

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

DANIELE CRISTINA SCHONS ECKHARDT

**FERTILIDADE DO SOLO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO MINERAL DO
EUCALIPTO FERTILIZADO COM LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2019

DANIELE CRISTINA SCHONS ECKHARDT

**FERTILIDADE DO SOLO, CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO MINERAL DO
EUCALIPTO FERTILIZADO COM LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Dr^a. Maria do Carmo Lana

Coorientador: Dr. Ubirajara Contro Malavasi

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Eckhardt, Daniele Cristina Schons

Fertilidade do solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto fertilizado com lodos de efluentes agroindustriais / Daniele Cristina Schons Eckhardt; orientador(a), Maria do Carmo Lana; coorientador(a), Ubirajara Contro Malavasi, 2019.

64 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Marechal Cândido Rondon, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2019.

1. Eucalyptus urograndis. 2. Resíduos agroindustriais. 3. Agricultura. I. Lana, Maria do Carmo. II. Malavasi, Ubirajara Contro. III. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ

GOVERNO DO ESTADO

DANIELE CRISTINA SCHONS ECKHARDT

Fertilidade do solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto fertilizado com lodos de efluentes agroindustriais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Sistemas de Produção Vegetal Sustentáveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Maria do Carmo Lana

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon
(UNIOESTE)

Viviane Ruppenthal

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon
(UNIOESTE)

Laercio Augusto Pivetta

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)

Marechal Cândido Rondon, 14 de fevereiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força nos momentos difíceis, pelas oportunidades vivenciadas, pela vida e por tudo que me destes.

Ao meu esposo Jhonatan, por todo amor, carinho e companheirismo; por estar sempre presente, me auxiliando, apoiando e incentivando.

Aos meus pais Ari e Selma, pelo amor, amizade, carinho, confiança, apoio e bons exemplos. E ao meu irmão Rudinei, pela amizade, parceria e auxílio na execução do experimento.

Aos meus sogros, Ilton e Liane, e à toda a minha família e amigos pelo apoio, motivação, amizade e conselhos.

A minha orientadora Dr^a. Maria do Carmo Lana, por ter aceitado o desafio de orientar este trabalho, com foco também na área ambiental. Pela compreensão, paciência e todos os ensinamentos ao longo destes 2 anos; aspectos fundamentais para a elaboração da presente pesquisa e para o meu crescimento profissional.

Ao coorientador Dr. Ubirajara Contro Malavasi, por todos os ensinamentos, apoio e paciência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

A Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA), pela qualidade de ensino, bem como pela oportunidade, espaço e recursos concedidos.

A todos os professores do programa, pelos ensinamentos no decorrer das disciplinas e da elaboração do presente trabalho, em especial Dr^a. Edleusa Pereira Seidel, Dr. Cláudio Yuji Tsutsumi, Dr. Vandeir Francisco Guimarães, Dr^a. Vanda Pietrowski, Dr. Affonso Celso Gonçalves Júnior, Dr. Eurides Kuster Macedo Júnior e Dr. Edmar Soares de Vasconcelos.

Ao Dr. Jucenei Fernando Frandoloso pelo auxílio em todas as avaliações no laboratório de fertilidade do solo e nutrição mineral de plantas e por todas as orientações.

Aos funcionários da universidade, pelo auxílio e amizade e por contribuírem continuamente para o funcionamento de todas as atividades.

A todos os colegas e amigos de turma, pelo compartilhamento de experiências e aprendizados, bem como pelo convívio, boas risadas e parceria; em especial à Giovana, Leila, Tatiane e Tauane, pela amizade, pelos grupos de estudos e por terem me adotado na agronomia.

As três agroindústrias, pela possibilidade de uso de seus resíduos, fator fundamental para que este estudo pudesse ser implantado.

Enfim, a todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

ECKHARDT, Daniele Cristina Schons. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2019. **Fertilidade do solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto fertilizado com lodos de efluentes agroindustriais.** Orientadora: Dr^a. Maria do Carmo Lana. Coorientador: Dr. Ubirajara Contro Malavasi.

A aplicação de lodos de efluentes agroindustriais no solo pode ser uma excelente alternativa, devido ao potencial fertilizante e condicionador de solos, por proporcionar a possibilidade de obter incrementos nos teores de nutrientes essenciais e no crescimento de plantas de eucalipto. Porém, ainda são escassos os trabalhos utilizando resíduos destas fontes. Em vista disso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos morfofisiológicos e edáficos da aplicação de três tipos de lodos de efluentes provenientes de agroindústrias alimentícias no crescimento inicial de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*); por meio da quantificação dos efeitos de doses de lodos sobre (i) os parâmetros morfológicos do eucalipto, (ii) os teores foliares de macro e micronutrientes e (iii) sobre a fertilidade do solo e seus atributos químicos. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial (4x4)+1, com quatro repetições; no qual o primeiro fator refere-se aos lodos de efluentes utilizados (lodo primário de abatedouro de aves (LPAI), lodo secundário de laticínio (LSLI) e lodo terciário de laticínio (LTLI), todos incorporados ao solo, e lodo terciário de laticínio em cobertura (LTLC)); o segundo fator é composto pelas quatro doses de cada lodo (10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹); e uma testemunha, sem a aplicação de lodo de efluente. O experimento foi conduzido em casa de vegetação em vasos por um período de 100 dias. Os resultados indicam que a aplicação de lodos de efluentes agroindustriais promoveu efeitos benéficos no desenvolvimento inicial da cultura de *E. urograndis*, influenciou os teores foliares de nutrientes e incrementou os atributos químicos relacionados à fertilidade do solo. Melhores resultados foram encontrados com o uso de LSLI, que apresentou resultados satisfatórios quanto aos teores foliares de macro e micronutrientes, maiores incrementos de parâmetros morfológicos e da fertilidade do solo. Resultados satisfatórios também foram observados com a aplicação de lodo terciário de laticínio, sendo que a aplicação em cobertura proporcionou resultados mais adequados quanto aos atributos químicos do solo e maiores teores de P no tecido vegetal. A aplicação de LPAI resultou em deficiência nutricional de K e baixos teores do elemento no solo, o que ocasionou efeitos negativos sobre os parâmetros morfológicos do eucalipto nas maiores doses testadas. Baixos teores de K no solo, também foram observados com a aplicação de LSLI e LTLI, embora não tenham sido observados efeitos negativos no crescimento inicial da cultura. Recomenda-se a suplementação mineral de K na aplicação incorporada de LPAI, LSLI e LTLI. Quanto às doses, recomenda-se, para os lodos secundário e terciário de laticínio, a aplicação de 30 a 40 t ha⁻¹ e, para o lodo primário de abatedouro de aves, entre 17 e 27 t ha⁻¹. Os teores de Pb, Cd, Cr e Cu estão abaixo do limite de investigação para áreas agrícolas, portanto, os resíduos podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura nas doses avaliadas de 10 a 40 t ha⁻¹.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Resíduos agroindustriais. Agricultura.

ABSTRACT

ECKHARDT, Daniele Cristina Schons. Western Paraná State University – UNIOESTE. February 2019. **Soil fertility, growth and mineral nutrition of eucalyptus fertilized with agroindustrial effluent sludge**. Advisor: Dr^a. Maria do Carmo Lana. Co-Advisor: Dr. Ubirajara Contro Malavasi.

The using of agroindustrial effluent sludge in soil can be an excellent alternative due to the fertilizing and soil conditioner potential because it provides the possibility of achieving increases in essential nutrient contents and growth of eucalyptus plants. However, work using waste from these sources is still scarce. In view of this, the aim of the present work was to evaluate the morphophysiological and edaphic effects using three effluent kinds of sludge from the food industry in the initial growth of a hybrid of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*); through the quantification of sludge doses effects on (i) the morphological parameters of eucalyptus, (ii) the macro and micronutrient foliar contents and (iii) the soil fertility and its chemical attributes. The experimental outline was the randomized block in factorial scheme (4x4)+1, with four repetitions, in which the first factor refers to the effluent sludge used (poultry slaughterhouse primary sludge (LPAI), dairy secondary sludge (LSLI) and dairy tertiary sludge (LTLI), all incorporated into the soil; and dairy tertiary sludge in coverage (LTLC)); the second factor were the four doses of each kind of sludge (10, 20, 30, and 40 t ha⁻¹) and a control, without the application of effluent sludge. The experiment was conducted in a greenhouse in pots for a period of 100 days. The results indicate that the application of effluent sludge promoted beneficial effects in the early development of *E. urograndis*, it influenced leaf nutrient content and increased the chemical attributes related to soil fertility. Better results were found with the use of LSLI, which presented satisfactory results regarding macro and micronutrient foliar contents, higher morphological parameters and soil fertility. Satisfactory results were also observed with the use of dairy tertiary sludge, being that the application in cover provided adequate results regarding the chemical soil attributes and higher levels of P in the vegetal tissue. The application of LPAI resulted in nutritional deficiency of K and low levels of soil element, which caused negative effects on the morphological parameters of eucalyptus in the highest doses tested. Low levels of K in soil were also observed with the application of LSLI and LTLI, although no negative effects were observed on the initial growth of the culture. It is recommended to supplement K mineral in the incorporated application of LPAI, LSLI and LTLI. As for the doses, it is recommended, for secondary and tertiary sludge of dairy, the application of 30 to 40 t ha⁻¹ and, for primary sludge, between 17 and 27 t ha⁻¹. The Pb, Cd, Cr and Cu levels are below the limit of research for agricultural areas, therefore, the residues can be used in an environmentally safe manner in the evaluated doses of 10 to 40 t ha⁻¹.

Keywords: *Eucalyptus urograndis*. Agroindustrial waste. Agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração do lodo primário de abatedouro de aves: (a) flotador físico-químico, (b) flotação de sólidos em suspensão, (c) remoção do material flotado por raspadores automáticos, (d) homogeneização do material em tanque agitador, (e) condicionamento em tanque de aquecimento e (f) separação de fases em tridecanter centrífugo	13
Figura 2 – Geração do lodo secundário de laticínio: (a) lagoa aerada com sistema de lodos ativados, (b) separação de fases em decantador e (c) remoção de umidade em tanques adensadores (a direita) e desaguamento em centrífuga (a esquerda)	15
Figura 3 – Geração do lodo terciário de laticínio: (a) flotador físico-químico, (b) remoção do material flotado por raspadores automáticos e (c) saída do efluente tratado, após a remoção do lodo.....	16
Figura 4 – Lodos de efluentes de agroindústrias: (a) lodo primário de abatedouro de aves, (b) lodo secundário de laticínio e (c) lodo terciário de laticínio	17
Figura 5 – Lodos aplicados ao solo: (a) lodo primário de abatedouro de aves, (b) lodo secundário de laticínio e (c) lodo terciário de laticínio secos e peneirados para incorporação ao solo e (d) lodo terciário de laticínio com a umidade natural para aplicação em cobertura	18
Figura 6 – Início do experimento após o transplântio das mudas	19
Figura 7 – Final do experimento, após 100 dias de condução e avaliações	19
Figura 8 – Incrementos em altura de plantas (a) e número de folhas (b) em função do tempo para as quatro doses de lodos de efluentes testados	22
Figura 9 – Incrementos acumulados de altura de plantas, diâmetro de coleto, número de folhas e de ramos em função do tempo para os quatro lodos de efluentes testados, e índice SPAD em função do tempo	23
Figura 10 – Incrementos acumulados de altura de plantas, diâmetro de coleto e número de folhas e índice SPAD em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.....	24
Figura 11 – Massa de matéria seca das partes aérea e radicular em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados aos 100 dias, número de ramos em função	

das doses e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro	25
Figura 12 – Sintomas observados nos tratamentos com aplicação do LPAI, nas doses de 20, 30 e 40 t ha ⁻¹ , aos 100 dias após o transplântio	26
Figura 13 – Teores foliares de N, P, Ca, Mg e S em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados, teores foliares de K em função das doses e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.....	39
Figura 14 – Teores foliares de Na, Zn e Mn e massa de matéria seca de parte aérea em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. ..	40
Figura 15 – Valores de H ⁺ + Al ³⁺ , MO, N, S e CTC em solos cultivados com eucalipto em função das doses de lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.....	53
Figura 16 – Teores de P, K, Ca e Na em solos cultivados com eucalipto em função das doses para os quatro lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.....	55
Figura 17 – Teores Zn, Fe e Pb em solos cultivados com eucalipto em função das doses para os quatro lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. ..	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos três lodos de efluentes de agroindústrias alimentícias	16
Tabela 2 – Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento.....	17
Tabela 3 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias do desenvolvimento inicial de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais ao longo do período experimental	21
Tabela 4 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias das massas de matéria seca de partes aérea e radicular de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais aos 100 dias	22
Tabela 5 – Teores de referência para interpretação de resultados de análise foliar de espécies de eucalipto	36
Tabela 6 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos teores foliares de macro e micronutrientes, bem como da massa de matéria seca aérea de plantas de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais aos 100 dias.....	37
Tabela 7 – Valores médios dos teores foliares de K, Cu e Fe de plantas de eucalipto em função da aplicação de quatro lodos de efluentes agroindustriais	38
Tabela 8 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos atributos químicos de solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais.....	50
Tabela 9 - Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos atributos químicos de solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais (continuação).....	51
Tabela 10 – Valores médios de pH CaCl ₂ , H ⁺ + Al ³⁺ , MO, N, Mg, S, Mn, SB, CTC e V em solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de quatro lodos de efluentes agroindustriais	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	6
3 CAPÍTULO 1: APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS NO CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO	10
RESUMO	10
ABSTRACT	10
3.1 INTRODUÇÃO.....	11
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	12
3.2.1 Localização do experimento.....	12
3.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais.....	12
3.2.2.1 Lodo Primário de Abatedouro de Aves (LPA).....	13
3.2.2.2 Lodo Secundário de Laticínio (LSL)	14
3.2.2.3 Lodo Terciário de Laticínio (LTL).....	15
3.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais.....	16
3.2.4 Implantação, condução e tratos culturais do experimento	17
3.2.5 Avaliações.....	19
3.2.6 Análise estatística	20
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.4 CONCLUSÕES.....	29
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
4 CAPÍTULO 2: TEORES FOLIARES DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS.....	33
RESUMO	33
ABSTRACT	33
4.1 INTRODUÇÃO.....	34
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	35
4.2.1 Localização do experimento.....	35
4.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais.....	35
4.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais.....	35
4.2.4 Implantação, condução e tratos culturais do experimento	35

4.2.5 Avaliações	35
4.2.6 Análise estatística	36
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.4 CONCLUSÕES.....	43
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
5 CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS SOBRE A FERTILIDADE E OS COMPONENTES INORGÂNICOS DE SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO	46
RESUMO	46
ABSTRACT	46
5.1 INTRODUÇÃO.....	47
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	48
5.2.1 Localização do experimento	48
5.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais	48
5.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais	48
5.2.4 Implantação, condução e tratos culturais do experimento	48
5.2.5 Avaliações	48
5.2.6 Análise estatística	49
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.4 CONCLUSÕES.....	60
5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

1 INTRODUÇÃO GERAL

Lodos são os principais resíduos gerados em estações de tratamento de efluentes industriais. Constituídos por suspensões aquosas de sólidos com características orgânicas e inorgânicas, que provêm dos efluentes líquidos, e também, em alguns casos, de produtos adicionados como coagulantes, polímeros, carvão ativado e outros (CAVALCANTI, 2012).

Podem ser classificados, de acordo com a etapa e o processo de geração, em lodo primário (sólidos sedimentados em processos físicos na etapa primária), lodo secundário (biomassa gerada na etapa secundária com processos biológicos) e lodo químico (gerado em etapa físico-química, seja no tratamento primário ou como polimento de efluentes secundários) (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014).

As características do lodo variam em função da tipologia do efluente, do grau de tratamento da estação e do processo gerador de lodo (TSUTIYA, 2001). Lodos secundários, por exemplo – gerados em lagoas facultativas, aeróbias e anaeróbias, lodos ativados, filtros biológicos e outros processos biológicos (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014) – geralmente possuem alto teor de material orgânico, nitrogênio e fósforo, com potencial para uso como fertilizante na agricultura (HAANDEL; SOBRINHO, 2006). Enquanto que o lodo químico pode ser obtido por meio do tratamento com coagulantes e floculantes e posterior flotação, e neste caso, conforme Zanotto et al. (2006) possui elevado potencial nutricional a ser explorado.

O grande problema associado ao lodo, provêm da complexidade quanto às alternativas de tratamento e destinação final, visto que envolve aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais. Por este motivo, em muitos casos verifica-se a ocorrência de negligências e a falta de planejamento, que ocasiona a gestão inadequada e gera impactos ambientais negativos (FERNANDES et al., 2014).

Quanto à destinação final, existem inúmeras alternativas que podem favorecer a resolução deste problema ambiental, bem como agregar valor ao resíduo. Neste sentido, destaca-se o uso benéfico na agricultura, ou seja, o aproveitamento das características do lodo como fertilizante e condicionador do solo, exercendo importantes efeitos nas propriedades físicas, químicas e biológicas (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014).

Esta prática, também conhecida como reciclagem do lodo, é considerada uma alternativa economicamente interessante e ambientalmente correta e vem apresentando grandes perspectivas de utilização (FERNANDES et al., 2014).

Um dos grandes benefícios está associado ao fato de que os lodos, em geral, apresentam quantidades significativas de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, sendo que o nitrogênio (N) e o fósforo (P) são os mais comumente encontrados no resíduo (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014). Estes são também considerados os elementos que mais limitam o crescimento vegetal na maioria dos solos (MARENCO; LOPES, 2009).

A matéria orgânica presente no lodo também é fator importante, visto que influencia positivamente nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo: atua como condicionador e agente cimentante; auxilia na agregação de partículas; melhora a retenção de água; aumenta a resistência à erosão; aumenta a quantidade de poros para o desenvolvimento radicular e circulação de água; favorece a melhoria da capacidade de troca catiônica do solo e da reserva de nutrientes para as plantas; melhora o poder tampão de pH e estimula a atividade microbiana no solo, influenciando positivamente o crescimento das plantas (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014).

Em diversos trabalhos foram observados efeitos positivos com a aplicação de lodo de esgoto favorecendo a recuperação dos atributos químicos de solo degradado (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015); com lodo de esgoto e de laticínio (BOECHAT et al., 2015), lodo de laticínio (MACHADO; TRANNIN, 2015) e lodo de indústria de papel reciclado (COSTA et al., 2009) promovendo a melhoria da fertilidade do solo; e com lodo de indústria de fibras e resina PET beneficiando, não apenas na fertilidade, mas também na estrutura física do solo (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2008). Assim sendo, verifica-se que o uso de lodo possibilita o aumento da produtividade, inclusive em solos mais degradados (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014), demonstrando o potencial do uso agrícola destes resíduos.

Importante considerar também que, conforme Pereira e Garcia (2016), apesar de ser um resíduo industrial, o lodo utilizado pelos mesmos (oriundo de efluentes de uma indústria alimentícia de transformação de frutas e legumes) apresenta características adequadas para uso benéfico no solo, no que diz respeito aos constituintes inorgânicos e de substâncias orgânicas potencialmente tóxicas no solo.

No entanto, a reciclagem do lodo deve ser realizada de forma correta, observando as restrições ambientais e pedológicas, para garantir a devida segurança aos seres humanos, aos animais e ao meio ambiente (FERNANDES et al., 2014). Também devem ser observados a Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e o anexo 6 da Resolução nº 21/2009 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) do Paraná, os quais definem critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgotos de estações de tratamento e outras providências; bem como o item 5 do anexo 2 da Resolução nº 70/2009 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CEMA) do Paraná, que trata da disposição de efluentes líquidos e resíduos sólidos de indústrias no solo para fins agrícolas e florestais, como condicionadores, fertilizantes ou corretivos.

