

Características do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido

Root systems attributes of *Eucalyptus grandis* trees response to increasing doses of biosolids

Luiz Fernando da Silva Martins
Fábio Poggiani
Ricardo Ferraz de Oliveira
Marcelino Carneiro Guedes
José Leonardo de Moraes Gonçalves

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de biossólido sobre a configuração do sistema radicular de absorção (raízes finas) de uma plantação de *Eucalyptus grandis*, aos 3 anos de idade. O povoamento apresenta um espaçamento de 2m nas linhas e de 3m nas entrelinhas de plantio, sendo que o biossólido foi aplicado nas entrelinhas em faixas de 2m de largura, quatro meses após o plantio das mudas no campo. Os tratamentos foram: 1) Testemunha "Tt"; 2) Adubação mineral, N-P-K e micronutrientes "Ad"; 3) 10t ha⁻¹ de biossólido com potássio "10t+K"; 4) 10t ha⁻¹ de biossólido com potássio e fósforo "10t+KP"; 5) 20t ha⁻¹ de biossólido com potássio "20t+K"; e 6) 40t ha⁻¹ de biossólido com potássio "40t+K". Para a amostragem das raízes finas, foi utilizada uma sonda cilíndrica de aço com 4 cm de diâmetro. A distribuição de raízes finas no perfil do solo foi determinada nas camadas entre 0-10 e 10-30 cm de profundidade nas linhas e nas entrelinhas de plantio. As raízes finas (≤ 3 mm de espessura), contidas nas amostras de solo foram lavadas e tiveram seus comprimentos e diâmetros médios determinados pelo sistema Delta T SCAN. Considerando todas as amostras coletadas nas linhas e nas entrelinhas, a maior densidade de raízes finas foi encontrada na camada superficial do solo (0-10 cm) com densidade média de 6,58 cm cm⁻³, decaindo para 1,83 cm cm⁻³ na camada inferior do solo (10-30 cm). Os tratamentos que apresentaram maiores valores de densidade de raízes finas na camada superficial, foram o "Tt" (8,20 cm cm⁻³) e o "Ad" (7,77 cm cm⁻³) e os menores valores foram observados nos tratamentos com biossólido, com média de 5,87 cm cm⁻³. Quanto ao diâmetro, em média os maiores valores foram encontrados nas linhas de plantio (0,47 mm) e os menores valores (0,38 mm) nas entrelinhas. Na camada superficial, nas linhas de plantio, o tratamento "Tt" foi o que apresentou a maior superfície específica de raízes finas, com 1,36 cm² cm⁻³, ao passo que uma menor superfície específica foi observada nos tratamentos com adição de biossólido com média de 0,76 cm² cm⁻³.

PALAVRAS-CHAVE: Raízes finas, Eucalipto, Biossólido, Lodo de esgoto urbano

ABSTRACT: The aim of this study was to evaluate the use of increasing doses of biosolids on the root system of planted eucalypt. The research was conducted in a three years old stand of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, located at the Forest Experimental Station of Itatinga (ESALQ/USP- State of São Paulo) in experimental plots with 2 m spacing between the trees planted in the same row and 3 m between rows. The biosolids was applied only between the rows of planting. The treatments were: 1) control "Tt"; 2) inorganic fertilizers "Ad"; 3) 10t ha⁻¹ of biosolids with potassium "10t+K"; 4) 10t ha⁻¹ of biosolids with potassium and phosphorus "10t+KP"; 5) 20t ha⁻¹ of biosolids with potassium "20t+K"; 6) 40t ha⁻¹ of biosolids with potassium "40t+K". To sample the fine roots, it was used a stainless steel cylindrical probe with the diameter of 4 cm. Fine roots distribution in the soil profile was established in

two layers from 0 to 10 and 10 to 30 cm along the row of planting and in the area between the rows. The fine roots were washed and had the average length and thickness settled by Delta T Scan System. The density average of eucalypt fine roots (≤ 3 mm thick), in the soil surface layer (0-10 cm) was $6,58 \text{ cm cm}^{-3}$, decreasing to $1,83 \text{ cm cm}^{-3}$ in the lower soil layer (10-30 cm). The treatments that presented higher fine roots density in the soil surface layer were, "Tt" ($8,20 \text{ cm cm}^{-3}$) and the "Ad" ($7,77 \text{ cm cm}^{-3}$). The smallest value ($5,87 \text{ cm cm}^{-3}$) was found in the treatments with biosolids. The highest diameter value (0,47 mm) was found in the planting rows, while the smallest value (0,38 mm) were found in the area between the rows. The treatment that presented fine roots with highest specific surface area was "Tt" ($1,36 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$). The smallest root specific surface area was observed in treatments with biosolids with average $0,76 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$.

KEYWORDS: Fine roots, Eucalypt, Biosolid, Sewage sludge

INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil possui aproximadamente 5 milhões de hectares com plantações homogêneas, predominando as espécies de *Eucalyptus* e de *Pinus* (Gonçalves et al. 2000; Scarf, 2003). Os povoados florestais, geralmente, são implantados em solos de baixa fertilidade, freqüentemente depauperados por longos anos pela agricultura e pecuária. Esses solos trazem consigo toda uma história de modificações em suas propriedades físico-químicas, como esgotamento nutricional e desestabilidade de agregados que podem levar a um reflexo negativo na produtividade do povoamento florestal.

A aplicação do biossólido (lodo de esgoto urbano tratado e higienizado), no solo de florestas plantadas e em áreas agrícolas, está-se credenciando como a melhor alternativa para a disposição final desse resíduo (Van Raij, 1998).

Nos Estados Unidos, desde a década de 70 e mais recentemente na Austrália, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas, destacando-se as alterações benéficas promovidas no solo pela aplicação do biossólido, proporcionada principalmente pela matéria orgânica e nutrientes presentes em sua composição, sendo estes os principais fatores que melhoram as características químicas e físicas do solo que elevam a produtividade das plantações florestais (Henry et al., 1994; Harrison et al., 1994; Polglase e Myers, 1995; Dickens et al., 2002).

