

COMPACTAÇÃO DO SOLO, CONTEÚDO DE ÁGUA E NUTRIÇÃO DA SOJA

Amauri Nelson Beutler¹, José Frederico Centurion², Eurico Lucas de Sousa Neto³, Flávia Consolini⁴

RESUMO

Este estudo teve por objetivo avaliar a influência da compactação do solo e do conteúdo de água do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) na nutrição da soja, em casa-de-vegetação e no campo. No experimento de casa-de-vegetação, foram coletadas amostras na profundidade de 0,0 – 0,20 m, passadas em peneira de 4 mm, compactados em camadas de 0,03 m, em vasos de 9,82 L. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 2 (compactação x conteúdo de água). No início do florescimento, determinou-se a massa de matéria seca e o teor de nutrientes na parte aérea das plantas. No experimento de campo, o solo foi compactado por meio de passagens de trator sobre a superfície do solo. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 x 2 (compactação x irrigação). No início do florescimento determinou-se a massa de matéria seca e o teor de nutrientes na parte aérea das plantas. A compactação do solo causou decréscimo da massa de matéria seca, porém teve pouco efeito no teor de nutrientes na parte aérea da soja. As plantas acumularam mais matéria seca na parte aérea no maior conteúdo de água (0,17 kg kg⁻¹) e, menores teores de alguns nutrientes, comparado ao menor

¹ Pós-Doutorando no Depto. de Solos e Adubos da FCAV/UNESP, Via de Ac. Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, CEP 14884-900, Jaboticabal, SP. email: amaurib@yahoo.com.br, Bolsista da Fapesp.

² Prof. Adjunto do Depto de Solos e Adubos da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. email: jfcentur@fcav.unesp.br. Bolsista do CNPq.

³ Mestrando no Depto de Solos e Adubos da FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. Bolsista da CAPES.

⁴ Dra. FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP.

conteúdo de água ($0,12 \text{ kg kg}^{-1}$), em casa-de-vegetação. No campo, a irrigação teve pouco benefício para esses parâmetros.

Palavras-chave: *Glycine max*, impedimento mecânico, umidade, nutrientes.

SOIL COMPACTION, WATER CONTENT AND SOYBEAN NUTRITION

ABSTRACT

This study evaluates the influence of soil compaction and water content of a Haplustox (LVd) in soybean nutrition, in greenhouse and in the field. In greenhouse samples were collected at 0.0 – 0.20 m depth, sieved in 0.004 m mesh opening, compacted layers of 0.03 m, in pots of 0.25 m diameter and 0.20 m height. The experimental design was a completely randomized, in a factorial scheme 3 x 2 (compaction x water content). At the beginning of the blooming period one determined the dry mass and the content of nutrients of the aerial part of plants. In the field study, the soil was compacted by a tractor. The experimental design was a completely randomized, in a factorial scheme 6 x 2 (compaction x irrigation). At the beginning of the blooming period one it was determined the dry mass and the content of nutrients of the aerial part of plants. The soil compaction caused decrease of dry mass, however it had smaller effect in nutrients content in the aerial part of the soybean plant. The plants accumulated more dry mass in the aerial part in higher water content (0.17 kg kg^{-1}) and, lower content of some nutrients, compared with the lower water content (0.12 kg kg^{-1}), in greenhouse. In the field, the irrigation showed low benefit for these parameters.

Key words: *Glycine max*, mechanical impediment, moisture, nutrients.

INTRODUÇÃO

A soja é a principal cultura de grãos do Brasil, e ocupa extensas áreas agrícolas, com relevante importância econômica para o país. Desta forma, torna-se cada vez mais importante o estudo dos fatores relacionados à produtividade da cultura. Entre esses, os atributos físicos do solo, especialmente a compactação, tem sido freqüentemente apontada como atributo físico limitante ao crescimento das plantas (Rosolem *et al.*, 1999). Isso por causa de impedimentos físicos (compactação, aeração, etc.) que reduzem o crescimento radicular e prejudicam a absorção de água e nutrientes em quantidades suficientes pelas plantas.

