

# SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

## CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DE EUCALIPTO EM RESPOSTA À COMPACTAÇÃO DE LATOSSOLOS COM DIFERENTES UMIDADES<sup>(1)</sup>

Sérgio Ricardo Silva<sup>(2)</sup>, Nairam Félix de Barros<sup>(3)</sup> & José Eliel Braga Vilas Boas<sup>(4)</sup>

### RESUMO

O crescimento radicular e a produtividade de eucalipto são diretamente influenciados pela compactação do solo durante as operações florestais, particularmente pela colheita de madeira, cujos efeitos são intensificados sob condições de alta umidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de níveis de compactação do solo com diferentes umidades sobre o crescimento e nutrição de mudas de eucalipto. Foram utilizados um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxidico-gibbsítico e um Latossolo Amarelo (LA) caulinítico. Os tratamentos consistiram de cinco pressões de compactação (0, 60, 120, 180 e 240 kPa) e de três conteúdos de água (0,05; 0,10 e 0,20 kg kg<sup>-1</sup>, este último correspondendo a 100 % do equivalente de umidade), em arranjo fatorial e dispostos em quatro blocos casualizados. Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de 1,66 dm<sup>3</sup>, em anéis de PVC, e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, no LVA e LA. Em seguida, as amostras de solo foram adubadas, umedecidas, acondicionadas nos recipientes e compactadas em uma prensa CBR equipada com anel dinamométrico. Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade resultante por meio do novo volume ocupado pelo solo. O experimento foi colhido 60 dias após a emergência das plântulas de eucalipto, para determinação da matéria seca de raízes e parte aérea, da densidade radicular e do conteúdo total de nutrientes na planta. Houve aumento da densidade dos solos em resposta à compactação, sendo a manifestação deste efeito intensificada com o aumento da umidade do solo. No solo oxidico-gibbsítico (LVA), a produção de matéria seca de raízes e total, a densidade radicular e o conteúdo de nutrientes na planta foram

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada à Universidade Federal de Viçosa (MG), para obtenção do Título de Doutor em Solos e Nutrição de Plantas. Financiada pela CAPES. Recebido para publicação em maio de 2005 e aprovado em agosto de 2006.

<sup>(2)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Veracel Celulose S.A. CEP 45.820-970 Eunápolis (BA). E-mail: sergio.silva@veracel.com.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36570-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: nfbarrros@ufv.br

<sup>(4)</sup> Engenheiro-Agrônomo. E-mail: elielufv@yahoo.com.br

reduzidos pela compactação do solo em maior conteúdo de água (0,20 kg kg<sup>-1</sup>). Observou-se que não houve efeito do aumento da compressão deste solo sobre a produtividade do eucalipto, em menores valores de umidade (0,05 e 0,10 kg kg<sup>-1</sup>) durante a compactação. Os nutrientes cuja absorção foi mais afetada pela compactação do solo com maior umidade (0,20 kg kg<sup>-1</sup>) foram: Fe > Zn > Cu > P = Mg, no solo oxidico-gibbsítico; e K, no solo caulinitico (LA). O solo caulinitico foi mais sensível aos efeitos da compactação do que o solo oxidico-gibbsítico, limitando, com maior intensidade, a produção de matéria seca de raiz e a absorção de Fe, Cu, N, S e Zn. Verificou-se que a umidade no momento da compressão do solo foi o fator determinante para a manifestação dos efeitos deletérios da compactação sobre o crescimento e nutrição do eucalipto.

**Termos de indexação:** densidade do solo, densidade radicular, nutrição de plantas, mineralogia do solo.

**SUMMARY:** *EUCALYPTUS GROWTH AND NUTRITION AS AFFECTED BY LATOSOL COMPACTION AT DIFFERENT MOISTURES*

*Eucalypt root growth and yield are affected directly by soil compaction during forestry operations, particularly harvesting. These effects are intensified under high soil moisture conditions. An experiment was carried out under controlled conditions in order to evaluate the effects of compaction under increased soil moisture levels, on seedling growth and nutrition. An oxidic-gibbsitic Red Yellow Latosol (LVA) and a kaolinitic Yellow Latosol (LA) were used. The treatments consisted of five compaction pressure levels (0, 60, 120, 180, and 240 kPa) and three soil volumetric water content (0.05, 0.10 and 0.20 kg kg<sup>-1</sup>, the last one corresponding to field capacity), arranged in four randomized blocks. A quantity of soil was calculated to occupy 1.66 dm<sup>3</sup> in a PVC pipe section at a bulk density of 1.05 and 1.10 kg dm<sup>-3</sup>, respectively, for the LVA and LA. Subsequently, the soil samples were fertilized, moistened, placed in PVC ring pots and compacted with a CBR press. After soil compaction, the resulting bulk density was calculated, according to the new volume occupied by the soil. Sixty days after eucalypt seedling emergence, the plants were harvested for root and shoot dry weight determination, root density estimation, and plant nutrient analyses. The increase of bulk density by soil compaction was intensified by soil moisture. Increasing soil compaction reduced root and shoot growth, root density and plant nutrient content at the highest volumetric water content (0.20 kg kg<sup>-1</sup>) in oxidic-gibbsitic soil (LVA), but did not affect eucalypt dry matter yield at the lower volumetric water levels. The most affected nutrients under the compacted condition were: Fe > Zn > Cu > P = Mg in the oxidic-gibbsitic soil, and K in the kaolinitic soil. This soil was more sensitive to compaction than oxidic-gibbsitic soil, causing stronger restrictions on the root dry matter yield and Fe, Cu, N, S, and Zn uptake. This study results support soil moisture at pressure application as the main factor for the negative effects of soil compaction on eucalypt seedling growth and nutrition.*

*Index terms:* Soil bulk density, root density, plant nutrition, soil mineralogy.