O conteúdo de material orgânico presente na composição do biossólido pode promover no ambiente radicular alterações desejáveis, como aumento da capacidade de retenção de umidade, diminuição da resistência física à penetração de raízes, melhoria das condições de movimentação

de nutrientes no solo etc (Martins et al., 1997; Fisher e Binkley, 2000). Entretanto, o biossólido pode gerar alguns impactos negativos, como por exemplo, o acúmulo de nitrogênio e de metais pesados no solo.

Quantificar e conhecer a distribuição do sistema radicular no perfil do solo é de fundamental importância como fonte de subsídios para explicar processos ecofisiológicos básicos como a nutrição mineral e balanço hídrico de uma árvore.

Analisando os estudos referentes ao efeito da adição de biossólido em plantações de eucalipto, podem ser citados alguns trabalhos que indicam: aumento na produtividade florestal, na produção e na decomposição do folheto (Guedes, 2000); melhorias nas características químicas e físicas do solo (Vaz, 2000; Rocha, 2002) e aumento da área basal e da densidade das copas das árvores (Martins, 2002). Entretanto, são escassas as referências em relação ao desenvolvimento do sistema radicular.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito de doses crescentes de biossólido, resultante do tratamento do lodo de esgoto, produzido na região metropolitana de São Paulo, sobre a densidade, diâmetro e superfície específica das raízes finas das árvores de *Eucalyptus grandis*.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Itatinga da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", localizada no município de Itatinga, Estado de São Paulo. As coordenadas

geográficas da área são: 23° 02' 01" e 23° 02' 30" latitude Sul e os meridianos 48° 38' 34" e 48° 37' 30" longitude Oeste, com altitude média de 830 m.

Os solos da região apresentam profundidades superiores a 2 metros, bem drenados e formados a partir de arenitos. O relevo é composto por topos aplainados e encostas de formas retilíneas apresentando declividade entre 10 e 15%. A área de estudo está localizada sobre um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa: mesotérmico úmido com inverno seco. A precipitação média anual é de aproximadamente de 1167 mm e geralmente não se observa déficit hídrico na área.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido num delineamento em blocos casualizados, com 6 tratamentos e 4 repetições. Cada parcela experimental é constituída por 100 plantas, ou seja, 10 linhas com 10 plantas cada. Apenas 36 plantas centrais foram consideradas nas avaliações dendrométricas e as demais deixadas como bordadura dupla. A espécie florestal utilizada foi o *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden, procedente de Coff's Harbour, Austrália. O plantio com mudas formadas a partir de sementes foi realizado em fevereiro de 1998, utilizando espaçamento de 3,0 m na entrelinha e 2,0 m na linha de plantio. As doses crescentes de biossólido aplicadas nos diferentes tratamentos foram distribuídas em superfície e sem incorporação, conforme descrito por Vaz (2000).

Os tratamentos utilizados foram:

- ✓ Testemunha "Tt" – Sem fertilização mineral e sem aplicação de biossólido;
- ✓ Adubação mineral "Ad" – 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (a lanço na área total), 110 kg ha⁻¹ de adubo N-P-K 0-45-0 (sulco de plantio), 150 kg ha⁻¹ de 10-20-10 (sulco de plantio), 80 kg ha⁻¹ de 20-0-20 (45 dias pós-plantio aplicado em meia lua próximo à muda), 180 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% Boro + 0,5% de Zinco (6 meses pós-plantio aplicado numa faixa de 40 cm na entrelinha de plantio) e 240 kg ha⁻¹ de 16-0-32 + 0,3% Boro + 0,5% de Zinco (12 meses pós-plantio aplicado numa faixa de 40 cm na entrelinha de plantio);

- ✓ 10 t ha⁻¹ de biossólido, complementado com Potássio "10t + K";
- ✓ 10 t ha⁻¹ de biossólido, complementado com Potássio e Fósforo "10t + KP";
- ✓ 20 t ha⁻¹ de biossólido, complementado com Potássio "20t + K";
- ✓ 40 t ha⁻¹ de biossólido, complementado com Potássio "40t + K".

Os tratamentos 3, 4, 5 e 6 receberam suplementação de potássio (KCl, 60% de K₂O), até que as quantidades de potássio contidas no biossólido somadas às do fertilizante potássico ficassem iguais à do tratamento 2 (125 kg ha⁻¹ de K). O tratamento 4 recebeu a mesma dose de fósforo (superfosfato triplo) que o tratamento 2 (34,73 kg ha⁻¹ de P). Em julho de 1998, foi feita a aplicação de biossólido, em faixas com 2 m de largura nas entrelinhas, mantendo-se uma distância de 50 cm das linhas de plantio para evitar possíveis efeitos diretos sobre as mudas.

A suplementação de potássio foi parcelada em três vezes. A primeira parcela de KCl, 35 kg ha⁻¹ de K₂O₃, foi aplicada em meia lua ao redor das plantas, seis meses após o plantio; a segunda, 58 kg ha⁻¹ de K₂O₃, aplicada em faixas de 40 cm de largura, no centro das entrelinhas, 12 meses após o plantio, e a terceira parcela restante foi aplicada em faixas de 40 cm de largura, no centro das entrelinhas, 18 meses após o plantio. O superfosfato usado no tratamento 4 foi aplicado no sulco de plantio.

Foi realizada capina química, utilizando glifosato, um mês após o plantio e efetuada uma roçada manual treze meses depois. O controle de formigas cortadeiras foi realizado com iscas formicidas, a base de sulfuramina, pré e pós-implantação.

Caracterização e aplicação do biossólido utilizado

O biossólido usado foi produzido na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), localizada em Barueri, SP, após tratamento biológico dos esgotos gerados pela grande São Paulo, por meio de condicionamento químico com cloreto férrico e cal (FeCl₃ e CaOH₂) e desidratado na fase final. A adição de cal que eleva

seu pH para 10,6 visa também a redução de patógenos que podem estar presentes no biossólido, sendo este caracterizado como Biossólido tipo B (CETESB, 1999), o que significa que a densidade de coliformes fecais no resíduo é inferior a 2×10^6 NMP g ST⁻¹ (Número Mais Provável por grama de Sólidos Totais). Na Tabela 1 é apresentada a composição do biossólido aplicado na área experimental.

