

DARIANE PRISCILA FRANCO DE OLIVEIRA

**APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA E LODO E SEU IMPACTO SOBRE O
DESENVOLVIMENTO INICIAL DE *Eucalyptus urophylla***

Botucatu

2020

DARIANE PRISCILA FRANCO DE OLIVEIRA

**APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA E LODO E SEU IMPACTO SOBRE O
DESENVOLVIMENTO INICIAL DE *Eucalyptus urophylla***

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutora em
Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Fernando Broetto

Botucatu

2020

O48a

Oliveira, Dariane Priscila Franco de

Aplicação de água residuária e lodo e seu impacto sobre o desenvolvimento inicial de *Eucalyptus urophylla* / Dariane Priscila Franco de Oliveira. -- Botucatu, 2020

92 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Fernando Broetto

1. Adubação orgânica. 2. Biossólido. 3. Silvicultura. 4. Bioquímica vegetal. 5. Nitrato Redutase. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA E LODO E SEU IMPACTO SOBRE O DESENVOLVIMENTO INICIAL DE *Eucalyptus urophylla*.

AUTORA: DARIANE PRISCILA FRANCO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: FERNANDO BROETTO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. FERNANDO BROETTO (Participação Virtual)
Química e Bioquímica / Instituto de Biociências de Botucatu – UNESP



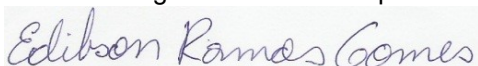
Prof.^a Dr.^a MAGALI RIBEIRO DA SILVA (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Pesquisadora Dr.^a MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu – UNESP



Pesquisador Dr. ARMANDO REIS TAVARES (Participação Virtual) Fruticultura / Instituto Agrônômico de Campinas



Prof. Dr. EDILSON RAMOS GOMES (Participação Virtual)
Engenharia Agrônômica / Faculdades Integradas de Bauru

Botucatu, 14 de dezembro de 2020

Aos meus amados pais,

Onaide e João

Ao meu noivo Felipe

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda ciência, toda vida, toda verdade e amor. Ele que é meu amado e grande amigo, que sempre abençoou o esforço de minhas buscas pessoais e profissionais, forneceu luz para meus passos e consolos para meus cansaços.

A Virgem Maria por seu amparo maternal.

Ao meu amado pai João que me ajudava com as tarefas de matemática, apontava meus lápis de escrever e colorir, costurava minha mochila quando rasgava e que com sabedoria e rigidez dizia que meu êxito dependeria de meu esforço. Esforço que, no entanto, também foi dele e de minha mãe.

A minha rainha e mãe Oneide que me ensinou as primeiras letras, o amor por ler e escrever poemas, e facilitou toda minha caminhada intelectual com seu serviço, prontidão e ternura.

Ao meu futuro marido Felipe que incansavelmente acompanhou diariamente como vivi cada pedaço desta pesquisa. Ele que foi meu apoio e minha estabilidade diante dos desafios que são próprios da condução de um doutorado e o primeiro a vibrar com os êxitos alcançados. Que sejamos sempre assim, vivendo um pelo outro.

Aos meus irmãos Claudinho, Diana, Débora e João Neto que me incentivam a dar o melhor de mim e foram meus primeiros exemplos de comprometimento profissional.

Em especial à minha irmã Diana e cunhado Márcio por me concederem o privilégio de viver em um lar tão amoroso e acolhedor durante esses anos de mestrado e doutorado.

Ao meu orientador Fernando Broetto pelos ensinamentos, prestatividade e auxílio no enriquecimento desta pesquisa.

A todos meus amigos do laboratório de bioquímica: Mara, Tamiris, Osvaldir, Ícaro, Tatiana, Alessandro, Luzma, Enrique e Irineu que me forneceram ajuda técnica e intelectual, sem a qual esta pesquisa seria quase impossível de ser realizada. Agradeço também por tantos risos e experiências compartilhadas em meio a seriedade das atividades acadêmicas.

A todos os colaboradores da Faculdade de Ciências Agrônômicas e Instituto de Biotecnologia de Botucatu que direta ou indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho.

Ao programa de Pós Graduação em Agronomia: Energia na Agricultura.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Põe um motivo sobrenatural na tua atividade profissional de cada dia, e terás santificado o teu trabalho.”

JOSÉMARIA ESCRIVÁ. **Caminho**. Tradução de Alípio Maia de Castro. 12. ed. São Paulo: Quadrante, 2019, p. 119.

