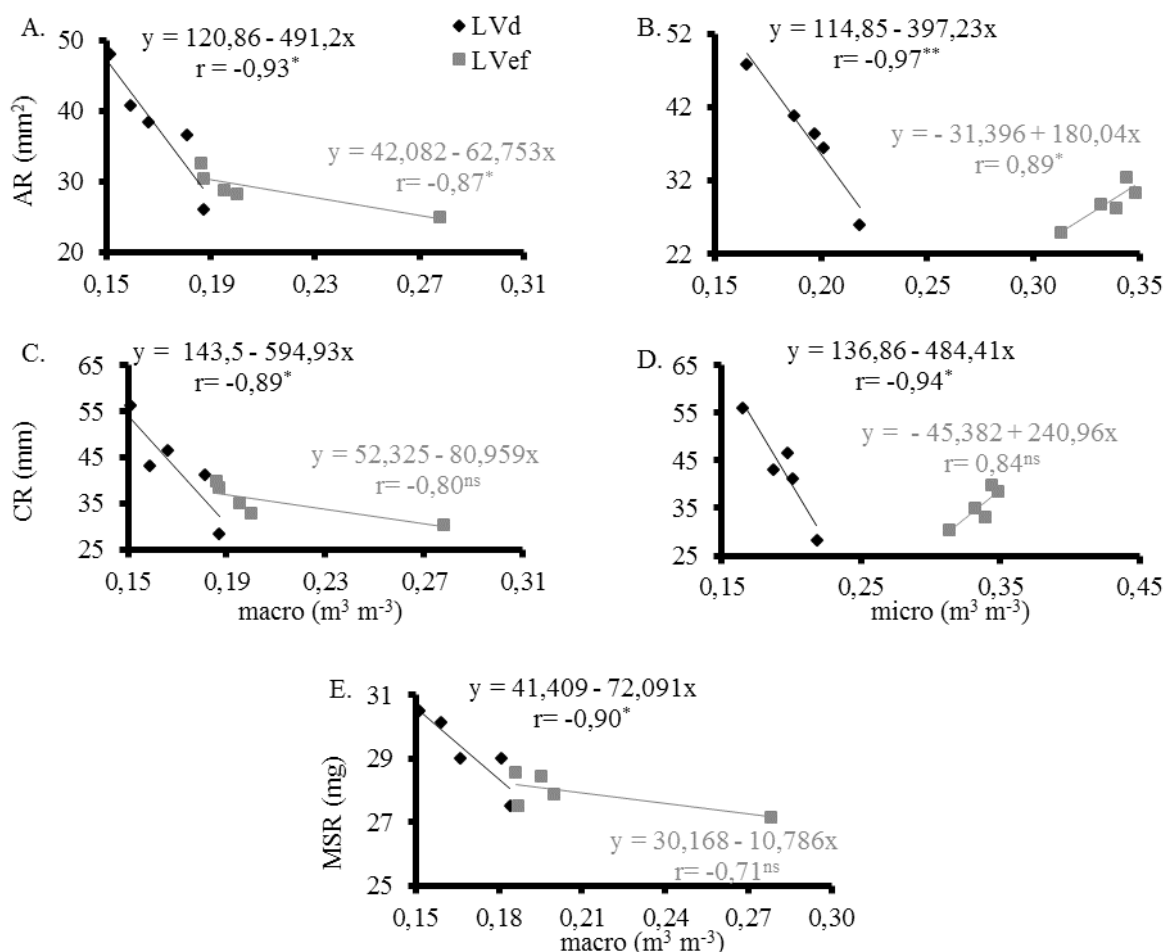


Figura 2 - Correlações entre variáveis do sistema radicular do milho e macroporosidade (AR - área radicular (A); CR - comprimento radicular (C); MSR - Matéria seca de raiz (E) e microporosidade (AR - área radicular (B); CR - comprimento radicular (D)) para a camada de 0,00-0,20 m.

Figure 2 - Correlations between corn root system variables and macroporosity (AR - root area (A), CR - root length (C), MSR - Root dry matter (E) and microporosity (AR - radicular area Radicular (B); CR - comprimento radicular (D)) for the layer of 0.00-0.20 m.

bulk density of root (DMS) of maize cultivated in two soils, LVd and Lvef under different compressions and layers

Em alguns casos no LVef, as correlações não foram significativas, sendo Figuras 2C, 2D e 2E. Nesse caso, constata-se divergência com o estudo de Bergamin *et al.* (2010a), os quais observaram correlação positiva e significativa ($r = 0,72^{**}$) no CR do milho com a macro. As variáveis radiculares sofreram menor amplitude com a macro e a micro no LVef, uma vez que no LVd, possivelmente, em razão da menor concentração de óxidos de Fe e do elevado teor de caulinita, conferem maior compactação a esse solo. Ressalta-se que os menores valores de macro no LVd influenciaram de forma mais intensa as variáveis radiculares, pois esse fato pode ser atribuído a uma alteração das plantas às condições restritivas impostas pela compactação, em relação à condição no LVef. Verifica-se correlação linear positiva entre a AR e o CR com a micro no LVef, provavelmente devido ao elevado conteúdo de argila nesse solo.

CONCLUSÕES

O Latossolo Vermelho eutroférico apresentou maior capacidade de suporte às compressões aplicadas, uma vez que todas as variáveis do sistema radicular do milho não foram alteradas;

As modificações na estrutura do Latossolo Vermelho distrófico e do Latossolo Vermelho eutroférico por meio do aumento da Ds e da RP, aliado a redução na macroporosidade, não limitaram o comprimento e a área radicular do milho.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BERGAMIN, A. C., VITORINO, A. C. T., FRANCHINI, J. C., SOUZA, C. M. A. de; SOUZA F. R. de. Compactação de um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 681-691, 2010a.

BERGAMIN, A. C., VITORINO, A. C. T., LEMPP, B., SOUZA, C. M. A. de; SOUZA F. R. de. Anatomia radicular de milho em solo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 299-305, 2010b.

Embrapa-Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos- Manual de métodos de análises de solo. 2. ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. Disponível em: < <http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/>>. Acesso em: 01 setembro. 2015.

Embrapa-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013, 353p.

FOLONI, J. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 627-636, 2007.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; PERES, F. S. C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II-Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 805-818, 2009.

LIPIEC, J.; HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J.; SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, n. 5, p. 74-81, 2012.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014.

- NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 7, p. 531-539, 2014.
- OLIVEIRA, P. R. DE; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. S.; BÁRBARO JÚNIOR, L. S.; ROSSETTI, K. V. Qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido à níveis de compactação e de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 587-597, 2012.
- RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. Tópicos em ciência do solo. 5.ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 3, p. 242-254, 2009.
- SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015.
- SILVA, S. G. C.; SILVA, A. P. DA; GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 547-555, 2012.
- SORACCO, C. G.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR, T. C.; COLLAZO, D. J.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 408-415, 2015.
- TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 437-445, 2011.
- TROLDBORG, M.; AALDERS, I.; TOWERS, W.; HALLETT, P. D.; MCKENZIE, B. M.; BENGOUGH, A. G.; LILLY, A.; BALL, B. C.; HOUGH, R. L. Application of Bayesian Belief Networks to quantify and map areas at risk to soil threats: Using soil compaction as an example. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 132, n. 6, p. 56-68, 2013.
- VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 7, p. 259-270, 2012.
- VOGELMANN, E. S.; MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P. DA; BARROS, C. A. P. DE; REINERT, D. J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, v. 42, n. 2, p. 291-297, 2012.