A compactação do solo reduz o volume total de poros e a macroporosidade e, aumenta a microporosidade (Merotto e Mundstock, 1999), reduzindo a permeabilidade à água e ao ar. Em conseqüência, ocorre menor absorção de água e nutrientes pelas plantas (Wolfe *et al.*, 1995), diminuindo o crescimento radicular, da parte aérea e a produtividade das plantas (Gediga, 1991). Ainda, o impedimento mecânico afeta a taxa de alongação celular, levando ao aumento no diâmetro da raiz em conseqüência do aumento no diâmetro e número das células em função do comprimento da raiz, e finalmente, o volume de solo explorado e absorção de água e nutrientes é menor (Bengough e Mullins, 1990).

Entretanto, vários pesquisadores afirmam que uma pequena compactação do solo é benéfica por aumentar a área de contato solo/raiz (Dolan *et al.*, 1992; Kopi e Douglas, 1991; Stirzaker *et al.*, 1996). Veen *et al.* (1992) verificaram incremento na absorção de fósforo e nitrato, respectivamente, e Borges *et al.* (1998) verificaram maior absorção de P, K e Mg com pequena compactação do solo.

Neste contexto, o valor de resistência do solo à penetração de 2,0 MPa têm sido considerado limitante ao crescimento das plantas (Taylor *et al.*,

1966). A partir desse valor considera-se que a compactação do solo é prejudicial ao desenvolvimento das plantas.

De fato, estudos mostram que ocorre redução no teor de nutrientes da parte aérea da soja quando ocorre compactação excessiva do solo. Entre esses, Borges *et al.* (1988) verificaram reduções para P, K, Mg e Ca, Dolan *et al.* (1992) para P e K e Rosolem *et al.* (1994) para N. Fernandez *et al.* (1995) verificaram que o impedimento mecânico ao crescimento radicular levou à decréscimos nas concentrações de N e Mg e, incrementos nos teores de P, Ca e K na parte aérea da soja.

Na literatura encontram-se alguns estudos avaliando a influência de camadas subsuperficiais de solo compactadas na absorção de macronutrientes pelas plantas, no entanto, poucos estudos avaliam a absorção de macro e micronutrientes, por culturas anuais, em solo compactado superficialmente, no qual as plantas de soja suportam menores níveis de compactação do solo (Johnson *et al.*, 1990). Com a acentuada expansão do sistema de plantio direto, no qual ocorre compactação superficial (Voorhees e Lindstorm, 1983), torna-se indispensável o conhecimento dos efeitos do impedimento mecânico na nutrição das plantas. Além disso, a maioria dos trabalhos utilizam a densidade do solo como indicativo do nível de compactação, que é um atributo indiretamente relacionado ao crescimento das plantas. Assim, há necessidade de estudos utilizando a resistência do solo à penetração, que está sendo priorizada em estudos de compactação do solo.

Este estudo teve por objetivo avaliar a influência da compactação e do conteúdo de água do Latossolo Vermelho distrófico na nutrição da soja, em casa-de-vegetação e no campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos experimentos em casa-de-vegetação no ano 2000 e no campo em 2004/05, na FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP, com a cultura da soja (*Glycine max*). Utilizou-se Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico hipoférrico (LVd), cuja composição granulométrica na camada de 0,0 – 0,20 m de argila, 330 g kg⁻¹; silte, 35 g kg⁻¹ e areia, 635 g kg⁻¹, foi determinada por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, e o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Gee e Bauder, 1986). A densidade de partículas obtida pelo método do picnômetro foi de 2,72 g cm⁻³ (Blake e Hartge, 1986a) e, a densidade máxima do solo, determinada com o aparelho Proctor normal foi de 1,86 g cm⁻³ (Carter, 1990).

Experimento de casa-de-vegetação

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 2 (compactação x conteúdo de água), com três repetições para o cultivo de soja e, uma para determinações físicas.