RESUMO

O uso do lodo de esgoto e água de reúso como fonte de nutrientes e suprimento hídrico para o desenvolvimento de plantas de eucalipto pode representar a possibilidade de manter ou elevar a produtividade dessa espécie. Além disso, propiciar uma finalidade mais adequada para os resíduos urbanos promovendo a reciclagem dos nutrientes. O presente ensaio teve como objetivo avaliar o potencial nutricional da água de reúso e de lodo de esgoto no desenvolvimento inicial de eucalipto. A água de reúso e o lodo foram produzidos a partir de efluentes domésticos da cidade de Botucatu (SP) - Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da SABESP. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, composto por 4 tratamentos e 5 blocos, sendo cada parcela composta por 10 vasos com uma planta por vaso, totalizando 50 vasos por tratamento. O experimento foi organizado em ambiente protegido. Os tratamentos se constituíram de diferentes fontes de nutrientes para as plantas de *Eucalyptus urophylla*, sendo que no controle (NPK) foi aplicado fertilizante mineral na dose recomendada para a cultura. Os demais tratamentos receberam nutrição via água de reúso (AR) e lodo de esgoto estabilizado nas proporções de 25 (L25) e 50% (L50) do volume do vaso de cultivo. As avaliações foram realizadas a partir da coleta de variáveis biométricas, bioquímicas e fisiológicas executadas em frequência mensal, durante 120 dias após o plantio. Ao final do experimento foram realizadas análises de biomassa, bioquímicas (açúcares totais e fenóis totais) e teor de macro e micronutrientes nas folhas, caule e raiz das plantas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Foram elaboradas correlações entre as variáveis, com auxílio da técnica de análise multivariada de componentes principais (PCA). As plantas dos tratamentos L25 e L50 apresentaram maior desenvolvimento biométrico, com destaque para altura, diâmetro de colo, área foliar e biomassa. As plantas do tratamento AR apresentaram parâmetros biométricos satisfatórios em relação ao tratamento NPK. Todos os tratamentos induziram ao acúmulo de pigmentos, quando comparado às plantas do controle. O lodo aplicado (L25 e L50) promoveu maiores concentrações de N, P, S e Zn além de aumentar as concentrações de açúcares totais. Plantas fertilizadas com NPK apresentaram maiores teores de K nos tecidos da folha e raiz. A atividade da enzima Nitrato redutase em folhas de eucalipto foi incrementada pelo uso do lodo (L25 e L50). A atividade fotossintética também foi responsiva em relação à aplicação do lodo,

diferindo-se conforme a proporção utilizada. Em conclusão, a aplicação de água de reuso foi satisfatória para o desenvolvimento inicial de plantas de *Eucalyptus urophylla*. A aplicação lodo de esgoto (L25 e L50) melhorou significativamente os parâmetros morfológicos, fisiológicos e nutricionais das plantas de *Eucalyptus urophylla* em relação demais tratamentos. A alta disponibilidade de P nos tratamentos com lodo foi o principal fator a promover maior desempenho em crescimento das plantas de *Eucalyptus urophylla*.

Palavras-chave: adubação orgânica; bio sólido; silvicultura; bioquímica vegetal; nitrato redutase.