Destaque especial tem sido dado à utilização de lodo em cultivos florestais, alternativa considerada promissora, não apenas pelo potencial como fertilizante e condicionador de solos, mas também para a melhoria do desenvolvimento de mudas e árvores (ASSENHEIMER, 2009) e pela maior segurança, visto que os produtos da atividade não são utilizados na alimentação humana ou animal, reduzindo os riscos de contaminação (HART et al., 1988; ALEIXO, MALAVASI, 2004).

A cultura florestal mais cultivada no Brasil é o eucalipto, cujas plantações representam 71,9% das áreas de florestas cultivadas, totalizando 5,56 milhões de hectares (MENDES; TREICHEL; BELING, 2016). O eucalipto tem sido escolhido para os plantios devido ao seu rápido crescimento, adaptabilidade à várias regiões e por seu potencial econômico – alta produtividade da madeira e menores custos (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014).

A grande diversidade de espécies também é fator importante, podendo atender aos requisitos de vários segmentos e atividades (SILVA; CASTRO; XAVIER, 2008). No Paraná, há grande demanda de madeira para fins energéticos na produção de alimentos em complexos de grãos e processamento de carnes, além da produção de móveis e de celulose e papel, dentre outros (MENDES Jr.; PONTES, 2016).

Dentre as espécies mais utilizadas no Brasil está o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (*E. urograndis*) (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014), uma combinação interespecífica que resulta em árvores vigorosas, resistentes ao cancro e com maior densidade da madeira (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2004). Apresenta rápido crescimento inicial e se adapta em quase todo o território

brasileiro. Além disso, a sua madeira apresenta múltiplas opções de uso, como serraria, celulose e papel, lenha e carvão e outros (SILVA; CASTRO; XAVIER, 2008).

Para o adequado desenvolvimento da cultura, com altos incrementos anuais de madeira, é importante o planejamento e acompanhamento, que deve incluir a aplicação de adubação, visto que geralmente os solos de plantios florestais apresentam baixa fertilidade natural. Assim, há a geração de melhor rentabilidade econômica e maiores benefícios aos produtores rurais (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014).

Neste sentido, se enquadra o lodo, que pode ser utilizado em substituição parcial ou total da fertilização usual (NOLASCO; GUERRINI; BENEDETTI, 2005). Abreu Jr. et al. (2017) sugerem que a aplicação de lodo em eucalipto proporciona maior retorno econômico, por reduzir consideravelmente a quantidade necessária de fertilizantes convencionais e encurtar a rotação da cultura. Isto porque, segundo Silva, Poggiani e Laclau (2011), o lodo libera nutrientes de forma suficientemente rápida, atendendo as altas exigências do eucalipto, de forma semelhante à adubação mineral.

Efeitos positivos tem sido observados tanto no crescimento inicial, avaliando-se características como altura de plantas, diâmetro de caule, massa de matéria seca de parte aérea e radicular, área foliar e taxas de crescimento (RIBEIRO et al., 2015; PÉREZ et al., 2011; GARCIA et al., 2010); quanto em plantas adultas, favorecendo aumentos do volume de madeira (FERRAZ; MOMENTEL; POGGIANI, 2016; SILVA et al., 2012; SILVA et al., 2008a). O efeito pode ser bastante longo no solo, apresentando respostas contínuas de crescimento em 8 anos após a aplicação (ASSENHEIMER, 2009).

Em relação ao estado nutricional, diversos autores vêm obtendo resultados promissores com a aplicação do resíduo na cultura do eucalipto, tais como, aumentos nos teores de nutrientes e melhoria no crescimento da cultura (FERRAZ; POGGIANI, 2014; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011; GARCIA et al., 2009); aumentos na produção de serrapilheira e na transferência de nutrientes entre os outros componentes do ecossistema (SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011); bem como a possibilidade de substituição e de redução das exigências de adubação mineral (SILVA et al., 2008b; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011).

A alternativa torna-se interessante por possibilitar a resolução de um grave problema ambiental, reduzindo a pressão da exploração dos recursos naturais e a

quantidade de resíduos com restrições ambientais quanto à disposição final. O baixo custo e os impactos ambientais positivos também são excelentes vantagens (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014).

Vale comentar, que são poucos os trabalhos envolvendo lodos de efluentes industriais e a sua destinação, sendo mais comum o uso de lodos de esgoto, tornando importante a implantação de estudos como este, que visam a ampliação dos conhecimentos sobre o assunto.

Além disto, o presente estudo possibilita a melhoria da gestão dos resíduos e a minimização dos impactos ambientais negativos dos mesmos, possibilitando um avanço da sustentabilidade ambiental empresarial.

Desta forma o presente trabalho teve por objetivos avaliar os efeitos morfofisiológicos e edáficos da aplicação de três tipos de lodos de efluentes provenientes de agroindústrias alimentícias no crescimento inicial de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*); por meio da quantificação dos efeitos de doses de lodos sobre (i) os parâmetros morfológicos do eucalipto, (ii) os teores foliares de macro e micronutrientes e (iii) sobre a fertilidade do solo e seus componentes inorgânicos.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU JR., C. H.; FIRME, L. P.; MALDONADO, C. A. B.; MORAES NETO, S. P.; ALVES, M. C.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; GAVA, J. L.; HE, Z.; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in *Eucalyptus* plantations. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 51-58, 2017.

ALEIXO, V.; MALAVASI, U. C. O uso de biossólido como fertilizante em *Eucalyptus*. **Revista Varia Scientia**, v. 04, n. 08, p. 149-154, 2004.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição de lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 317-395.

ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Ambiência**, v. 5, n. 2, p. 321-330, 2009.

BOECHAT, C. L.; RIBEIRO, M. O.; BOMFIM, M. R.; BITTENCOURT, N. S.; ACCIOLY, A. M. A.; SANTOS, J. A. G. Sewage sludges in physic nut seedlings macronutrient contents and chemical attributes of soil. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 5, p. 1378-1387, 2015.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 de agosto de 2006.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2. ed. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2012. 500 p.

COSTA, E. R. O.; RIZZI, N. E.; SILVA, H. D.; MAEDA, S.; LAVARONI, O. J. Alterações químicas do solo após aplicação de biossólidos de estações de tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2009.

FERNANDES, F.; LOPES, D. D.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, S. M. C. P. Avaliação das alternativas e gerenciamento de lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 297-315.

FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v. 47, p. 861-876, 2016.

FERRAZ, A. V.; POGGIANI, F. Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 311-320, 2014.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Análise nutricional de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 275-290, 2009.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 1, p. 87-94, 2010.

HAANDEL, A. V.; SOBRINHO, P. A. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos de saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 7-28.

HART, J. B.; NGUYEN, P. V.; URIE, D. H.; BROCKWAY, D. G. Silvicultural use of wastewater sludge. **Journal of Forestry**, 1988.

MACHADO, L. R. D.; TRANNIN, I. C. B. Agricultural potential of an industrial sewage sludge in compliance with CONAMA Resolution no. 275/2006. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 6, p. 4177-4184, 2015.

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal**: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 486 p.

MENDES, L.; TREICHEL, M.; BELING, R. R. **Anuário Brasileiro da Silvicultura 2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 56 p.

MENDES Jr., C. L.; PONTES, F. M. **Manual de implantação de cultivos florestais**: cultura do eucalipto. Curitiba: Instituto de Florestais do Paraná, 2016. 23 p.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos florestais. In: GONÇALVES, J. L.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 385-414.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; PACHECO, A. R.; DITTMAR, H.; CORDEIRO, C. A. **Estratégias para o melhoramento de eucaliptos tropicais na Embrapa**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 29 p.

PARANÁ. Conselho Estadual Do Meio Ambiente (CEMA). Anexo 2 – Diretrizes para Elaboração e Apresentação de Projetos Básicos de Sistemas de Controle de Poluição Ambiental em Empreendimentos/Atividades Industriais. Resolução nº 70 de 01 de outubro de 2009. Curitiba, 2009.

PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA). Anexo 6 – Critérios para utilização agrícola de lodo de ETE. Resolução nº 21 de 22 de abril de 2009. Curitiba, 22 de abril de 2009.

PEREIRA, A. C. A.; GARCIA, M. L. Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 1-8, 2016.

PÉREZ, P. V.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M.; LANG, A.; ZACHOW, K. Efeito de biossólido no crescimento inicial de *Corymbia citriodora*. **Ambiência**, v. 7, n. 1, p. 13-23, 2011.

RIBEIRO, E. P.; MAGALHÃES, J. L.; RODRIGUES, A. A.; RODRIGUES, D. A.; FRAZÃO, M. A.; RODRIGUES, C. L. Análise inicial do super clone de eucalipto adubado com lodo de efluente suíno. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 399-407, 2015.

SANTAROSA, E.; PENTEADO Jr., J. P.; GOULART, I. C. G. R (Eds.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. 138p.

SILVA, J. C.; CASTRO, V. R.; XAVIER, B. A. **Manual prático do fazendeiro florestal: produzindo madeira com qualidade**. 2. ed. Viçosa, 2008. 72 p.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; FERRAZ, A. V.; SIXEL, R. M. M.; BRITO, J. O. Balanço nutricional, produção de óleo essencial e madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson com aplicação de lodo de esgoto e fertilizante mineral. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 821-831, 2012.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; MOREIRA, R. M. Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 79-88, 2008a.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodo de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008b.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J. P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, p. 1-11, 2011.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESB, 2001. p. 133-180.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos**: tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 15-65.

ZANOTTO, D. L.; BELLAVER, C.; CORDEBELLA, A.; SCHEUERMANN, G. N.; CUNHA JR., A.; AJALA, L. C. Flotado de efluentes de frigorífico de suínos e aves - 1. Composição química. **Comunicado Técnico**, v. 440, 2006.

3 CAPÍTULO 1: APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS NO CRESCIMENTO INICIAL DE EUCALIPTO

RESUMO

Lodos de efluentes agroindustriais podem ser excelentes alternativas para melhorar a fertilidade do solo e obter incrementos no crescimento de plantas de eucalipto, porém ainda são escassos os trabalhos utilizando resíduos destas fontes. Em vista disso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais, por meio da avaliação de parâmetros morfológicos de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Foram aplicadas quatro doses de lodos (10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹) de efluentes de um abatedouro de aves e de dois laticínios, bem como um tratamento testemunha, sem fertilização. Durante 100 dias foi realizada periodicamente a avaliação da altura de plantas, diâmetro de coleto, número de folhas e de ramos e índice SPAD, e ao final do experimento foi mensurada a massa de matéria seca das partes aérea e radicular das plantas. Os resultados encontrados demonstram que a aplicação dos lodos foi benéfica, por proporcionar maior crescimento em comparação ao tratamento sem fertilização. Para o lodo de abatedouro de aves, as menores doses foram superiores à testemunha, porém as maiores doses testadas apresentaram efeitos negativos; enquanto que para os lodos de laticínios, melhores resultados foram encontrados com a aplicação das maiores doses. Diante disso, conclui-se que a aplicação dos lodos de efluentes agroindustriais no solo é uma alternativa valiosa e eficaz para a destinação final destes resíduos, por favorecer o crescimento de *Eucalyptus urograndis*, bem como a resolução de um problema ambiental.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Fertilidade do solo. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

Agroindustrial sludge can be an excellent alternative to improve soil fertility and to obtain increases in the eucalyptus plants growth but works using waste from these sources are still scarce. In view of this, the aim of the present work was to quantify the application effects of different agroindustrial effluents sludge doses through the morphological parameters' evaluation of a hybrid from *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Four doses were applied (10, 20, 30 and 40 t ha⁻¹) of a primary poultry slaughterhouse sludge, secondary sludge and tertiary sludge incorporated into the soil and tertiary sludge of dairy in coverage, as well as a control treatment, without fertilization. For 100 days it was evaluated the plant height, the lap diameter, the leaf and branch number and SPAD index and at the end of the experiment were measured dry biomass from plant aerial and root parts. The results showed that the sludge application was beneficial, as it provided greater growth compared to the treatment without fertilization. For poultry slaughterhouse sludge, the lower doses were higher from the control treatment and the higher doses tested had negative effects, while for dairy industry sludges better results were found with the application of higher doses. Therefore, the conclusion is that agroindustrial sludges application on soil is a valuable and effective alternative for the final destination of this waste because it favors the growth of *Eucalyptus urograndis* as well as the resolution of an environmental problem. Keywords: *Eucalyptus urograndis*. Soil fertility. Agroindustrial waste.

3.1 INTRODUÇÃO

A cultura do eucalipto é uma alternativa interessante para a diversificação da produção e renda em propriedades rurais, da qual pode-se obter matéria prima para energia, celulose, serraria e outros (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014). É considerada a cultura florestal mais importante no Brasil, totalizando 5,56 milhões de hectares (MENDES; TREICHEL; BELING, 2016).

Dentre as espécies do gênero, destaque é dado para o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (*E. urograndis*), o mais cultivado no país (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014), por ser uma combinação interespecífica que resulta em árvores altamente vigorosas, resistentes ao cancro, de maior densidade de madeira (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2004) e com múltiplas opções de uso – serraria, celulose e papel, lenha e carvão e outros – bem como, adaptabilidade em quase todo o território nacional (SILVA; CASTRO; XAVIER, 2008).

Para a obtenção de melhor retorno econômico, com adequado desenvolvimento da cultura e maiores incrementos anuais de madeira, é necessária a aplicação de adubação, visto que os solos de plantios florestais apresentam baixa fertilidade natural. Neste sentido, recomenda-se, além de fertilizantes químicos, a utilização de resíduos de origem orgânica, que servem como fonte de nutrientes às plantas e de matéria orgânica aos solos (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014).

Um dos resíduos orgânicos que podem ser utilizados para a fertilização e condicionamento de solos em plantios de eucalipto é o lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) (NOLASCO; GUERRINI; BENEDETTI, 2005), o qual se constitui de suspensões aquosas de sólidos com características orgânicas e inorgânicas, que provém dos efluentes e, em alguns casos, de produtos adicionados (CAVALCANTI, 2012).

Ainda são escassos os trabalhos envolvendo lodos de efluentes industriais ou agroindustriais na agricultura. Contudo, diversos trabalhos com aplicação de lodos de esgotos tem apresentado efeitos positivos no desenvolvimento da cultura do eucalipto, seja no crescimento de mudas com aumentos em altura, diâmetro, número de folhas e de ramos, maior massa de matéria seca de partes aérea e radicular e outros parâmetros (LEILA et al., 2017; RIBEIRO et al., 2015; PÉREZ et al., 2011; GARCIA et

al., 2010); como na melhoria da produção de madeira (ABREU Jr. et al., 2017; FERRAZ; MOMENTEL; POGGIANI, 2016; SILVA et al., 2012; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011; SILVA et al., 2008); na redução do ciclo de cultivo e da necessidade de adubação convencional (ABREU Jr. et al., 2017), podendo os efeitos residuais durar mais de um ciclo de rotação (ASSENHEIMER, 2009).

Em vista disto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o efeito da aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais, por meio da avaliação de parâmetros morfológicos de um híbrido de *E. urograndis*.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização do experimento

O estudo foi conduzido em casa de vegetação, localizada na Área de Cultivo Protegido Prof. Dr. Mario César Lopes do *Campus* de Marechal Cândido Rondon da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

O clima da região é classificado como Cfa, subtropical mesotérmico úmido, com geadas pouco frequentes, verão quente e chuvas mais concentradas, não havendo estação seca definida (CAVIGLIONE et al., 2000). A temperatura média no local do experimento foi de 24,4 °C, com mínima de 12,1 °C e máxima de 38,8 °C; e a umidade relativa do ar média foi de 69,2 %, variando entre 21,3 % e 94,4 %.

3.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais

Os lodos de efluentes foram oriundos de três agroindústrias do ramo alimentício localizadas na Região Oeste do estado do Paraná, cujas características de geração estão apresentadas a seguir.

3.2.2.1 Lodo Primário de Abatedouro de Aves (LPA)

Gerado em flotador físico-químico (Figura 1a), localizado na etapa primária da ETE de um abatedouro de aves.

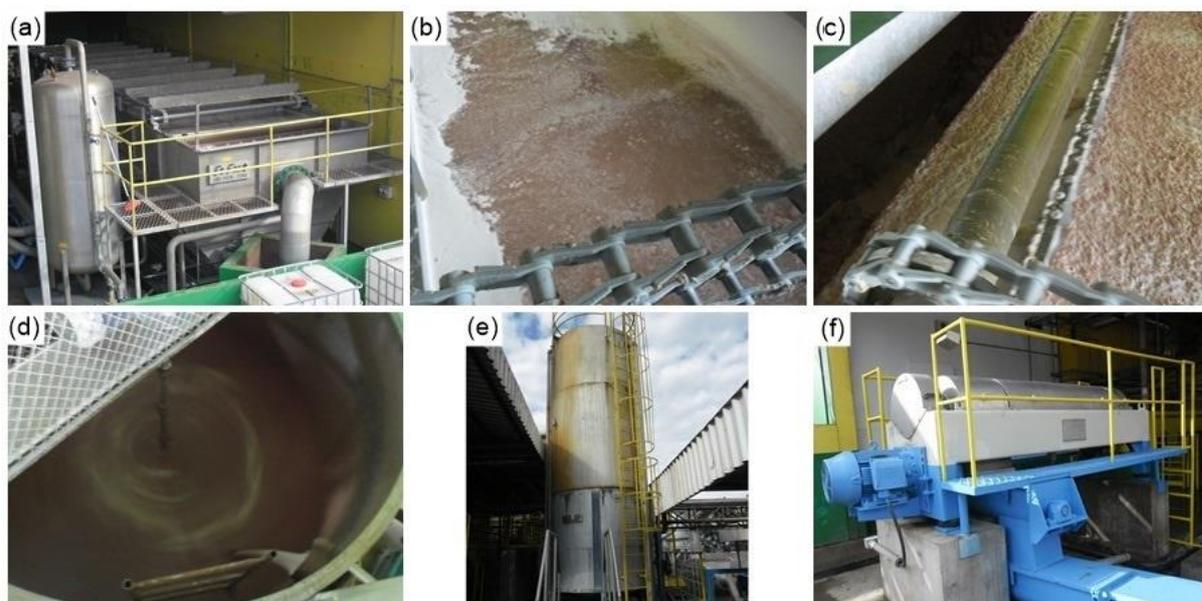


Figura 1 – Geração do lodo primário de abatedouro de aves: (a) flotador físico-químico, (b) flotação de sólidos em suspensão, (c) remoção do material flotado por raspadores automáticos, (d) homogeneização do material em tanque agitador, (e) condicionamento em tanque de aquecimento e (f) separação de fases em tridecanter centrífugo

O processo de flotação de efluentes visa a remoção de sólidos em suspensão e de óleos e graxas contidos no efluente por meio da separação de fases, com a introdução de microbolhas de ar dissolvido na parte inferior do equipamento. Os flóculos em suspensão e os glóbulos de óleo são flotados (carreados) pelas microbolhas até a superfície (Figura 1b), formando um material flotado que é retirado por raspadores automáticos (Figura 1c). No processo são adicionados um coagulante e um floculante, os quais auxiliam na aglomeração de partículas em suspensão e na formação dos flocos maiores, o que facilita a separação de fases e melhora a eficiência do tratamento (CAVALCANTI, 2012).

O material flotado é homogeneizado em tanque com agitador (Figura 1d) e encaminhado para um tanque de aquecimento (Figura 1e) à 95°C-97°C visando seu condicionamento para aumento do tamanho dos sólidos pela agregação de partículas

menores, e conseqüentemente, incremento na eficiência da etapa seguinte: a remoção de umidade (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2014). O desaguamento é realizado por meio do processo de centrifugação em um tridecanter (Figura 1f), que separa o material em 3 fases: sólido ou lodo, efluente e óleo.

Após este processo, o lodo é encaminhado para a destinação final em uma empresa de compostagem, para a qual é pago um valor por quantidade de resíduo e para o transporte. A geração mensal de lodo fica em torno de 360 t, o que gera um custo médio de R\$ 36.000,00 por mês.