Foi coletada amostra de solo na camada de 0-0,20 m e passada em peneira de 4 mm. Em seguida foi adubada segundo Raij *et al.* (1996). Em 1 m³ de solo foi utilizada a adubação referente a 5 m² no campo, cuja análise química foi realizada conforme Raij *et al.* (1987).

Após a realização da adubação, o solo, com conteúdo de água equivalente a retida na tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo), foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (altura de 0,20 m e diâmetro de 0,25 m), em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada mediante a queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso (Beutler *et al.*, 2004). Os níveis de

compactação foram obtidos através de 0, 5, 11 impactos por camada de solo, correspondendo aos níveis 1, 2 e 3 de compactação.

Após a compactação, 01 de agosto de 2000 foram semeadas três sementes de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48), inoculadas com *Bradyrhizobium Japonicum*, por cova (quatro covas vaso⁻¹). Após 10 dias realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja por vaso, e aplicaram-se os tratamentos de conteúdo de água no solo (conteúdo de água de 0,17 e 0,12 kg kg⁻¹, correspondente a retida, em amostras deformadas, na tensão de 0,01 e 0,05 MPa), visto que foi necessário maior conteúdo de água para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. A partir dessa data, o conteúdo de água foi mantido constante, por meio de duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso. A pesagem e rodízio de todos os vasos foram feitos a cada cinco dias.

No início do florescimento, aos 54 dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi seccionada próximo a superfície do solo e seca em estufa de circulação forçada de ar a ± 65 °C para determinação da massa seca. Posteriormente a parte aérea foi moída em moinho Willey para determinação do teor de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, segundo metodologia citada por Bataglia *et al.* (1983). Após a colheita retirou-se uma amostra por repetição para caracterização química do solo (Tabela 2).

O conteúdo de água retida nas tensões de 0,01 MPa (capacidade de campo) e 0,05 MPa foi determinado em amostras deformadas em câmaras de Richards (Klute, 1986). A densidade do solo foi determinada segundo Blake e Hartge (1986b). A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico, com ângulo cone de 30°, sendo a leitura realizada quando a base do cone atingiu a

profundidade de 0,03 m a partir da superfície do solo, e o valor de cada repetição obtido da média de quatro subdeterminações.

Experimento de campo

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 6 x 2 (compactação x irrigação), quatro repetições e parcelas de 9,0 m².

Em novembro de 2004, o solo foi escarificado até 0,30 m de profundidade e nivelado com uma gradagem. Um dia após uma precipitação, no conteúdo de água próximo a retida na tensão de 0,01 MPa (capacidade de campo), foram aplicados os tratamentos de compactação: 1= sem compactação; 2= uma passada do trator com massa de 4 t; 3= uma passada; 4= duas passadas; 5= quatro passadas e 6= seis passadas de um trator de 11 t, no mesmo local, com dois eixos e quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície do solo. No tratamento 2 a compactação foi realizada com trator de 4 t, para obter menor compactação.

Em seguida, as sementes de soja (*Glycine max cv. IAC Foscarim 31*) receberam inóculos de *Bradyrhizobium japonicum* e foram semeadas na profundidade de 0,05 m e no espaçamento de 0,45 m entre linhas, no sentido transversal ao tráfego do trator e ao declive da área. Utilizou-se a cultivar IAC Foscarim 31, no experimento de campo, pois na época de semeadura não foi encontrada semente da cultivar Embrapa 48, utilizada em casa-de-vegetação em 2000. Realizaram-se duas irrigações após a semeadura para que as sementes germinassem e, após 10 dias, fez-se o desbaste deixando 20 plantas por metro. No tratamento com irrigação, essas foram realizadas quando o conteúdo de água atingiu valores próximos a retida na tensão de 0,06 MPa, totalizando sete irrigações de 20 mm, durante o ciclo da cultura.

A adubação foi de 50 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 150 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, na semeadura, para obtenção da produtividade esperada de soja de 3,5 a 4,0 t ha⁻¹, segundo recomendação de Raij *et al.* (1996).