ABSTRACT

The use of sewage sludge and reuse water as a source of nutrients and hydric supply for the development of eucalyptus plants may represent the possibility of maintaining or increasing the productivity of this species. In addition, providing a more suitable purpose for urban waste by promoting the recycling of nutrients. The present research aimed to evaluate the nutritional potential of reuse water and sewage sludge in the initial development of eucalyptus. The reuse water and sludge were produced from domestic effluents from the city of Botucatu (SP) - Sewage Treatment Station (ETE) of SABESP. The experimental design was in randomized blocks, composed of 4 treatments and 5 blocks, each plot consisting of 10 pots with one plant per pot, totaling 50 pots per treatment. The experiment was organized in a protected environment. The treatments consisted of different sources of nutrients for the *Eucalyptus urophylla* plants, and in the control (NPK) mineral fertilizer was applied at the recommended dose for the crop. The other treatments received nutrition by way of reuse water (AR) and stabilized sewage sludge in the proportions of 25 (L25) and 50% (L50) of the volume of the culture pot. The evaluations were performed based on the collection of biometric, biochemical and physiological variables performed on a monthly basis, during 120 days after planting. At the end of the experiment, biomass, biochemical analyzes (total sugars and total phenols) and macro and micronutrient content in the leaves, stem and root of the plants were performed. The data obtained were subjected to analysis of variance and the means compared by the Tukey test at 5% probability. Correlations between the variables were elaborated, with the aid of the principal component multivariate analysis (PCA) technique. The plants of treatments L25 and L50 showed greater biometric development, with emphasis on height, neck diameter, leaf area and biomass. The AR treatment plants showed satisfactory biometric parameters in relation to the NPK treatment. All treatments induced the accumulation of pigments, when compared to the control plants. The applied sludge (L25 and L50) promoted higher concentrations of N, P, S and Zn in addition to increasing the concentrations of total sugars. Plants fertilized with NPK showed higher levels of K in the leaf and root tissues. The activity of the enzyme Nitrate reductase in eucalyptus leaves was increased by the use of sludge (L25 and L50). Photosynthetic activity was also responsive in relation to the application of sludge, differing according to the proportion used. In conclusion, the application of reuse water was satisfactory for the initial development of *Eucalyptus urophylla* plants. The application of sewage sludge (L25

and L50) significantly improved the morphological, physiological and nutritional parameters of those of *Eucalyptus urophylla* plants in relation to other treatments. The high availability of P in the sludge treatments was the main factor to promote greater growth performance of *Eucalyptus urophylla* plants.

Keywords: organic nutrition; biosolid; forestry; plant biochemistry; nitrate reductase.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Visão geral da área experimental..... 33
- Figura 2 - Temperatura do atmosférica (°C) máxima, média e mínima no interior da estufa agrícola durante o período experimental34
- Figura 3 - Umidade relativa (%) atmosférica máxima, média e mínima no interior da estufa agrícola durante o período experimental 35
- Figura 4 - Curva de retenção de umidade do solo..... 39
- Figura 5 - Curva de retenção de umidade do solo com adição de 25% de lodo ao volume do vaso 40
- Figura 6 - Curva de retenção de umidade do solo com adição de 50% de lodo ao volume do vaso 40
- Figura 7 - Crescimento em altura de plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)..... 49
- Figura 8 - Crescimento em diâmetro de colo de plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5).....49
- Figura 9 - Perda de eletrólitos (PE) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)..... 52
- Figura 10 - Clorofila a (Cl a) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5) 53
- Figura 11 - Clorofila b (Cl b) de plantas em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)..... 54
- Figura 12 - Concentração de carotenoides (Car) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)..... 55
- Figura 13 - Atividade da nitrato redutase (NR) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)..... 57

Figura 14 - Conteúdo relativo de água (CRA) em plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas a diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5).....	59
Figura 15 - Potencial hídrico foliar (ψ_{hf}) em plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)	60
Figura 16 - Fotossíntese líquida (A) de plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5).....	61
Figura 17 - Condutância estomática (gS) em plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5).....	61
Figura 18 - Concentração interna de carbono nas células (C_i) em plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas a diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)	62
Figura 19 - Transpiração (E) em plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i> submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo. Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)	63
Figura 20 - Agrupamento dos tratamentos considerados (NPK, AR, L25 e L50) pela análise dos componentes principais. Correlacionando-se as variáveis altura (H), diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), massa seca foliar (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca radicular (MSR), SLA (Specific Leaf Area), LWR (Leaf Weight Ratio), LAR (Leaf Area Ratio), perda de eletrólitos (PE), clorofila a (Cl a), clorofila b (Cl b), carotenoides (Car), nitrato redutase (NR), teor de fenóis, açúcares totais (AT), conteúdo relativo de água (CRA), potencial hídrico (ψ_{hf}), fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs), concentração interna de carbono nas células (C_i) e transpiração (E).....	73
Figura 21 - Dispersão dos tratamentos considerados (NPK, AR, L25 e L50) pela análise dos componentes principais de acordo com as concentrações de macro e micronutrientes na folha, caule e raiz das plantas de <i>Eucalyptus urophylla</i>	75