3.2.2.2 Lodo Secundário de Laticínio (LSL)

Provém de uma indústria do ramo de laticínios, cujas matérias-primas são soro de leite, creme de leite e creme de soro de leite, utilizadas na fabricação de produtos concentrados como soro de leite em pó, concentrado proteico de soro (*whey protein*), manteiga e creme de leite pasteurizado com alto teor de gordura.

A geração do lodo ocorre na etapa secundária do tratamento de efluentes, mais precisamente, em uma lagoa aerada com sistema de lodos ativados (Figura 2a), a qual é caracterizada pela inserção de ar atmosférico por sopradores e pela presença de bactérias aeróbias. Estas bactérias removem a matéria orgânica dos efluentes e resultam no lodo biológico, que se mantém em constante crescimento em virtude da entrada contínua de matéria orgânica na lagoa. Sendo necessária a remoção constante de sólidos biológicos, na mesma proporção em que estes são gerados, para manter o sistema em equilíbrio (VON SPERLING; GONÇALVES, 2014; CAVALCANTI, 2012).

Após o tratamento na lagoa, os efluentes são encaminhados à quatro decantadores (Figura 2b), onde ocorre a adição de um flocculante orgânico, para a separação das fases, ou seja, a remoção do lodo biológico (CAVALCANTI, 2012). O lodo gerado em três destes decantadores é devolvido à lagoa (recirculação de lodo) e o lodo gerado no quarto equipamento é removido do sistema, para manutenção do equilíbrio na lagoa.

Este lodo excedente é encaminhado para dois tanques adensadores, onde permanece por 6h em média, para a remoção da umidade por meio da gravidade. Em

seguida, o mesmo passa por um condicionamento, neste caso, a adição de um polímero orgânico, que favorece a agregação de partículas sólidas e a formação de flocos, afetando diretamente a etapa seguinte. A última etapa é o desaguamento, que ocorre em um decanter, onde a umidade é removida pela ação de uma força centrífuga (Figura 2c) (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2014).

Após estes processos de remoção da umidade, o lodo é encaminhado para a mesma empresa de compostagem citada anteriormente, sendo gerados, em média, $12,5 \text{ t mês}^{-1}$, cujos custos para a destinação final ficam entre R\$ 2.500 e R\$ 3.000 por mês.



Figura 2 – Geração do lodo secundário de laticínio: (a) lagoa aerada com sistema de lodos ativados, (b) separação de fases em decantador e (c) remoção de umidade em tanques adensadores (a direita) e desaguamento em centrífuga (a esquerda)

3.2.2.3 Lodo Terciário de Laticínio (LTL)

Oriundo de um laticínio, cuja matéria-prima é o leite, utilizado na fabricação de uma infinidade de produtos lácteos: requeijão, leite, achocolatado, creme de leite, leite condensado, doce de leite, manteiga e diversos tipos de queijo.

A geração do lodo ocorre em um flotador físico-químico, situado na etapa terciária da ETE, visando o polimento dos efluentes. O processo é semelhante ao gerador do lodo primário de abatedouro, com a adição de um coagulante orgânico e um floculante catiônico (Figura 3).

Porém, nesta indústria, o material flotado não passa por processos de remoção de umidade ou de condicionamento, e é destinado ao solo em cultivos de pastagem, por meio caminhões específicos para esta finalidade. A geração média é de 930 t mês^{-1} e os custos ficam em torno de R\$ 6.000,00 por mês.



Figura 3 – Geração do lodo terciário de laticínio: (a) flotor físico-químico, (b) remoção do material flotado por raspadores automáticos e (c) saída do efluente tratado, após a remoção do lodo

3.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais

Antes da implantação do experimento, os lodos foram caracterizados quanto ao seu potencial agrônomo, conforme metodologias de Abreu, Andrade e Falcão (2006), Abreu et al. (2009) e Tedesco et al. (1995) e os dados estão apresentados na Tabela 1. Os lodos de efluentes gerados pelas agroindústrias estão apresentados na Figura 4.

Tabela 1 – Caracterização dos três lodos de efluentes de agroindústrias alimentícias

Parâmetro	Umidade	pH	Condutividade elétrica	Sólidos totais (SV)	Sólidos voláteis (ST)	Relação SV/ST			
Unidade	%	-	$\mu\text{S cm}^{-1}$	%	%	-			
LPA	65,32	6,82	139,20	33,88	29,98	0,89			
LSL	85,26	8,21	565,33	13,80	10,04	0,73			
LTL	97,13	7,45	462,67	2,66	1,90	0,71			
Parâmetro	Carbono orgânico	N (NH_4^+)	N (NO_3^- e NO_2^-)	N	P	K	Ca	Mg	
Unidade	g kg^{-1}	mg kg^{-1}		g kg^{-1}					
LPA	248,53	147,52	15,96	60,54	19,51	0,32	14,74	0,50	
LSL	255,26	486,87	39,90	44,94	32,99	4,50	42,06	3,37	
LTL	209,20	146,56	15,99	47,34	21,28	5,87	7,31	1,11	
Parâmetro	Na	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr
Unidade	g kg^{-1}		mg kg^{-1}						
LPA	0,29	4,52	624,77	33,94	20,70	142,32	3,32	12,35	4,94
LSL	3,48	5,68	34.150,19	224,47	20,56	39,48	0,83	22,15	24,62
LTL	35,35	2,37	1.469,11	14,79	15,61	48,49	1,64	6,53	0,00
Limites*			-	-	1.500,00	2.800,00	39,00	300,00	1.000,00

* indica limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/06. LPA: lodo primário de abatedouro de aves; LSL: lodo secundário de laticínio; LTL: lodo terciário de laticínio.

Fonte: os autores, 2018.



Figura 4 – Lodos de efluentes de agroindústrias: (a) lodo primário de abatedouro de aves, (b) lodo secundário de laticínio e (c) lodo terciário de laticínio

3.2.4 Implantação, condução e tratos culturais do experimento

O experimento foi implantado em vasos de 8 L preenchidos com 7 kg de solo peneirados em malha de 5 mm. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico (SANTOS et al., 2018) e seus atributos químicos (LANA et al., 2016) e físicos (TEIXEIRA et al., 2017) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Atributos químicos e físicos do solo utilizado no experimento

pH CaCl ₂	H ⁺ + Al ³⁺	Al ³⁺	MO	N	P	K	Ca	Mg	Na	
-	---- cmol _c dm ⁻³ ----	---- g dm ³ -----	----- mg dm ⁻³ -----	----- cmol _c dm ⁻³ -----						
6,37	2,95	0,00	2,74	4,75	3,05	0,0339	3,08	0,473	0,014	
S	Cu	Zn	Fe	Mn	Cd _{total}	Pb _{total}	Cr _{total}	Argila	Areia	Silte
----- mg dm ⁻³ -----		----- mg kg ⁻¹ -----		----- % -----						
17,73	8,85	0,38	88,8	41,25	3,02	160,55	55,61	83,3	6,5	10,2

Fonte: os autores, 2018.

Os três lodos foram preparados por meio de secagem em estufa de circulação de ar forçado a 65°C até peso constante, moídos em moinho tipo facas e peneirados em malha 2 mm (Figura 5a, b e c). Posteriormente foram incorporados ao solo em todo o volume do vaso, visando acelerar o contato do lodo com o solo e as raízes.

O lodo terciário de laticínio foi aplicado também em cobertura (Figura 5d), com suas características e umidade mantidas desde o momento da coleta. Por se tratar de grandes volumes de lodo com alto teor de umidade aplicados em recipientes pequenos, as doses maiores foram aplicadas de forma parcelada ao longo de cinco dias.

A aplicação dos lodos no solo, seja incorporado ou em cobertura, foi realizada no dia 9 de setembro de 2017, quatorze dias antes do plantio das mudas, sendo realizada irrigação diária neste período, mantendo a umidade do solo adequada, aproximadamente 80% da capacidade de campo.

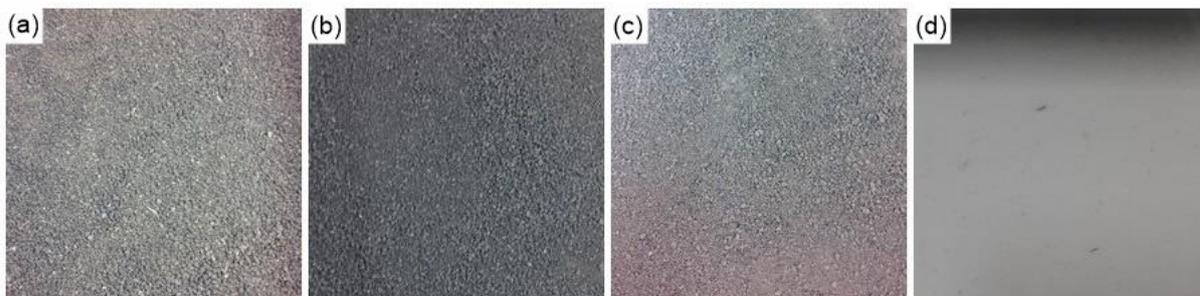


Figura 5 – Lodos aplicados ao solo: (a) lodo primário de abatedouro de aves, (b) lodo secundário de laticínio e (c) lodo terciário de laticínio secos e peneirados para incorporação ao solo e (d) lodo terciário de laticínio com a umidade natural para aplicação em cobertura

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em esquema fatorial (4x4)+1, com quatro repetições; no qual o primeiro fator refere-se aos lodos de efluentes utilizados (lodo primário de abatedouro de aves (LPAI), lodo secundário de laticínio (LSLI) e lodo terciário de laticínio (LTLI), todos incorporados ao solo, e lodo terciário de laticínio em cobertura (LTLC)); o segundo fator é composto pelas quatro doses de cada lodo (10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹ calculadas em base seca); foi implantado também um tratamento adicional constituído pela testemunha, sem a aplicação de lodo de efluente.

As mudas de eucalipto urograndis foram obtidas juntamente à um produtor de mudas cadastrado ao Registro Nacional de Sementes e Mudas (RENASEM) sob o número PR-01319/2006, localizado no município de Ouro Verde do Oeste-PR.

As mesmas foram selecionadas considerando seu diâmetro e altura, visando reduzir os efeitos das variáveis não controladas pelo experimento, e transplantadas para os vasos, adicionando-se uma muda por vaso, totalizando 68 unidades experimentais.

O transplante foi realizado no dia 23 de setembro de 2017 (Figura 6) e o experimento foi conduzido até o dia 02 de janeiro de 2018, totalizando 100 dias (Figura 7).



Figura 6 – Início do experimento após o transplântio das mudas



Figura 7 – Final do experimento, após 100 dias de condução e avaliações

A irrigação foi realizada conforme a necessidade das mudas, mantendo o solo em 80% da capacidade de campo. A partir de 80 dias de condução do experimento, devido à exigência de grandes volumes de água, a irrigação passou a ser realizada por gotejamento, mantendo-se a umidade do solo adequada.

Para o combate de psilídeo (*Diaphorina citri*) foi realizada uma pulverização de Engeo™ Pleno (inseticida sistêmico de contato e ingestão dos grupos químicos neonicotinóide e piretróide) aos 61 dias de condução do experimento, na dosagem de 15 ml de produto em 100 L de água até o completo molhamento das folhas.

3.2.5 Avaliações

Durante o período de cultivo, aos 0, 30, 60, 90 e 100 dias, foram realizadas as seguintes avaliações morfológicas do eucalipto: altura da base até a extremidade

da planta com auxílio de trena; diâmetro do coleto por meio do cálculo da média entre duas medidas perpendiculares realizadas a 2 cm da base com paquímetro digital; número total de folhas e número de ramos (ambas não puderam ser avaliadas aos 90 dias de experimento), com a finalidade de obter os incrementos de cada variável nas parcelas.

A partir de 60 dias foi aferido também, o teor relativo de clorofila foliar, denominado de índice SPAD, por meio de duas medições em três folhas do terço médio da planta, utilizando o medidor portátil 502 Plus da marca Konica Minolta.

Além disso, foi avaliada a massa de matéria seca das partes aérea e radicular, por meio da secagem com circulação de ar forçado a 65°C até peso constante e pesagem em balança de precisão ao final do experimento.

3.2.6 Análise estatística

Foram realizados testes de normalidade, bem como análise de variância no programa estatístico SAS University Edition (SAS INSTITUTE INC, 2014). Foram retirados valores inconsistentes de forma que houve redução no valor do grau de liberdade do resíduo. Para os parâmetros avaliados ao longo do período experimental, o delineamento fatorial com adicional foi subdividido no tempo. Quando significativo, foi realizada análise da superfície de resposta para a interação “dose x tempo”; análise de regressão para a interação “lodo x dose” e para “dose” e teste de Dunnett para o “fatorial vs adicional”.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância mostraram que, quando avaliadas ao longo do tempo, as variáveis apresentaram significância entre tempo e lodo, com exceção do índice SPAD. Enquanto que a interação entre tempo e dose foi significativa apenas para altura de plantas e número de folhas; a interação entre tempo, lodo e dose não apresentou efeito significativo para nenhuma variável (Tabela 3). Houve interação significativa entre lodo e dose para todas as variáveis, com exceção do número de ramos (Tabelas 3 e 4); e o contraste do fatorial com o tratamento adicional foi significativo para todas as variáveis avaliadas.

Tabela 3 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias do desenvolvimento inicial de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais ao longo do período experimental

Fonte de variação	--- Altura de plantas ---		--- Diâmetro de coletor ---		--- Número de folhas ---		-- Número de ramos --		--- Índice SPAD ---	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	1.359	3	0,58	3	4.662	3	23,16	3	4,97
Lodo	3	708	3	9,30 **	3	10.047 *	3	8,11	3	380,30 **
Dose	3	3.672 **	3	17,04 **	3	76.745 **	3	50,52 **	3	78,67 *
Lodo x Dose	9	1.231 *	9	8,30 **	9	10.452 **	9	6,76	9	41,45 *
Erro 1	48	509	48	1,94	48	2.636	49	8,70	49	19,32
Tempo	3	167.168 **	3	1.056,69 **	2	1.941.897 **	2	3.732,78 **	2	3.017,99 **
Tempo x Lodo	9	1.018 **	9	8,31 **	6	44.914 **	6	18,75 **	6	7,57
Tempo x Dose	9	684 *	9	2,03	6	12.711 **	6	12,08	6	10,36
Tempo x Lodo x Dose	27	251	27	1,60	18	4.575	18	2,50	18	7,76
Fatorial vs Adicional	3	56.397 **	3	300,75 **	2	774.280 **	2	1.041,65 **	2	2.112,06 **
Erro 2	149	323	148	1,41	88	3.218	101	6,01	97	16,82
CV 1 (%)		24,16		15,87		25,30		13,9		8,9
CV 2 (%)		19,35		24,16		24,20		9,20		7,08
Média		64,02		6,43		175,22		14,55		37,52

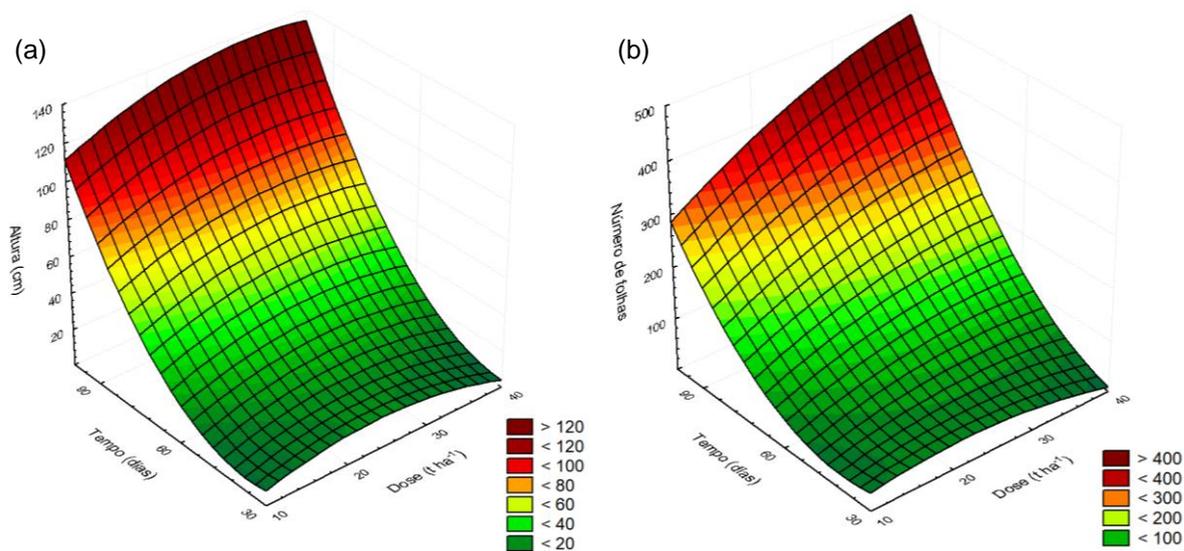
** Significativo a 1% de probabilidade de erro; * Significativo a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 4 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias das massas de matéria seca de partes aérea e radicular de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais aos 100 dias

FV	Massa de matéria seca aérea		Massa de matéria seca radicular	
	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	92	3	463 *
Lodo	3	1.678 **	3	1.774 **
Dose	3	12.146 **	3	1.157 **
Lodo x Dose	9	2.665 **	9	684 **
Fatorial vs Adicional	1	25.355 **	1	5.365 **
Resíduo	47	151	46	127
CV (%)		12,07		21,02
Média		104,04		53,67

** Significativo a 1% de probabilidade de erro; * Significativo a 5% de probabilidade de erro.

Quanto à interação “tempo x dose” (Figura 8), significativa para os incrementos em altura e número de folhas, é interessante destacar que ao longo do tempo houve alteração das doses de máxima resposta: inicialmente resultados superiores foram obtidos para doses de lodo entre 20 e 30 t ha⁻¹, mas durante o experimento a dose de 40 t ha⁻¹ passou a demonstrar os melhores resultados.



Altura: $\hat{y} = 27,8869 + 1,8312x - 2,0199y - 0,0473x^2 + 0,0130xy + 0,0259y^2$ ($R^2=0,97$)
 Número de folhas: $\hat{y} = 142,6876 + 1,5680x - 6,9921y - 0,1166x^2 + 0,1111xy + 0,0728y^2$ ($R^2=0,97$)

Figura 8 – Incrementos em altura de plantas (a) e número de folhas (b) em função do tempo para as quatro doses de lodos de efluentes testados

Os incrementos em altura de plantas, diâmetro de coleto e número de folhas e de ramos em função das doses avaliadas nos diferentes tempos estão representados graficamente na Figura 9. Verificou-se que a altura de plantas apresentou incrementos a partir de 60 dias para todos os lodos; e as demais variáveis citadas mostraram incrementos lineares em função do tempo. Resultados estes que podem ser explicados devido às plantas estarem em sua fase inicial de crescimento.

