

Aplicação de lodo de esgoto seco e fertilizantes minerais em plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*: produtividade e balanço de nutrientesDry sewage sludge application and mineral fertilization in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* plantations: productivity and nutrient balanceAlexandre de Vicente Ferraz<sup>1</sup>, Fábio Poggiani<sup>2</sup> e  
Paulo Henrique Müller da Silva<sup>1</sup>**Resumo**

A aplicação de lodo de esgoto em plantações florestais permite a reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes, entre os ambientes urbanos e agroflorestal, podendo contribuir para um menor consumo de fertilizantes minerais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento e a produção de biomassa lenhosa em plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, bem como a exportação de nutrientes via colheita da madeira (lenho + casca) após nove anos do plantio, em resposta à aplicação de lodo de esgoto seco e fertilização mineral. Estimou-se o “balanço de nutrientes” pela diferença entre a quantidade de nutrientes adicionada com a fertilização e a quantidade de nutrientes exportada com a colheita da madeira. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos: 1) Controle, sem qualquer fertilização (C); 2) Fertilização mineral (FM); 3) Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto sem adição de fertilizantes minerais (LSF) e 4) Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> de lodo complementado com fertilizantes minerais (LCF). Até os seis anos de idade, as árvores fertilizadas com lodo (LSF e LCF) apresentaram diâmetro à altura do peito (DAP) e altura do tronco superiores (7 a 12%), o que resultou maior volume de madeira (cerca de 20%) em relação às árvores dos tratamentos C e FM. Aos nove anos de idade, o volume e a biomassa de tronco foram semelhantes entre os tratamentos. De modo geral, a exportação de nutrientes via colheita do tronco foi maior no tratamento LCF; mesmo assim, o balanço de nutrientes nos tratamentos com lodo foi positivo e superior aos tratamentos C e FM, principalmente para os elementos N, P, Ca, S e Zn.

**Palavras-chave:** Biossólido seco, Exportação de nutrientes, Fertilização orgânica, Balanço de nutrientes.

**Abstract**

The sewage sludge application in forest plantations allows recycling of organic matter and nutrients, between urban and agroforestry environments, and may contribute to lower consumption of mineral fertilizers. The aim of this study was to evaluate the growth and woody biomass production in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* plantations as well as the nutrients export through wood harvesting (stemwood + stembark) nine years after planting, in response to dry sewage sludge application and mineral fertilization. It was also estimated the “nutrient balance” through the difference between nutrients added with fertilization and the nutrients exported with the wood harvest. The experimental design was a randomized block with four replications and four treatments: 1) Control, without any fertilization (C); 2) Mineral Fertilization (FM); 3) Fertilization with 18 t ha<sup>-1</sup> of sewage sludge, without mineral fertilizers additional (LSF) and 4) Fertilization with 18 t ha<sup>-1</sup> of sewage sludge complemented with mineral fertilizers (LCF). Until the six years old, trees fertilized with sludge (LSF and LCF) had the greatest diameter at breast height (DBH) and height of the trunk (7 to 12%), which resulted in higher wood volume (about 20%) in relation to trees in C and FM treatments. At nine years old, the volume and stem biomass were similar among treatments. In general, the nutrients export through the trunk harvest was higher in LCF treatment; even so the nutrients balance in sludge treatments was positive and higher than C and FM treatments, especially for the N, P, Ca, S and Zn elements.

**Keywords:** Dry biosolids, Export of nutrients, Organic fertilization, Nutrient balance

<sup>1</sup>Pesquisador Doutor. IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Via Comendador Pedro Morganti, 3500 – 13415-000 – Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: [devicenteferraz@gmail.com](mailto:devicenteferraz@gmail.com); [paulohenrique@ipef.br](mailto:paulohenrique@ipef.br).

<sup>2</sup>Professor Titular do Departamento de Ciência Florestal. USP – Universidade de São Paulo / ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Caixa Postal 09 – 13418-260 – Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: [poggiani@usp.br](mailto:poggiani@usp.br).

## INTRODUÇÃO

A produtividade das plantações florestais pode ser influenciada por fatores bióticos e abióticos, tais como: as condições climáticas, as características físico-químicas e biológicas do solo ou a eventual ocorrência de pragas e doenças (JOKELA, 2004). No Brasil, a expansão das plantações com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* vem ocorrendo principalmente em áreas de baixa fertilidade natural (GONÇALVES et al., 2013). Por isso, a fertilização do solo e a prática do cultivo mínimo têm-se tornado cada vez mais importantes para o aumento da produtividade e a manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas florestais (LACLAU et al., 2013).

A intensificação das práticas silviculturais tem reduzido os ciclos de cultivo e aumentado a frequência da colheita da madeira, o que tem elevado a taxa média de exportação de nutrientes e, conseqüentemente, ampliado a demanda por fertilizantes (SMETHURST, 2010). Além disso, o setor agrícola brasileiro tem vivenciado momentos difíceis, tais como: a elevada dependência por insumos importados, o alto valor do dólar e o aumento paulatino dos preços dos fertilizantes (SAAB; PAULA, 2008).

A utilização do lodo de esgoto em plantações florestais vem sendo estimulada em todo o mundo, principalmente nos países desenvolvidos onde uma série de estudos demonstraram os efeitos benéficos do lodo sobre a fertilidade do solo, no crescimento das árvores e na produção de biomassa lenhosa, bem como de outros produtos como a celulose, o carvão, óleos e resinas (SILVA et al., 2009). Estudos realizados na Nova Zelândia por Kimberley et al. (2004) demonstraram também maior rentabilidade econômica em plantações de *Pinus radiata* quando adubadas com lodo de esgoto.

No Brasil, vários estudos são realizados desde a década de 80 em busca de alternativas mais apropriadas para o descarte do lodo de esgoto, como por exemplo, o seu uso agrícola ou florestal. Esta prática tem-se intensificado nos últimos anos devido à crescente quantidade de lodo produzido pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs), como por exemplo, na região metropolitana de São Paulo, cuja produção estimada era de 700 toneladas <sup>(base seca)</sup> por dia (TSUTIYA, 2001).