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Características químicas do solo puro e do solo com adição de 25% e 50% de lodo de esgoto ao volume do vaso. 36
- Tabela 2 - Caracterização química do lodo de esgoto puro 36
- Tabela 3 - Análise química, física e microbiológica da água de reúso (após tratamento secundário)..... 38
- Tabela 4 - Altura (H), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais 47
- Tabela 5 - Massa seca foliar (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca radicular (MSR), massa seca total (MST), área foliar específica (SLA), fração da biomassa total alocada nas folhas (LWR) e relação da superfície foliar (LAR) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais 50
- Tabela 6 - Perda de eletrólitos (PE), clorofila a (Cl a), clorofila b (Cl b), carotenoides (Car), atividade da enzima nitrato redutase (NR), teor de fenóis, e açúcares totais (AT) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais 51
- Tabela 7 - Conteúdo relativo de água (CRA), potencial hídrico (ψ_{hf}), fotossíntese líquida (A; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de carbono nas células (Ci; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e transpiração (E; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais 59
- Tabela 8 - Concentração de macro e micronutrientes nas folhas *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais .. 63
- Tabela 9 - Concentração de macro e 23,00 mg L⁻¹ micronutrientes no caule *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais 68
- Tabela 10 - Concentração de macro e micronutrientes na raiz *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais..... 70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	EUCALIPTO.....	24
2.2	ÁGUA DE REÚSO.....	25
2.3	LODO DE ESGOTO.....	29
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	33
3.2	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA ESPÉCIE UTILIZADA.....	35
3.4	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	35
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO.....	36
3.6	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA RESIDUÁRIA.....	37
3.7	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO E MANEJO HÍDRICO.....	38
3.8	PARÂMETROS DE CRESCIMENTO.....	40
3.9	BIOMASSA.....	41
3.10	ÍNDICES DE CRESCIMENTO.....	41
3.11	TEOR DE NUTRIENTES EM TECIDO VEGETAL.....	42
3.12	TROCAS GASOSAS.....	42
3.13	POTENCIAL HÍDRICO.....	43
3.14	CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA.....	43
3.15	TEOR DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS.....	44
3.17	ANÁLISE ENZIMÁTICA.....	45
3.18	PREPARO DO MATERIAL VEGETAL PARA DETERMINAÇÃO FENÓIS E AÇÚCARES ...	45
3.19	TEOR DE FENOIS.....	46
3.20	TEOR DE AÇÚCARES TOTAIS.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1	VARIÁVEIS DE CRESCIMENTO.....	47
4.2	VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS.....	51
4.3	VARIÁVEIS NUTRICIONAIS.....	63
4.4	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.....	72
5	CONCLUSÕES.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

A poluição de corpos hídricos, a destruição de ecossistemas, as extensas áreas ocupadas por aterros sanitários, dentre outros fatores relacionados a disposição inadequada de resíduos, têm despertado o interesse de grupos dos setores público e privado em elaborar práticas mais sustentáveis, principalmente sob o ponto de vista ambiental.

O aproveitamento de qualquer tipo de resíduo traz em si o benefício de redução do descarte. Todavia o desafio está em utilizar os mais diversos resíduos gerados pelas indústrias e pela população inserindo-os novamente na cadeia produtiva e adequando-os aos usos mais viáveis técnica, econômica e ambientalmente.

O crescimento populacional promoveu o aumento do volume de efluentes (QADIR et al., 2010) e resíduos sólidos domésticos gerados pelas estações de tratamento de esgoto - ETEs (TASSO JÚNIOR et al., 2007). A partir desta abordagem, são necessárias práticas e estudos que possibilitem a reciclagem desses recursos, a fim de evitar que os mesmos sejam fontes de poluição ambiental. Uma opção a ser considerada é a aplicação em cultivos florestais, como recurso hídrico e nutricional. Espécies florestais são caracterizadas por longos ciclos de desenvolvimento de um amplo sistema radicular capaz de absorver grandes quantidades de nutrientes. A aplicação de resíduos urbanos na silvicultura pode trazer os benefícios da reciclagem destes nutrientes immobilizando-os por maior tempo nestas plantas com menor risco a saúde humana, uma vez que o principal objetivo dos plantios comerciais é o abastecimento da indústria madeireira.

Os plantios florestais do gênero *Eucalyptus* são responsáveis por 72% da área de reflorestamentos no Brasil (IBA, 2019). As espécies e híbridos deste gênero são amplamente utilizadas como matéria prima para diversos fins comerciais como celulose, papel, madeira para construção civil, painéis de madeira industrializados, lenha, carvão vegetal, briquetes e cavacos. O sucesso deste cenário deve-se à modernização do setor florestal a partir de práticas silviculturais e melhoramento genético. Diante da relevância do gênero *Eucalyptus* é importante desenvolver ou

aprimorar técnicas de manejo relacionadas ao uso de resíduos urbanos como fonte nutricional para impulsionar a eucaliptocultura.