A distribuição do biossólido na área experimental foi realizada em julho de 1998, utilizando-se uma carreta com 3 m³ de capacidade puxada por um trator e especialmente regulada para cada dose de aplicação. O biossólido (60% de umidade) foi aplicado a lanço em cobertura nas entrelinhas, mantendo-se uma distância aproximada de meio metro da linha de plantio das mudas de *Eucalyptus grandis*, produzidas por semente, e previamente plantadas em abril de 1998.

Coleta de raízes finas

Para a amostragem das raízes finas (≤ 3 mm de espessura), foi utilizada uma sonda cilíndrica de aço inoxidável, com 4 cm de diâmetro interno, especialmente fabricada para a coleta de solo. Foram selecionadas 4 árvores médias quanto ao diâmetro à altura do peito (d.a.p.) na área central de cada parcela experimental. Tendo como ponto de partida os troncos de 2 árvores, foram retiradas 3 amostras nas linhas e 3 amostras nas entrelinhas de plantio em intervalos de 0,50 m. Foi dada uma atenção especial na escolha das árvores para evitar a presença de falhas, tocos e plantas daninhas nas proximidades dos pontos de coleta.

Tabela 1

Característica do biossólido utilizado: elementos totais, base seca a 65°C produzido pela ETE Barueri (Guedes e Poggiani, 2003).

(Biosolids characteristics used: total elements, dry mass 65°C produced from ETE Barueri).

Elemento	Concentração	Elemento	Concentração
C (g kg ⁻¹)	114,0	Cu (mg kg ⁻¹)	900
N (g kg ⁻¹)	26,6	Fe (mg kg ⁻¹)	39200
Relação C:N	4,3	Zn (mg kg ⁻¹)	1500
P (g kg ⁻¹)	9,5	Mn (mg kg ⁻¹)	300
K (g kg ⁻¹)	1,3	Na (g kg ⁻¹)	0,5
Ca (g kg ⁻¹)	95,0	Cd (mg kg ⁻¹)	21
Mg (g kg ⁻¹)	3,0	Pb (mg kg ⁻¹)	200
S (g kg ⁻¹)	6,0	pH em CaCl ₂	10,6

A distribuição das raízes finas no perfil do solo foi determinada na camada entre 0-10 e 10-30 cm de profundidade. A amostragem foi realizada em fevereiro de 2001. As amostras retiradas da área experimental foram imediatamente acondicionadas em sacos plásticos perfeitamente vedados e mantidas sob refrigeração para evitar a dessecação e morte das raízes.

Lavagem e separação de raízes finas

Para a lavagem e separação das raízes finas, foi utilizado o lavador e separador de raízes semi-automático Delta T Root Washer, idealizado por Kirchhof & Pendar, na Austrália, com capacidade para grande volume de solo (Delta T, 1995). Após a lavagem das amostras para a remoção das partículas de solo e material orgânico, as raízes finas (≤ 3 mm de espessura) foram acondicionadas numa solução contendo 70% de álcool etílico. Todo material (solo+raiz) não prontamente separado foi mantido sob refrigeração.

Comprimento, diâmetro e superfície específica de raízes finas

O comprimento total e o diâmetro médio das raízes finas com espessura ≤ 3 mm foram medidos pelo sistema Delta T SCAN Image Analysis Software (DELTA T SCAN, 1993). A superfície específica radicular (S) foi calculada através da fórmula:

$$S = \pi \cdot T \cdot L_s$$

onde:

S = Superfície específica radicular

T = Diâmetro

L_s = Comprimento total de raízes

O valor obtido foi dividido pelo volume de solo amostrado, e o resultado expresso em $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ de solo.

Todas as variáveis referentes ao comprimento, diâmetro e superfície específica de raízes finas foram analisadas através da Análise de Variância, e a comparação das médias com diferença significativa, através do teste de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Densidade de raízes finas

Na Figura 1 pode ser observado que a densidade média de raízes finas decresce da camada superior para a camada inferior do solo. Considerando todas as amostras coletadas nas linhas e nas entrelinhas de plantio, constatou-se que a densidade média de raízes finas foi de $6,58 \text{ cm cm}^{-3}$, na camada superficial do solo entre 0 e 10 cm e de $1,83 \text{ cm cm}^{-3}$ entre 10 e 30 cm de profundidade.

Considerando todos os tratamentos, na camada entre 0 e 10 cm de profundidade, os maiores valores de densidade de raízes finas foram

encontrados no tratamento “Tt” ($8,20 \text{ cm cm}^{-3}$) e no “Ad” ($7,77 \text{ cm cm}^{-3}$). Nos tratamentos que receberam doses crescentes de biossólido mais complementação “10t+K”, “10t+KP”, “20t+K” e “40t+K”, constatou-se uma diminuição na densidade de raízes finas com um valor médio de $5,87 \text{ cm cm}^{-3}$.

Semelhantemente, vários autores estudando diversas espécies florestais, relataram as variações na distribuição de raízes finas no perfil do solo, sendo na camada superficial o maior acúmulo (Kramer e Kozlowski, 1979; Vogt et al., 1981; Persson, 1983; Jordan, 1985; Reis et al., 1985; Gonçalves, 1994; Leles, 1995; Barber, 1995; Sanford e Cuevas, 1996; Mello, 1997; Anghinoni e Meurer, 1999; Laclau et al., 2001).

A densidade de raízes finas pode ser um fator relacionado com a característica do genótipo e, neste caso específico, estaria também relacionada com o comportamento nutricional, potencial produtivo e capacidade de adaptação às condições de estresse ambiental.