## INTRODUÇÃO

Um dos problemas no manejo de máquinas florestais consiste em decidir quando as operações mecanizadas de colheita e preparo do solo devem ser realizadas, considerando a condição de umidade do solo, que é fator determinante de sua capacidade de suporte de carga (Dias Júnior, 2000). Quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação, mas, à medida que ele vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre

os agregados, o qual facilita o deslocamento e o rearranjo das partículas do solo, diminuindo sua resistência à compactação (Hillel, 1980).

A compactação reduz o crescimento de plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Misra & Gibbons, 1996; Mapfumo et al., 1998; Ishaq et al., 2001). A inibição na extensão de raízes em solos compactados está relacionada com vários fatores. Em solos secos, o aumento da resistência mecânica e o decréscimo do potencial de água no solo podem ser

mais importantes. Em contrapartida, em solos úmidos, a deficiência de oxigênio e a acumulação de CO<sub>2</sub>, etileno e fitotoxinas são os fatores principais (Conlin & Driessche, 1996; Marschner, 1995). Quando a concentração de O<sub>2</sub> é muito baixa, pode ocorrer redução na pressão de turgescência da célula ou, mesmo, maior resistência da parede celular ao alongamento (Borges et al., 1997). Conlin & Driessche (1996) verificaram que a compactação promoveu o aumento da taxa de respiração e a redução da fotossíntese líquida em plântulas de *Pinus contorta*, tendo esses fatores também contribuído para a redução do crescimento das plantas.

Silva et al. (2002) observaram que a compactação do solo restringiu o crescimento e aumentou o diâmetro médio de raízes de eucalipto, além de proporcionar redução do acúmulo de K na planta, reduzindo a eficiência de utilização de K e a eficiência da adubação potássica. Rosolem et al. (1994) verificaram decréscimo significativo da produção de matéria seca de raízes e do conteúdo total de N em plantas de soja com o aumento da densidade do solo. Shierlaw & Alston (1984) verificaram decréscimo do comprimento radicular e da matéria seca de plantas de milho em resposta à compactação do solo, além de ter ocorrido maior absorção de fósforo, por unidade de comprimento de raiz, em solos compactados do que naqueles sem compactação.

Oberhauser et al. (2002), em experimento de compactação de dois Latossolos com diferentes umidades, verificaram que houve decréscimo da produção de matéria seca e do comprimento radicular de *Eucalyptus grandis*, cujos efeitos negativos foram

mais pronunciados nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo durante a compactação.

Apesar de representar um problema para o crescimento de florestas manejadas, poucos experimentos foram realizados para estimar os efeitos da compactação sobre o desenvolvimento de eucalipto. Estudos feitos em condições mais controladas podem servir para avaliar os efeitos da compactação sobre o crescimento de raízes e da parte aérea e sobre a nutrição das plantas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de pressões de compactação do solo com diferentes umidades sobre o crescimento e nutrição de mudas de eucalipto.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dois solos com mineralogias distintas, um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) oxidico-gibbsítico do município de Santa Maria de Itabira, MG (19° 23' 58" S e 42° 54' 12" W; altitude de 850 m), e um Latossolo Amarelo (LA) caulinitico do município de Santana do Paraíso, MG (19° 22' 58" S e 42° 28' 56" W; altitude de 230 m). Os solos foram coletados em povoamentos de eucalipto, na meia-encosta do relevo ondulado, na profundidade de 0-15 cm, secos ao ar, passados em peneira de 4 mm de malha e homogeneizados, para posterior análise química e física (Quadro 1).

**Quadro 1. Caracterização dos solos utilizados no experimento**

Característica	LVA	LA
COT (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>	2,76	2,20
N-total (dag kg <sup>-1</sup> ) <sup>(2)</sup>	0,15	0,13
P (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	0,78	5,14
K (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	24	29
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(4)</sup>	0,18	1,02
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) <sup>(4)</sup>	0,07	0,15
Zn (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	1,40	2,77
Fe (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	37,50	46,67
Mn (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	1,50	8,00
Cu (mg dm <sup>-3</sup> ) <sup>(3)</sup>	0,56	0,66
pH <sup>(5)</sup>	4,5	4,8
Equivalente de umidade (kg kg <sup>-1</sup> )	0,2	0,2
Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> )	1,05	1,10
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	470	510
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	90	40
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	440	450
Classe textural	Argila	Argila
SiO <sub>2</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(6)</sup>	71,29	135,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(6)</sup>	172,93	139,99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>(6)</sup>	60,64	44,64
Classe mineralógica	Oxidico-gibbsítico	Caulinitico

<sup>(1)</sup> Carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988). <sup>(2)</sup> Nitrogênio total (Bremner & Mulvaney, 1982). <sup>(3)</sup> Extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1978). <sup>(4)</sup> Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. <sup>(5)</sup> pH em água, relação 1:2,5. <sup>(6)</sup> Extrato do ataque sulfúrico (Embrapa, 1997).

Antes do cultivo, foi efetuada adubação com os seguintes nutrientes, em  $\text{mg dm}^{-3}$ : 50 de N, 300 de P, 75 de K, 40 de S, 0,81 de B, 1,33 de Cu, 1,55 de Fe, 3,66 de Mn, 0,15 de Mo e 4 de Zn. Os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram nivelados nos solos para 2,02 e  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , respectivamente. A adubação de cobertura, com  $50 \text{ mg dm}^{-3}$  de N e  $75 \text{ mg dm}^{-3}$  de K, foi feita 40 dias após a emergência das plântulas.