No florescimento, foram coletadas 16 subamostras, compostas pelo terceiro e quarto folíolos com pecíolo, a partir do ápice da planta, com duas repetições, para determinação do teor de nutrientes na parte aérea da soja, segundo Bataglia *et al.* (1983).

Foram coletadas amostras de solo (duas repetições) com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \times 10^{-6} \text{ m}^3$), nas camadas de 0,03 - 0,06, 0,08 - 0,11, 0,15 - 0,18 m, que foram utilizadas para obtenção de valores médios. Em seguida, foram saturadas durante 24 horas e submetidas à tensão de 0,01 MPa, em câmaras de pressão com placas porosas de Richards (Klute, 1986). Ao atingir o equilíbrio, foi determinada a RP, com duas repetições por amostra, na camada de 0,01 a 0,02 m do cilindro, perfazendo 100 leituras por repetição, que foram utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada com o penetrômetro eletrônico estático, com semi-ângulo de cone de 30°, com velocidade constante de penetração de 1 cm min⁻¹, cone com área da base de 2,96 mm, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados (Bengough *et al.*, 2001). Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante, para determinação da Ds (Blake e Hartge, 1986b).

Após a colheita determinou-se o teor de nutrientes no solo na linha, 16 subamostras por repetição (Tabela 2).

A caracterização física dos experimentos esta apresentada na tabela 1.

Tabela 1 - Densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RP) (MPa), nos três níveis de compactação e nos dois conteúdos de água no experimento de casa-de-vegetação, e nos seis níveis de compactação no experimento de campo

Conteúdo de água	Casa-de-vegetação			Campo	
	0,12	0,17			
	----- kg kg ⁻¹ -----	----- g cm ⁻³ -----		kg kg ⁻¹	g cm ⁻³
Nível de compactação	RP ¹	Ds		RP ²	Ds
1	0,38	0,27	1,09	1,16	1,32
2	1,95	1,79	1,60	2,21	1,62
3	3,76	2,69	1,73	2,36	1,66
4				3,11	1,71
5				4,01	1,74
6				4,81	1,75

¹ RP determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico. ² RP determinada com o penetrômetro eletrônico no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

Tabela 2 - Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico, no experimento de casa-de-vegetação e no campo, após a colheita

	pH (CaCl ₂)	Matéria orgânica P _{resina}	K	Ca	Mg	V	
	1 : 2,5	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	...mmol _c dm ⁻³	%	
Casa-de-vegetação ¹	5,7	10	28	2,1	19	13	68
Campo ¹	5,6	15	80	2,2	23	17	68

¹ Não houve diferença significativa para os atributos químicos entre os tratamentos, no experimento de casa-se-vegetação e de campo.

A análise estatística dos resultados consistiu da análise da variância (ANOVA) utilizando o teste F e quando significativa aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro para comparação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A compactação do solo e o conteúdo de água afetaram a produção de matéria seca e o teor de alguns nutrientes na parte aérea da soja (Tabelas 3, 4, 5 e 6).

Tabela 3. Análise de variância para a massa de matéria seca e teor de nutrientes da parte aérea da soja em casa-de-vegetação

	Causas de variação e F			CV %
	Compactação (C)	Conteúdo de água (U)	C x U	
Matéria seca	11,6 **	142,2 **	8,9 **	12,59
Nitrogênio	1,0 NS	15,6 **	17,3 **	11,37
Fósforo	16,1 **	9,8 **	24,5 **	6,94
Potássio	2,5 NS	15,2 **	18,7 **	7,31
Cálcio	0,4 NS	2,9 NS	1,1 NS	9,87
Magnésio	8,3 **	0,4 NS	4,4 *	7,17
Enxofre	0,3 NS	0,1 NS	3,3 NS	14,81
Boro	3,4 NS	1,0 NS	0,3 NS	13,89
Cobre	3,2 NS	1,8 NS	16,8 **	6,54
Ferro	3,1 NS	0,0 NS	0,0 NS	18,51
Manganês	1,4 NS	0,1 NS	0,9 NS	33,49
Zinco	0,3 NS	22,4 **	5,9 *	8,63

NS, * e ** Não significativo e significativo a 5 e 1%, respectivamente.