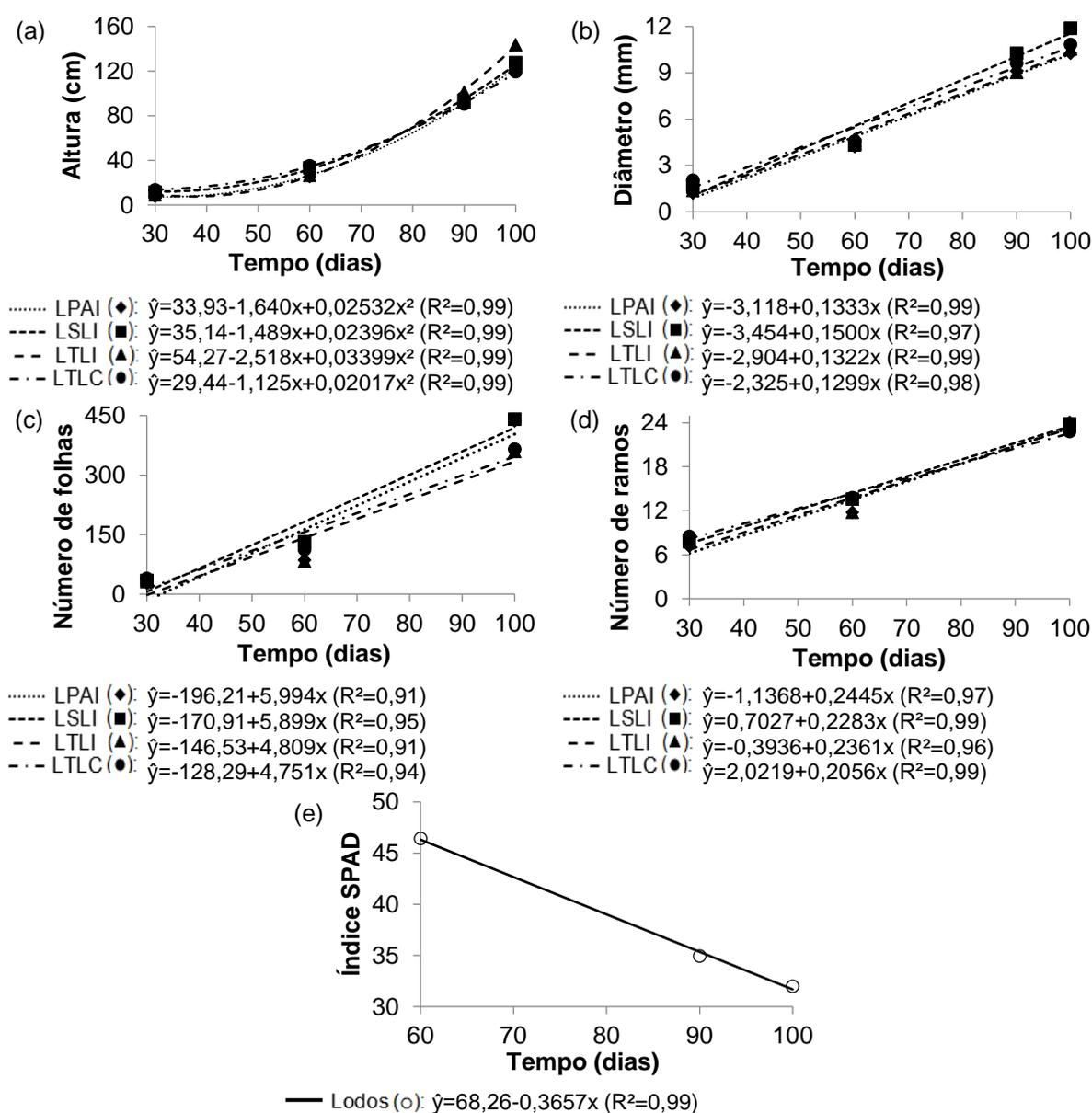


Figura 9 – Incrementos acumulados de altura de plantas, diâmetro de coleto, número de folhas e de ramos em função do tempo para os quatro lodos de efluentes testados, e índice SPAD em função do tempo. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Enquanto isto, o índice SPAD apresentou redução gradual ao longo do tempo (Figura 9e), o que pode estar diretamente relacionado com a atividade fotossintética das plantas e ter sido influenciado por diversos fatores bióticos e abióticos (TAIZ et al., 2017); além disso, pode ser resultado, de um efeito de diluição da clorofila foliar à medida que as plantas cresceram.

Na Figura 10 estão apresentados os incrementos acumulados de altura de plantas, diâmetro de coleto, número de folhas, índice SPAD e, na Figura 11, para as massas de matéria seca de partes aérea e radicular, em função das doses dos quatro lodos de efluentes agroindustriais.

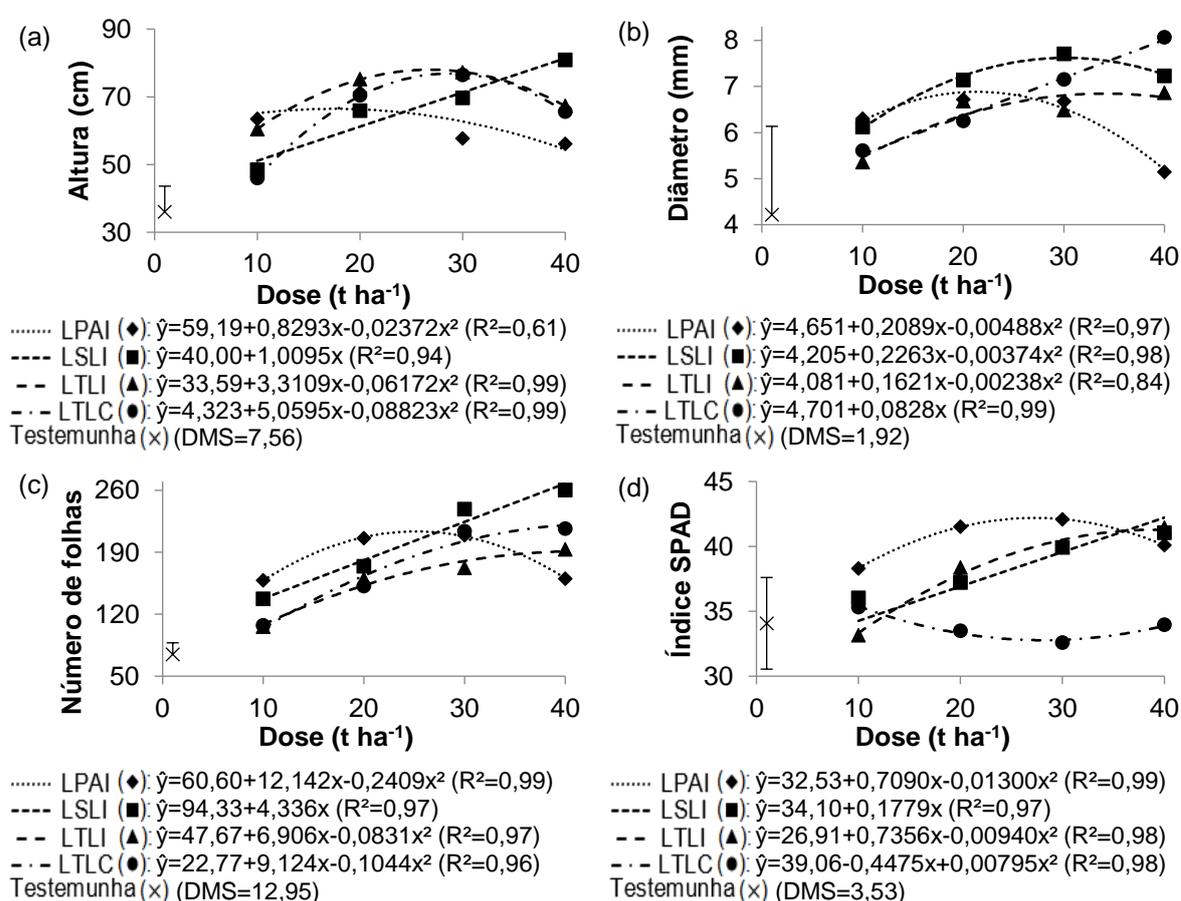


Figura 10 – Incrementos acumulados de altura de plantas, diâmetro de coleto e número de folhas e índice SPAD em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

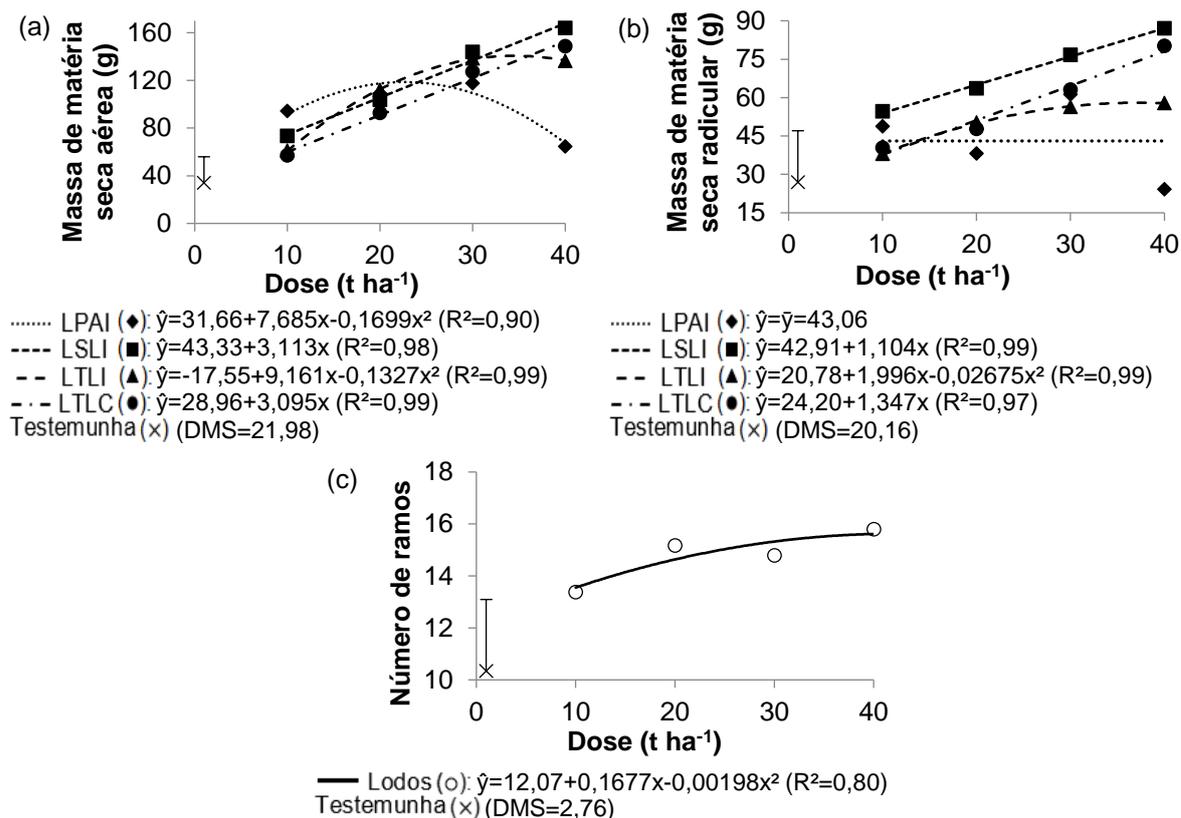


Figura 11 – Massa de matéria seca das partes aérea e radicular em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados aos 100 dias, número de ramos em função das doses e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Nas plantas cultivadas com LPAI foram observados resultados máximos para as variáveis avaliadas entre as doses de 17 e 27 t ha⁻¹. Além disso, verificou-se que as plantas adubadas com LPAI apresentaram resultados bastante inferiores aos demais lodos em altura e massa de matéria seca de parte aérea.

Ao estudar o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* à campo em São Paulo, Silva et al. (2008) também observaram que as melhores respostas em altura e volume de madeira não ocorreram com as maiores doses de lodo de esgoto aplicadas (20 e 30 t ha⁻¹) e sim com a dose de 10 t ha⁻¹, e associaram o resultado à limitação de K, o qual havia sido adicionado na mesma quantidade em todos os tratamentos, pois o resíduo possuía baixos teores do nutriente (2,7 g kg⁻¹). Além disso, observaram que quando aplicado o lodo sem complementação, os resultados foram ainda inferiores, indicando que a adição de K era necessária para viabilizar o uso do lodo como

fertilizante. O mesmo pode ter ocorrido no presente estudo para os tratamentos com LPAI, que apresentou em sua constituição teores ainda inferiores de K ($0,32 \text{ g kg}^{-1}$) e não teve complementação de adubação potássica.

Além disso, nas maiores doses de LPAI foram observados efeitos negativos sobre as plantas (Figura 12), caracterizados pelo avermelhamento das folhas, das bordas e direção ao centro, com posterior secamento das pontas das folhas; bem como pontuações escuras ao longo do limbo foliar, tornando-se necróticas posteriormente, os quais estão associados à deficiência de K, conforme Silveira et al. (2001). Intensa queda de folhas também foi verificada. Este lodo possui também, altos teores de N ($60,54 \text{ g kg}^{-1}$), nutriente que proporcionou maior resposta em incrementos de matéria seca, de forma que o K passa a ser ainda mais limitante em função do desequilíbrio nutricional.



Figura 12 – Sintomas observados nos tratamentos com aplicação do LPAI, nas doses de 20, 30 e 40 t ha^{-1} , aos 100 dias após o transplântio

Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) explicam que os desequilíbrios nutricionais podem impedir respostas adequadas das árvores à fertilização com lodo de esgoto, tornando interessante o estudo da combinação com outras fontes de nutrientes, com vistas a alcançar um equilíbrio nutricional e maiores produtividades em povoamentos florestais.

Com a aplicação de LSLI, foi encontrado ponto de máximo para o diâmetro de coleto na dose de 30 t ha⁻¹; enquanto que os demais parâmetros apresentaram incrementos nas doses testadas, com comportamento quadrático para altura de plantas e linear para número de folhas, índice SPAD e massas de matéria seca aérea e radicular. Importante ressaltar também, que o LSLI apresentou pontos de máxima resposta superiores aos demais lodos para a maioria dos parâmetros (Figura 10).

Quando aplicado o LTLI foram observadas respostas quadráticas, com máxima altura na dose de 27 t ha⁻¹ e para os demais parâmetros melhores resultados entre 35 e 40 t ha⁻¹. Enquanto que o mesmo lodo aplicado em cobertura (LTLC) apresentou ponto de máxima altura com 29 t ha⁻¹, efeito quadrático crescente para número de folhas e lineares para diâmetro e massas de matéria seca aérea e radicular.

Quanto ao índice SPAD, observa-se na Figura 10d, grande diferença de comportamento do LTLC, o qual apresentou redução do índice SPAD com o aumento das doses, e resultados bastante inferiores aos demais lodos. Madeira et al. (2009) observaram correlação positiva entre os valores de SPAD e os teores foliares de N em plantações jovens de eucalipto. Dados ainda não publicados quanto à avaliação nutricional das plantas de eucalipto do presente estudo indicam que os teores foliares de N total variaram de 1,12 a 1,60 g kg⁻¹ para LTLI e de 0,99 a 1,07 g kg⁻¹ para LTLC; isto pode ser explicado pela forma de aplicação do LTLC, único lodo aplicado em cobertura, o que pode ter influenciado na disponibilidade do nutriente às plantas e nos teores de clorofila.

Quanto ao diâmetro de coleto, número de folhas e massa de matéria seca radicular valores inferiores foram observados no tratamento LTLI, os quais podem estar associados à maior exposição do sistema radicular do eucalipto à altos teores de sódio (Tabela 1), reduzindo o crescimento radicular e, por consequência, os incrementos na parte aérea. Resultados semelhantes foram obtidos por Mendonça et al. (2010), os quais estudaram os efeitos de doses de cloreto de sódio em 3 espécies de eucalipto e observaram uma redução do crescimento da biomassa seca foliar, o que está associado às estratégias de resistência das plantas ao estresse salino.

Conforme Taiz et al. (2017), alguns dos efeitos da salinidade são a inibição no crescimento da parte aérea e, devido ao fechamento estomático, a inibição da fotossíntese e de processos biossintéticos. Além disso, em concentrações elevadas

de Na, há uma competição por sítios de transporte nas proteínas transportadoras que são fundamentais à absorção de K, reduzindo a absorção do nutriente essencial. Broadley et al. (2012) complementam que a maioria das espécies agrícolas importantes tem baixa tolerância ao Na e possuem um mecanismo de exclusão do elemento nas raízes, o qual bloqueia seu transporte para os ramos e reduz o crescimento da planta. Isto porque possuem uma exigência absoluta de K na maioria de suas funções metabólicas.

Por outro lado, a aplicação do lodo terciário em cobertura resultou em menor contato das raízes com os altos teores de sódio do lodo, de forma a favorecer o crescimento, gerando maiores incrementos em matéria seca de raízes, número de folhas e diâmetro de coleto durante o período experimental.

Para os incrementos no número de ramos, houve significância do fator dose, demonstrado por resposta quadrática (Figura 11c), onde houve aumento gradual do número em função das doses, chegando próximo ao ponto de máxima resposta na dose de 40 t ha⁻¹, assim como ocorreu para a maioria dos demais parâmetros nos lodos LSLI, LTLI e LTLC.

A interação significativa entre o “fatorial vs adicional” para todas as variáveis, evidencia elevadas diferenças entre a testemunha e os demais tratamentos. O teste de Dunnett demonstrou que para altura, diâmetro de coleto, número de folhas e de ramos (na média dos tempos), e massas de matéria seca aérea e radicular (Figuras 10 e 11), a testemunha foi significativamente inferior, principalmente nas maiores doses dos lodos LSLI, LTLI e LTLC. Diferenças ainda superiores foram observadas nos resultados encontrados no último período de avaliação (100 dias) para altura, diâmetro e número de folhas e de ramos, onde todas as doses dos quatro lodos testados foram significativamente superiores à testemunha pelo teste de médias.

Assim como no presente estudo, pesquisa realizada por Leila et al. (2017), indicou aumentos graduais para altura, diâmetro e número de folhas em *Eucalyptus camaldulensis* em função das doses de lodo, com maiores respostas na maior proporção de lodo/solo testada (60% de lodo) e menores resultados na testemunha. Para os autores, isto indica a boa qualidade da adubação e a melhoria do solo, devido à adição de nutrientes e matéria orgânica; por este motivo, consideram o uso agrícola de lodos de esgoto uma boa alternativa para estes tipos de resíduo.

Outros estudos indicaram que a aplicação de lodos em comparação à testemunha proporcionou aumentos em altura de plantas, diâmetro de caule, massas de matéria verde e seca de mudas de *Eucalyptus urograndis* (RIBEIRO et al., 2015); e incrementos no volume de madeira na ordem de 2 a 3 vezes em *Eucalyptus grandis* (ABREU JR. et al., 2017; FERRAZ; MOMENTEL; POGGIANI, 2016; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011). Além disso, estes autores indicaram, que a aplicação de lodo de esgoto se assemelhou à aplicação de fertilizantes minerais, sendo por isto, uma alternativa eficaz para a disposição final destes resíduos, bem como para a adubação de plantios de eucalipto.

Silva, Poggiani e Laclau (2011) complementam que a mineralização do lodo gerou uma liberação suficientemente rápida de nutrientes para atender às exigências do estabelecimento das plantas de eucalipto nos primeiros anos, sendo as quantidades de nutrientes superiores aos requisitos para a cultura. Além disso, Abreu Jr. et al. (2017) mencionam que a aplicação de lodo pode aumentar o retorno econômico de florestas plantadas, favorecendo, inclusive a redução do ciclo de rotação.

Diante disso, vale ressaltar que a aplicação dos lodos de efluentes agroindustriais no solo é uma alternativa valiosa e eficaz para a destinação final destes resíduos, por favorecer o crescimento de *Eucalyptus urograndis*, bem como a resolução de um problema ambiental. Estudos complementares relacionados à nutrição das mudas e à fertilidade do solo podem auxiliar no entendimento dos resultados encontrados e também são importantes para avaliação dos efeitos do uso agrícola dos lodos de efluentes agroindustriais.

3.4 CONCLUSÕES

A aplicação de lodos de efluentes agroindustriais foi benéfica no desenvolvimento inicial da cultura de *Eucalyptus urograndis*, proporcionando maior crescimento em altura de plantas, diâmetro de coleto, número de folhas e de ramos, bem como maior produção de massas de matéria seca aérea e radicular em comparação ao tratamento sem fertilização.

O lodo primário de abatedouro de aves proporcionou incrementos nas variáveis morfológicas com doses entre 17 e 27 t ha⁻¹ e efeitos negativos em doses

superiores. Enquanto que os lodos secundário e terciário de laticínios (seja incorporado ou em cobertura) apresentaram resultados superiores para a maioria dos parâmetros nas maiores doses testadas, entre 30 e 40 t ha⁻¹.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. F.; ABREU JR., C. H.; SILVA, F. C.; SANTOS, G. C. G.; ANDRANDE, J. C.; GOMES, T. F.; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, C. A. Análise química de fertilizantes orgânicos (urbanos). In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009, p. 399-485.

ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C.; FALCÃO, A. A. Protocolos de análises químicas. In: ANDRADE, J.C.; ABREU, M. F. (Eds.). **Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agroambientais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2006. p. 121-158.

ABREU JR., C. H.; FIRME, L. P.; MALDONADO, C. A. B.; MORAES NETO, S. P.; ALVES, M. C.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; GAVA, J. L.; HE, Z.; NOGUEIRA, T. A. R.; CAPRA, G. F. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in *Eucalyptus* plantations. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 51-58, 2017.

ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Ambiência**, Guarapuava, v. 5, n. 2, p. 321-330, 2009.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 167, p. 141-146, 30 de agosto de 2006.

BROADLEY, M.; BROWN, P. CAKMAK, I.; MA, J. F.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Beneficial elements. In: MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. 2. ed. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2012. 500 p.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, [s.l.], v. 47, p. 861-876, 2016.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Crescimento de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de biossólidos. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 1, p. 87-94, 2010.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 157-258.

LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R.; RICHARDT, A.; FONTANIVA, S. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. 2. ed. Cascavel: EDUNIOESTE, 2016. 155 p.

LEILA, S.; MHAMED, M.; HERMANN, H.; MYKOLA, K.; OLIVER, W.; CHRISTIN, M.; ELENA, O.; NADIA, B. Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. **Biotechnology Reports**, v. 13, p. 8-12, 2017.

MADEIRA, A. C.; MADEIRA, M.; FABIÃO, A.; MARQUES, P.; CARNEIRO, M. Avaliação da nutrição de plantações jovens de eucalipto por análise foliar e métodos não destrutivos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 139-153, 2009.

MENDES, L.; TREICHEL, M.; BELING, R. R. **Anuário Brasileiro da Silvicultura 2016**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2016. 56 p.

MENDONÇA, A. V. R.; CARNEIRO, J. G. A.; FREITAS, T. A. S.; BARROSO, D. G. Características fisiológicas de mudas de *Eucalyptus* spp. submetidas a estresse salino. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 255-267, 2010.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fontes de nutrientes e condicionadores de solos florestais. In: GONÇALVES, J. L.; BENEDETTI, V. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 385-414.

PALUDZYSZYN FILHO, E.; PACHECO, A. R.; DITTMAR, H.; CORDEIRO, C. A. **Estratégias para o melhoramento de eucaliptos tropicais na Embrapa**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 29 p.

PÉREZ, P. V.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M.; LANG, A.; ZACHOW, K. Efeito de biossólido no crescimento inicial de *Corymbia citriodora*. **Ambiência**, v. 7, n. 1, p. 13-23, 2011.

RIBEIRO, E. P.; MAGALHÃES, J. L.; RODRIGUES, A. A.; RODRIGUES, D. A.; FRAZÃO, M. A.; RODRIGUES, C. L. Análise inicial do super clone de eucalipto adubado com lodo de efluente suíno. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 399-407, 2015.

SANTAROSA, E.; PENTEADO Jr., J. P.; GOULART, I. C. G. R (Eds.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. 138p.

SANTOS, H. G. JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SAS INSTITUTE INC. SAS University Edition: installation guide for Windows Cary: SAS Institute. Version 9.4. Cary, 2014.

SILVA, J. C.; CASTRO, V. R.; XAVIER, B. A. **Manual prático do fazendeiro florestal: produzindo madeira com qualidade**. 2. ed. Viçosa, 2008. 72 p.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; FERRAZ, A. V.; SIXEL, R. M. M.; BRITO, J. O. Balanço nutricional, produção de óleo essencial e madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson com aplicação de lodo de esgoto e fertilizante mineral. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 821-831, 2012.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; MOREIRA, R. M. Crescimento de *Eucalyptus grandis* tratado com diferentes doses de lodos de esgoto úmido e seco, condicionados com polímeros. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 79-88, 2008.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J. P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, [s.l.], v. 2011, p. 1-11, 2011.

SILVEIRA, R., L. V. A.; HIGASHI, E. N.; SGARBI, F.; MUNIZ, M. R. A. Seja o doutor do seu eucalipto. **Informações agronômicas**, n. 93, p. 1-32, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 574 p.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 15-65.

4 CAPÍTULO 2: TEORES FOLIARES DE NUTRIENTES EM PLANTAS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS

RESUMO

Lodos de efluentes agroindustriais podem promover incrementos nos teores de nutrientes essenciais, além de melhoria do crescimento das culturas. O objetivo do presente trabalho foi avaliar os teores foliares de macro e micronutrientes em um híbrido de *E. urograndis* após a aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais. Foram aplicadas quatro doses (10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹) de um lodo primário de abatedouro de aves (LPAI), lodo secundário de laticínio (LSLI) e lodo terciário de laticínio (LTLI) incorporados ao solo e do lodo terciário de laticínio em cobertura (LTLC), bem como uma testemunha, sem fertilização. Após 100 dias de condução do experimento, foi determinada a massa de matéria seca de parte aérea, bem como os teores de macro e micronutrientes nos tecidos foliares. Os resultados indicaram que os lodos de efluentes agroindustriais influenciaram os teores foliares de nutrientes na cultura. A aplicação de LPAI resultou em deficiência nutricional de K, queda de folhas, menor massa de matéria seca e altos teores de macro e micronutrientes. Enquanto que, os lodos secundário e terciário de laticínios apresentaram resultados satisfatórios quanto aos teores foliares de referência, superando a testemunha. O LSLI proporcionou maiores teores de P e Ca, além de altos teores de N e S nas maiores doses e o LTLI proporcionou maiores teores para todos os elementos, com exceção do P, em comparação ao LTLC.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Fertilidade do solo. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

Agroindustrial effluent sludges can promote increases in essential nutrient contents, as well as the improvement of crop growth. The aim of the present work was to evaluate macro and micronutrient foliar contents in a *E. urograndis* hybrid after application of different doses of agroindustrial effluent sludge. Four doses were applied (10, 20, 30 and 40 t ha⁻¹) of a primary poultry slaughterhouse sludge (LPAI), secondary sludge (LSLI) and tertiary sludge (LTLI) incorporated into the soil and tertiary sludge of dairy in coverage (LTLC), as well as a control treatment, without fertilization. After 100 days of conduction of the experiment, the aerial part dry matter mass was determined, as well as macro and micronutrient contents in leaf tissues. The results indicated that agroindustrial effluent sludges influenced foliar nutrient contents in the crop. The LPAI application resulted in nutritional deficiency of K, leaf fall, lower dry matter mass and high levels of macro and micronutrients. While the secondary and tertiary sludge of dairy presented satisfactory results regarding reference leaf contents, surpassing the control. The LSLI provided higher levels of P and Ca, as well as high levels of N and S in the highest doses and the LTLI provided higher levels for all elements except P, in comparison to LTLC.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Soil fertility. Agroindustrial waste.

4.1 INTRODUÇÃO

As plantas obtêm do solo nutrientes essenciais, cuja função é atender à numerosas funções biológicas em diferentes estruturas vegetais, fazendo com que a produtividade agrícola seja dependente da fertilização (TAIZ et al., 2017).

Os solos utilizados para plantios florestais geralmente possuem baixa fertilidade natural, tornando a adubação uma prática necessária para a obtenção de boa produtividade. Recomenda-se o uso de resíduos de origem orgânica, além de fertilizantes convencionais (SANTAROSA; PENTEADO Jr.; GOULART, 2014).

Em vários países, lodos de esgoto vem sendo utilizados (FERRAZ; POGGIANI, 2014), como forma de fertilização e condicionamento do solo, exercendo importantes efeitos nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como no crescimento vegetal (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2014).

Diversos autores vêm obtendo resultados promissores com a aplicação do lodo na cultura do eucalipto, com aumentos nos teores de nutrientes essenciais e melhoria no crescimento da cultura (FERRAZ; POGGIANI, 2014; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011; GARCIA et al., 2009); aumentos na produção de serrapilheira e na transferência de nutrientes entre os outros componentes do ecossistema (SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011); bem como a possibilidade de substituição e redução da adubação mineral (SILVA et al., 2008; SILVA; POGGIANI; LACLAU, 2011).

As características dos lodos podem variar em função da tipologia do efluente, do grau de tratamento da estação e do processo gerador do lodo (TSUTIYA, 2001), possibilitando a ocorrência de desequilíbrios nutricionais, como observado por Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) e Bertolazi et al. (2016), o que impediu a obtenção de respostas adequadas em *E. grandis* e *E. urograndis*, respectivamente.

Portanto, torna-se necessário o estudo da composição dos lodos aplicados e dos seus efeitos sobre a cultura do eucalipto, visando identificar se há necessidade de complementação nutricional. Além disso, é importante salientar que são escassos os trabalhos envolvendo lodos de efluentes industriais ou agroindustriais na agricultura.

Assim sendo, o objetivo do presente estudo se constituiu da avaliação dos teores foliares de macro e micronutrientes em um híbrido de *E. urograndis*, após aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização do experimento

A localização do experimento está apresentada no item 3.2.1 do Capítulo 1 (p. 12).

4.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais

As informações sobre a geração dos lodos estão apresentadas no item 3.2.2 do Capítulo 1 (p. 12).

4.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais

A caracterização dos lodos está apresentada no item 3.2.3 do Capítulo 1 (p. 16).

4.2.4 Implantação, condução e tratamentos culturais do experimento

A descrição da implantação, condução e tratamentos culturais do experimento está apresentada no item 3.2.4 do Capítulo 1 (p. 17).

4.2.5 Avaliações

Ao final dos 100 dias de condução do experimento, coletou-se a parte aérea das plantas, para a determinação da massa de matéria seca de parte aérea, por meio da secagem com circulação de ar forçado a 65°C até peso constante e pesagem em balança de precisão.

Posteriormente, as folhas foram separadas do caule para a avaliação do estado nutricional da planta, visto que as mesmas respondem melhor às variações no suprimento de nutrientes, conforme descrito por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). As folhas foram moídas em moinho tipo Willye, peneiradas (em malha de 1 mm ou 20

mesh) e submetidas à digestão sulfúrica para a determinação de N por destilação e titulação e, à digestão nítrico-perclórica para a determinação dos teores de P por colorimetria em espectrofotômetro, de K e Na em fotômetro de chama, S por turbidimetria em espectrofotômetro, e de Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn, Cd, Pb e Cr por espectrometria de absorção atômica (LANA et al., 2016).

Os teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn foram comparados com teores de referência para a interpretação de resultados de análise foliar para as espécies de eucalipto mais plantadas no Paraná (SBCS/NEPAR, 2017) e no Brasil (GONÇALVES, 2010), apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Teores de referência para interpretação de resultados de análise foliar de espécies de eucalipto

N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Fe	Mn
----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----				
SBCS/NEPAR (2017)									
13-18	0,9-1,3	9-13	6-10	3,5-5,0	1,5-2,0	7-10	35-50	150-200	400-600
Gonçalves (2010)									
21-30	1,0-1,3	5,5-8,5	3,5-6,0	2,0-3,0	0,5-1,5	7-10	10-18	70-200	100-800

Fonte: SBCS/NEPAR (2017) e Gonçalves (2010).

4.2.6 Análise estatística

Foram realizados testes de normalidade, bem como análise de variância no programa estatístico SAS University Edition (SAS INSTITUTE INC, 2014). Foram retirados valores inconsistentes de forma que houve redução no valor do grau de liberdade do resíduo. Quando significativo, foi realizada análise de regressão para a interação entre lodo e dose e para o fator dose, teste de Tukey para o fator lodo e teste de Dunnett para a comparação entre o fatorial e o tratamento adicional.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação significativa entre lodo e dose para N, P, Ca, Mg, S, Na, Zn, Mn e massa de matéria seca aérea. Para K, houve efeito de lodo e de dose; e para Cu e Fe houve efeito de lodo. Enquanto que o contraste do fatorial com a testemunha foi significativo para todas as variáveis avaliadas (Tabela 6).

Tabela 6 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos teores foliares de macro e micronutrientes, bem como da massa de matéria seca aérea de plantas de eucalipto, em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais aos 100 dias

FV	N		P		K		Ca	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	0,0295	3	0,0221	3	1,493 **	3	2,344
Lodo	3	2,3291 **	3	1,9891 **	3	27,837 **	3	31,972 **
Dose	3	0,6241 **	3	0,7096 **	3	2,726 **	3	34,049 **
Lodo x Dose	9	0,1161 **	9	0,0966 **	9	0,283	9	7,879 **
Fatorial vs Adicional	1	0,9092 **	1	0,8323 **	1	3,637 **	1	9,976 *
Resíduo	48	0,0124	47	0,0256	45	0,226	47	2,346
CV (%)		8,36		16,8		11,34		8,56
Média		13,30		1,30		4,19		17,88
FV	Mg		S		Na		Cu	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	0,0980	3	0,0616 **	3	3,269 **	3	33,46 **
Lodo	3	1,0551 **	3	1,3154 **	3	26,816 **	3	410,93 **
Dose	3	0,4144 **	3	0,3278 **	3	2,654 **	3	2,50
Lodo x Dose	9	0,1637 **	9	0,0848 **	9	2,452 **	9	7,91
Fatorial vs Adicional	1	0,7723 **	1	0,5800 **	1	30,829 **	1	123,01 **
Resíduo	47	0,0352	48	0,0095	41	0,397	41	4,95
CV (%)		6,35		7,61		9,56		25,98
Média		2,99		1,28		6,22		8,46
FV	Zn		Fe		Mn		Massa de matéria seca aérea	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	35,5 *	3	1.136	3	66.272	3	92
Lodo	3	1.133,0 **	3	10.967 **	3	8.913.752 **	3	1.678 **
Dose	3	17,2	3	2.953	3	558.339 **	3	12.146 **
Lodo x Dose	9	47,3 **	9	1.662	9	438.176 **	9	2.665 **
Fatorial vs Adicional	1	554,7 **	1	7.945 *	1	566.675 **	1	25.355 **
Resíduo	47	10,0	41	1.102	47	38.345	47	151
CV (%)		11,13		16,80		15,85		12,07
Média		29,01		186,50		1235,48		104,04

** Significativo a 1% de probabilidade de erro; * Significativo a 5% de probabilidade de erro.

As diferenças estatisticamente significativas entre os lodos para os teores foliares de K, Cu e Fe estão demonstradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores médios dos teores foliares de K, Cu e Fe de plantas de eucalipto em função da aplicação de quatro lodos de efluentes agroindustriais

Lodos	K (g kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)
LPAI	2,38 c	16,63 a	224,34 a
LSLI	4,30 b	4,95 c	162,29 b
LTLI	5,00 a	9,17 b	190,56 b
LTLC	5,42 a	5,55 c	173,65 b

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

No caso do K (Tabela 7), o LPAI proporcionou os menores teores foliares enquanto que o LTL (incorporado e em cobertura) mostrou os maiores valores; o que está diretamente relacionado aos teores do elemento presentes nos resíduos aplicados (Tabela 1). Em comparação com os teores adequados (SBCS/NEPAR, 2017; GONÇALVES, 2010), observou-se que todos os lodos, bem como a testemunha, apresentaram resultados inferiores, porém a aplicação de LPAI se mostrou mais discrepante, o que indica, segundo Gonçalves (2010) um maior grau potencial de deficiência.

Para Fe e Cu foram observados teores superiores com a aplicação de LPAI (Tabela 7). Resultados semelhantes para o lodo foram observados na interação entre lodo e dose (Figuras 13 e 14), havendo incremento dos teores de N, P, S, Zn e Mn em função das doses, sendo os teores superiores aos encontrados para os tratamentos com os demais lodos. Foram observados também, teores extremamente elevados de Na, apesar das baixas concentrações do elemento no lodo em questão; bem como resultados superiores à testemunha pelo teste de Dunnett para todos os parâmetros citados. Além disso, houve redução dos teores de Ca e para o Mg não foram observadas diferenças com o aumento das doses.

Comparando os resultados de LPAI com os valores de referência descritos pela SBCS/NEPAR (2017), observou-se que os teores de N, P, Ca, Cu, Fe e Mn encontram-se acima dos níveis considerados adequados e para Gonçalves (2010) foram superiores os teores de P, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn; enquanto que os demais elementos não citados se encontraram abaixo dos níveis indicados.

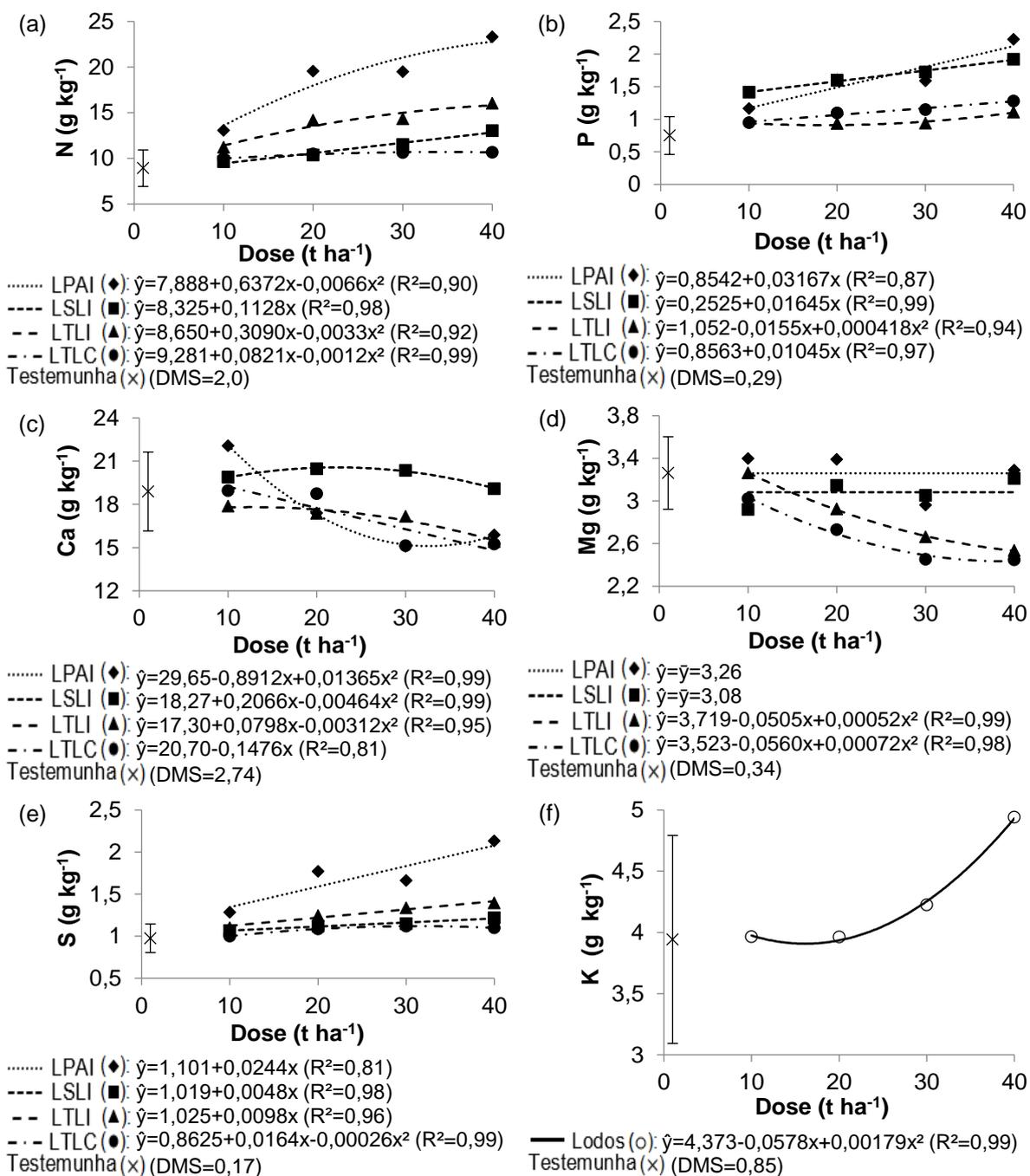


Figura 13 – Teores foliares de N, P, Ca, Mg e S em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados, teores foliares de K em função das doses e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