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, utilizando delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial constituído por cinco níveis de pressão de compactação e três de umidade do solo. Foram utilizados tubos de PVC de 100 mm de diâmetro com fundo de isopor, com capacidade de  $1,88 \text{ dm}^3$ , que continha um volume constante de solo de  $1,66 \text{ dm}^3$ . Calculou-se a quantidade de cada solo para ocupar o volume de  $1,66 \text{ dm}^3$  e atingir as densidades de 1,05 e  $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$ , respectivamente, no LVA e LA. No entanto, antes de serem acondicionadas nos vasos, as amostras de solo tiveram a umidade elevada até atingir os conteúdos de água estabelecidos para os respectivos tratamentos. A seguir, foi realizada a compactação dos solos em uma prensa hidráulica equipada com anel dinamométrico. As pressões de compactação do solo foram de 0, 60, 120, 180 e 240 kPa, e as umidades ( $U_c$ ) do solo durante a compactação foram de 0,05; 0,10 e  $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$  (100 % do equivalente de umidade). Após a aplicação da pressão, determinou-se a densidade do solo. Foi semeado *Eucalyptus urophylla* e, após a emergência, foi feito o desbaste, deixando uma planta por vaso.

O material do experimento foi colhido 60 dias após a emergência das plântulas, sendo determinada a matéria seca da parte aérea (MSPA) das plantas, após secagem em estufa a  $65^\circ \text{C}$  por 72 h. Foi retirada de cada vaso, ao lado da planta, uma amostra de solo ao longo de todo o perfil do vaso com auxílio de trado com 3,80 cm de diâmetro interno. A amostra foi submetida à lavagem em água corrente, sobre peneira de 0,25 mm de abertura para retirada de raízes, a serem utilizadas na mensuração do comprimento radicular pelo método da intercepção de linhas (Tennant, 1975). Estimou-se a densidade radicular (DR) pela divisão do comprimento radicular pelo volume de solo amostrado. Após esta mensuração, as raízes foram secas para determinação da matéria seca (MSR1). As raízes restantes em cada vaso foram lavadas em água corrente sobre peneira de 0,25 mm de abertura e secas em estufa para determinação da matéria seca (MSR2). Desta forma, obteve-se a matéria seca total de raízes ( $\text{MSR} = \text{MSR1} + \text{MSR2}$ ). Do somatório da MSPA e MSR, obteve-se a matéria seca total (MST).

Amostras de material vegetal foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (Johnson & Ulrich, 1959) para determinar os teores dos nutrientes: P, por colorimetria pelo método do azul de molibdênio (Braga & Defelipo, 1974); K por fotometria de chama; Ca, Mg,

Zn, Cu, Fe e Mn, por espectrofotometria de absorção atômica. O N foi obtido por oxidação úmida e determinado pelo método Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982). Foi obtido o conteúdo total dos nutrientes na planta pelo somatório do produto dos teores pela MSR e MSPA.

Os resultados, separadamente para cada solo, foram submetidos à análise de variância, de correlação e de regressão, sendo os coeficientes das equações ajustadas testados com base no quadrado médio do resíduo da ANOVA do experimento. Dentre os modelos significativos, foi escolhido o que apresentou maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 apresenta os resultados de densidade do solo ( $D_s$ ) após a compactação com diferentes umidades. Houve aumento da  $D_s$  em resposta às pressões de compactação, sendo a manifestação deste efeito intensificada com o aumento da umidade do solo. Os incrementos atingiram 5,4 e 10,9 %, respectivamente, no LVA e LA, nos solos compactados com pressão de 240 kPa na maior umidade ( $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$ ), próximo à capacidade de campo.

O maior aumento da  $D_s$  no LA deveu-se à mineralogia deste solo, visto que a caulinita se modela e, ou, deforma mais facilmente do que os óxidos, quando sujeita à pressão, especialmente sob umidade elevada (Ferreira et al., 1999). Por sua vez, o LVA

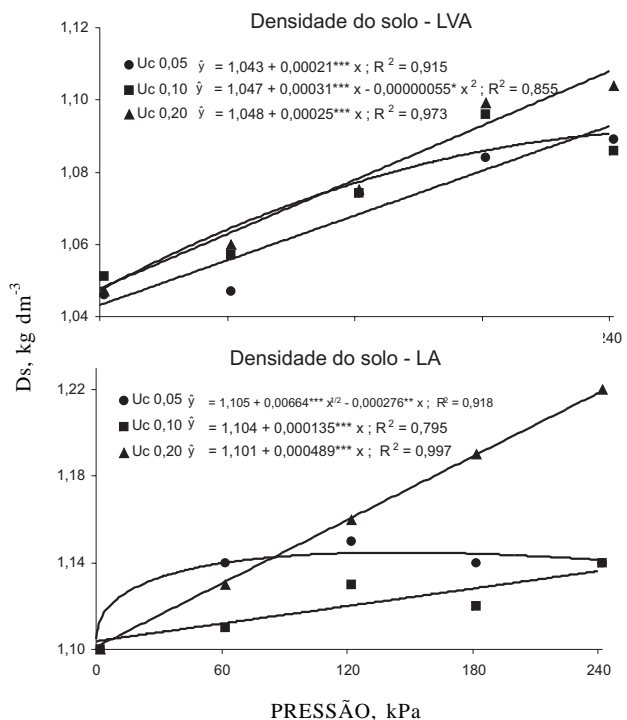


Figura 1. Densidade de dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

contém óxidos de Fe e de Al, com agregados pequenos e extremamente estáveis, que conferem ao LVA maior resistência à deformação quando sujeito à pressão (Ferreira et al., 1999).