O lodo de esgoto é rico em matéria orgânica e nutrientes que podem ser utilizados para melhorar a fertilidade do solo e promover o crescimento das plantas; no entanto, o lodo pode conter também elementos potencialmente tóxicos como os metais pesados (BETTIOL; CAMARGO, 2006), cujas concentrações devem ser monitoradas conforme legislação vigente para o seu uso agrícola ou florestal. Estes cuidados visam minimizar eventuais alterações fisiológicas prejudiciais às plantas, bem como possíveis danos ambientais (CETESB, 2001).

Diferentemente da maioria dos fertilizantes minerais, o lodo de esgoto pode ser utilizado como fertilizante orgânico de liberação lenta, em virtude de sua gradual decomposição no solo e mineralização dos nutrientes ao longo do tempo, o que permite estabelecer uma maior sincronia entre a capacidade de absorção dos nutrientes pelas plantas e sua disponibilidade no solo. Conseqüentemente, também são minimizadas as perdas de nutrientes por lixiviação, principalmente em solos muito intemperizados, durante os períodos de maior pluviosidade (JORDAN, 1985; POGGIANI et al., 2006). Deve-se levar em consideração também o efeito residual do lodo de esgoto sobre a fertilidade do solo, podendo beneficiar inclusive os cultivos subsequentes, propiciando o contínuo suprimento dos nutrientes, principalmente: nitrogênio, fósforo, cálcio e diversos micronutrientes (BINDER et al., 2002; FERRAZ, 2013).

Diferentemente das regiões de clima temperado e boreal, onde as espécies do gênero *Pinus* são intensamente estudadas (PRITCHETT; FICHER, 1987; PRESCOT; BLEVINS, 2005; FOX et al., 2007; CAMPOE et al., 2013); no Brasil, são escassas as pesquisas relacionadas à fertilização dos pinheiros tropicais e subtropicais, principalmente, com lodo de esgoto. Além disso, estes estudos têm sido geralmente conduzidos em condições de viveiro, ou apenas durante as primeiras fases de crescimento das árvores no campo (SIMÕES et al., 1970), sendo os resultados pouco conclusivos e, às vezes, contraditórios (BALLONI et al., 1978; MANIKAM; SRIVASTAVA, 1980; CAPITANI et al., 1982; MORAES NETO et al., 2003).

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da aplicação do lodo de esgoto, com adição ou não de fertilizantes minerais, no crescimento e na produção de biomassa lenhosa em povoamentos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, bem como sobre a exportação de nutrientes via colheita da madeira após nove anos do plantio. Objetivou-se também estimar o “balanço de nutrientes” por meio da diferença entre a quantidade de nutrientes adicionada via fertilização e a quantidade de nutrientes exportada com a colheita da madeira.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no município de Agudos-SP, localizado nas coordenadas de 22°53'20" S e 47°4'39"W, a 603 m de altitude. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Cfa, com precipitação média anual de 1374 mm e temperatura média anual de 20,4 °C (ALVAREZ et al, 2013).

O experimento foi instalado em novembro de 2003, em um Latossolo Amarelo distrófico psamítico, A moderado, álico (EMBRAPA, 2006) e relevo plano a suavemente ondulado. Antes da implantação do experimento, o solo apresentava elevada acidez, baixo teor de matéria orgânica e fósforo (Tabela 1), possuindo 13% de argila, 1% de silte e 86% de areia. A área havia sido anteriormente cultivada com *Pinus caribaea* var. *caribaea*.

**Tabela 1.** Atributos químicos do solo antes da aplicação do lodo de esgoto

**Table 1.** Chemical properties of soil before sewage sludge application

Camada (cm)	p <sub>H</sub>	MO	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V%	m%
	CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			-----					
0 – 20	3,7	14	4	0,3	2	2	38	10	4	42	10	70
20 – 40	3,8	10	5	0,3	2	1	38	11	3	41	8	77

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos: 1) Controle, sem qualquer fertilização (C); 2) Fertilização mineral convencional (FM); 3) Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto sem adição de fertilizantes minerais (LSF) e 4) Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo complementado com fertilizantes minerais (LCF).

O lodo utilizado no experimento foi tratado com polieletrólito na Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri-SP e, posteriormente, submetido ao processo de secagem em secador térmico (SEGHERS, 2001; DAVID, 2002), o que lhe conferiu textura granular (Ø ≈ 3 mm), pH de 6,2 e umidade de 3,7%. (Tabela 2). O lodo de esgoto foi distribuído em uma faixa de aproximadamente 60 cm de largura sobre a superfície do solo, ao longo das linhas de plantio (cerca de 320 metros por parcela).

**Tabela 2.** Características químicas do lodo de esgoto produzido em 2003 pela ETE de Barueri-SP.

**Table 2.** Chemical characteristics of sewage sludge produced in 2003 by STW of Barueri-SP.

Atributos	Unidade	Valores	Atributos	Unidade	Valores
pH em CaCl <sub>2</sub> a 0,01 M	-	6,2	Magnésio (Mg) <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	3,80
Umidade <sub>total</sub> (65°C)	%	3,7	Enxofre (S) <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	7,07
Densidade	g cm <sup>-3</sup>	0,93	Ferro (Fe) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	45.200
Matéria Orgânica <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	556,77	Cobre (Cu) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	700
Carbono <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	309,37	Manganês (Mn) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	300
Nitrogênio <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	38,13	Zinco (Zn) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	3.200
Relação C/N	-	8/1	Cádmio (Cd) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	nd
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	34,87	Cromo (Cr) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	nd
Potássio (K <sub>2</sub> O) <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	1,60	Chumbo (Pb) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	nd
Cálcio (Ca) <sub>total</sub>	g kg <sup>-1</sup>	25,60	Níquel (Ni) <sub>total</sub>	mg kg <sup>-1</sup>	nd

Todos os valores de concentração são dados com base na matéria seca. <sup>nd</sup> Não determinado

No plantio, foram utilizadas mudas seminais de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, oriundas do Pomar Clonal da empresa Duratex S/A. Após a subsolagem, até a profundidade de 40 cm do solo, as mudas foram plantadas no espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,5 m entre plantas. Em cada parcela (27 x 36 m) foram plantadas 216 mudas, sendo 48 na área útil (12 x 18 m) e 168 na área de bordadura.