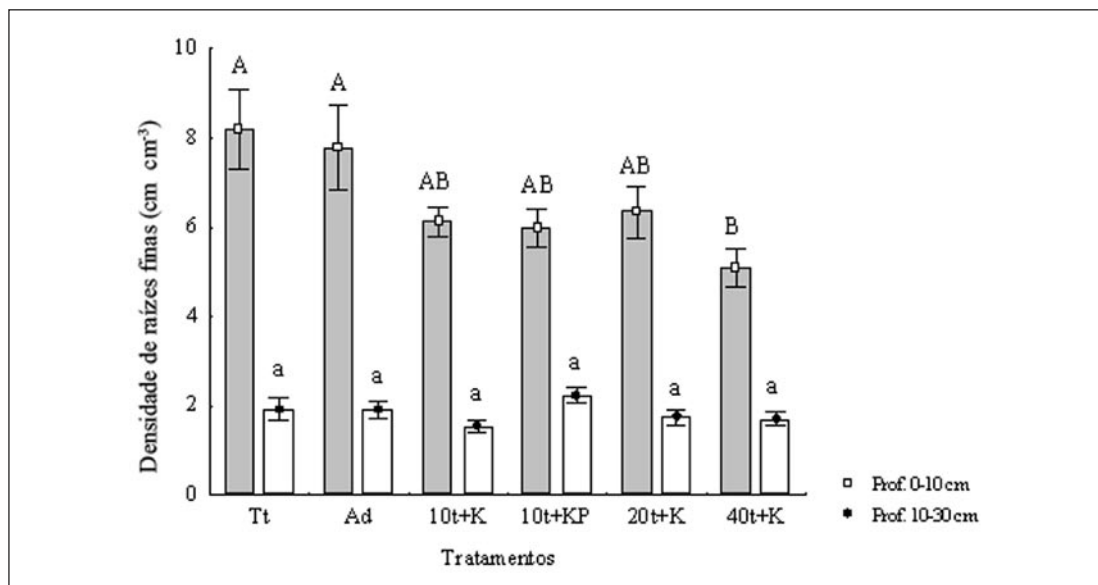


Figura 1

Densidade de raízes finas (média ± erro padrão), na camada entre 0 e 10 cm e 10 e 30 cm de profundidade nas parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* aos 3 anos de idade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

(Fine roots density (means ± standard error), in soil layers from 0-10 and 10-30 cm depth in the experimental portion of three years old *Eucalyptus grandis*. Means followed by the same letter are not significantly different ($P > 0,05$).

Comparando os tratamentos que receberam doses crescentes de biossólido (Figura 1), verifica-se que a densidade de raízes finas caiu, mas não significativamente, de $6,11 \text{ cm cm}^{-3}$, no tratamento “10t+K” com menor dose de biossólido, para $5,07 \text{ cm cm}^{-3}$ no tratamento “40t+K”, com maior dose de biossólido. Todavia, comparando-se os tratamentos “Tt”, “Ad” com o tratamento “40t+K”, observa-se uma diferença significativa, sendo que neste último tratamento, entre 0 e 10 cm de profundidade, a densidade de raízes foi 36% inferior à testemunha. Estes resultados estão de acordo com as conclusões de Reis et al. (1985) e Gonçalves (1994), ou seja, quanto maior a produtividade do sítio relacionada com a fertilidade do solo, menor é a densidade de raízes finas das árvores.

Fazendo-se uma analogia com os dados obtidos por outros pesquisadores, que integram este projeto na mesma área experimental, Vaz (2000) constatou que a elevação das doses de biossólido aplicado resultou em ganhos na produtividade de madeira e atribuiu este fato à maior disponibilidade de nutrientes liberados pelo biossólido. Rocha (2002), aos 32 meses após a aplicação do biossólido, constatou uma melhoria na fertilidade do solo, registrando aumento significativo dos teores de carbono orgânico e pH, além de uma maior disponibilização de P e Ca e uma acentuada redução no teor de alumínio, associada às doses crescentes de biossólido aplicadas. Observou, ainda, que a disponibilização destes elementos no solo, até 20 cm de profundidade, foi superior também ao tratamento com adubação mineral (Ad).

Andrade e Matiazzo (2003) encontraram um aumento do teor de N nas folhas um ano após a aplicação do biossólido. Guedes (2000) observou que o tratamento “40t+K” aumentou em 40% a produção de serapilheira e também acelerou sua decomposição, disponibilizando mais rapidamente os nutrientes para as raízes. Também, Guedes e Poggiani (2003) constataram ao longo do tempo aumentos significativos de N, P, Ca e S nas folhas dos eucaliptos tratados com doses crescentes de biossólido. Martins (2002), aos 35 meses de idade das árvores do mesmo talhão experimental, observou maiores incrementos da área basal nos

tratamentos “10t+KP” e “40t+K”. Os diversos resultados obtidos no mesmo experimento indicam, portanto, que a melhoria das condições químicas e físicas do solo promovidas pela adição do biossólido podem estar reduzindo a necessidade da alocação dos fotoassimilados das copas das árvores para a produção de raízes finas, tendo em vista a pronta disponibilidade de macro e micronutrientes na camada superficial do solo, proporcionada pela aplicação deste resíduo orgânico.

Por outro lado, segundo Kramer e Kozłowski (1979), Reis et al. (1985), Gonçalves (1994) e Gonçalves e Mello (2000), sob condições restritivas de água e nutrientes, a densidade de raízes finas absorventes das árvores tenderia a se expandir, permitindo que um maior volume de solo seja explorado, aumentando conseqüentemente a capacidade de absorção. Estes autores justificam que quando a disponibilidade de água e nutrientes no solo é baixa, as árvores alocam uma maior quantidade de fotoassimilados às raízes. Este fenômeno acaba abaixando a relação parte aérea / sistema radicular. Portanto, o maior dispêndio de energia voltado para a produção de raízes, reduziria o incremento de biomassa aérea. Neste sentido, Rodriguez et al. (2003) e Son e Hwang (2003), trabalhando respectivamente em povoamentos de *Pinus radiata* no Chile e *Larix leptolepis* na Coreia, também observaram uma relação inversa entre a produção de raízes finas e maior disponibilidade de nutrientes no solo.