No LVA, a produção de matéria seca de raízes (MSR) e total (MST) e a densidade radicular (DR) foram reduzidas pela compactação do solo na maior umidade (0,20 kg kg<sup>-1</sup>) (Figura 2). Neste solo, esta redução atingiu 40, 30 e 39 %, respectivamente, para MSR, MST e DR (pressão de 240 kPa e U<sub>c</sub> = 0,20 kg kg<sup>-1</sup>). A compactação reduziu o crescimento das plantas por seu efeito no crescimento de raízes e conseqüente redução na absorção de água e de nutrientes (Mapfumo et al., 1998; Ishaq et al., 2001; Silva et al., 2002).

Observou-se no LVA que, em baixos valores de umidade, não houve efeito do aumento da pressão sobre a produção do eucalipto, demonstrando que a água é o fator determinante para a manifestação dos efeitos da compactação, uma vez que facilita o ajuste de partículas e reduz a resistência dos agregados à deformação física.

No LA, não houve resposta às pressões de compactação quanto à produção de MSR e MST (exceção para U<sub>c</sub> = 0,05 kg kg<sup>-1</sup> em que houve ganhos de MST com a compactação) (Figura 2). No entanto, o aumento da pressão, em maiores conteúdos de água no solo (0,10 e 0,20 kg kg<sup>-1</sup>), acarretou redução da DR. Esta redução da densidade de raízes por efeito da compactação também foi obtida por outros pesquisadores (Misra & Gibbons, 1996; Nadian et al., 1996; Coelho et al., 2000; Ishaq et al., 2001, Silva et al., 2002).

A inibição na extensão de raízes em solos compactados está relacionada com vários fatores. Em solos secos, o aumento da resistência mecânica e o decréscimo do potencial de água no solo podem ser mais importantes. Em contrapartida, em solos úmidos, a deficiência de oxigênio e a acumulação de CO<sub>2</sub>, etileno e fitotoxinas são os fatores principais (Conlin & Driessche, 1996; Marschner, 1995). Quando a concentração de O<sub>2</sub> é muito baixa, pode ocorrer redução na pressão de turgescência da célula

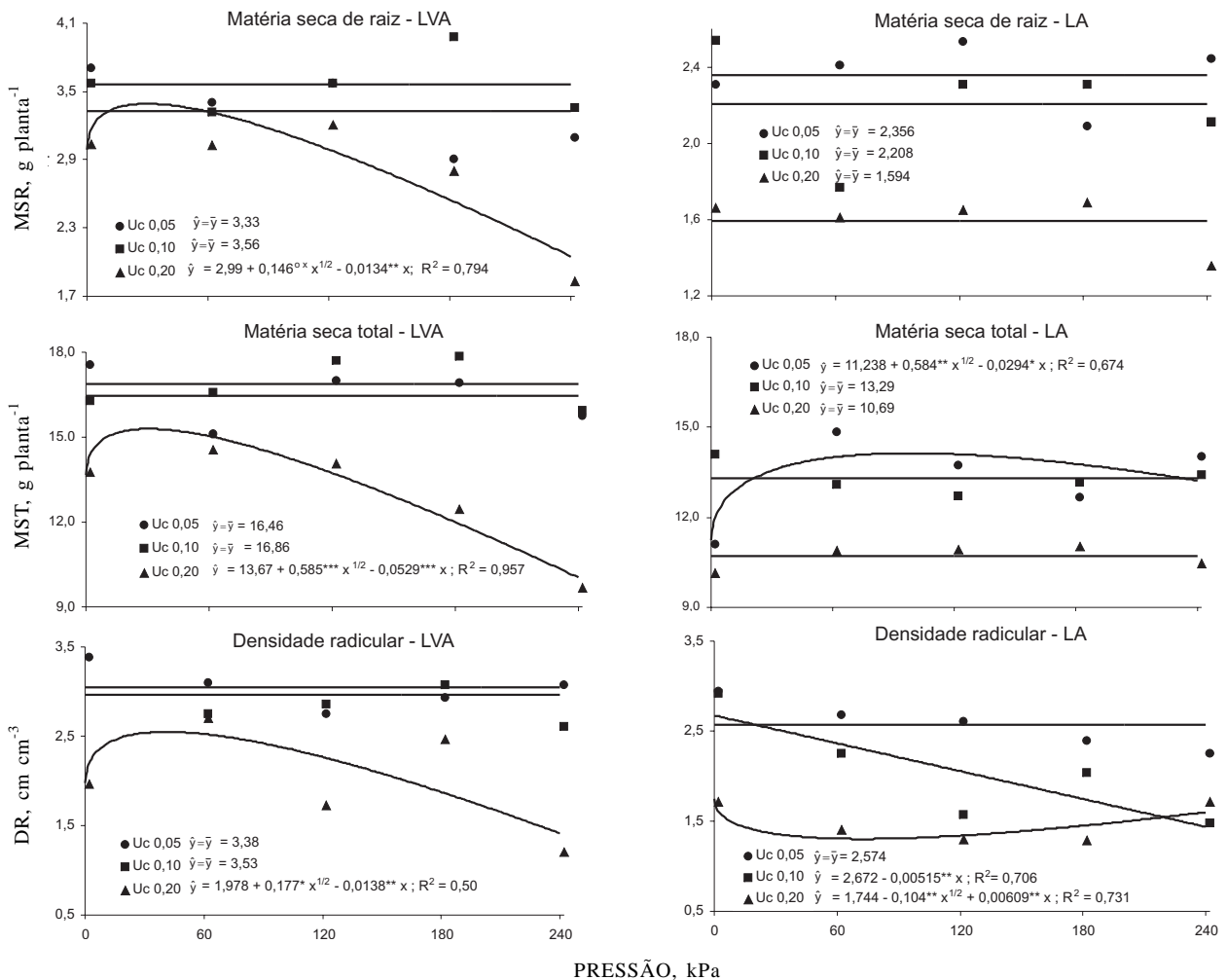


Figura 2. Densidade radicular, matéria seca de raiz e total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

ou, mesmo, maior resistência da parede celular ao alongamento (Borges et al., 1997).