Os fertilizantes minerais foram aplicados nos tratamentos FM e LCF em duas etapas. Na primeira etapa, a fertilização de base foi distribuída em covetas laterais a 10 centímetros das mudas, sendo aplicados: 135 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante NPK 08-37-07 + 0,5% de Zn + 0,2% de Cu e 50 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> via superfosfato simples. Na segunda etapa, a fertilização de manutenção foi efetuada aos 360 dias após o plantio, em covetas laterais, com a aplicação de 400 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 10-15-20 + 0,4% de B + 0,2% de Zn.

Durante a condução do experimento, mediu-se a altura total das árvores com 1, 2, 3, 4, 6 e 9 anos de idade, utilizando-se um hipsômetro digital modelo Vertex III (precisão de 0,1 m). Além disso, foi mensurado o diâmetro do tronco à altura do peito – DAP (1,30 m da superfície do solo) aos 4, 6 e 9 anos de idade, com uma suta e precisão de 0,1 cm. O volume de madeira com casca

(Vcc) e sem casca (Vsc) das árvores foi estimado de acordo com modelos matemáticos ajustados pela empresa Duratex S/A para as plantações da região do estudo, sendo:

$$V_{cc} = (0,041953323 * (DAP^{1,969453614}) * (H^{0,993141531})) / 1000$$

$$V_{sc} = (0,016303616 * (DAP^{1,959562598}) * (H^{1,236834776})) / 1000$$

Onde:

Vcc = Volume do tronco com casca (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)

Vsc = Volume do tronco sem casca (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)

DAP = Diâmetro do tronco à altura do peito (cm)

H = Altura do tronco (m)

Em janeiro/2013, foram selecionadas árvores médias em cada parcela para abate e coleta de amostras do tronco, visando a determinação da densidade do lenho e casca, bem como da concentração de nutrientes em cada um desses componentes da árvore. Foram coletados discos do tronco com 5 cm de espessura, nas posições de 0, 25, 50, 75 e 100% do comprimento total das árvores.

As amostras de lenho e casca foram armazenadas em um tanque com água para saturação, até atingirem peso constante. Com o auxílio de uma balança hidrostática, foi computado o peso das amostras imersas em água e saturadas. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa de ventilação forçada a uma temperatura de 60-65°C e, após 96 horas de secagem, foram pesadas em balança eletrônica com precisão de 0,01g. As densidades da casca e do lenho foram determinadas conforme metodologia padronizada por Vital (1984). As biomassas de lenho e casca foram estimadas por meio da multiplicação dos volumes pelas respectivas densidades básicas do lenho e da casca.

No Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP, as amostras de lenho e casca foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60-65°C, moídas em moinho tipo Willey e analisadas quanto à concentração de macro e micronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), conforme metodologia descrita por Malavolta et al. (1989).

Com base na biomassa estimada e nas concentrações de nutrientes no lenho e casca foi possível estimar a quantidade de nutrientes exportada com a colheita do tronco, bem como estimar o “balanço de nutrientes” considerando a quantidade de elementos adicionada ao solo via fertilização (com lodo e/ou fertilizante mineral) e a quantidade de nutrientes exportada via colheita da madeira (lenho+casca).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Crescimento e volume de madeira

Até os três anos de idade, a altura das árvores de *Pinus* foi superior (10 a 12%) nos tratamentos com aplicação de lodo de esgoto ou com a fertilização mineral, em comparação ao tratamento controle (Tabela 3). Aos quatro anos de idade, apenas as árvores submetidas ao tratamento com lodo e fertilizante mineral (LCF) permaneceram superiores (~5%) em relação ao controle (C); porém, aos nove anos, as árvores de todos os tratamentos igualaram-se em altura (Tabela 3). No Canadá, em um plantio de coníferas com onze anos de idade, Prescott e Blevins (2005) verificaram que a magnitude e a duração dos efeitos da aplicação do lodo de esgoto e da fertilização mineral sobre o crescimento das árvores foram semelhantes entre si, mas significativamente superiores ao do tratamento controle.

No quarto ano de idade, o diâmetro à altura do peito (DAP) dos troncos foi 7% maior no tratamento LCF em relação ao controle (C) (Tabela 3) e, aos seis anos, o DAP foi significativamente superior (7-8%) nos tratamentos LSF e LCF em relação à fertilização mineral (FM). Porém, aos nove anos de idade, o DAP foi similar entre todos os tratamentos. Ainda na Tabela 3, nota-se que os volumes do tronco com e sem casca foram aproximadamente 20% superiores no tratamento LCF em relação aos tratamentos C (aos quatro anos) e FM (aos seis anos); porém, aos nove anos, os troncos atingiram volumes similares em todos os tratamentos (Vcc ≈ 380 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e Vsc ≈ 280 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

As árvores de *Pinus* fertilizadas com lodo de esgoto apresentaram respostas positivas em crescimento até os seis anos de idade; mas, após este período, pouca resposta foi observada. O resultado pode ser atribuído à crescente competição que se estabelece entre as árvores ao longo do tempo por

outros fatores que governam o crescimento (ex. luz e água), principalmente após o fechamento de copas. À medida que um ecossistema florestal se desenvolve, a retranslocação de nutrientes entre os tecidos da árvore, conhecido como “ciclagem bioquímica”, passa a contribuir significativamente para a demanda nutricional das árvores, que se tornam menos dependentes das reservas minerais do solo (MILLER, 1981; PRITCHETT; FICHER, 1987; MA et al., 2007).