Neste trabalho, considerando somente as amostras de raízes coletadas nas linhas de plantio, entre 0 e 10 cm de profundidade (Tabela 2), é possível observar que ocorre uma tendência para a diminuição da densidade de raízes finas com a aplicação das maiores doses de biossólido, principalmente considerando os tratamentos “20t+K” e “40t+K”. Nas entrelinhas de plantio, local onde foi aplicado o biossólido, também foi observada a mesma tendência (Tabela 2). Neste caso, o tratamento “Tt” foi o que apresentou a maior densidade de raízes finas ($9,13 \text{ cm cm}^{-3}$), e o tratamento “40t+K” a menor densidade ($5,57 \text{ cm cm}^{-3}$). Todavia não foi detectada diferença estatística entre os tratamentos, devido à grande variabilidade das amostras coletadas em cada par-

cela experimental e que pode ser atribuída, entre outros fatores, à desuniformidade da distribuição inicial do bio-sólido nas entrelinhas dos eucaliptos devido à sua característica pastosa, que dificultou o espalhamento de forma homogênea sobre o solo.

Diâmetro de raízes finas

Analisando todas as amostras coletadas nas

linhas e nas entrelinhas de plantio (Figura 2), observa-se que na camada superficial (0-10 cm), o diâmetro médio do tratamento “Tt” poderia ser considerado maior do que o dos outros tratamentos. Todavia, estatisticamente, não se observam diferenças entre as duas profundidades e também entre os tratamentos.

Tabela 2

Distribuição de densidade, diâmetro médio e superfície específica de raízes finas de *Eucalyptus grandis*, coletadas nas linhas e nas entrelinhas de plantio na camada entre 0 e 10 cm de profundidade. Médias seguidas da mesma letra em cada coluna não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

(Fine root density distribution, average diameter and specific surface of *Eucalyptus grandis*, sampled in rows and areas between the planting rows in soil layer of 0-10 cm depth. Means followed by the same letter in each columns are not significantly ($P > 0,05$))

Tratamentos (t ha ⁻¹)	Densidade (cm cm ⁻³)		Diâmetro médio (mm)		Superfície específica (cm ² cm ⁻³)	
	Linha	Entrelinha	Linha	Entrelinha	Linha	Entrelinha
Profundidade 0 – 10 cm						
Testemunha	7,27 AB	9,13 a	0,59 A	0,39 ab	1,36 A	1,09 a
Ad. Mineral	9,06 A	6,48 a	0,46 B	0,38 ab	1,23 A	0,77 a
10t+K	6,43 AB	5,79 a	0,50 AB	0,36 b	1,03 AB	0,63 a
10t+KP	5,63 AB	6,33 a	0,42 B	0,39 ab	0,73 B	0,78 a
20t+K	5,10 B	7,55 a	0,41 B	0,36 b	0,65 B	0,86 a
40t+K	4,57 B	5,57 a	0,46 B	0,41 a	0,66 B	0,72 a

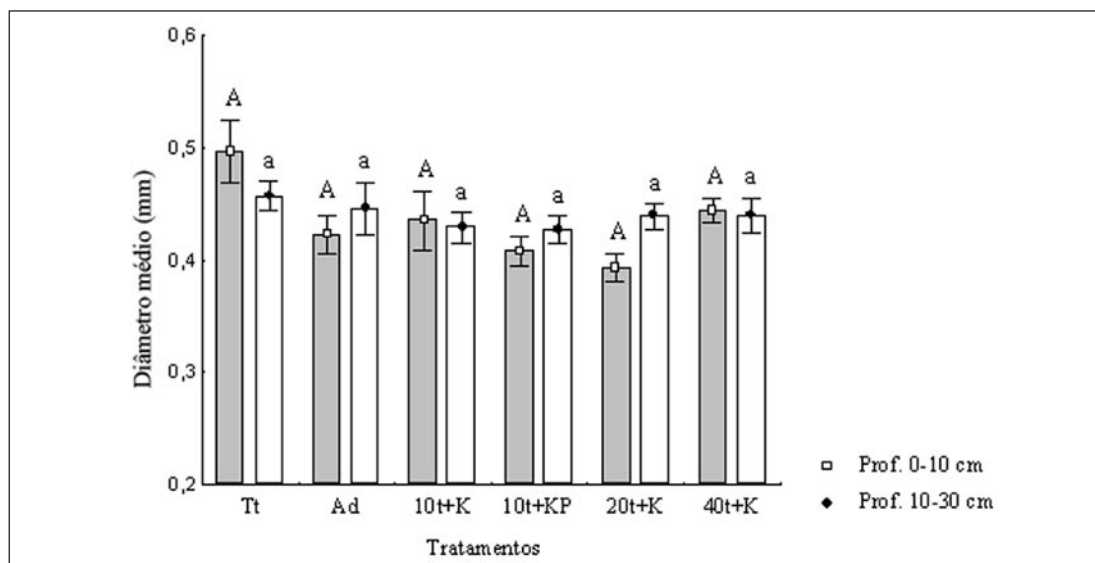


Figura 2

Diâmetro de raízes finas (média ± erro padrão), na camada entre 0 e 10 cm e 10 e 30 cm de profundidade nas parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* aos 3 anos de idade. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

(Fine roots diameter (means ± standard error), in soil layers from 0-10 and 10-30 cm depth in the experimental portion of three years old *Eucalyptus grandis*. Means followed by the same letter are not significantly different ($P > 0,05$)).

Segundo Fahey e Hughes (1994), os nutrientes do solo são absorvidos mais eficientemente pela minimização do diâmetro radicular e maximização do comprimento. Eissenstat (1992) observou que as raízes com maior comprimento radicular e com menor diâmetro foram capazes de proliferar mais rapidamente, principalmente aquelas da camada superficial do solo. Este autor observou um diâmetro menor e um comprimento maior das raízes finas na camada superficial do solo, pois esta camada é mais rica em nutrientes do que as camadas mais profundas.