No LVA e LA, foi evidenciado o efeito negativo de maiores conteúdos de água no solo durante a compactação, ocasionando redução da produção de matéria seca e densidade radicular (Figura 2). É importante observar que, mesmo no tratamento cujo solo não foi compactado na prensa (pressão = 0 kPa), houve menores valores de MSR, MST e DR justamente nos tratamentos com maior conteúdo de água (0,20 kg kg<sup>-1</sup>). Isto é atribuído ao umedecimento das amostras de solo, segundo os tratamentos (Uc = 0,05; 0,10 e 0,20 kg kg<sup>-1</sup>), antes de serem colocadas nos vasos, ocorrendo maior expansão de volume naqueles solos mais úmidos. Desta forma, ao serem acondicionados nos vasos para ocupar o volume de 1,66 dm<sup>3</sup> e atingir as densidades de 1,05 e 1,10 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, no LVA e LA, ocorreu compressão adicional do solo e ajuste de partículas durante a realização deste procedimento, especialmente nos solos mais úmidos, mesmo que não tenha ocorrido alteração

da densidade final. No entanto, esse ajuste de partículas parece ter permanecido durante o experimento, podendo ter ocorrido selamento parcial do solo, que prejudicou o crescimento de raízes. Este fato é mais evidente no LA, o que pode ser atribuído à morfologia laminar da caulinita (filossilicato) e à sua capacidade de modelagem e, ou, deformação sob alta umidade (Ferreira et al., 1999). É importante destacar que esse ajuste de partículas, proporcionado pela compactação do solo, promove a reorganização do sistema poroso, ou seja, modifica a distribuição do tamanho, alongação e continuidade vertical dos poros, como observado por Marsili et al. (1998), reduzindo a infiltração da água no solo, acarretando formação de ambiente anaeróbico, o qual é prejudicial ao desenvolvimento radicular.

Houve resposta diferenciada ao acúmulo de cada nutriente na planta (Figuras 3, 4 e 5), em decorrência da grande complexidade e interação dos fatores envolvidos nos processos de transporte de nutrientes no solo e absorção destes pelas raízes das plantas, ambos