**Tabela 3.** Altura total, diâmetro a altura do peito (DAP) e volume do tronco com casca (Vcc) e sem casca (Vsc) em plantios de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* até os 9 anos de idade, em função dos tratamentos: Controle, sem qualquer adubação (C); Fertilização mineral (FM); Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto com e sem fertilização mineral complementar (LCF e LSF, respectivamente).

**Table 3.** Height, diameter at breast height (DAP, by its acronym in Portuguese) and stem volume with bark (Vcc) and only stem wood (Vsc) in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* until nine years old, on the treatments: Control, no fertilization (C); Mineral fertilization (FM); Fertilization with 18 t ha<sup>-1</sup> (dry basis) of sewage sludge with and without supplementary mineral fertilizers (LCF and LSF respectively).

TRATAMENTO	IDADE DO POVOAMENTO (anos)					
	1	2	3	4	6	9
<b>Altura total (m)</b>						
C	0,70 b	2,02 b	4,20 b	6,87 b	11,43 a	15,30 a
FM	0,78 a	2,23 a	4,61 a	7,03 ab	11,37 a	15,09 a
LSF	0,75 ab	2,24 a	4,63 a	7,01 ab	11,46 a	15,31 a
LCF	0,76 a	2,33 a	4,72 a	7,13 a	11,42 a	15,41 a
<b>Diâmetro à altura do peito – DAP (cm)</b>						
C	-	-	-	8,90 b	13,21 ab	15,90 a
FM	-	-	-	9,01 ab	12,80 b	15,45 a
LSF	-	-	-	9,13 ab	13,65 a	16,85 a
LCF	-	-	-	9,52 a	13,83 a	17,08 a
<b>Volume do tronco com casca – Vcc (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>						
C	-	-	-	48,10 b	169,5 ab	380,8 a
FM	-	-	-	50,51 ab	159,2 b	376,8 a
LSF	-	-	-	51,65 ab	182,0 ab	375,7 a
LCF	-	-	-	56,74 a	186,1 a	392,0 a
<b>Volume do tronco sem casca – Vsc (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>)</b>						
C	-	-	-	28,9 b	116,6 ab	283,1 a
FM	-	-	-	30,5 ab	109,7 b	279,9 a
LSF	-	-	-	31,2 ab	125,4 ab	279,6 a
LCF	-	-	-	34,4 a	128,1 a	291,6 a

Para cada atributo e idade das árvores (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P>0,05).

Durante a fase juvenil do povoamento, as árvores de *Pinus* cultivadas sem fertilização (tratamento C) tiveram taxas de crescimento menores em relação aos demais tratamentos. Entretanto, a partir do quarto ano de idade, os pinheiros do tratamento C apresentaram maiores taxas de crescimento, ganhando em altura, DAP e volume do tronco. Até o quarto ano de idade, o crescimento acelerado das árvores cultivadas com lodo e/ou fertilizante mineral fez com que a competição intraespecífica fosse antecipada; ao contrário das árvores cultivadas no tratamento controle, que cresceram lentamente devido à escassez de nutrientes no solo. Ao longo deste período, é possível que as árvores do tratamento controle tenham investido mais recursos energéticos na expansão do sistema radicular do que no crescimento da parte aérea. Após adquirir maior capacidade de exploração do solo e, conseqüentemente, de absorver maior quantidade de nutrientes; as árvores do tratamento controle passaram a crescer de forma mais acentuada até alcançarem também a fase de intensa competição intraespecífica por luz e água (GONÇALVES et al., 2005; FOX et al., 2007).

Nota-se que, aos nove anos de idade, os pinheiros sem fertilização (C) igualaram-se ao porte das árvores fertilizadas com lodo de esgoto e fertilizantes minerais. Comportamento semelhante foi observado por Poggiani et al. (2006) e Ferraz (2013) em plantios de eucaliptos adubados há dez anos com lodo de esgoto e/ou fertilizantes minerais. De acordo com esses autores, a baixa resposta de povoamentos florestais ao lodo de esgoto também se deve a competição intraespecífica após o fechamento das copas.

### Concentração de nutrientes no tronco

As concentrações de fósforo, potássio, magnésio, boro, cobre, ferro e manganês no lenho e na casca das árvores de *Pinus*, aos nove anos de idade, foram similares entre os tratamentos (Tabela 4). Porém, a concentração de nitrogênio na casca dos pinheiros foi 50% maior no tratamento C em relação ao LSF.

A menor concentração de N na casca das árvores adubadas apenas com o lodo de esgoto (LSF) pode ser atribuída à rápida mineralização do nitrogênio orgânico contido no lodo e, consequentemente, à perda de N por volatilização e lixiviação ao longo do tempo. Xue et al. (2015), após estudarem por 19 anos a utilização de biossólido em plantios de *Pinus radiata* na Nova Zelândia, constataram que a aplicação periódica de lodo (a cada três anos) pode estimular continuamente o crescimento dos pinheiros, visto que a frequente adição de nitrogênio e dos demais nutrientes ao solo supre as perdas por lixiviação e volatilização.

Devido à baixa fertilidade do solo (Tabela 1), a micorrização das plantas no tratamento controle pode ter sido beneficiada, o que favoreceu a absorção de nitrogênio do solo e o aumento da concentração de N nos tecidos das plantas (LARCHER, 2000). Por outro lado, a adubação com lodo de esgoto aumenta, a princípio, a concentração de N no solo, que pode reduzir a atividade dos fungos micorrízicos (WALLANDER et al. 1992; LARCHER, 2000; FREY et al., 2004). Recentes estudos bioquímicos, utilizando técnicas de espectroscopia fotoeletrônica por raios X, evidenciaram que o aumento da concentração de nitrogênio no solo pode inibir, em determinadas situações, a atividade das micorrizas em plantas (LECROY et al. 2013). Em nosso experimento, a combinação dos aspectos acima mencionados pode explicar a variação das taxas de crescimento dos pinheiros, bem como da concentração de N e demais elementos na casca e lenho.