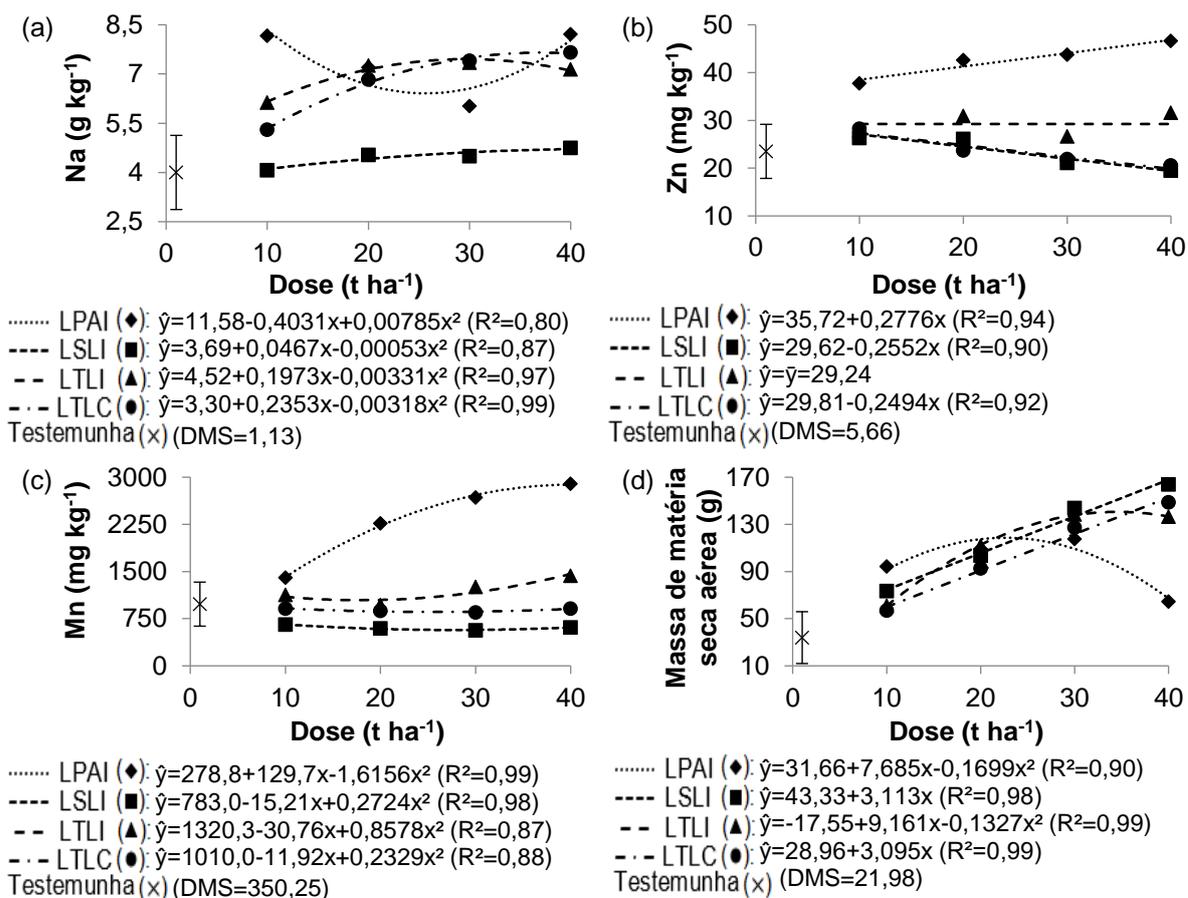


Figura 14 – Teores foliares de Na, Zn e Mn e massa de matéria seca de parte aérea em função das doses para os quatro lodos de efluentes testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

É importante destacar que o lodo citado apresentou sintomas de deficiência nutricional de K e intensa queda de folhas (Capítulo 1), bem como menores massas de matéria seca da parte aérea (Figura 14d), principalmente nas maiores doses aplicadas. Assim sendo, os resultados podem ser explicados pela mobilidade dos elementos: N, P, S, Na, Zn e Mn, móveis ou pouco móveis, podem ser redistribuídos pela planta previamente à queda das folhas, aumentando os teores dos elementos nos tecidos remanescentes da planta (efeito de concentração); no caso de Ca, relativamente imóvel, não há a redistribuição, sendo os elementos exportados na queda das folhas, não havendo o aumento das concentrações (TAIZ et al., 2017; MALAVOLTA, 2006).

Resultados semelhantes foram observados por Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) e Bertolazi et al. (2016), os quais indicaram que a aplicação exclusiva de lodo não seria suficiente para atender à todas as necessidades nutricionais da cultura e garantir uma boa produção, sendo recomendada a complementação mineral ou a combinação com outras fontes visando o equilíbrio nutricional e maior crescimento.

O LSLI demonstrou incrementos nos teores de N e P e redução de Zn, em função do aumento das doses, enquanto que os demais elementos mantiveram-se relativamente constantes. Em comparação aos demais lodos, LSLI apresentou teores mais elevados de P e Ca e inferiores de Zn, Mn e Na. Quando comparado à testemunha, apresentou concentrações semelhantes para a maioria dos parâmetros e, principalmente nas maiores doses, altos teores de N, P e S, os quais são componentes intrínsecos na estrutura, metabolismo e desenvolvimento vegetal e demandados em altas quantidades (TAIZ et al., 2017).

Quanto ao lodo terciário de laticínio, foram observadas diferenças de comportamento entre os teores foliares para as duas formas de aplicação. Quando incorporado ao solo (LTLI) as doses promoveram acréscimos dos teores de N, P, S, Na e Mn, decréscimos de Ca e Mg e poucas variações nos demais elementos; enquanto que este lodo aplicado em cobertura (LTLC) apresentou aumento apenas de P e Na e a redução de Ca, Mg e Zn. Além disso, dentre ambos, o LTLI apresentou teores mais elevados para todos os elementos, com exceção de P (que foi superior em LTLC). Estes resultados podem ser explicados pelo maior contato entre os nutrientes e a planta quando o lodo foi incorporado ao solo, facilitando, assim, a absorção dos mesmos.

No caso do P, cujos teores foram superiores no lodo em cobertura, os resultados podem estar relacionados à dinâmica do elemento no solo. Quando incorporado ao solo, devido ao aumento do contato com o solo, o P presente no lodo pode ter sido em grande parte adsorvido às partículas da fração argila em um processo não reversível, reduzindo a eficiência da adubação neste sentido. Enquanto que, na aplicação em cobertura, mais localizada, a adsorção é reduzida e o nutriente pode ser liberado mais lentamente e melhor aproveitado (RAIJ, 2011). Além disso, o P é um nutriente de baixa mobilidade no solo, motivo pelo qual a aplicação mais próxima as raízes incrementa a absorção (BAZANI et al., 2014). Importante comentar, também, que altos teores foliares de P favorecem rápido crescimento inicial do

eucalipto, conforme verificado em estudo de Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) com a aplicação de lodo de esgoto; o que ocorreu também no presente estudo (Capítulo 1).

É importante salientar que a inexistência de diferenças significativas para os teores foliares de alguns nutrientes entre a testemunha e algumas doses de lodo não é um fator necessário para que a aplicação do resíduo seja considerada vantajosa. Isto porque, conforme Camargo et al. (2013), os lodos, além de contribuírem para o aumento dos teores de nutrientes, também promovem aumento da produção de massa de matéria seca, gerando um efeito de diluição nas plantas. Conforme constatado na Figura 14d, os lodos secundário e terciário apresentaram incrementos na produção de massa de matéria seca de parte aérea, até a maior dose aplicada.

Deve-se atentar ao equilíbrio nutricional. Em comparação com SBCS/NEPAR (2017), observou-se que para LSLI estão adequados os teores de N na maior dose testada e o Fe em todas as doses; e, conforme Gonçalves (2010), os teores de S, Fe e Mn estão adequados. Para o LTLI, estão adequados os valores de N, P, Cu e Fe, para SBCS/NEPAR (2017); e P e Mg nas maiores doses, S, Cu e Fe em todas as doses para Gonçalves (2010). Para o LTLC, conforme SBCS/NEPAR (2017), P e Fe estão adequados e para Gonçalves (2010), P, Mg, S e Fe estão adequados. Enquanto que a testemunha apresentou teores adequados apenas para Fe, conforme SBCS/NEPAR (2017), e para S e Fe de acordo com Gonçalves (2010).

Os resultados que ficaram em desconformidade aos teores de referência apresentados na Tabela 5, podem estar relacionados à posição das folhas coletadas (pelo maior ou menor grau de retranslocação) (SILVEIRA et al., 2005) e à fase do povoamento florestal, isto é, antes, durante ou depois do fechamento da copa (GONÇALVES, 2010). Além disso, SBCS/NEPAR (2017) e Gonçalves (2010), recomendam que seja realizada a coleta de folhas maduras da parte superior da copa de várias árvores do mesmo talhão; o que não pode ser seguido no presente estudo, devido ao tamanho das plantas e ao estudo ter sido conduzido em vasos, além de ter sido avaliado na fase inicial de crescimento das plantas.

Apesar das diferenças observadas entre os resultados e os valores de referência, pode-se observar que a aplicação dos lodos secundário e terciário (incorporado ou em cobertura) favoreceu a obtenção de níveis adequados de vários nutrientes, em comparação à testemunha.

Variações nos teores de nutrientes também foram observados em outros estudos com a aplicação de lodo de esgoto em eucalipto. Garcia et al. (2009) verificaram aumentos de teores foliares de N, P, K, Zn e Cu e redução de Mg e Fe; Silva, Poggiani e Laclau (2011) constataram aumentos de P foliar e associaram ao aumento da disponibilidade do elemento com a aplicação de lodo; enquanto que Ferraz e Poggiani (2014) obtiveram elevações dos teores de P, Ca e Zn e redução de Mn em raízes de *E. grandis*.

Silva, Poggiani e Laclau (2011) complementam que a aplicação de lodo de esgoto favoreceu o ciclo biológico de nutrientes, com maiores concentrações foliares e maiores retornos de nutrientes ao solo por meio da formação de serrapilheira, já durante o início da rotação da cultura.

Além do equilíbrio nutricional, inúmeros benefícios foram observados por Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) com a aplicação de três tipos de lodo de esgoto. Seja pela reciclagem de nutrientes ou pela possibilidade de substituição total ou parcial da adubação convencional por um resíduo, os autores citam que o uso agrícola de lodos em cultivos de eucalipto é promissor.

Para Cd, Pb e Cr foram encontrados resultados inferiores ao limite de quantificação do método para a maioria das repetições de todos os tratamentos, o que sugere teores extremamente baixos e impossibilitou a análise de variância, mesmo mediante transformação de dados. Sampaio et al. (2016), estudando a aplicação de lodo de esgoto em solos com plantas nativas brasileiras, também observaram teores foliares de metais pesados extremamente baixos, e associaram os resultados à baixa disponibilidade dos mesmos no solo e à diluição na matéria seca da planta.

4.4 CONCLUSÕES

A aplicação de lodos de efluentes agroindustriais influenciou teores foliares de nutrientes em *E. urograndis*, em função da composição de cada lodo, das doses utilizadas e da dinâmica dos elementos no solo.

A aplicação de LPAI resultou em deficiência nutricional de K, intensa queda de folhas e menor produção de massa de matéria seca de parte aérea. Os teores de N, P, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn se mostraram superiores aos valores de referência para o eucalipto.

A aplicação dos lodos secundário e terciário (incorporado ou em cobertura) de laticínios apresentou resultados satisfatórios quanto aos teores foliares de referência para macro e micronutrientes, superando a testemunha.

O LSLI proporcionou maiores teores de P e Ca, além de altos teores de N e S nas maiores doses. O LTL incorporado proporcionou maiores teores para todos os elementos, com exceção do P, em comparação ao LTL aplicado em cobertura.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição de lodo no solo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Eds.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. p. 317-395.

BAZANI, J. H.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T. MELO, E. S. A. C.; PRIETO, M. Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. **Informações Agrônomicas**, n. 148, p. 1-28, 2014.

BERTOLAZI, K. B.; AFAZ, D. C. S.; VIANI, R. A. G.; SOUZA, C. F. Viabilidade da aplicação de composto de lodo de esgoto no cultivo inicial de eucalipto. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 72-78, 2016.

CAMARGO, R.; MALDONADO, A. C. D.; DIAS, P. A. S.; SOUZA, M. F.; FRANÇA, M. S. Diagnóstico foliar em mudas de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) produzidas com biossólido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 283-290, 2013.

FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v. 47, p. 861-876, 2016.

FERRAZ, A. V.; POGGIANI, F. Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 311-320, 2014.

GARCIA, G. O.; GONÇALVES, I. Z.; MADALÃO, J. C.; NAZÁRIO, A. A.; REIS, E. F. Análise nutricional de mudas de eucalipto submetidas à aplicação de lodo de esgoto doméstico. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 275-290, 2009.

GONÇALVES, J. L. M. Eucalipto. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 309-369.

LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R.; RICHARDT, A.; FONTANIVA, S. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. 2. ed. Cascavel: EDUNIOESTE, 2016. 155 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; OTERO, X. L.; VAZQUEZ, F. M.; BOGIANI, J. C.; OLIVEIRA, F. C.; GAVA, J. L.; CIOL, M. A.; LITCKE, K. M.; HARRISON, R. B. The impact of biosolid application on soil and native plants in a degraded Brazilian Atlantic rainforest soil. **Water Air Soil Pollut**, v. 227, n.1, p. 1-9, 2016.

SAS INSTITUTE INC. SAS University Edition: installation guide for Windows Cary: SAS Institute. Version 9.4. Cary, 2014.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. Volume de madeira e concentração foliar de nutrientes em parcelas experimentais de *Eucalyptus grandis* fertilizadas com lodo de esgoto úmido e seco. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 845-854, 2008.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LACLAU, J. P. Applying sewage sludge to *Eucalyptus grandis* plantations: effects on biomass production and nutrient cycling through litterfall. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2011, p. 1-11, 2011.

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. (Eds.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. P. 79-104.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO/NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ (SBCS/NEPAR). **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESB, 2001. p. 133-180.

5 CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO DE LODOS DE EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS SOBRE A FERTILIDADE E OS COMPONENTES INORGÂNICOS DE SOLO CULTIVADO COM EUCALIPTO

RESUMO

A aplicação de lodos de efluentes agroindustriais no solo pode ser uma excelente alternativa, devido ao potencial fertilizante e condicionador de solos. Em vista disso, este estudo teve por objetivo avaliar os efeitos da aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais sobre a fertilidade e os componentes inorgânicos de solo cultivado com um híbrido de *E. urograndis*. Foram aplicadas quatro doses (10, 20, 30 e 40 t ha⁻¹) de um lodo primário de abatedouro de aves (LPAI), lodo secundário de laticínio (LSLI) e lodo terciário de laticínio (LTLI) incorporados ao solo e do lodo terciário de laticínio em cobertura (LTLC), bem como uma testemunha, sem fertilização. Após 100 dias de condução experimental, o solo foi amostrado e preparado para a avaliação de seus atributos químicos. Incrementos quanto à fertilidade do solo foram observados com a aplicação de LSLI e LTLI (em comparação ao LTLC); enquanto que o LPAI apresentou baixa disponibilidade de nutrientes e demonstrou maior deficiência de K. Para a aplicação incorporada de LPA e LSL recomenda-se a suplementação com uma fonte mineral de K. Os teores de Pb, Cd, Cr e Cu estão abaixo do limite de investigação para áreas agrícolas, de forma que os resíduos podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura nas doses avaliadas de 10 a 40 t ha⁻¹.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Adubação. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

The application of agroindustrial effluent sludge to the soil can be an excellent alternative due to the potential fertilizer and soil conditioner. The aim of this study was to evaluate the effects of the application of different doses of agroindustrial effluent sludge on fertility and inorganic soil components cultivated with a hybrid of *E. urograndis*. Four doses were applied (10, 20, 30 and 40 t ha⁻¹) of a primary poultry slaughterhouse (LPAI), secondary dairy sludge (LSLI) and dairy tertiary sludge (LTLI) incorporated into the soil and sludge tertiary in coverage (LTLC) as well as a control treatment, without fertilization. After 100 days of experimental conduction, the soil was sampled and prepared for the evaluation of its chemical attributes. Increases in soil fertility were observed with the application of LSLI and LTLI (in comparison to LTLC); while LPAI showed the lowest results and a higher K deficiency. For the incorporated application of LPA and LSL, it is recommended the supplementation with a mineral source of K. The Pb, Cd, Cr and Cu levels are below the limit of research for agricultural areas, therefore, the residues can be used in an environmentally safe manner in the evaluated doses of 10 to 40 t ha⁻¹.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*. Fertilizing. Agroindustrial waste.

5.1 INTRODUÇÃO

A fertilidade do solo é fundamental para o desenvolvimento das culturas agrícolas, por favorecer aumentos de produtividade e melhoria nos ganhos econômicos (RAIJ, 2011). Porém, é comum que solos de cultivos florestais apresentem baixa fertilidade natural, motivo pelo qual torna-se importante o manejo da adubação. Neste sentido, recomenda-se além de fertilizantes químicos, a utilização de resíduos de origem orgânica (SANTAROSA; PENTEADO JR.; GOULART, 2014).

Dentre os resíduos orgânicos, destaque tem sido dado aos lodos de esgoto e de efluentes industriais de diversas tipologias, os quais têm demonstrado resultados promissores na melhoria da qualidade do solo de cultivos de eucalipto, bem como no incremento de parâmetros morfológicos da cultura (FERRAZ; MOMENTEL; POGGIANI, 2016; BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015; BOECHAT et al., 2015; MACHADO; TRANNIN, 2015; VIEIRA; CASTILHOS; CASTILHOS, 2011; COSTA et al., 2009; TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2008).

O uso agrícola de lodos é uma das melhores alternativas de disposição final do resíduo, devido ao potencial fertilizante e condicionador de solos (MACHADO; TRANNIN, 2015). Isto porque lodos de tratamento de esgoto e de indústrias alimentícias apresentam elevados teores de nutrientes e de matéria orgânica (PEREIRA; GARCIA, 2016; AŞIK et al., 2016).

Porém, é comum que as características do lodo variem em função de sua fonte de origem (AŞIK et al., 2016), devido às diferenças na tipologia do efluente, do grau de tratamento da estação e do processo gerador do lodo (TSUTIYA, 2001). Neste sentido, torna-se importante a implantação de estudos sobre os efeitos da aplicação dos mesmos no solo, visando ampliar os conhecimentos sobre o assunto.

Assim sendo, o presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito da aplicação de doses de diferentes lodos de efluentes agroindustriais sobre a fertilidade e os componentes inorgânicos de solo cultivado com um híbrido de *E. urograndis*.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Localização do experimento

A localização do experimento está apresentada no item 3.2.1 do Capítulo 1 (p. 12).

5.2.2 Geração dos lodos de efluentes agroindustriais

As informações sobre a geração dos lodos estão apresentadas no item 3.2.2 do Capítulo 1 (p. 12).

5.2.3 Caracterização dos lodos de efluentes agroindustriais

A caracterização dos lodos está apresentada no item 3.2.3 do Capítulo 1 (p. 16).

5.2.4 Implantação, condução e tratamentos culturais do experimento

A descrição da implantação, condução e tratamentos culturais do experimento está apresentada no item 3.2.4 do Capítulo 1 (p. 17).

5.2.5 Avaliações

Ao final do experimento, o solo das parcelas experimentais foi amostrado e submetido aos processos de secagem, destorroamento, tamisação (peneiramento) e homogeneização da fração menor que 2 mm, cujo resultado é denominado de “terra fina seca ao ar” (TFSA), a qual foi utilizada para as determinações descritas a seguir (SILVA et al., 2009; LANA et al., 2016).