Analisando-se separadamente os locais de amostragem (linhas e entrelinhas), na camada entre 0 e 10 cm (Tabela 2), constatou-se que nas linhas de plantio o diâmetro médio de raízes dos tratamentos foi de 0,47 mm. O tratamento “Tt” apresentou um diâmetro médio de 0,59 mm, significativamente maior em relação aos demais tratamentos, exceto para o “10t+K”.

Nas entrelinhas de plantio, o solo mais adensado parece ter inibido o diâmetro das raízes que apresentou em média 0,38 mm. Na Tabela 2 observa-se que apenas o tratamento que recebeu a dose mais elevada de biossólido “40t+K” evidenciou ligeiro mas não significativo aumento no diâmetro médio das raízes finas. Em geral, doses crescentes de biossólido parecem que não ter afetado acentuadamente o diâmetro das raízes. Também na camada inferior (10-30 cm) de profundidade, não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

A razão das raízes finas apresentarem um diâmetro médio maior nas linhas de plantio (0,47 mm) em relação às entrelinhas (0,38 mm), pode ser atribuído também ao solo menos adensado, visto que no momento da implantação florestal foi utilizado um escarificador mono-haste para o preparo do solo nas linhas de plantio, revolvendo-se a camada entre 0 e 30 cm e tornando-a mais permeável.

Chiaranda (1989), avaliando em condições controladas o efeito da compactação do solo sobre as raízes de mudas de *Eucalyptus torelliana* e de *Eucalyptus grandis*, observou que os tratamentos em solo compactado apresentaram valores menores de diâmetro do que os tratamentos em

solo não compactado, concluindo que o solo mais permeável favorece o desenvolvimento das raízes em comprimento e diâmetro.

Taylor et al. (1983) e Kramer e Boyer (1995) verificaram que as propriedades físicas do solo afetam o crescimento radicular diretamente pela restrição da penetração das raízes e indiretamente pelo efeito na aeração e no conteúdo de água no solo. A compactação, por exemplo, modifica o espaço poroso do solo alterando seriamente as condições de armazenamento de água, além do suprimento de oxigênio e nutrientes, aumentando ainda a resistência à penetração das raízes. Essas modificações nos atributos físicos do solo podem ter afetado, portanto, o crescimento e o desenvolvimento das raízes dos eucaliptos, que apresentaram comportamento diferente nas linhas e entrelinhas deste experimento.

Superfície específica de raízes finas

Na Figura 3, considerando todas as amostras coletadas nas linhas e entrelinhas, pode ser observado que a maior superfície específica de raízes finas foi encontrada na camada superficial (0 e 10 cm), com média entre os tratamentos de 0,87 cm² cm⁻³. Na camada inferior do solo (10 e 30 cm), a média foi de 0,24 cm² cm⁻³. Esta distribuição da superfície específica acompanha o padrão de distribuição da densidade de raízes (Figura 1). Este comportamento foi também observado por Berish e Ewel (1988) em estudos com raízes de espécies arbóreas tropicais da Costa Rica e por Schwengber et al. (1994) em raízes de seringueira.

Quanto à posição de coleta das amostras (Tabela 2), a superfície específica média das raízes finas dos tratamentos nas linhas de plantio foi de 0,94 cm² cm⁻³, ao passo que nas entrelinhas de plantio foi de 0,81 cm² cm⁻³. Conforme se observa na camada entre 0 e 10 cm nas linhas de plantio, a superfície específica das raízes foi maior no tratamento “Tt” (1,36 cm² cm⁻³). Na camada entre 10 e 30 cm de profundidade, não foram observadas diferenças significativas. Observa-se também uma queda na superfície específica de raízes finas em resposta às doses crescentes de biossólido, semelhante ao verificado para a densidade. Também na avaliação das amostras de raízes coletadas nas entrelinhas de plantio, o tratamento “Tt” foi o

que apresentou a maior superfície específica com $1,09 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$. Entretanto, não houve diferença estatística em relação aos demais tratamentos, devido à grande variabilidade das amostras coletadas (Tabela 2).

No solo, a quantidade de nutrientes absorvida pela planta é determinada principalmente pela área superficial de suas raízes (Kramer e Kozlowski, 1979; Anghinoni e Meurer, 1999). Segundo Böhm (1979), esta é uma característica que proporciona excelente correlação com a água absorvida pelas raízes finas. Portanto, o aumento da superfície específica de raízes finas, principalmente na camada superficial do solo, contribui diretamente para a melhor absorção de água e nutrientes pelas plantas.

Analisando a eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes, Anghinoni e Meurer (1999) observaram que a produção de raízes longas e finas é um mecanismo utilizado pelas plantas em situações de baixo suprimento nutricional. Estas observações vão de encontro aos dados observados no tratamento "Tt" (sem biofósforo e sem adubação mineral). Resultados semelhantes foram encontrados por Schwengber et al. (1994),

que avaliaram o efeito do gesso e calcário sobre as raízes de seringueiras e observaram que a testemunha apresentou maior aumento na densidade e na superfície específica radicular.

A proliferação de raízes em ambientes de menor concentração de nutrientes é um comportamento adaptativo bem conhecido e já discutido anteriormente. A produção de raízes longas e finas são também características desejáveis para aumentar a eficiência de absorção de nutrientes de baixa mobilidade no solo (Barber, 1995).

Tendo por base também os estudos efetuados por Reis et al. (1985), Gonçalves (1994) e Mello (1997), há evidências de que, quanto mais produtivo for o sítio menos desenvolvido será o sistema de raízes finas de absorção. Portanto, as árvores do tratamento "Tt" cresceram sob condições edáficas (químicas, físicas e microbiológicas) menos favoráveis que as árvores dos tratamentos que foram submetidos à adubação mineral e a doses crescentes de biofósforo. Assim, para atenderem às suas demandas nutricionais, precisariam de um sistema radicular de absorção mais efetivo (maior área superficial), capaz de absorver, em quantidade e qualidade, os nutrientes do solo.