Tabela 4. Matéria seca e teor de nutrientes acumulados na parte aérea da soja, em três níveis de compactação e dois conteúdos de água no LVD, em casa-de-vegetação

Nutriente	Conteúdo de água kg kg ⁻¹	Nível de compactação		
		1	2	3
Matéria seca(g vaso ⁻¹)	0,12	8,1 Ba	8,7 Ba	4,6 Bb
	0,17	12,1 Ab	17,9 Aa	15,0 Aab
N (g kg ⁻¹)	0,12	22,5 A	25,2 A	30,5 A
	0,17	26,9 A	19,8 B	16,6 B
P (g kg ⁻¹)	0,12	2,6 Ba	2,5 Aa	2,8 Aa
	0,17	3,0 Aa	2,3 Ab	1,8 Bc
K (g kg ⁻¹)	0,12	19,7 A	20,3 A	23,1 A
	0,17	21,9 A	18,1 A	15,1 B
Ca (g kg ⁻¹)	0,12	19,7	20,3	23,1
	0,17	21,9	18,1	15,1
Mg (g kg ⁻¹)	0,12	4,9 Ab	6,0 Aa	6,5 Aa
	0,17	5,5 Aa	5,8 Aa	5,8 Ba
S (g kg ⁻¹)	0,12	2,1	2,3	2,5
	0,17	2,6	2,1	2,0
B (mg kg ⁻¹)	0,12	51,7	49,0	43,0
	0,17	51,3	42,7	40,7
Cu(mg kg ⁻¹)	0,12	7,3	7,7	9,7
	0,17	8,3	8,0	7,3
Fe (mg kg ⁻¹)	0,12	325,7	260,3	258,7
	0,17	329,3	271,7	259,1
Mn (mg kg ⁻¹)	0,12	99,7	80,3	80,0
	0,17	99,7	65,7	80,0
Zn(mg kg ⁻¹)	0,12	34,7 Ab	39,0 Aab	42,0 Aa
	0,17	34,3 Aa	31,3 Ba	29,7 Ba

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha (entre níveis de compactação) e maiúscula na coluna (entre níveis de umidade) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste de Tukey foi aplicado apenas quando o teste F foi significativo.

Tabela 5. Análise de variância para a massa de matéria seca e teor de nutrientes da parte aérea da soja no campo

	Causas de variação e F			CV %
	Compactação (C)	Conteúdo de água (U)	C x U	
Matéria seca	4,3 **	3,6 ^{NS}	0,4 ^{NS}	17,74
Nitrogênio	0,8 ^{NS}	0,0 ^{NS}	0,1 ^{NS}	10,80
Fósforo	0,5 ^{NS}	0,3 ^{NS}	0,5 ^{NS}	8,22
Potássio	1,8 ^{NS}	1,0 ^{NS}	1,7 ^{NS}	6,00
Cálcio	1,3 ^{NS}	3,8 ^{NS}	0,6 ^{NS}	7,89
Magnésio	6,1 **	0,2 ^{NS}	0,7 ^{NS}	3,80
Enxofre	3,8 *	16,3 **	0,9 ^{NS}	2,80
Boro	1,4 ^{NS}	0,0 ^{NS}	0,2 ^{NS}	9,20
Cobre	1,3 ^{NS}	0,2 ^{NS}	0,7 ^{NS}	23,96
Ferro	1,7 ^{NS}	6,9 *	1,2 ^{NS}	8,56
Manganês	1,4 ^{NS}	0,1 ^{NS}	0,3 ^{NS}	14,12
Zinco	0,9 ^{NS}	0,3 ^{NS}	0,3 ^{NS}	8,86

^{NS}, * e ** Não significativo e significativo a 5 e 1%, respectivamente.