**Tabela 4.** Concentração de nutrientes no lenho e casca de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com nove anos de idade, em função dos tratamentos: Controle, sem qualquer fertilização (C); Fertilização mineral convencional (FM) e Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto com e sem fertilização mineral complementar (LCF e LSF, respectivamente).

**Table 4.** Nutrient concentration in the stem wood and stem bark of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, with nine years old, on the treatments: control, no fertilization (C); Mineral fertilization (FM) and Fertilization with 18 t ha<sup>-1</sup> (dry basis) of sewage sludge with and without supplementary mineral fertilizers (LCF and LSF respectively).

TRAT.	g kg <sup>-1</sup>						mg kg <sup>-1</sup>				
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
<b>LENHO</b>											
C	2,07 a	0,08 a	0,3 a	0,46 a	0,10 a	0,07 a	3,42 a	0,60 a	16,00 a	75,50 a	6,87 b
FM	1,79 a	0,08 a	0,3 a	0,44 a	0,10 a	0,05 a	2,95 a	0,60 a	14,87 a	72,37 a	8,17 b
LSF	1,55 a	0,10 a	0,3 a	0,57 a	0,15 a	0,07 a	3,97 a	0,91 a	17,50 a	61,87 a	15,69 a
LCF	1,95 a	0,10 a	0,4 a	0,52 a	0,12 a	0,08 a	3,39 a	0,70 a	22,87 a	54,75 a	13,90 a
<b>CASCA</b>											
C	2,64 a	0,11 a	0,5 a	0,59 a	0,15 a	0,08 ab	5,06 a	1,72 a	158,33 a	42,12 a	11,33 b
FM	2,20 ab	0,12 a	0,4 a	0,76 a	0,12 a	0,07 b	4,92 a	1,60 a	143,69 a	36,50 a	13,79 ab
LSF	1,76 b	0,13 a	0,3 a	0,82 a	0,17 a	0,11 ab	4,81 a	1,76 a	139,35 a	36,37 a	16,11 ab
LCF	1,94 ab	0,14 a	0,4 a	0,92 a	0,22 a	0,13 a	4,37 a	1,61 a	139,07 a	32,00 a	20,98 a

Para cada nutriente e componente da árvore (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P > 0,05).

No lenho, a concentração de zinco foi aproximadamente 2 vezes superior nos tratamentos com lodo de esgoto (LSF e LCF) em relação aos tratamentos C e FM (Tabela 4). Na casca, as concentrações de zinco e enxofre foram aproximadamente 85% maiores no tratamento LCF em relação ao controle (C). Estes resultados podem ser atribuídos à elevada quantidade de Zn e S adicionada ao solo através da aplicação do lodo de esgoto e, no caso do Zn, à sua maior biodisponibilidade pela complexação com ácidos fúlvicos produzidos a partir da matéria orgânica contida no lodo de esgoto (GARCÍA-MINA et al., 2004).

### Biomassa lenhosa e balanço nutricional

Não foram constatadas diferenças significativas entre os tratamentos quanto à produção de biomassa seca de lenho e casca (Tabela 5), cujas médias foram estimadas em 116,5 e 28,5 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Considerando o corte raso do povoamento aos nove anos de idade, a biomassa de tronco exportada em cada tratamento seria em média de 65,3 kg árvore<sup>-1</sup> ou 145 t ha<sup>-1</sup>, equiparando-se à

produtividade média (62,5 kg árvore<sup>-1</sup>) estimada por Moro (2005) para plantios de *Pinus taeda* com oito anos idade, no município de Guarapuava/PR.

**Tabela 5.** Estoque e exportação de nutrientes com a colheita do lenho e casca de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com nove anos de idade, e balanço nutricional nos tratamentos: Controle, sem fertilização (C); Fertilização mineral (FM) e Fertilização com 18 t ha<sup>-1</sup> (base seca) de lodo de esgoto com e sem fertilização mineral complementar (LCF e LSF, respectivamente).

**Table 5.** Amount and export of nutrients with harvest of wood and bark of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, with nine years old, and nutrient balance on the treatments: control, no fertilization (C); Mineral fertilization (FM) and Fertilization with 18 t ha<sup>-1</sup> (dry basis) of sewage sludge with and without supplementary mineral fertilizers (LCF and LSF respectively).