A água residuária assim como o lodo provenientes das ETEs são ricos em macro e micronutrientes (QUINTANA et al., 2011; RODRIGUES et al., 2009a; SHARMA et al., 2017) essenciais às plantas, apresentando potencial para contribuir com o desenvolvimento vegetal. Estudos têm mostrado resultados positivos em relação ao ganho de biomassa de espécies florestais sob aplicação de efluentes e resíduos domésticos (LEILA et al., 2017; MINHAS et al., 2015; MARINHO et al., 2013; SILVA et al., 2012; SOUZA et al., 2011).

A água de reúso contém quantidades significativas de nitrogênio, fósforo e potássio (N, P e K) que podem suprir em partes a demanda nutricional de plantas (Rodrigues et al., 2009a). Além disso, a água é o recurso mais limitante para a produtividade vegetal (TAIZ e ZEIGER, 2009). Portanto, a água de reúso ao dispor para as plantas o benefício da hidratação fornece também nutrientes, podendo propiciar maiores ganhos em biomassa.

Considerado nas cidades como resíduo sólido altamente problemático, o lodo de esgoto é rico em matéria orgânica e nutrientes, sendo que, no Brasil sua destinação comum é o descarte em aterros sanitários (CABREIRA et al., 2017), podendo representar até 50% do custo operacional de uma estação de tratamento de esgoto (COSCIONE et al., 2010). Após tratado e estabilizado o lodo de esgoto recebe o nome de bio sólido e demonstra capacidade de atender a demanda nutricional de plantas.

O uso agrícola e florestal do lodo ou bio sólido pode ser uma alternativa interessante, tanto para os geradores do bio sólido, que passam a dispor seu resíduo de forma mais sustentável, como para os receptores, que passam a receber um material rico em nutrientes e matéria orgânica em quantidade e com baixo custo (ABREU et al., 2019). A aplicação do bio sólido promove alterações físicas, químicas e biológicas no solo (SILVA, 2019). Diversas pesquisas discorrem sobre as possibilidades de uso do bio sólido como substrato, condicionador de solo e fertilizante em plantios florestais (ABREU et al., 2019; ABREU et al., 2017; IBRAHIM et al., 2019; USMAN et al., 2012; SONG e LEE, 2010; AFÁZ et al., 2016; LEILA et al., 2017).

Diante desta perspectiva, a aplicação de lodo de esgoto da água de reúso em plantios florestais pode favorecer a consolidação de práticas mais sustentáveis, uma

vez que estes resíduos demonstram alto potencial para nutrição de plantas possibilitando uma economia com insumos e a destinação segura de resíduos gerados a partir de efluentes urbanos.

A hipótese do trabalho é de que o desenvolvimento até os 120 dias de plantas do híbrido de *Eucalyptus urophylla* tratadas com lodo de esgoto e água de reúso seja superior ao desenvolvimento das plantas adubadas com fertilizantes minerais convencionais.

Para responder a esta hipótese o objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso do lodo de esgoto e da água de reúso como fonte de nutrientes para plantas em substituição a fertilizantes inorgânicos no desenvolvimento plantas de *Eucalyptus urophylla*, a partir de variáveis biométricas, bioquímicas, fisiológicas e nutricionais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eucalipto

Detentor de uma vasta área de florestas nativas e florestas plantadas de alta produtividade, o Brasil destaca-se no cenário mundial com 7,8 milhões de hectares de reflorestamentos em 2015, haja vista que os plantios de eucalipto são responsáveis por aproximadamente 72% desse total (IBÁ, 2019).

O gênero *Eucalyptus* é pertencente à família Mirtaceae (TRUGILHO et al., 1996) e apresenta mais de 800 espécies que ocorrem naturalmente na Austrália, Papua-Nova Guiné, Timor Leste, Indonésia e Filipinas, ocupando regiões tropicais e temperadas com condições climáticas distintas, gerando espécies com morfologia complexa e variável (FLORES et al., 2016). Muitas dessas espécies são cultivadas mundialmente em função de seu rápido crescimento, potencial de adaptabilidade e alta produtividade (ZHANG et al., 2015).