O pH foi determinado por solução de CaCl_2 (relação solo:solução 1:2,5); acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) em solução tamponada SMP a pH 7,5; matéria orgânica (MO) calculada por meio da determinação de carbono orgânico pelo método Walkley-

Black; acidez trocável (Al^{3+}), N mineral, Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , sendo o Al^{3+} determinado por titulação com NaOH $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, N por destilação seguida de titulação e Ca^{2+} e Mg^{2+} determinados em espectrofotômetro de absorção atômica; P, K^+ , Na^+ , Cu, Zn, Fe e Mn extraídos por solução Mehlich-1, sendo o P determinado por colorimetria em espectrofotômetro enquanto K^+ e Na^+ foram determinados em fotômetro de chama e Cu, Zn, Fe e Mn por espectrometria de absorção atômica; S por turbidimetria em espectrofotômetro; bem como Cd, Pb e Cr por digestão nítrico-perclórica para determinação dos teores totais em espectrofotômetro de absorção atômica (LANA et al., 2016). Também foram obtidos os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de saturação por bases (V) (SILVA et al., 2009).

Além da comparação dos resultados entre os tratamentos, os mesmos foram comparados com valores orientadores de qualidade do solo, apresentados pela Resolução do CONAMA nº 420/2009; além de valores para interpretação de parâmetros químicos do solo para o Estado do Paraná, de SBCS/NEPAR (2017).

5.2.6 Análise estatística

Foram realizados testes de normalidade, bem como análise de variância no programa estatístico SAS University Edition (SAS INSTITUTE INC, 2014). Foram retirados valores inconsistentes de forma que houve redução no valor do grau de liberdade do resíduo. Quando significativo, foi realizada análise de regressão para a interação entre lodo e dose e para o fator dose, teste de Tukey para o fator lodo e teste de Dunnett para a comparação entre o fatorial e o tratamento adicional.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise de variância (Tabelas 8 e 9) mostraram que houve efeitos de lodo para pH CaCl_2 , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, MO, N mineral, Mg, S, Mn, SB, CTC e V (Tabela 10); efeitos significativos de dose para $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, MO, N, S e CTC (Figura 15) e interação significativa entre lodo e dose para P, K, Ca, Na, Zn, Fe e Pb (Figuras 16 e 17). Enquanto que o contraste do fatorial com a testemunha foi significativo para todas as variáveis.

Tabela 8 – Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos atributos químicos de solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais

FV	pH CaCl ₂		H ⁺ + Al ³⁺		Matéria Orgânica		N mineral	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	0,0816	3	0,1186 **	3	0,467	3	23,96
Lodo	3	1,4336 **	3	1,1530 **	3	17,512 **	3	118,26 **
Dose	3	0,0636	3	0,2212 **	3	7,568 **	3	44,60 *
Lodo x Dose	9	0,0118	9	0,0218	9	1,238	9	17,62
Fatorial vs Adicional	1	0,8416 **	1	0,8124 **	1	17,821 **	1	179,92 **
Resíduo	47	0,0303	47	0,0233	48	0,810	46	12,36
CV (%)		2,87		4,83		12,45		36,99
Média		6,08		3,16		7,23		9,51
FV	P		K		Ca		Mg	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	826,3	3	0,0001	3	0,2471	3	0,0687 **
Lodo	3	16113,6 **	3	0,0514 **	3	1,9764 **	3	0,0533 **
Dose	3	15980,1 **	3	0,0083 **	3	0,3086	3	0,0110
Lodo x Dose	9	2835,7 **	9	0,0042 **	9	0,7194 **	9	0,0051
Fatorial vs Adicional	1	17045,7 **	1	0,0112 **	1	1,9362 **	1	0,2918 **
Resíduo	48	357,9	47	0,0002	47	0,2030	46	0,0045
CV (%)		29,43		21,01		17,00		22,66
Média		64,29		0,07		2,65		0,30
FV	S		Na		Cu		Zn	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	6,08	3	0,0417	3	9,958 **	3	0,0776
Lodo	3	289,90 **	3	1,0638 **	3	0,440	3	0,9292 **
Dose	3	12,41 *	3	0,4088 **	3	0,447	3	0,1457 *
Lodo x Dose	9	9,10	9	0,2445 **	9	0,073	9	0,2166 **
Fatorial vs Adicional	1	29,88 *	1	0,4375 **	1	30,368 **	1	0,3318 **
Resíduo	48	5,58	46	0,0368	47	0,363	45	0,0398
CV (%)		23,79		20,68		7,26		17,07
Média		9,93		0,93		8,30		1,17

** Significativo a 1% de probabilidade de erro; * Significativo a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 9 - Resumo do quadro da análise de variância, com os graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), coeficiente de variação (CV) e médias dos atributos químicos de solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de doses de lodos de efluentes agroindustriais (continuação)

FV	Fe		Mn		Cd		Pb	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	477,4 **	3	1769,5 *	3	3,446 *	3	1841,0 **
Lodo	3	12363,2 **	3	2787,0 **	3	1,324	3	398,8
Dose	3	95,8	3	294,2	3	0,668	3	624,4 *
Lodo x Dose	9	656,3 **	9	616,8	9	1,396	9	704,4 **
Fatorial vs Adicional	1	1433,9 **	1	10028,0 **	1	20,725 **	1	5747,6 **
Resíduo	48	104,4	48	501,5	46	0,959	48	215,9
CV (%)		13,89		15,79		30,77		8,88
Média		73,60		141,82		3,18		165,53

FV	Cr		SB		CTC		V	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Bloco	3	129,34	3	0,4790	3	0,3583	3	46,08 *
Lodo	3	32,72	3	4,1319 **	3	3,0466 **	3	362,88 **
Dose	3	19,10	3	0,3551	3	0,7661 *	3	6,04
Lodo x Dose	9	131,07	9	0,3049	9	0,3035	9	9,36
Fatorial vs Adicional	1	412,73 *	1	1,5480 **	1	1,2183 *	1	196,23 **
Resíduo	47	86,63	47	0,2022	47	0,1849	48	11,16
CV (%)		29,00		11,25		5,97		6,00
Média		32,10		4,00		7,20		55,71

** Significativo a 1% de probabilidade de erro; * Significativo a 5% de probabilidade de erro.

Para Al^{3+} todos os resultados se igualaram a zero, motivo pelo qual não foi realizada a análise de variância, o que pode estar associado ao pH superior a 5,5 – que precipita o alumínio e o torna menos solúvel – e é considerado positivo, visto que, o Al^{3+} pode gerar efeitos tóxicos às plantas, devido à limitação no crescimento e desenvolvimento radicular, prejudicando a absorção de nutrientes e de água (NOVAIS et al., 2007).

Quanto à acidez ativa e potencial (Tabela 10), observou-se que o LPAI apresentou o menor pH $CaCl_2$ e o maior $H^+ + Al^{3+}$; enquanto que o LTLC resultou em maior pH $CaCl_2$ e menor $H^+ + Al^{3+}$, não diferindo de LTLI. Ferraz, Momentel e Poggiani (2016), avaliando a fertilidade do solo e o crescimento de *E. grandis* com três tipos de lodos de esgoto, também observaram que em maiores valores de pH no solo houve

redução de $H^+ + Al^{3+}$ e, associaram isto à possibilidade de precipitação e redução da solubilidade do alumínio em pH mais alto, tal como ocorreu para a acidez trocável.

Tabela 10 – Valores médios de pH $CaCl_2$, $H^+ + Al^{3+}$, MO, N, Mg, S, Mn, SB, CTC e V em solo cultivado com eucalipto em função da aplicação de quatro lodos de efluentes agroindustriais

Lodo	pH $CaCl_2$	$H^+ + Al^{3+}$	MO	N mineral	Mg
Unidade	-	$cmol_c dm^{-3}$	$g dm^{-3}$	$mg kg^{-1}$	$cmol_c dm^{-3}$
LPAI	5,608 c	3,584 a	6,710 b	13,759 a	0,2530 b
LSLI	6,069 b	3,169 b	8,914 a	10,733 ab	0,3472 a
LTLI	6,226 ab	3,039 bc	6,857 b	7,926 b	0,2264 b
LTLC	6,293 a	2,967 c	6,920 b	7,453 b	0,3511 a
Lodo	S	Mn	SB	CTC	V
Unidade	----- $mg dm^{-3}$ -----	----- $cmol_c dm^{-3}$ -----	----- $cmol_c dm^{-3}$ -----	----- $cmol_c dm^{-3}$ -----	%
LPAI	16,262 a	145,0 ab	3,358 c	6,902 b	48,554 b
LSLI	6,664 b	154,4 a	4,581 a	7,838 a	58,771 a
LTLI	8,381 b	125,0 b	3,893 b	6,933 b	56,122 a
LTLC	8,816 b	151,2 a	4,111 b	7,164 b	58,453 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Além disso, para $H^+ + Al^{3+}$ foi verificado aumento em função das doses de lodos e diferenças estatisticamente significativas em relação à testemunha (Figura 15a), assim como ocorreu para Bonini, Alves e Montanari (2015) com a aplicação de lodo de esgoto em área cultivada com eucalipto e braquiária.

A acidez do solo, principalmente a acidez ativa, pode interferir, direta ou indiretamente, em numerosas reações químicas e processos, agindo sobre a disponibilidade de nutrientes e na atividade de microrganismos (NOVAIS et al., 2007; RAIJ, 2011). Conforme SBCS/NEPAR (2017), as espécies de eucalipto cultivadas no Brasil apresentam grande tolerância à acidez; porém no presente estudo, o pH do solo estava elevado, sendo o LPAI classificado na classe muito alto, enquanto os demais lodos (Tabela 10) e a testemunha (pH 6,43) encontram-se na "condição a evitar". Em vista disso, torna-se importante comentar que o pH inicial já era considerado elevado (Tabela 1) e a aplicação dos lodos promoveu decréscimos.

Para a MO foi observado incremento linear em função das doses, sendo as maiores, diferentes da testemunha (Figura 15b). Maiores teores foram observados no

LSLI (Tabela 10), o que pode estar associado aos maiores teores de carbono orgânico presentes no lodo (Tabela 1). Em comparação aos valores sugeridos por SBCS/NEPAR (2017) para solos do Paraná, os resultados do LSLI se enquadraram na classe baixo, enquanto que os demais lodos e a testemunha estão na classe muito baixo.

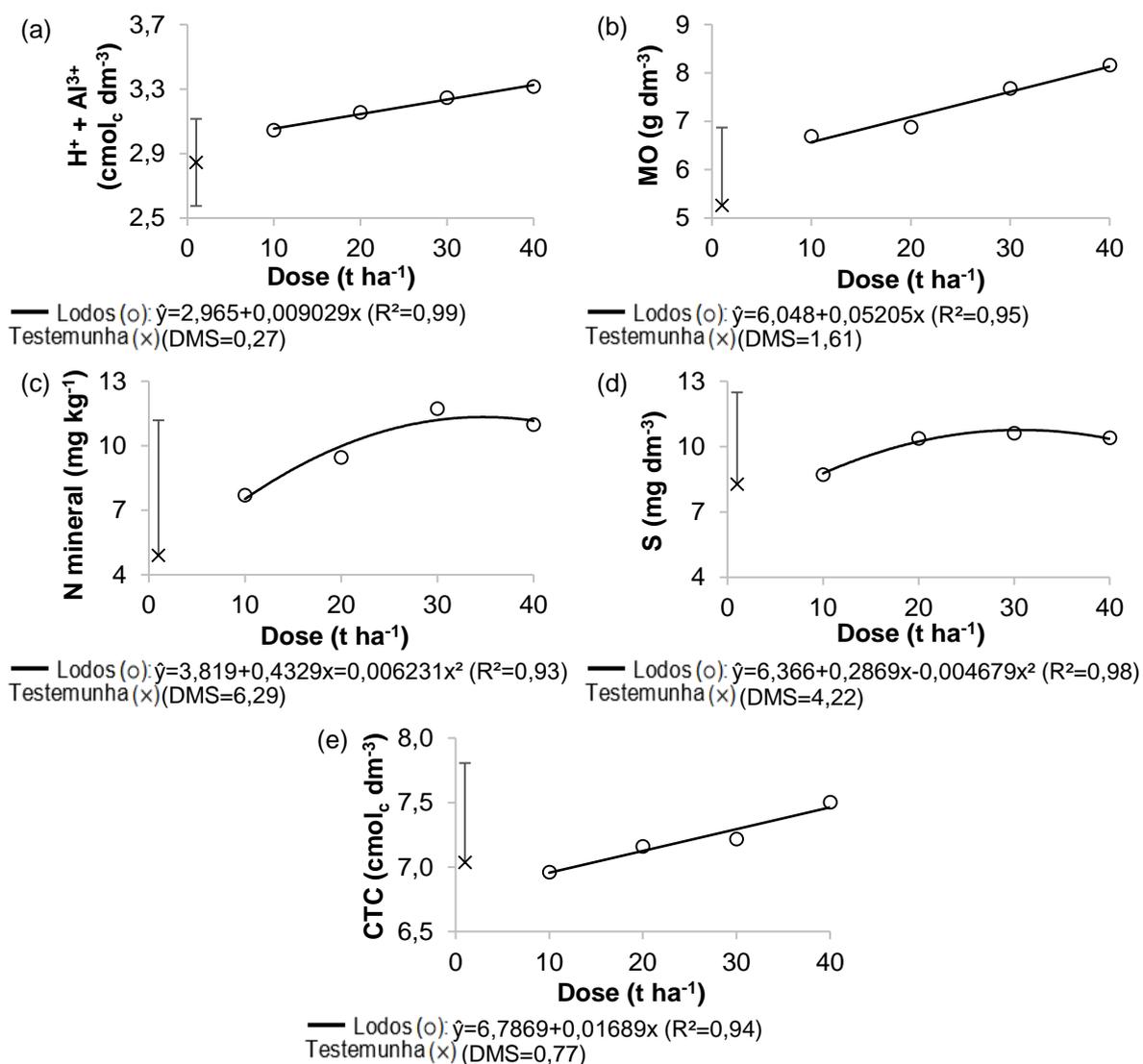


Figura 15 – Valores de $H^+ + Al^{3+}$, MO, N, S e CTC em solos cultivados com eucalipto em função das doses de lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Estes resultados são importantes visto que a MO fornece dois elementos químicos importantes que não estão presentes no material de origem dos solos: o carbono e o nitrogênio (RAIJ, 2011); além de alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, influenciando positivamente no crescimento de plantas (NOVAIS et al., 2007). Efeitos positivos da MO também são observados no processo de recuperação da qualidade do solo, pela mineralização de nutrientes, bem como pela melhoria da estruturação do solo, que influencia a porosidade e aeração do solo (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015).

Estudo de Andrade, Andrezza e Camargo (2016) com a aplicação de lodo de estação de tratamento de efluentes de aterro industrial, indicou aumento dos teores de carbono mineralizado em função do tempo e do aumento das doses; proporcionando aumento, também, da atividade microbiana.

Para N mineral, foi observada uma tendência de aumento quadrático, com máxima resposta na dose $34,7 \text{ t ha}^{-1}$, sendo as doses 30 a 40 t ha^{-1} superiores à testemunha (Figura 15c). É importante comentar que a presença de N nas formas de amônio e nitrato no solo é fundamental para o crescimento vegetal, visto que são as formas disponíveis às plantas (RAIJ, 2011).

Maiores teores de N mineral foram observados para LPAI e LSLI (Tabela 10). O primeiro lodo citado, apresentava em sua composição maiores teores de N total (Tabela 1), o qual pode ter mineralizado, formando NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^- (RAIJ, 2011); enquanto que o segundo, já apresentava maiores teores de N mineral (NH_4^+ , NO_3^- e NO_2^-) (Tabela 1). Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) também encontraram resultados de nitrogênio superiores ao controle e, inclusive, ao tratamento com adubação mineral.

Behling et al. (2009) estudando a aplicação de lodo de indústria de borracha sintética na cultura da soja, também observaram aumentos dos teores de N orgânico, N mineral e carbono no solo; bem como o aumento dos teores de N mineral ao longo do tempo, sendo que a maior parte da mineralização ocorreu até os 60 dias após a aplicação dos resíduos, demonstrando a possibilidade da mineralização de N também ter ocorrido com o tratamento LPAI no presente estudo.

Carmo e Lambais (2013) observaram na análise da composição do lodo, que praticamente todo o nitrogênio se encontrava na forma orgânica (assim como no presente estudo, demonstrado pela diferença dos teores de N-total em relação ao N

amoniaco e nítrico na Tabela 1). Porém, após a aplicação no solo, ao longo do experimento, ocorreram aumentos nos teores de N mineral no solo, o que está relacionado à mineralização. Os autores destacaram ainda, as diferenças quanto às transformações do nitrogênio que ocorrem com lodos de diferentes estações de tratamento de esgoto, tal como ocorreu com os diferentes lodos de efluentes agroindustriais.

O teor de P apresentou-se mais elevado com a aplicação de LSLI (Figura 16a), o qual teve os maiores teores em sua composição (Tabela 1). Além disso, todos os lodos incorporados apresentaram incrementos lineares em função das doses. Da mesma forma, Bonini, Alves e Montanari (2015) observaram teores superiores do elemento na maior dose estudada, explicado pela maior disponibilização do elemento com a aplicação de maiores quantidades do resíduo.

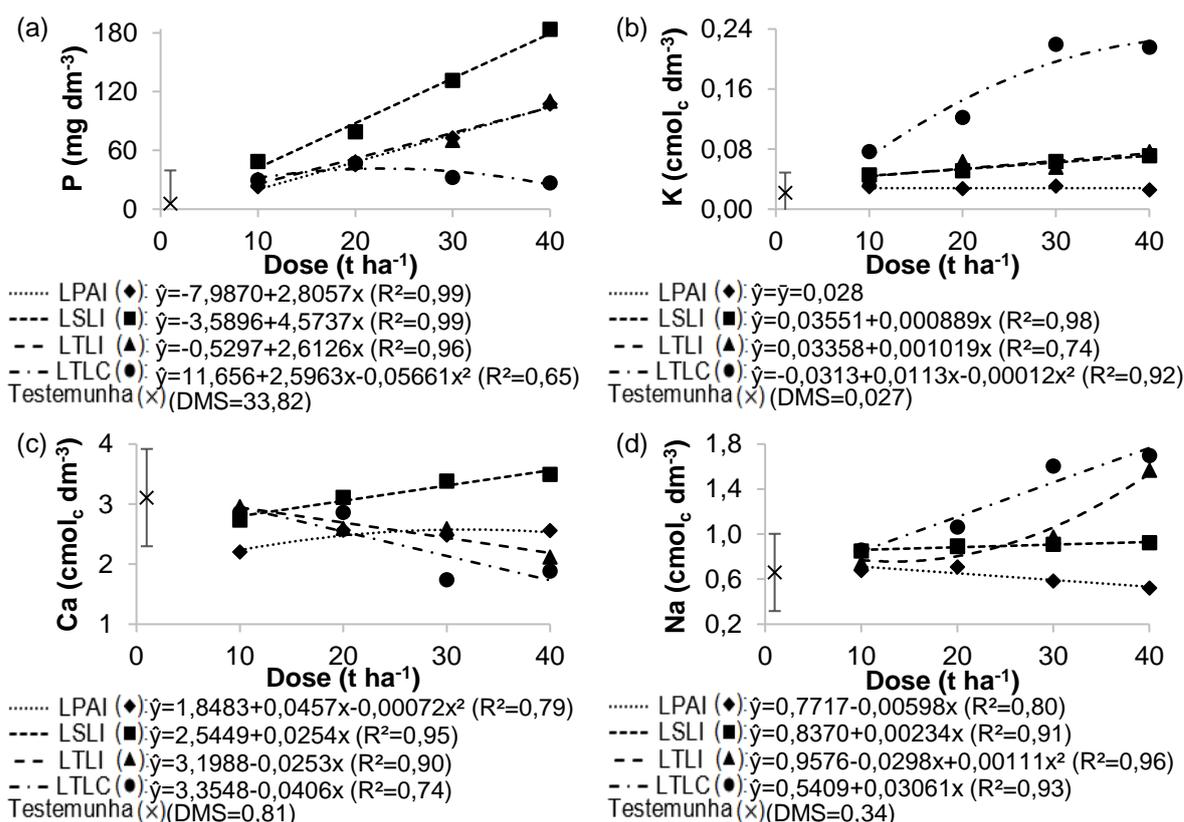


Figura 16 – Teores de P, K, Ca e Na em solos cultivados com eucalipto em função das doses para os quatro lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Com o LTL em cobertura os teores de P foram inferiores, o que pode ter ocorrido pela forma de aplicação, em cobertura e localizada, a qual disponibiliza o nutriente de forma mais lenta (RAIJ, 2011) e favorece a absorção pelas raízes (BAZANI et al., 2014), reduzindo os teores no solo.