Trat.	Biomassa t ha <sup>-1</sup>	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
kg ha <sup>-1</sup>												
<b>Lenho</b>												
C	116,3 a	240,7 a	9,3 b	34,9 b	53,5 ab	11,6 b	8,1 a	0,40 ab	0,07 b	1,9 b	8,8 a	0,8 b
FM	115,0 a	205,9 ab	9,2 b	34,5 b	50,6 b	11,5 b	5,8 b	0,34 b	0,07 b	1,7 b	8,3 ab	0,9 b
LSF	114,9 a	178,1 b	11,5 ab	34,5 b	65,5 a	17,2 a	8,0 a	0,46 a	0,10 a	2,0 b	7,1 bc	1,8 a
LCF	119,9 a	233,8 a	12,0 a	47,9 a	62,3 ab	14,4 ab	9,6 a	0,41 ab	0,08 b	2,7 a	6,6 c	1,7 a
<b>Casca</b>												
C	28,5 a	75,2 a	3,1 c	14,2 a	16,8 c	4,3 b	2,3 c	0,14 a	0,05 a	4,5 a	1,2 a	0,3 d
FM	28,3 a	62,3 b	3,4 bc	11,3 b	21,5 b	3,4 c	2,0 c	0,14 a	0,05 a	4,1 ab	1,0 b	0,4 c
LSF	28,0 a	49,3 c	3,6 b	8,4 c	23,0 b	4,8 b	3,1 b	0,13 a	0,05 a	3,9 b	1,0 b	0,5 b
LCF	29,3 a	56,8 bc	4,1 a	11,7 b	26,9 a	6,4 a	3,8 a	0,13 a	0,05 a	4,1 ab	0,9 b	0,6 a
<b>Exportação com a colheita do tronco</b>												
C	144,8 a	315,9 a	12,4 b	49,1 b	70,3 b	15,9 b	10,4 b	0,54 a	0,12 b	6,4 ab	10,0 a	1,1 b
FM	143,3 a	268,2 bc	12,6 b	45,8 b	72,1 b	14,9 b	7,8 c	0,48 a	0,12 b	5,8 b	9,3 ab	1,3 b
LSF	142,9 a	227,4 c	15,1 ab	42,9 b	88,5 a	22,0 a	11,1 b	0,59 a	0,15 a	5,9 ab	8,1 ab	2,3 a
LCF	149,2 a	290,6 ab	16,1 a	59,6 a	89,2 a	20,8 a	13,4 a	0,54 a	0,13 ab	6,8 a	7,5 b	2,3 a
<b>Entrada de nutriente via adubação</b>												
C		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FM		50,8	131,8	89,5	8,0	0	4,0	1,6	0,30	0	0	1,5
LSF		686,3	627,7	28,8	460,8	68,4	127,3	0	12,60	813,6	5,4	57,6
LCF		737,1	759,5	118,3	468,8	68,4	131,3	1,6	12,90	813,6	5,4	59,1
<b>Balanço de nutrientes</b>												
C		-315,9	-12,4	-49,1	-70,3	-15,9	-10,4	-0,54	-0,12	-6,4	-10,0	-1,1
FM		-217,4	+119,2	+43,7	-64,1	-14,9	-3,8	+1,12	+0,18	-5,8	-9,3	+0,2
LSF		+458,9	+612,6	-14,1	+372,3	+46,4	+116	-0,59	+12,45	+807,7	-2,7	+55,3
LCF		+446,5	+743,4	+58,7	+379,6	+47,6	+117	+1,06	+12,77	+806,8	-2,1	+56,8

Para cada nutriente e componente da árvore (coluna), médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (P > 0,05).

A quantidade de nitrogênio (N) estocada no lenho e na casca, bem como a quantidade de N exportada com a colheita do tronco, foi significativamente maior no tratamento C (25 a 50%) em relação aos tratamentos FM e LSF. Como a biomassa das árvores foi similar nos quatro tratamentos, a diferença observada entre os estoques de N pode ser atribuída a maior concentração de N na casca produzida no tratamento C (Tabela 4). Os estoques de fósforo (P) no lenho e na casca foram de 15 a 30% superiores no tratamento LCF em comparação ao C e FM. No tratamento LSF, apenas o estoque de P na casca foi maior (≈15%) em relação ao tratamento controle (Tabela 5). O lodo de esgoto é um resíduo urbano rico em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo, ferro e zinco (tabela 2), que enriquece o solo e eleva a concentração de P e demais nutrientes nas plantas.

O estoque de potássio no lenho foi aproximadamente três vezes maior do que na casca (Tabela 5). A concentração de K no lenho é normalmente baixa em comparação aos demais tecidos da planta; no entanto, a biomassa de lenho acumulada pelas árvores é significativamente maior no momento da colheita. Por isso, a exportação de K com a colheita do lenho é alta e, por isso, precisa ser considerada durante a fertilização do ciclo de cultivo subsequente. Em solos deficientes em potássio (Tabela 1), a aplicação de lodo de esgoto não é suficiente para atender a demanda de K pelos eucaliptos, uma vez que o lodo é pobre neste elemento e o eucalipto é exigente por K. Em nosso estudo, o maior estoque de potássio na biomassa do tronco ocorreu nos tratamentos LCF e FM, onde foram efetuadas as fertilizações com KCl.

Os estoques de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no lenho foram 30 e 50% maiores, respectivamente, no tratamento LSF em relação à fertilização mineral (FM). Na casca, o estoque de Ca e Mg foi até 60% maior em LCF comparado aos demais tratamentos. Conseqüentemente, a exportação de ambos elementos com a colheita do tronco foi de 25 a 40% maior nos tratamentos com lodo de esgoto (LSF e LCF). O estoque de enxofre (S) nos troncos foi menor no tratamento FM e maior nos tratamentos com lodo de esgoto (Tabela 5). Este resultado pode ser atribuído à matéria orgânica contida no lodo (Tabela 2), que ao ser decomposta e mineralizada pelos microrganismos do solo disponibiliza enxofre mineral ( $SO_4^{2-}$ ) e outros elementos para às plantas (ALVAREZ et al., 2007).

Os estoques de manganês no lenho e na casca foram de 20 a 30% menores em LSF e LCF, se comparados com o tratamento controle. De acordo com Abreu et al. (2007), este resultado pode ser atribuído à afinidade do manganês pela matéria orgânica do substrato e, conseqüentemente, à formação de complexos organominerais estáveis e pouco solúveis. O estoque de zinco (Zn) nos componentes do tronco foi cerca de duas vezes maior nos tratamentos com o lodo de esgoto em relação aos tratamentos C e FM. Geralmente, lodos de esgoto oriundos de regiões metropolitanas altamente industrializadas, como no caso da ETE Barueri, são ricos em elementos metálicos (ex. Zn), contribuindo muitas vezes para o aumento do teor desses elementos no solo. Em geral, lodos de esgoto de origem doméstica apresentam teores de metais inferiores àqueles de origem industrial; além disso, os processos de tratamento e estabilização do lodo influenciam nas características desse resíduo e na disponibilidade dos metais contidos em sua composição (SILVEIRA et al., 2003).