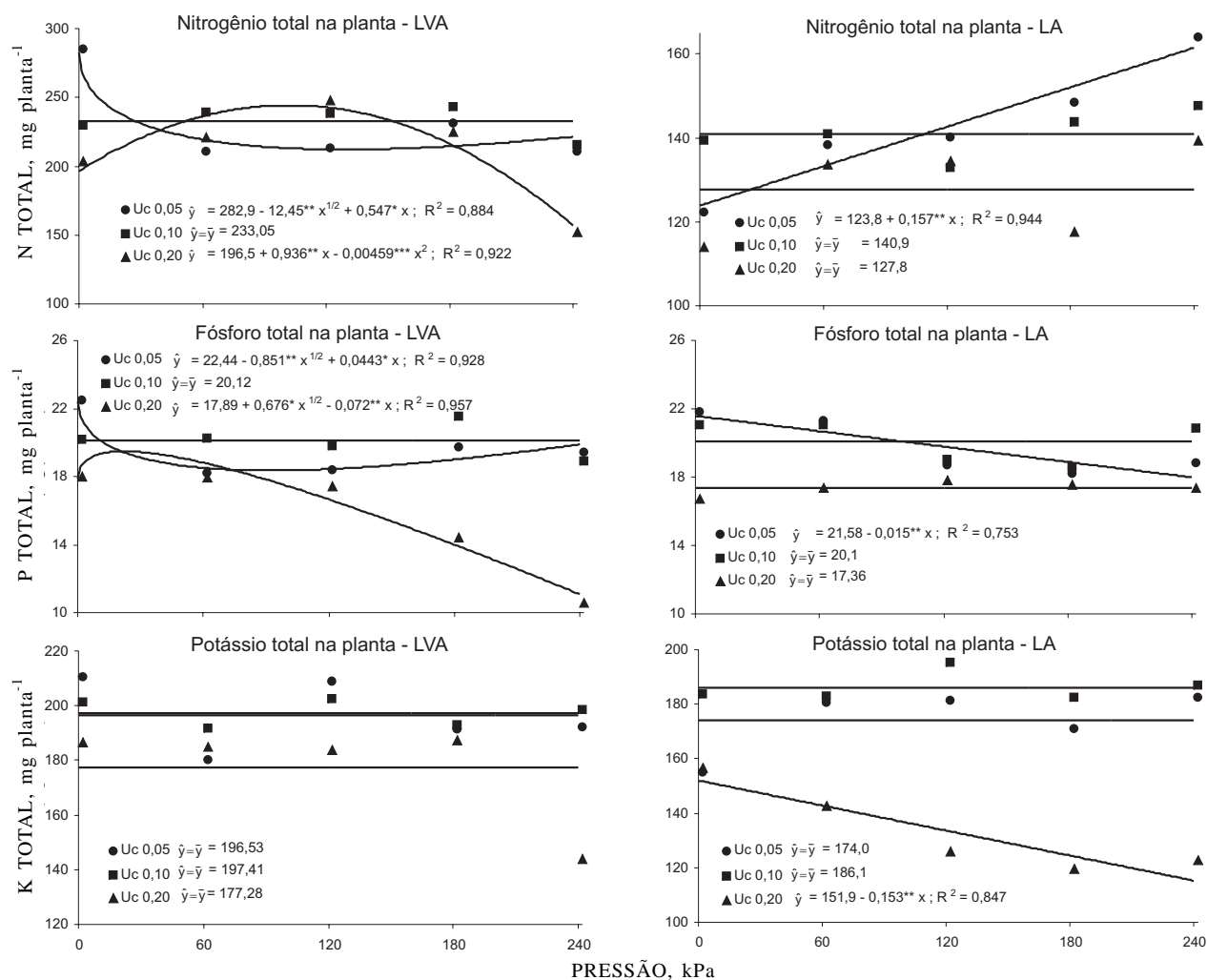
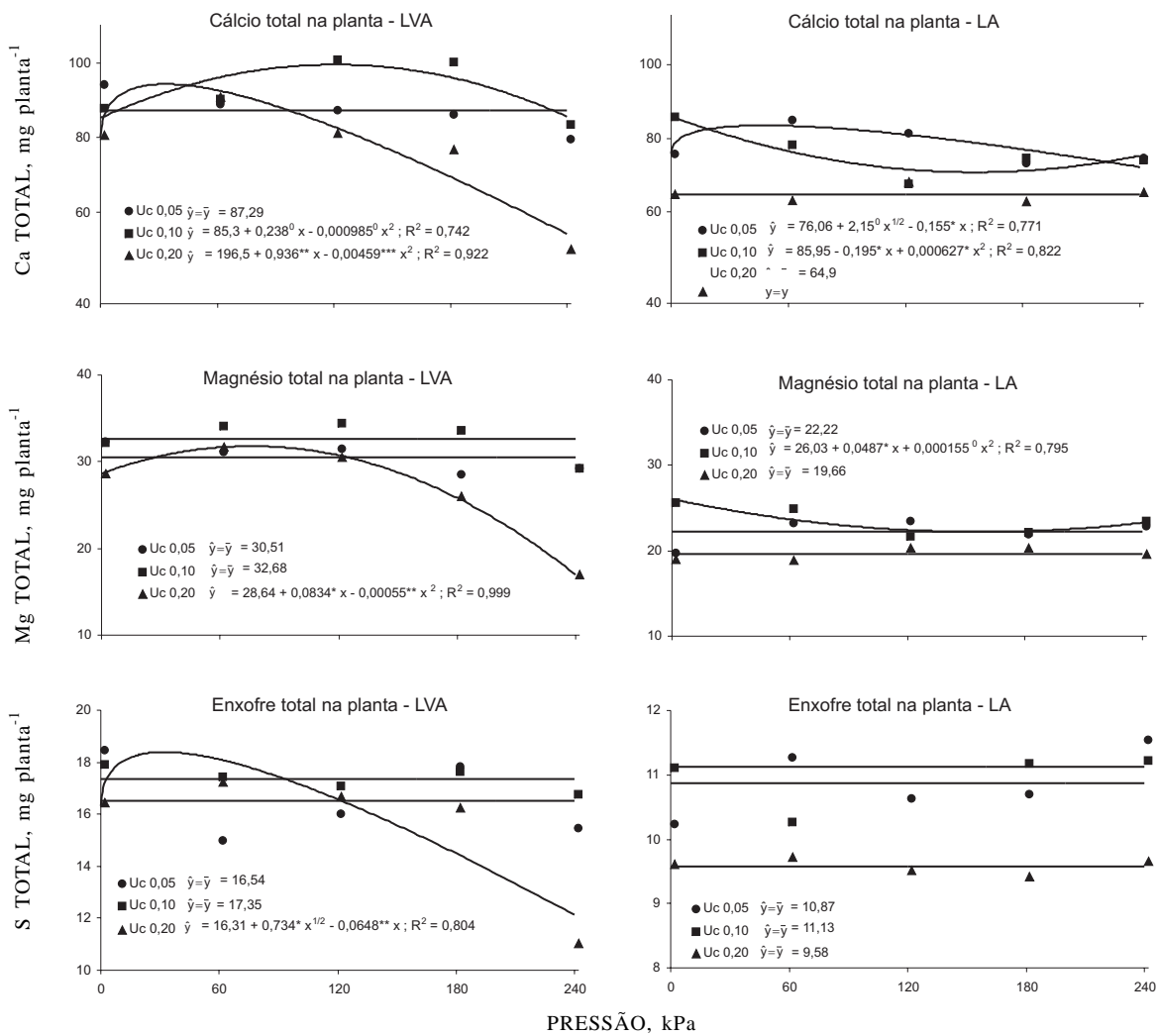


Figura 3. Conteúdos de nitrogênio, fósforo e potássio na matéria seca total de eucalypto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.



**Figura 4. Conteúdos de cálcio, magnésio e enxofre na matéria seca total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.**

influenciados pela compactação. Para que atinjam os sítios de absorção das raízes, os nutrientes devem ser transportados na solução do solo (Jungk, 1991). Os mecanismos de transporte – fluxo de massa e difusão – dependem do tipo de solo e do crescimento radicular. Por isso, a influência da compactação sobre esses mecanismos não apresenta comportamento específico. Verificou-se, em determinados trabalhos, ser o transporte ora aumentado ora diminuído pela compactação (Shierlaw & Alston, 1984; Lowery & Schuler, 1991; Dolan et al., 1992; Rosolem et al., 1994; Novais & Smyth, 1999).