Tabela 6. Matéria seca e teor de nutrientes acumulados na parte aérea da soja, em seis níveis de compactação no LVd, no campo

Nutriente	Conteúdo de água	Nível de compactação					
		1	2	3	4	5	6
Matéria seca(g vaso ⁻¹)	Sequeiro	3,7ab	4,6a	4,3ab	4,2ab	3,2b	3,5b
	Irrigado	3,8ab	4,3a	3,6ab	3,8ab	3,1b	2,8b
N (g kg ⁻¹)	Sequeiro	43,6	41,5	44,6	38,7	42,2	44,6
	Irrigado	41,8	43,1	43,4	38,8	44,6	44,1
P (g kg ⁻¹)	Sequeiro	2,9	3,0	3,2	3,2	2,8	2,9
	Irrigado	3,0	2,9	3,0	2,9	3,0	2,8
K (g kg ⁻¹)	Sequeiro	23,4	22,7	26,0	25,9	26,7	25,0
	Irrigado	27,5	24,5	25,7	24,4	26,5	24,8
Ca (g kg ⁻¹)	Sequeiro	7,8	7,6	8,0	8,0	7,8	7,6
	Irrigado	7,7	8,1	9,4	8,5	8,0	8,1
Mg(g kg ⁻¹)	Sequeiro	4,6a	4,2abc	4,5ab	4,1abc	4,0bc	3,9c
	Irrigado	4,4a	4,1abc	4,3ab	4,2abc	4,1bc	4,0c
S (g kg ⁻¹)	Sequeiro	2,6Aab	2,6Aab	2,6Aab	2,7Aa	2,4Ab	2,5Aab
	Irrigado	2,5Bab	2,5Bab	2,4Bab	2,6Ba	2,4Bb	2,4Bab
B (mg kg ⁻¹)	Sequeiro	38,5	36,0	40,5	41,0	40,0	39,5
	Irrigado	35,5	37,0	40,5	43,0	40,0	38,5
Cu(mg kg ⁻¹)	Sequeiro	6,5	6,5	7,5	7,0	6,0	6,5
	Irrigado	8,0	7,5	7,5	6,0	4,5	5,0
Fe (mg kg ⁻¹)	Sequeiro	114,0A	98,5A	117,0A	105,0A	92,0A	100,5A
	Irrigado	96,5B	88,5B	95,0B	99,0B	94,0B	99,0B
Mn(mg kg ⁻¹)	Sequeiro	87,5	87,5	95,5	97,0	91,0	100,5
	Irrigado	77,5	94,0	98,5	95,0	92,0	111,0
Zn (mg kg ⁻¹)	Sequeiro	33,5	31,5	36,0	37,5	34,0	36,0
	Irrigado	35,5	34,0	36,5	35,5	34,5	36,5

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha (entre níveis de compactação) e maiúscula na coluna (entre níveis de umidade) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). O teste de Tukey foi aplicado apenas quando o teste F foi significativo.

No experimento de casa-de-vegetação, a produção de matéria seca foi menor no terceiro nível de compactação (RP= 3,76 MPa; Ds= 1,73 g cm⁻³), no menor conteúdo de água de 0,12 kg kg⁻¹. No conteúdo de água de 0,17 kg kg⁻¹ não houve redução da produção de matéria seca até o terceiro nível de compactação (RP= 2,69 MPa) (Tabelas 3 e 4). Isso deve-se ao maior impedimento mecânico no menor conteúdo de água no solo, visto que a resistência à penetração de raízes tem relação inversa exponencial com o conteúdo de água. Nesse caso, a maior RP possivelmente restringiu o crescimento e a distribuição do sistema radicular no solo, conforme verificado para o mesmo solo por Beutler e Centurion (2004). Assim, diminuiu a taxa de absorção de água, além do menor conteúdo de água desse tratamento (0,12 kg kg⁻¹), comparado a 0,17 kg kg⁻¹, visto que o teor de nutrientes na parte aérea foi semelhante ao solo menos compactado. Além disso, Tardieu (1994) menciona que em solo compactado ocorre rápida depleção da água nos poros ocupados pelas raízes, aumentando a resistência à penetração nas paredes dos poros e a resistência ao fluxo de água em direção as raízes.