A exportação de N com a colheita do tronco gerou um balanço negativo de 200 a 300 kg ha<sup>-1</sup> nos tratamentos C e FM (Tabela 5), ou seja, a quantidade de N exportada com a colheita da madeira foi significativamente maior à quantidade de N adicionada via fertilização. Nos tratamentos com lodo de esgoto, observou-se um saldo positivo de aproximadamente 450 kg ha<sup>-1</sup> de N; todavia, uma grande parte deste nitrogênio pode ter volatilizado ou lixiviado ao longo tempo (SILVA et al., 2013). A quantidade de fósforo (P) exportada com a colheita do tronco, se comparado aos demais macronutrientes, pode aparentar baixa demanda de P pelos pinheiros (Tabela 5); porém, suas atribuições fisiológicas são essenciais, como por exemplo, a composição das moléculas de energia (ATP) e dos ácidos nucléicos (TAIZ; ZEIGER, 2013). A forte interação do fósforo com as partículas organominerais do solo (NOVAIS et al., 2007) torna quase sempre necessária a fertilização fosfatada nos plantios florestais. Por este motivo, o balanço positivo do P decorrente da aplicação do lodo de esgoto é interessante, uma vez que o efeito residual do lodo pode proporcionar o fósforo necessário para os ciclos de cultivo subsequentes, conforme observado por Ferraz (2013) em plantios de eucaliptos.

Com a colheita das árvores aos nove anos de idade, a exportação de potássio (K) e boro (B) foi significativamente maior à quantidade de K e B adicionada ao solo no tratamento LSF (Tabela 5). Este balanço negativo pode ser atribuído ao baixo conteúdo de K e B no lodo, devido à separação das frações líquida (água+K+B) e orgânica (lodo) durante o processo de decantação na estação de tratamento de esgoto. Neste caso, é necessária uma complementação do lodo com KCl e ulexita (borato natural), conforme a exigência de cada espécie florestal. Para o cálcio, magnésio e enxofre, a aplicação de lodo de esgoto (LSF e LCF) proporcionou balanços positivos em relação às quantidades exportadas pela colheita do tronco; mas, nos tratamentos C e FM, o balanço desses nutrientes foi negativo, demonstrando a necessidade de fertilizações complementares e, principalmente, de calagem para fornecer cálcio e magnésio ao sistema solo-planta.

Em todos os tratamentos, a quantidade de manganês adicionada ao solo via lodo ou fertilização mineral não foi suficiente para igualar-se a exportação desse elemento com a colheita da madeira (Tabela 5). Entretanto, apesar deste resultado, não foi observado qualquer sintoma (e.g. clorose) de deficiência de Mn (SILVEIRA et al., 2005) durante o ciclo de cultivo dos pinheiros. Nos casos do cobre, ferro e zinco, os balanços (entrada vs. saída) foram positivos nos tratamentos com aplicação do lodo de esgoto. Vale destacar que a demanda das plantas por micronutrientes é normalmente baixa e quase sempre é satisfeita pelo estoque natural desses elementos no solo (GONÇALVES; VALERI, 2001). Nota-se ainda na Tabela 5, que as quantidades de zinco e cobre adicionadas ao solo com a aplicação do lodo de esgoto (LSF e LCF) foram significativamente maiores em comparação ao tratamento FM; mesmo assim, de acordo com a Resolução do Conama 375 (CONAMA, 2006), esses teores foram cerca de dez vezes inferiores à quantidade limite desses elementos no solo. Apesar de existirem leis que proíbam o despejo de resíduos industriais na rede de esgoto doméstica, a falta de

fiscalização rigorosa no Brasil desfavorece a produção de lodos de esgoto com maior qualidade, ou seja, isentos de compostos indesejáveis (ex. metais pesados).

## CONCLUSÕES

A aplicação de lodo de esgoto seco (granulado) no plantio de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* propiciou um maior crescimento inicial das árvores; mas, com o decorrer do tempo, não foram observados efeitos positivos ou negativos do lodo sobre o crescimento e a produção de biomassa lenhosa (lenho + casca). Mesmo a aplicação da fertilização mineral não afetou significativamente o crescimento das árvores até os nove anos de idade.

Os estoques de fósforo, cálcio, enxofre e zinco nos plantios de pinus foram enriquecidos com a aplicação do lodo de esgoto e fertilização mineral complementar; entretanto, o estoque de N não sofreu alterações significativas com a aplicação do lodo ou fertilizante mineral. Mesmo assim, considerando-se a entrada de nutrientes no solo (via adição de lodo e/ou de fertilizantes minerais) e a sua saída juntamente com a colheita da madeira, a aplicação de lodo de esgoto proporcionou saldos positivos para os elementos N, P, Ca, S e Zn.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP – Processo: 2010/00706-2) pela bolsa de doutorado ao primeiro autor, à Empresa Duratex S/A e ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF pela infraestrutura e ajuda técnica. Ao departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP e aos funcionários pelo auxílio na condução do experimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 645-736.
- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, V. V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 595-644.
- BALLONI, E. A.; JACOB, W. S.; SIMÕES, J. W., Resultados parciais de experimentação desenvolvidos pelo Setor de Implantação Florestal com diferentes espécies. **Boletim Informativo IPEF**. Piracicaba, v. 6, n. 18, p. 78-87, 1978.
- BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. Disposição do lodo de esgoto em solo agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura** (Eds.) Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006, 349 p.
- BINDER, D. L.; DOBERMANN, A.; SANDER, D. H.; CASSMAN, K. G. Biosolids as nitrogen source for irrigated maize and rainfed sorghum. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 66, n. 2, p. 531-543, 2002.
- CAMPOE, O. C.; STAPE, J. L.; ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R.; RUBILAR, R.; BINKLEY, D. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, 2013.
- CAPITANI, L. R.; SPELTZ, G. E.; CAMPOS, W. O. Efeitos da calagem e adubação fosfatada no desenvolvimento de *Pinus oocarpa* MORELET VAR. *hondurensis*. **Silvicultura**, São Paulo, v. 8, n. 28, p. 243-246, Suplemento. Apresentado no CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2001, 232 p.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 375: “Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências”. Publicação **Diário Oficial da União**, n. 167, de 30/08/2006, 2006. p. 141-146.