Nas figuras 3, 4 e 5, o acúmulo da maioria dos nutrientes em resposta às crescentes pressões de compactação acompanhou a curva de produção de MST, o que fica evidente por meio das significativas ( $p < 0,001$ ), positivas e altas correlações obtidas no LVA entre MST e conteúdo total de N ( $r = 0,766$ ), P ( $r = 0,925$ ), K ( $r = 0,751$ ), Ca ( $r = 0,833$ ), Mg ( $r = 0,872$ ), S ( $r = 0,794$ ), Zn ( $r = 0,796$ ), Fe ( $r = 0,631$ ), Cu ( $r = 0,563$ ) e Mn ( $r = 0,554$ ). No LA essas correlações,

apesar de menores na maioria das vezes, também foram altamente significativas ( $p < 0,001$ ): N ( $r = 0,733$ ), P ( $r = 0,514$ ), K ( $r = 0,821$ ), Ca ( $r = 0,718$ ), Mg ( $r = 0,793$ ), S ( $r = 0,653$ ), Zn ( $r = 0,448$ ), Fe ( $r = 0,486$ ), Cu ( $r = 0,387$ ) e Mn ( $r = 0,413$ ).

Nos tratamentos com maior conteúdo de água no solo no momento da compactação, houve maior efeito negativo das pressões sobre o acúmulo de alguns nutrientes nas plantas. No LVA, os nutrientes que tiveram o acúmulo na planta mais afetado pela compactação (pressão = 240 kPa; e Uc = 0,20 kg kg<sup>-1</sup>) foram, em ordem decrescente: Fe (-58 %) > Zn (-53 %) > Cu (-43 %) > P (-41 %) = Mg (-41 %) > Ca (-38 %) > S (-33 %) > N (-25 %) > Mn (-18 %). No LA, estes efeitos foram maiores para o K (-22 %). Esta redução do acúmulo de nutrientes nas plantas é consequência direta do menor crescimento radicular em solos compactados. Para alguns nutrientes, como o P, a compactação reduziu também o fluxo difusivo na solução solo, como observado por Shierlaw & Alston (1984) e Nadian et al. (1996).

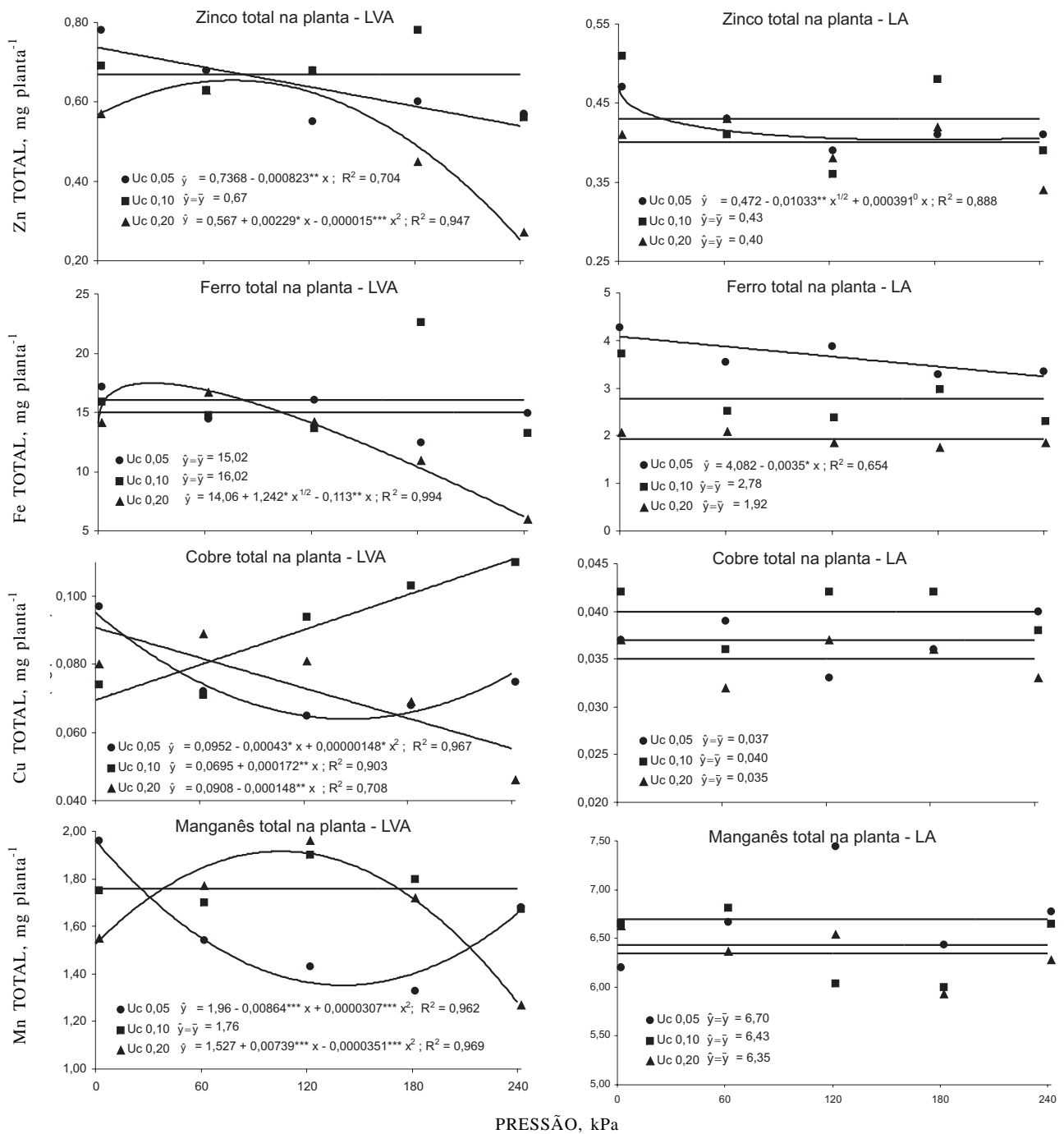


Figura 5. Conteúdos de zinco, ferro, cobre e manganês na matéria seca total de eucalipto em dois Latossolos compactados com diferentes pressões e umidades.