Por outro lado, a menor produção de matéria seca no solo compactado também pode ter ocorrido por causa de um segundo fator. Nessa condição, a planta produz hormônios na raiz e envia à parte aérea, informando que as condições de crescimento estão se restringindo e levando a planta a reduzir o crescimento (Mulholland *et al.*, 1996).

No entanto, no maior conteúdo de água no solo (0,17 kg kg⁻¹) houve maior produção de matéria seca da parte aérea da soja, corroborando os estudos de Johnson *et al.* (1990) e Pearce *et al.* (1993) (Tabelas 3 e 4).

Em relação ao teor de nutrientes na parte aérea, no terceiro nível de compactação, no menor conteúdo de água (0,12 kg kg⁻¹) verificou-se maior teor de N, P, K, Mg e Zn, comparado ao maior conteúdo de água (0,17 kg

kg⁻¹). Isso ocorreu possivelmente devido ao efeito de concentração do teor de nutrientes em função da menor massa de matéria seca, que foi três vezes inferior à matéria seca acumulada no conteúdo de água de 0,17 kg kg⁻¹, conforme discutido por Jarrell e Beverly (1981). Por sua vez, no menor conteúdo de água (0,12 kg kg⁻¹), ocorreu “consumo de luxo” de nutrientes no solo, visto que apresentou maior teor de nutrientes na planta e menor produção de matéria seca da parte aérea, por causa do menor conteúdo de água disponível para as plantas absorverem e se desenvolverem normalmente, corroborando com Johnson *et al.* (1990). Isso é confirmado ao se verificar que a análise de solo após a colheita não revelou diferença entre os tratamentos, mesmo utilizando pequenos volumes de solo (9,82 L de solo) (Tabela 2).

O efeito da compactação do solo no teor de nutrientes na parte aérea da soja é pouco conclusivo. Verificou-se redução nos teores de P, no maior conteúdo de água, e aumento nos teores de Mg e Zn no menor conteúdo de água de 0,12 kg kg⁻¹. Neste contexto, Borges *et al.* (1988) verificaram redução do teor de P, K, Mg e Ca; Dolan *et al.* (1992) observaram menores teores de P e K; Rosolem *et al.* (1994) encontraram apenas teor de N inferior e, Fernandez *et al.* (1995) obtiveram decréscimos nos teores de N e Mg e incrementos nos teores de P, Ca e K, na parte aérea da soja.

No experimento de campo, os efeitos da compactação e do conteúdo de água no solo foram menos evidentes no desenvolvimento da soja (Tabelas 5 e 6).

A produção de matéria seca da parte aérea da soja foi menor a partir do quinto nível de compactação do solo, na condição de sequeiro e irrigado (RP= 4,01 MPa e Ds= 1,74 g cm⁻³). Explicação razoável para esse fato é que o impedimento mecânico ao crescimento radicular induziu as raízes das plantas à produção de hormônios que informam a parte aérea que o

crescimento deve ser reduzido, conforme estudos de (Mulholland *et al.*, 1996). Isso possivelmente ocorreu, já que a redução do crescimento da parte aérea ocorreu na condição de sequeiro e irrigado, sugerindo que o fator água não foi limitante, e o teor de nutrientes na parte aérea das plantas foi semelhante estatisticamente (Tabela 6).

O efeito da compactação e do conteúdo de água no solo (irrigação) foi pouco evidente no teor de nutrientes na parte aérea da soja (Tabelas 5 e 6), porém a compactação prejudicou a produção de matéria seca.

Finalmente, pode-se afirmar que a deficiência dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn possivelmente não foi fator limitante à produção de massa de matéria seca das plantas de soja, mas sim a deficiência de água, no experimento de casa-de-vegetação, e o excesso de impedimento mecânico ao crescimento radicular em ambos experimentos.