DAVID, A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. 2002, 151p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: CNPS, 2006. 306 p.

FERRAZ, A. V. **Efeito residual do lodo de esgoto na produtividade e ciclagem de nutrientes em plantios de *Eucalyptus grandis* e no cultivo de plantas alimentícias (Simulando alteração do uso agrícola do solo)**. 2013. 159 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, 2013.

FOX, T. R.; ALLEN, H. L.; ALBAUGH, T. J.; RUBILAR, R.; CARLSON, C. A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v. 31, n. 1, p. 5-11, 2007.

FREY, S. D.; KNORR, M.; PARRENT, J. L.; SIMPSON, R. T. [Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests](#). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 196, n. 1, p. 159-171, 2004.

GARCÍA-MINA, J. M.; ANTOLÍN, M. C.; SANCHES-DIAZ, S. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soil types. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, n. 1, p. 57-69, 2004.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. P. L.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, n. 1, p. 6-27, 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição de árvores. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 79-104.

GONÇALVES, J. L. M.; VALERI, S. V. Eucalipto e pinus. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P.; RAIJ, B.; ABREU, C. A. (Eds.). **Micronutrientes: elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/PATAFOS, p. 393-423, 2001.

JOKELA, E. J. Nutrient management of southern pines. In: DICKENS, E. D.; BARNETT, J. P.; HUBBARD, W. G.; JOKELA, E. J. (Eds.). **Slash Pine: still growing and growing!** Proceedings of the Slash Pine Symposium, Asheville: USDA Forest Service, p. 27-35. 2004. (SRS General Technical Report, 76)

JORDAN, C. F. **Nutrient cycling in tropical forest ecosystems: principles and their applications in management and conservation**. Chichester: John Wiley, 1985. 200 p.

KIMBERLEY, M. O.; WANGA, H.; WILKSB, P. J.; FISHERB, C. R.; MAGESANA, G. N. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, n. 1-3, p. 345-351, 2004.

- LACLAU, J. P.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, n. 1, p. 1-5, 2013.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000. 531 p.
- LECROY, C.; MASIELLO, C. A.; RUDGERS, J. A.; HOCKADAY, W. C.; SILBERG, J. J. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 58, p. 248-254, 2013.
- MA, X.; HEAL, K. V.; LIU, A.; JARVIS, P. G. Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 243, n. 1, p. 61-74, 2007.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do Estado Nutricional das Plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201 p.
- MANIKAM, D.; SRIVASTAVA, P. B. L. The growth response of *Pinus caribaea* Mot. var. *hondurensis* Bar and Golf seedlings to fertilizer application on the Serdang soil series. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 3, p. 127-139, 1980.
- MILLER, H. G. Forest fertilization: some guiding concepts. **Forestry**, Oxford, v. 54, n. 2, p. 157-167, 1981.
- MORAES NETO, S. P.; GONÇALVES, J. L. M.; ARTHUR JR., J. C.; DUCATTI, F.; AGUIRRE JR., J. H. Fertilização de mudas de espécies arbóreas nativas e exóticas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 129-137, 2003.
- MORO, L. **Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema SISPINUS**. 2005. 114 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 276-374.
- POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M.; [GUEDES, M. C.](#) Uso do lodo de esgoto em plantações florestais. In: ANDREOLI, C. V. (Org.). **Biossólidos - Alternativas do Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES-PROSAB, v. 4, p. 159-188, 2006.
- PRESCOT, C. E.; BLEVINS, L. L. Eleven-year growth response of young conifers to biosolids or nitrogen and phosphorus fertilizer on Northern Vancouver Island. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, n. 1, p. 211-214, 2005.
- PRITCHETT, W. L.; FICHER, R. F. **Properties and management of forest soils**. 2.ed. New York: John Wiley, 1987. 510 p.
- SAAB, A. A.; PAULA, R. A. O Mercado de fertilizantes no Brasil: diagnósticos e propostas de políticas. **Revista de Política Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 5-24, 2008.
- SEGHERS. **Instalação de secagem de lodos de São Miguel** - Manual de operação. Seghers Better Technology, SBT-SNL 1- 04- 01. São Paulo, 2001.
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; BRITO, J. O.; STAPE, J. L.; MOREIRA, R. M. Produção de óleo essencial e balanço nutricional em *Corymbia citriodora* adubado com lodo de esgoto em diferentes espaçamentos. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 3, p. 346-354, 2009.
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 67-78, 2013.

SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F.; GUILHERME, L. R. G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 793-806, 2003.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; GONÇALVES, A. N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: Diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Org.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 79-104.

SIMÕES, J. W.; MASCARENHAS SOBRINHO, J.; MELLO, H. A.; COUTO, H. T. Z.; A adubação acelera o desenvolvimento inicial de plantações de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 1, p. 59-80, 1970.

SMETHURST, P. J. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 335, n. 1/2, p. 83-100, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TSUTIYA, M. T. Características de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM, P. S.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. (Eds.) **Bio sólidos na agricultura**. 1.ed. São Paulo: SABESP, p. 89-131, 2001.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

XUE, J.; KIMBERLEY, M. O.; ROSS, C.; GIELEN, G.; TREMBLAY, L. A.; CHAMPEAU, O.; HORSWELL, J.; WANG, H. Ecological impacts of long-term application of biosolids to a radiata pine plantation. **Science of the Total Environment**, v. 530-531, p. 233-240, 2015.

WALLANDER, H.; NYLUND, J. E. Effects of excess nitrogen and phosphorus starvation on the extramatrical mycelium of ectomycorrhizas of *Pinus sylvestris* L. **New Phytologist**, Oxford, v. 120, n. 4, p. 495-503, 1992.

Recebido em 10/11/2015

Aceito para publicação em 18/05/2016