Os primeiros relatos relevantes de plantios de eucalipto para fins industriais no Brasil ocorreram início do século XX para atender à demanda madeireira da antiga Companhia Paulista de Estradas de Ferro, onde o pesquisador Edmundo Navarro de Andrade desenvolveu estudos científicos precursores sobre o gênero (ANDRADE, 1939). Paulatinamente, os plantios foram expandidos para propriedades rurais visando atender a demanda siderúrgica na década de 1940 e de papel e celulose em meados de 1950 (FLORES et al., 2016).

Dentre os principais seguimentos industriais brasileiros responsáveis pelo plantio de eucalipto destacam-se papel e celulose (61%), painéis de madeira industrializados (25%) e produtos sólidos de madeira (8%) (IBÁ, 2019).

Na década de 60 a produtividade média dos plantios de eucalipto era de 10 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (GONÇALVES et al., 2008), hoje este valor é de aproximadamente 41 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (ABRAF, 2013). Esse acréscimo deve-se ao avanço das técnicas de melhoramento genético e silviculturais que incluem: preparo do solo, fertilização, controle de pragas, plantas daninhas e doenças (BINKLEY e STAPE, 2004; PALLET e SALE, 2004).

Exigente na demanda de água e nutrientes (ZHAO et al., 2013) e geralmente plantados em solos de baixa fertilidade (SILVA et al., 2012b), o eucalipto quando

cultivado sob manejos hídrico e nutritivo adequados obtêm alta eficiência no uso da luz, gerando assim maior produtividade (WHITEHEAD e BEADLE, 2004).

A fertilização em plantios de eucalipto pode trazer alterações até mesmo em níveis anatômicos, podendo refletir na densidade e produtividade da madeira (BARREIROS et al., 2007). Estima-se que a fertilização é responsável por ganhos entre 30 e 50% na produção de madeira (BAZANI et al., 2016).

Um estudo feito por Stape et al. (2010), demonstrou que plantios de eucalipto sem fertilização e irrigação apresentaram incremento anual médio de madeira inferior aos plantios devidamente adubados e irrigados, em contrapartida, a aplicação de taxas muito altas de fertilizantes em relação às comumente utilizadas não promoveram maior incremento anual médio significativo dos plantios.

Os fertilizantes podem ser de fonte mineral ou orgânica, ambos são eficientes em plantios com espécies do gênero *Eucalyptus* (BARREIROS et al., 2007). A aplicação de fertilizantes minerais é responsável por aproximadamente 25% do custo dos plantios de eucalipto (BAZANI et al., 2016), sendo assim, vem sendo avaliada a aplicação de fontes alternativas de fertilizantes, como por exemplo o lodo de esgoto, que tem se mostrado uma alternativa de fertilizante orgânico viável (BARREIROS et al., 2007), pois além da produtividade da planta, a fertilização deve estar ajustada ao menor custo sem afetar negativamente o meio ambiente (SILVA et al., 2013).

Para elevar ou manter a produtividade do eucalipto é imprescindível aplicar técnicas de fertilização, compreender o processo de ciclagem de nutrientes (GAMA-RODRIGUES et al., 2005), a dinâmica nutricional de cada espécie (ZAIA e GAMA-RODRIGUES, 2004) e concomitantemente, atender às perspectivas econômico-financeiras e ambientais.

2.2 Água de reúso

Em função da atual escassez de água de qualidade adequada para os diversos fins de consumo no Brasil, faz-se necessário o uso de recursos hídricos alternativos para atender a alta demanda de água tanto em ambientes urbanos, quanto rurais (SILVA et al., 2014; TOZE, 2006). Além das regiões áridas e semiáridas, muitas áreas com recursos hídricos abundantes tornaram-se insuficientes devido ao

aumento populacional, atividades produtivas e degradação dos corpos hídricos. Tais fatores resultam em conflitos de uso e restrições de consumo que afetam a economia e a qualidade de vida no país (HESPANHOL, 2002; SILVA et al., 2012).

A urbanização, melhorias na qualidade de vida, o desenvolvimento econômico junto ao crescimento da população promoveu o aumento do volume de efluentes domésticos gerados pelas estações de tratamento (QADIR et al., 2010). Estes efluentes geralmente contêm grande quantidade de patógenos e compostos orgânicos sintéticos que trazem risco a saúde humana. Os sistemas de tratamento que possibilitariam o consumo humano destes efluentes seria economicamente custoso para abastecimento público (HESPANHOL, 2002). A disponibilidade e o uso de águas residuais para irrigação aumentaram à medida que a disponibilidade de outras águas de irrigação se tornou mais limitada e a disposição das águas residuais em cursos de água se tornou mais restrita (ARIENZO et al., 2019).