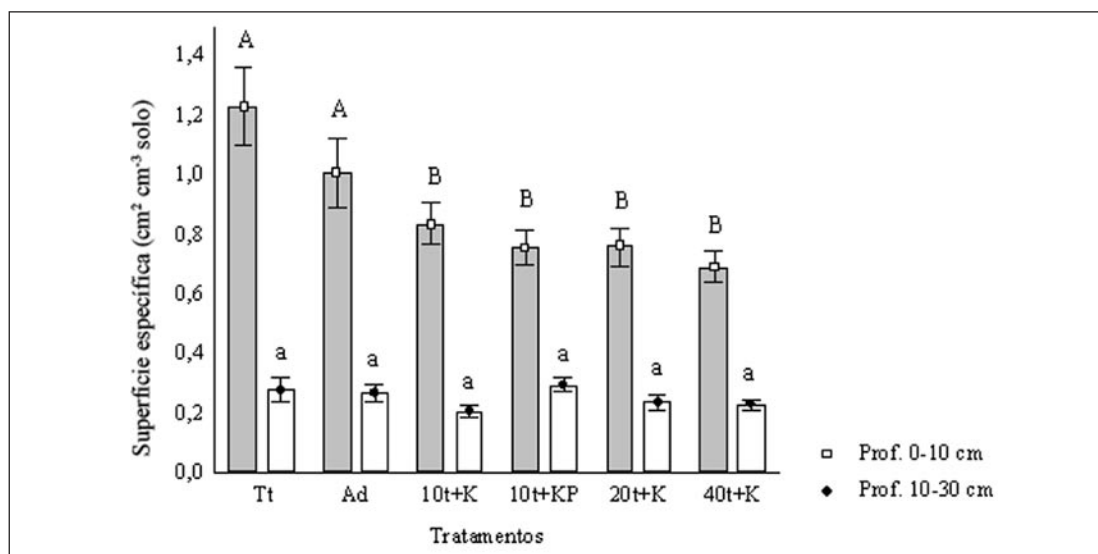


Figura 3

Superfície específica de raízes finas (média ± erro padrão) na camada entre 0 e 10 e 10 e 30 cm nas parcelas experimentais. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. (Fine roots specific surface (means ± standard error), in soil layers from 0-10 and 10-30 cm depth in the experimental portion of three years old *Eucalyptus grandis*. Means followed by the same letter are not significantly different ($P > 0,05$).

Em linhas gerais, pode-se dizer que o estudo sobre o crescimento radicular deve ser feito através da avaliação das características das raízes, como massa, comprimento, diâmetro e superfície, sempre levando em consideração os fatores do ambiente que influenciam na distribuição das raízes, como densidade e porosidade do solo, água e ar disponíveis no solo, presença de serapilheira, nutrientes, pH e temperatura do solo, dentre outros. Entretanto, poucos estudos ainda foram realizados com espécies arbóreas no Brasil, indicando a necessidade de se aprofundar e ampliar as pesquisas nesta área.

CONCLUSÕES

Na camada superficial do solo (0-10 cm), principalmente nas linhas de plantio, a densidade, o diâmetro e a superfície específica de raízes finas diminuíram com o aumento das doses de biossólido aplicado.

As variações de densidade, diâmetro e superfície específica de raízes finas entre os tratamentos foram observadas somente na camada entre 0 e 10 cm de profundidade do solo. Na camada inferior, entre 10 e 30 cm, não houve variação entre os tratamentos.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

LUIZ FERNANDO DA SILVA MARTINS é Mestre em Recursos Florestais pela ESALQ/USP. E-mail: lfsmarti@hotmail.com

FÁBIO POGGIANI é Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP - Avenida Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: fpoggian@esalq.usp.br

RICARDO FERRAZ DE OLIVEIRA é Professor Associado do Departamento de Ciências Biológicas da ESALQ/USP - Avenida Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: rfolivei@esalq.usp.br

MARCELINO CARNEIRO GUEDES é Doutorando em Recursos Florestais pela ESALQ/USP - Avenida Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: mcguedes@esalq.usp.br

JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES é Professor Associado do Departamento de Ci-

ências Florestais da ESALQ/USP - Avenida Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: jlmgonca@esalq.usp.br

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa, à Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga pelo apoio técnico e logístico e ao Programa Temático de Biossólido (SABESP, IPEF e ESALQ/USP), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, C.A.; MATIAZZO, M.E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. *Scientia forestalis*, n.58, p.59-72, 2000.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASO, Aracaju, 1999. *Anais*. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 1999. p.57-87
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley, 1995. 414p.
- BERISH, C.W.; EWEL, J.J. Root development in simple and complex tropical successional ecosystems. *Plant and soil*, v.108, p.73-84, 1988.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188p.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projetos e operação**. São Paulo, 1999. 32p. (Manual técnico P-4.230)
- CHIARANDA, R. **Efeitos da compactação do solo em mudas de *Eucalyptus torelliana* F. Muell e de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden**. Piracicaba, 1989. 118p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- DELTA T. **Root washer: user manual**. London: Kirchhof & Pendar, 1995. 14p.
- DELTA T SCAN. **Image analysis software: user manual**. London: Kirchhof & Pendar, 1993. 244p.
- DICKENS, E.D.; OUTCALT, K.W.; OUTCALT, P.A.; TUCKER, R.B. Effect of a one-time biosolids application in an old-field loblolly pine plantation on diameter distribution, volume per acre, and value per acre. In: BIENNIAL SOUTHERN SILVICULTURAL RESEARCH CONFERENCE, 11, Knoxville, March 2001. **Proceedings**. Knoxville: USDA/Forest Service/Southern Research Station, 2002. p.15-19
- EISSENSTAT, D.M. Costs and benefits of constructing roots of small diameter. *Journal of plant nutrition*, v.15, p.763-782, 1992.
- FAHEY, T.J.; HUGHES, J.W. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of ecology*, v.82, p.533-548, 1994.

- FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. New York: John Wiley, 2000. 489p.
- GONÇALVES, J.L.M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. Piracicaba, 1994. 84p. Tese (Livro Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap.8, p.218-267
- GONÇALVES, J.L.M.; VAZ, L.M.S.; AMARAL, T.M.; POGGIANI, F. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: efeito na fertilidade do solo, nutrição e crescimento das árvores. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. cap.9, p.179-195
- GUEDES, M.C. **Efeito do lodo de esgoto (biossólido) sobre a nutrição, ciclagem de nutrientes e crescimento de sub-bosque, em plantação de eucalipto**. Piracicaba, 2000. 74p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- GUEDES, M.C.; POGGIANI, F. Variação dos teores de nutrientes foliares em eucalipto fertilizado com biossólido. **Scientia forestalis**, n.63, p.188-201, 2003.
- HARRISON, R.; XUE, D.; COLE, D.W. Long-term effects of heavy applications of biosolids on organic matter and nutrient content of a coarse-textured soil. **Forest ecology and management**, v.66, p.165-177, 1994.
- HENRY, C.L.; COLE, D.W.; HARRISON, R.B.; BENGTSSON, J.; LUNDKVISK, H. Use of municipal sludge to restore and improve site productivity in forestry: the Pack Forest Sludge Research Program. **Forest ecology and management**, v.66, n.1/3, p.137-149, 1994.
- JORDAN, C.F. **Nutrient cycling in tropical forest ecosystems**. New York: John Wiley, 1985. 190p.
- KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Water relations of plants and soils**. New York: Academic Press, 1995. cap.5, p.115-166
- KRAMER, P.J.; KOZLOWSKI, T.T. **Physiology of woody plants**. London: Academic Press, 1979. 811p.
- LACLAU, J.P.; ARNAUD, M.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J.; BOTTON, B.; CHALOT, M.; DIZENGREMEL, P.; TACON, F.; RYGIWICZ, P.; TOPA, M. Spatial distribution of *Eucalyptus* roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. **Tree physiology**, v.21, n.2/3, p.129-136, 2001.
- LELES, P.S.S. **Crescimento, alocação de biomassa e distribuição de nutrientes e uso de água em *E. camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos**. Viçosa, 1995. 133p. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa
- MARTINS, L.F.S. **Configuração do sistema radicular das árvores de *Eucalyptus grandis* em resposta à aplicação de doses crescentes de biossólido**. Piracicaba, 2002. 73p. Tese (Mestrado). Escola Superior Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- MARTINS, L.G.C.; VALLE, C.F.; BARROS, N.F. Efeito da aplicação do lodo da indústria de papel e celulose sobre características do solo e sobre a biomassa de raízes de eucalipto. In: CONFERENCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS, Salvador, 1997. **Anais**. Colombo: EMBRAPA/CNPQ, 1997. v.3, p.167-173
- MELLO, S.L.M. **Características do sistema radicular de povoamento de eucaliptos propagados por sementes e estacas**. Piracicaba, 1997. 79p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- PERSSON, H.A. The distribution and productivity of fine root in boreal forest. **Plant and soil**, v.71, p.87-121, 1983.
- POLGLASE, P.J.; MYERS, B.J. Tree plantations for recycling effluent and biosolids in Australia. In: ELDRIDGE, K.G.; CROWE, M.P.; OLD, K.M. **Environmental management: the role of *Eucalyptus* and other fast growing species**. Melbourne: CSIRO, 1995. p.100-109
- REIS, M.G.F.; KIMMINS, J.P.; REZENDE, G.C.; BARROS, N.F. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista árvore**, v.9, n.2, p.149-162, 1985.
- ROCHA, G.B. **Monitoramento da fertilidade do solo, nutrição mineral e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido**. Piracicaba, 2002. 48p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- RODRIGUEZ, R.; ESPINOSA, M.; HOFMANN, G.; MARCHANT, M. Needle mass, fine root and stem woody production in response to silvicultural treatment, tree size and competitive status in radiata pine stands. **Forest ecology and management**, v.186, n.1/3, p.287-296, 2003.
- SANFORD JR, R.L.; CUEVAS, E. Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: MULKEY, S.; CHAZDON, R.L.; SMITH, A.P. **Tropical forest plant ecophysiology**. New York: Chapman & Hall, 1996. cap.10, p.268-300
- SCARF, R. **Falta madeira na terra do pau-brasil**. Galileu, p. 52-60, 2003.
- SCHWENGBER, D.R.; VENTURIN, N.; CARVALHO, J.G. Efeitos do gesso e calcário na relação raiz/parte aérea e em características das raízes de tocos de seringueira (*Hevea* spp) recém implantados em campo. **Cerne**, v.1, n.1, p.38-44, 1994.
- SON, Y.; HWANG, J.H. Fine root biomass, production and turnover in a fertilized *Larix leptolepis* plantations in central Korea. **Ecological research**, v.18, n.3, p.339, 2003.

TAYLOR, H.M.; JORDAN, W.R.; SINCLAIR, T.R. Managing root systems for efficient water use: an overview. In: TAYLOR, H.M. **Limitations to efficient use in crop production**. Madison: American Society of Agronomy, 1983. cap. 3A, p. 87-113

VAN RAIJ, B. Uso agrícola de bioossólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIODOSSÍLIDO DO MERCOSUL, 1, Curitiba, 1998. **Palestras**. Curitiba: SANE-PAR; ABES, 1998. p.147-151

VAZ, L.M.S. **Crescimento inicial, fertilidade do solo e nutrição de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bioossólido**. Piracicaba, 2000. 41p. Tese (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo

VOGT, K.A.L.; EDMONDS, R.L.; GRIER, C.C. Seasonal changes in biomass and vertical distribution of mycorrhizal and fibrous-textured conifer fine roots in 23 and 180 year-old sub alpine *Abies amabilis* stands. **Canadian journal of forest research**, v.11, p.223-229, 1981