É importante citar que todos os tratamentos com lodo se enquadram na condição a evitar para P, estabelecida por SBCS/NEPAR (2017) para culturas florestais, enquanto que a testemunha se encontra na classe médio. Considerando que a cultura se encontrava na fase de desenvolvimento inicial no presente estudo, os resultados encontrados com a aplicação de lodo podem ser considerados vantajosos, isto porque, conforme Melo et al. (2016), nos estágios iniciais de híbridos de *E. urograndis* há uma maior demanda por P, devido, principalmente, à limitação do sistema radicular, que explora poucas áreas. Além disto, as plantas de eucalipto apresentaram bons resultados de desenvolvimento (Capítulo 1).

Estudos de Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) demonstraram teores de P (resina) de 2 mg dm⁻³ para a testemunha e para a aplicação de fertilizante mineral e de 127 a 223 mg dm⁻³ (75 vezes maior) para os tratamentos com lodo de esgoto de 3 cidades de São Paulo. Bonini, Alves e Montanari (2015) demonstraram resultados semelhantes, com P (resina) de 1 mg dm⁻³ para a testemunha, 14 mg dm⁻³ para a adubação mineral e 55 a 97 mg dm⁻³ com doses de lodo de esgoto. Costa et al. (2014) também encontraram teor elevado de P com a aplicação de lodo de esgoto na cultura do milho (114 e 162 mg dm⁻³ para os extratores Mehlich-1 e resina, respectivamente), valor bastante superior à aplicação de adubação mineral (42 e 57 mg dm⁻³, para Mehlich-1 e resina, respectivamente); e associaram os resultados à matéria orgânica, que se mostrou superior nas áreas de maior P disponível.

Para K (Figura 16b), menores teores foram observados com LPAI, o qual apresentou-se deficiente do elemento em sua composição; enquanto que maiores valores foram obtidos com o lodo terciário (Tabela 1) em cobertura. Em comparação à recomendação de SBCS/NEPAR (2017), o LPAI, assim como a testemunha, se enquadrou na classe muito baixo; as maiores doses de LSLI e LTLI chegaram à classe baixo e as maiores doses de LTLC ficaram na classe alto.

Resultados semelhantes à aplicação de LPAI, LSLI e LTLI para o K, foram encontrados por Machado e Trannin (2015) com lodo de laticínio e por Costa et al.

(2009) com lodo de indústria de papel reciclado, os quais recomendaram a suplementação mineral com outras fontes do nutriente. Machado e Tranin (2015) citaram ainda, que mesmo que a utilização agrícola de lodo seja benéfica para o crescimento e produtividade das culturas, os nutrientes essenciais nem sempre se encontram em concentrações balanceadas, fazendo com que as respostas sejam negativas, em alguns casos, se não houver a complementação; tal como ocorreu com LPAI (Capítulo 1).

A forma de aplicação de LTL, afetou grandemente os teores de K no solo devido à dinâmica do elemento, que se perde por lixiviação em função da concentração presente na solução do solo (NOVAIS et al., 2007), a qual provavelmente era maior em LTLI. Assim, a aplicação em cobertura se mostrou positiva e possibilitou o atendimento da recomendação de SBCS/NEPAR (2017).

Os teores de Ca (Figura 16c) e de Mg (Tabela 10) foram superiores com a aplicação de LSLI, o qual possuía os maiores teores dos nutrientes em sua composição (Tabela 1). LTLC também apresentou teores superiores de Mg. Quanto ao Ca todos os resultados se enquadram na classe alta, adequada, e para Mg, os 4 lodos e a testemunha encontram-se situados na classe baixo (SBCS/NEPAR, 2017).

Quanto ao S foi observado maior teor no tratamento com LPAI (Tabela 10). E a dose de máxima resposta encontrada para os lodos foi de 30,6 t ha⁻¹ (Figura 15d).

Em relação ao Na, foram encontrados maiores teores para o lodo terciário e menores para o LPAI (Figura 16d), o que está diretamente relacionado à composição dos resíduos aplicados (Tabela 1). Os resultados de LPAI e LSLI foram semelhantes à testemunha pelo teste de Dunnett, assim como ocorreu para Costa et al. (2009); enquanto que as maiores doses de LTLI e LTLC foram estatisticamente superiores à testemunha. O LTLC apresentou teores no solo superiores ao LTLI (diferentemente do que havia sido observado no tecido vegetal (Figura 14a)), possivelmente devido às perdas por lixiviação quando aplicado de forma incorporada.

Maiores teores de Zn foram observados com LPAI (Figura 17a) e de Fe com LSLI (Figura 17b), o que está associado à composição dos lodos (Tabela 1). Quanto ao Mn (Tabela 10), os maiores resultados foram observados com LSLI (devido aos maiores teores do micronutriente no resíduo) e para LTLC (possivelmente pela maior proximidade do lodo ao local de coleta de amostras de solo). Os resultados de Zn mantiveram-se extremamente inferiores ao limite de investigação estabelecido para

áreas agrícolas (450 mg kg^{-1}) pela CONAMA 420/09; enquanto que Fe e Mn não possuem limites máximos em solos pela resolução.

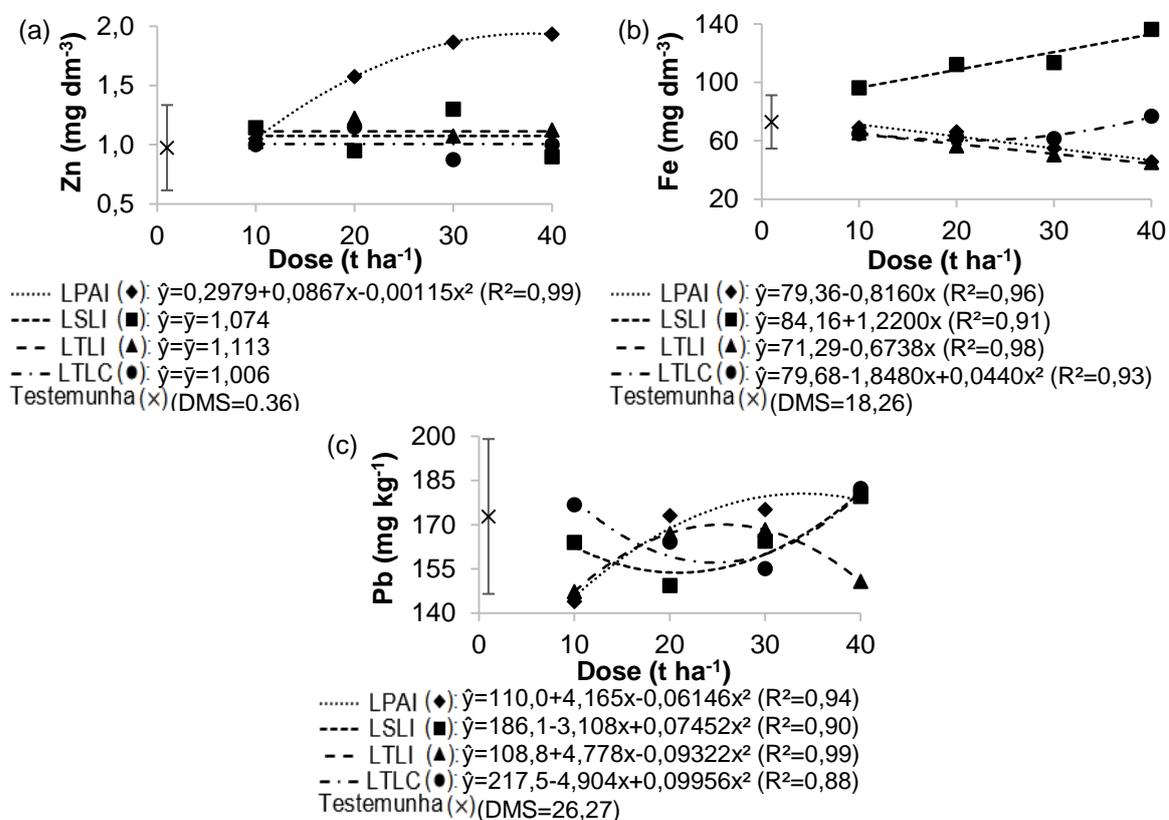


Figura 17 – Teores Zn, Fe e Pb em solos cultivados com eucalipto em função das doses para os quatro lodos de efluentes agroindustriais testados e diferença mínima significativa da testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro. LPAI: lodo primário de abatedouro de aves incorporado; LSLI: lodo secundário de laticínio incorporado; LTLI: lodo terciário de laticínio incorporado e LTLC: lodo terciário de laticínio em cobertura

Para Pb, verificou-se na Figura 17c, que LPAI e LTLI apresentaram elevação e posterior decréscimo em função das doses; enquanto que para LSLI e LTLC houve redução e posteriormente aumento com o incremento das doses. Apesar da diferença de comportamentos, os resultados para todos os lodos mantiveram-se dentro de uma faixa próxima e semelhantes à testemunha pelo teste de Dunnett. Além disto, os resultados encontrados mantiveram-se abaixo do limite de investigação para áreas agrícolas (180 mg kg^{-1}) da Resolução CONAMA 420/09.

Sampaio et al. (2016) não encontraram efeitos significativos nas concentrações de metais no solo – tal como ocorreu para Cu, Cd e Cr neste estudo –

e observaram que os vestígios da contaminação do solo e das plantas por metais com a aplicação de lodos parece ser insignificante, devido às baixas concentrações de metais, baixas doses aplicadas e à forte ligação de metais ao solo; mostrando que os resíduos podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura, com poucas chances de se tornarem biodisponíveis.

Maiores valores de SB e CTC foram encontrados com a aplicação de LSLI e para V, maiores valores foram encontrados para LSLI, LTLI e LTLC; enquanto que o LPAI apresentou os menores valores (Tabela 10). Conforme valores de interpretação de SBCS/NEPAR (2017), a CTC encontra-se na classe baixa para todos os lodos e doses, bem como para a testemunha; quanto ao V, o LPAI enquadrou-se na classe médio e os demais lodos e testemunha ficaram na classe alta.

No caso da CTC foram observados aumentos lineares em função das doses para a média dos lodos (Figura 15e), o que pode estar relacionado ao aumento da MO proporcionada pelos tratamentos com lodo, conforme Pereira e Garcia (2016).

Assim como no presente estudo, Ferraz, Momentel e Poggiani (2016) observaram diferentes resultados sobre os parâmetros de fertilidade do solo para as diferentes fontes de lodo de esgoto, e estes citaram que, apesar disto, os resultados benéficos encontrados quanto à ciclagem de nutrientes para a cultura do eucalipto, permitiria a substituição parcial e até mesmo total da adubação mineral por estes resíduos.

Efeitos positivos também foram observados com a aplicação de lodo de esgoto (BONINI; ALVES; MONTANARI, 2015) favorecendo a recuperação dos atributos químicos de solo degradado; com lodo de esgoto e de laticínio (BOECHAT et al., 2015), lodo de laticínio (MACHADO; TRANNIN, 2015) e lodo de indústria de papel reciclado (COSTA et al., 2009) promovendo a melhoria da fertilidade do solo; e com lodo de indústria de fibras e resina PET beneficiando, não apenas na fertilidade, mas também na estrutura física do solo (TRANNIN; SIQUEIRA; MOREIRA, 2008). Estudos estes que demonstraram o potencial de uso agrícola destes resíduos.

Para complementar, vale ressaltar que a melhoria das propriedades químicas e físicas, induzem a maior exploração radicular, resultando em maior produtividade das culturas, tal como observado por Behling et al. (2009) com a aplicação de lodo de indústria de borracha sintética na cultura da soja.

Estudando o uso agrícola de lodo de indústria de frutas e legumes em Goiânia, Pereira e Garcia (2016) observaram melhoria da fertilidade do solo em comparação à testemunha, indicado pelo aumento da soma de bases, CTC e MO, além da redução do alumínio trocável; e de não haver alterações quanto às substâncias orgânicas potencialmente tóxicas.

Além disso, Vieira, Castilhos e Castilhos (2011) observaram que a aplicação de lodo da indústria de parboilização de arroz proporcionou benefícios à atividade e biomassa microbiana, com melhores resultados do que a testemunha e a aplicação de fertilizantes minerais.

5.4 CONCLUSÕES

A aplicação do LSLI proporcionou incremento dos atributos químicos relacionados à fertilidade do solo, com maiores teores de MO, N, P, Ca, Mg, Fe, além de maiores valores para SB, CTC e V.

O tratamento com LPAI apresentou os menores valores de SB, CTC e V e menores teores de K, os quais estão diretamente relacionados aos resultados inferiores de crescimento das plantas de eucalipto.

O LTL aplicado em cobertura proporcionou teores adequados de Mg e Fe no solo e maior teor de K em comparação com o lodo incorporado. O uso de LPA, LSL e LTL aplicado de forma incorporada com fins de adubação devem ser suplementados com uma fonte mineral de K.

Os resíduos podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura, com poucas chances de contaminação do solo por Pb, Cd, Cr e Cu nas doses avaliadas de 10 a 40 t ha⁻¹.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. C.; ANDREAZZA, R.; CAMARGO, F. A. O. Soil microbial activity under wastewater treatment plant sludge doses from an industrial landfill. **Ciência Rural**, v. 46, n. 2, p. 267-272, 2016.

AŞIK, B. B.; AYDINALP, C.; ŞAĞBAN, F. O. T.; KATKAT, A. V. Agricultural use of wastewater sludge from various sources with special emphasis on total and DTPA-

extractable heavy metal content. **Environment Protection Engineering**, v. 42, n. 1, p. 45-58, 2016.

BAZANI, J. H.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T. MELO, E. S. A. C.; PRIETO, M. Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. **Informações Agronômicas**, n. 148, p. 1-28, 2014.

BEHLING, M.; DIAS, F. C.; SOBRINHO, N. M B. A.; OLIVEIRA, C.; MAZUR, N. Nodulação, acúmulo de nitrogênio no solo e na planta, e produtividade da soja em solo tratado com lodo de estação de tratamento de resíduos industriais. **Bragantia**, v. 68, n. 2, p. 453-462, 2009.

BOECHAT, C. L.; RIBEIRO, M. O.; BOMFIM, M. R.; BITTENCOURT, N. S.; ACCIOLY, A. M. A.; SANTOS, J. A. G. Sewage sludges in physic nut seedlings macronutrient contents and chemical attributes of soil. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 5, p. 1378-1387, 2015.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 388-393, 2015.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 249, p. 81-84, 30 de dezembro de 2009.

CARMO, J. C.; LAMBAIS, M. R. Transformações do nitrogênio em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 3, p. 152-162, 2013.

COSTA, E. R. O.; RIZZI, N. E.; SILVA, H. D.; MAEDA, S.; LAVARONI, O. J. Alterações químicas do solo após aplicação de bio-sólidos de estações de tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2009.

COSTA, V. L.; MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; MELO, L. C. A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 287-293, 2014.

FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v. 47, p. 861-876, 2016.

LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; FEY, R.; RICHARDT, A.; FONTANIVA, S. **Análise química de solo e de tecido vegetal: metodologias analíticas**. 2. ed. Cascavel: EDUNIOESTE, 2016. 155 p.

MACHADO, L. R. D.; TRANNIN, I. C. B. Agricultural potential of an industrial sewage sludge in compliance with CONAMA Resolution no. 275/2006. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 6, p. 4177-4184, 2015.

MELO, E. A. S. C.; GONÇALVES, J. L. M.; ROCHA, J. H. T.; HAKAMADA, R. E.; BAZANI, J. H.; WENZEL, A. V. A.; ARTHUR JR., J. C.; BORGES, J. S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C. C. Z.; FERREIRA, E. V. O.; FERRAZ, A. V. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P, and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, v. 7, n. 2, p. 1-15, 2016.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

PEREIRA, A. C. A.; GARCIA, M. L. Efeitos da disposição de lodo de estações de tratamento de efluentes (ETE) de indústria alimentícia no solo: estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 1-8, 2016.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

SAMPAIO, T. F.; GUERRINI, I. A.; OTERO, X. L.; VAZQUEZ, F. M.; BOGIANI, J. C.; OLIVEIRA, F. C.; GAVA, J. L.; CIOL, M. A.; LITCKE, K. M.; HARRISON, R. B. The impact of biosolid application on soil and native plants in a degraded Brazilian Atlantic rainforest soil. **Water Air Soil Pollut**, v. 227, n.1, p. 1-9, 2016.

SANTAROSA, E.; PENTEADO Jr., J. P.; GOULART, I. C. G. R (Eds.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. 138p.

SAS INSTITUTE INC. SAS University Edition: installation guide for Windows Cary: SAS Institute. Version 9.4. Cary, 2014.

SILVA, F. C.; ABREU, M. F.; PÉREZ, D. V.; EIRA, P. A.; ABREU, C. A.; RAIJ, B. V.; GIANELLO, C.; COELHO, A. M.; QUAGGIO, J. A.; TEDESCO, M. J.; SILVA, C. A.; BARRETO, W. O. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009, p. 107-189.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO/NÚCLEO ESTADUAL PARANÁ (SBCS/NEPAR). **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR, 2017. 482 p.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008.

TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESB, 2001. p. 133-180.

VIEIRA, G. D.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V. Atributos microbianos do solo após a adição de lodo anaeróbio da estação de tratamento de efluentes de parboilização do arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 543-550, 2011.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de lodos de efluentes agroindustriais promoveu efeitos benéficos no desenvolvimento inicial da cultura de *E. urograndis*, influenciou os teores foliares de nutrientes e incrementou os atributos químicos relacionados à fertilidade do solo.

Melhores resultados foram encontrados com o uso de LSLI, que apresentou valores adequados para os teores foliares de macro e micronutrientes, maiores incrementos de parâmetros morfológicos e resultados positivos quanto à fertilidade do solo.

Resultados satisfatórios também foram observados com a aplicação de LTL, sendo que a aplicação em cobertura proporcionou resultados mais adequados quanto aos atributos químicos do solo e maiores teores de P no tecido vegetal.

Para os lodos secundário e terciário de laticínio, recomenda-se a aplicação de doses entre 30 e 40 t ha⁻¹.

A aplicação de LPAI resultou em deficiência nutricional de K e baixos teores do elemento no solo, o que ocasionou efeitos negativos sobre os parâmetros morfológicos do eucalipto nas maiores doses testadas; motivo pelo qual, recomenda-se o uso de doses entre 17 e 27 t ha⁻¹.

Baixos teores de K no solo, também foram observados com a aplicação de LSL e LTL incorporados, embora não tenham sido observados efeitos negativos no crescimento inicial da cultura. Assim, recomenda-se a suplementação mineral de K na aplicação incorporada de LPA, LSL e LTL.

Os teores de Pb, Cd, Cr e Cu estão abaixo do limite de investigação para áreas agrícolas, portanto, os resíduos podem ser utilizados de maneira ambientalmente segura nas doses avaliadas de 10 a 40 t ha⁻¹.