No Brasil, o reúso da água tem sido investigado e aplicado em pequena escala em diversos setores rurais e urbanos (OLIVEIRA et al. 2019). A utilização de água residuária tratada, principalmente no que diz respeito à água para irrigação, surge como um instrumento capaz de restaurar o equilíbrio entre oferta e demanda de hídrica em diversas regiões brasileiras (HESPANHOL, 2002; NASCIMENTO; FIDELES FILHO, 2015), pois os requisitos necessários ao tratamento desta água para uso em culturas agrícolas e florestais são menores devido ao menor potencial de contato humano (TOZE, 2006). Espera-se que a água para reúso ganhe importância crescente, exigindo uma consideração cuidadosa envolvendo o equilíbrio adequado entre os insumos nutricionais via irrigação e os requisitos de produtividade ideal da planta (HASHISH et al., 2017).

O Ministério do Meio Ambiente na Resolução 54, artigo 2 (BRASIL, 2005) estabelece as seguintes definições a respeito do reúso de águas:

- I - Água residuária: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não;
- II – Reúso de água: utilização de água residuária;
- III - Água de reúso: água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas.

O emprego da água de reúso na agricultura e silvicultura possibilita a reciclagem de nutrientes, aumento da fertilidade do solo, a redução do uso de

fertilizantes comerciais, maior desenvolvimento vegetal, redução do consumo de água potável adequada para fins mais nobres e redução da disposição de efluentes nos corpos d'água receptores (AGRAFIOTI; DIAMADOPOULOS, 2012; HOEK et al., 2002; MARINHO et al., 2014; NASCIMENTO; FIDELES FILHO, 2015; RODRIGUES et al., 2009a).

A adubação é fundamental para que as plantações florestais alcancem níveis adequados de crescimento e produtividade (PEREIRA et al., 2012). Nesse sentido, a água de reúso contém quantidades significativas de nitrogênio, fósforo e potássio (N, P e K) e capacidade de elevar o pH do solo, em função de sua alta alcalinidade, (Rodrigues et al., 2009a). O potássio que é essencial para a ativação enzimática, síntese de proteínas e fotossíntese (ALMEIDA et al., 2010), possui alta solubilidade em água (ZABOTTO et al., 2019), portanto é comumente encontrado em quantidades significativas nas águas residuárias corroborando o potencial de uso desta água na nutrição de plantas. A concentração de potássio em efluentes de fontes de águas residuais domésticas varia entre 10 e 30 mg L⁻¹ (ARIENZO et al., 2009).

Irrigar plantios florestais não é uma técnica utilizada em larga escala no Brasil, todavia, sua aplicação tem contribuído positivamente na produção de biomassa florestal. Para que uma floresta de eucalipto tenha produções significativas, um dos procedimentos aplicáveis é a irrigação que tem, por objetivo, o fornecimento controlado de água para plantas em quantidade suficiente e no momento certo, complementando a precipitação natural (FERNANDES et al. 2012). Em uma pesquisa conduzida com plantas de eucalipto dos 7 aos 17 meses após o plantio, foi verificado que as plantas dos tratamentos com irrigação por gotejamento e microaspersão apresentaram maior altura de plantas, diâmetro do caule, área basal do caule e volume de caule por hectare (JUNG et al., 2017).

Um estudo que avaliou o crescimento potencial de plantações clonais de eucalipto em oito locais diferentes no Brasil, atestou que a irrigação elevou em 30% o incremento médio anual dos plantios, sendo a água o fator mais limitante na produtividade de madeira (STAPE et al., 2010).

A fertirrigação é uma técnica que consiste em aliar a adubação e irrigação, esta combinação potencializa o crescimento das culturas florestais, visto que a fertirrigação aumenta a condução dos nutrientes às raízes (PEREIRA et al., 2019). O estudo de Fernandes et al. (2012) demonstrou que houve maiores valores biométricos

e incremento médio anual em plantas de eucalipto que receberam fertirrigação nos cinco anos iniciais do plantio.