CONCLUSÕES

A compactação do solo causou decréscimo da massa de matéria seca, porém teve pouco efeito no teor de nutrientes na parte aérea da soja.

As plantas acumularam mais matéria seca na parte aérea no maior conteúdo de água ($0,17 \text{ kg kg}^{-1}$) e, menores teores de alguns nutrientes, comparado ao menor conteúdo de água ($0,12 \text{ kg kg}^{-1}$), em casa-de-vegetação. No campo, a irrigação teve pouco benefício para esses parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R., 1983. **Métodos de análise química das plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico. 48p. (Boletim Técnico, 78).

- BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E., 1990. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **J. Soil Sci.**, 41:341-358.
- BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F., 2001. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: **Soil environmental analysis: Physical Methods**. 2. ed. Marcel Dekker, Inc. p.377-403.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F., 2004. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesq. Agropec. Bras.**, 39:581-588.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P., 2004. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, 9:181-192.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H., 1986b. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. v.1. p.363-375.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H., 1986a. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. v.1, p.377-382.
- BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F. de; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B.; BARROS, N.F., 1988. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **R. Ceres**, 35:553-568.
- CARTER, M.R., 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Can. J. Soil Sci.**, 70:425-433.
- DOLAN, M.S.; DOWDY, R.H.; VOORHEES, W.B.; JOHNSON, J.F.; BIDWELL-SCHRADER, A.M., 1992. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. **Agron. J.**, 84:639-642.

- FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.A.C.; THIMOTEO, C.M. de S.; ROSOLEM, C.A., 1995. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. **Científica**, 23:117-132.
- GEDIGA, K., 1991. Influence of subsoil compaction on the uptake of ⁴⁵Ca from the soil profile and on maize yield. **Soil Till. Res.**, 19:351-355.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W., 1986. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. part. 1. p. 383-411.
- JARRELL, W.M.; BEVERLY, R.B., 1981. The dilution effect in plant nutrition studies. **Adv. Agron.**, 34:197-224.
- JOHNSON, J.F.; VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W., 1990. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agron. J.**, 82:973-979.
- KLUTE, A., 1986. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy. part. 1, p. 635-662.
- KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T., 1991. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use Man.**, 7:52-56.
- MEROTTO, A.J.; MUNDSTOCK, C.M., 1999. Wheat root growth as affected by soil strength. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:197-202.
- MULHOLLAND, B.J.; BLACK, C.R.; TAYLOR, I.B.; ROBERTS, J.A.; LENTON, J.R., 1996. Effect of soil compaction on barley (*Hordeum vulgare* L.) growth. I. Possible role for ABA as a root-sourced chemical signal. **J. Exp. Bot.**, 47:539-549.
- PEARCE, R.C.; GRABAU, L.J.; GROVE, J.H.; LIN, H., 1993. Development of double-crop soybean under different soil water regimes. **Agron. J.**, 85:576-583.

- RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.H.; FURLANI, A.M.C., 1996. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: INSTITUTO AGRONÔMICO & FUNDAÇÃO IAC, 285p. (Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C., 1987. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill. 170p.
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C. da S.; SACRAMENTO, L.V.S. do., 1994. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, 53:259-266.
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C., 1999. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesq. Agropec. Bras.**, 34:821-828.
- STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y., 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant Soil**, 185:151-162.
- TARDIEU, F., 1994. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to coil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil Till. Res.**, 30:217-243.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J., 1966. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Sci.**, 102:18-22.
- VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M.; WILLIGEN, P.; BOONE, F.R.; KOOISTRA, M.J., 1992. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency. **Plant Soil**, 139:131-138.

-
- WOLFE, D.W.; TOPOLESKI, D.T.; GUNDERSHEIM, N.A.; INGALL, B.A., 1995. Growth and yield sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. **J. Am. Soc. Hort. Sci.**, 120:956-963.
- VOORHEES, W.B.; LINDSTORM, M.J., 1983. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northorn corn belt. **J. Soil Water Cons.**, 38:307-311.