Observa-se, em algumas situações, que um nível intermediário de compactação do solo favoreceu o acúmulo de alguns nutrientes na planta, destacando-se N (Uc = 0,20 kg kg<sup>-1</sup>, no LVA; e Uc = 0,05 kg kg<sup>-1</sup>, no LA); Ca (Uc = 0,10 kg kg<sup>-1</sup>, no LVA; e Uc = 0,05 kg kg<sup>-1</sup>, no LA); Mg, S, Zn, Fe e Mn (Uc = 0,20 kg kg<sup>-1</sup>, no LVA); e Cu (Uc = 0,10 kg kg<sup>-1</sup>, no LVA). Segundo Oliveira et al. (1998), com o aumento da densidade do solo, a difusão aumentou até atingir

um máximo e depois decresceu. Esse aumento deveu-se à maior aproximação entre as partículas do solo e as raízes, o que favoreceu a continuidade do filme de água e diminuiu a distância que o íon deve percorrer até alcançar a raiz.

Verificou-se, nas figuras 3, 4 e 5, que as plantas cultivadas no solo caulinitico (LA) acumularam, de modo geral, menor quantidade de nutrientes em relação ao solo oxidico-gibssitico (LVA), principalmente



de Fe, Cu, N, S e Zn. Isto deveu-se, principalmente, ao menor crescimento radicular e produção de matéria seca no LA.

### CONCLUSÕES

1. A umidade no momento da compressão do solo foi determinante para manifestação dos efeitos deletérios da compactação sobre o crescimento e nutrição do eucalipto.

2. Os nutrientes cuja absorção foi mais afetada pela compactação do solo com maior umidade (0,20 kg kg<sup>-1</sup>) foram: Fe > Zn > Cu > P = Mg, no solo oxidíco-gibbsítico (LVA); e K, no solo caulínítico (LA).

3. O solo caulínítico mostrou-se mais sensível aos efeitos da compactação do que o solo oxidíco-gibbsítico, limitando, com maior intensidade, a produção de matéria seca de raiz e a absorção de Fe, Cu, N, S e Zn.

### LITERATURA CITADA

- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F. & COSTA, L.M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um Latossolo com compactação simulada. R. Bras. Ci. Solo, 21:125-130, 1997.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen – Total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis, 2.ed. Part 2. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.595-624.
- COELHO, M.B.; MATEOS, L. & VILLALOBOS, F.J. Influence of a compacted loam subsoil layer on growth and yield of irrigated cotton in Southern Spain. Soil Till. Res., 57:129-142, 2000.
- CONLIN, T.S.S. & DRIESSCHE, R.V.D. Short-term effects of soil compaction on growth of *Pinus contorta* seedlings. Can. J. For. Res., 26:727-739, 1996.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.
- DOLAN, M.S.; DOWDY, R.H.; VOORHEES, W.B.; JOHNSON, J.F. & BIDWELL-SCHRADER, A.M. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. Agron. J., 84:639-642, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.
- HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. Amherst, University of Massachusetts, Academic Press, 1980. 413p.
- ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M. & LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. Soil Till. Res., 60:153-161, 2001.
- JOHNSON, C.M. & ULRICH, A. Analytical methods for use in plants analyses. Los Angeles, University of California, 1959. v.766. p.32-33
- JUNGK, A. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: WAISEL, J.; ESHEL, A. & KAFKAFI, U., eds. Plant roots, the hidden half. New York, Marcel Dekker, 1991. p.455-481.
- LOWERY, B. & SCHULER, R.T. Temporal effects of subsoil compaction on soil strength and plant growth. Soil Sci. Soc. Am. J., 55:216-223, 1991.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. Agron. J., 90:805-812, 1998.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. San Diego, Academic Press, 1995. 889p.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M. & VIENOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passes of rubber and metal-tracked tractors. Soil Till. Res., 49:185-199, 1998.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 9:477-492, 1978.
- MISRA, R.K. & GIBBONS, A.K. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. Plant Soil, 182:1-11, 1996.
- NADIAN, H.; SMITH, S.E.; ALSTON, A.M. & MURRAY, R.S. The effect of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum*: interactions with mycorrhizal colonisation. Plant Soil, 182:39-49, 1996.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- OBERHAUSER, A.G.; SILVA, S.R. & BARROS, N.F. Crescimento de eucalipto e densidade de dois Latossolos influenciados pela compactação do solo a diferentes umidades. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., Rio de Janeiro, 2002. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. CD-ROOM
- OLIVEIRA, C.V.; BAHIA, V.G. & PAULA, M.B. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. Inf. Agropec., 191:46-48, 1998.
- ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S. & SACRAMENTO, L.V.S.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. Bragantia, 53:259-266, 1994.

- SHIERLAW, J. & ALSTON, A.M. Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil*, 77:15-28, 1984.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. & PEREIRA, P.R.G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1001-1010, 2002.
- TENNANT, D.A. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.*, 63:995-1001, 1975.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.