A irrigação de espécies florestais é benéfica para a reciclagem e utilização de águas de reúso por conservar a energia de nutrientes em biomassa, aumentando assim a produção de madeira e promovendo saneamento ambiental e a eco restauração (MINHAS et al., 2015). Sousa et al. (2011), demonstraram que a produtividade e o teor de óleo das sementes de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) foram afetados positiva e significativamente com a aplicação de água de reúso. No cultivo de espécies de eucalipto, cuja produção de madeira em plantas que receberam água de reúso foi superior quando comparadas às plantas que não receberam este tipo de água (MARINHO et al., 2014; MINHAS et al., 2015).

Pesquisas com culturas agrícolas também têm evidenciado resultados favoráveis à nutrição vegetal sob aplicação de águas de reúso como na cultura do cafeeiro (MEDEIROS et al., 2008), pimentão (*Capsicum annuum* L.), (SOUSA et al., 2006), algodão colorido (BEZERRA et al., 2005), mamoneira (*Ricinus communis* L.) (RODRIGUES et al., 2009b), feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) (SOUZA et al., 2015) e alface (*Lactuca sativa* L.) (SANDRI et al., 2006).

Embora a utilização da água de reúso possa auxiliar na nutrição das plantas, a alta concentração de nutrientes como carbono (C) e nitrogênio (N) podem causar efeitos indesejados por meio da atividade e crescimento microbiano demasiados no solo (TOZE, 2006), e prejudicar o desenvolvimento vegetal, como verificado no estudo de Leal et al. (2010), em que a quantidade de N presente na água de reúso no cultivo de cana de açúcar foi excessiva em relação à demanda da cultura.

Outra limitação relativa ao uso de águas residuárias, é que este efluente tem comumente um alto teor de sódio e outros compostos salinos que são de difícil remoção, podendo levar à salinização dos solos e prejudicar o desenvolvimento das plantas (AYERS; WESTCOT, 1991; RODRIGUES et al., 2009a; TOZE, 2006). Araújo et al. (2016) constataram que o estado nutricional de mudas de *Enterolobium contortsiliquum* foi comprometido em função do desbalanceamento nutricional da água residuária com a qual foram irrigadas.

O Brasil demonstra capacidade de ampliar o reúso da água nas diversas atividades previstas na legislação (OLIVEIRA et al., 2019), todavia, torna-se necessário adequar a aplicação das águas de reúso e desenvolver metodologias para

viabilizar este reúso de acordo com a sensibilidade de cada espécie avaliada, levando em consideração também, a variação da composição dessas águas.

2.3 Lodo de esgoto

A grande quantidade de águas residuárias e resíduos sólidos gerados pelo aumento da população e pelo constante desenvolvimento industrial (TASSO JÚNIOR et al., 2007), tem se tornado um dos principais problemas ambientais, no que diz respeito ao descarte desses resíduos.

No relatório referente ao ano de 2018, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) constatou que apenas 45,4 % do esgoto gerado no Brasil é tratado (BRASIL, 2019). Conforme estimativas do Instituto Trata Brasil (2017), referentes às capitais brasileiras, um volume aproximado de 1,2 bilhão de m³ de esgoto foi lançado nos corpos hídricos em 2013 sem nenhum tratamento. Destarte, o tratamento do esgoto e a destinação adequada dos resíduos gerados tornam-se requisitos fundamentais para melhoria das condições ambientais (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

O material coletado pelas estações de tratamento de água (ETAs) passa por procedimentos de coagulação, floculação, sedimentação, decantação e filtração (BITTENCOURT et al., 2012; ANDREOLI, 2001), que possibilitam o retorno de água ao ambiente, gerando um resíduo sólido denominado lodo de esgoto (QUINTANA et al., 2011).

A disposição final adequada do lodo em uma ETA pode custar até 50% do orçamento operacional do sistema de tratamento (BETTIOL e CAMARGO, 2000). Surge assim, o interesse de promover destinações úteis e economicamente viáveis para este resíduo. Entre as opções disponíveis tem-se a incineração, aterro sanitário, disposição superficial (VIEIRA et al., 2011), deposição oceânica e florestal e a utilização como fertilizante de plantas (QUINTANA et al., 2011). Segundo Guoqing et al. (2019) a aplicação lodo de esgoto em áreas florestais é mais barata do que outros métodos de eliminação deste resíduo.

O lodo quando tratado e estabilizado, por meio de processos químicos e biológicos, é chamado de biossólido (OLIVEIRA, 2017; DORES-SILVA, 2011). A necessidade de estabilização do lodo visa atenuar seus odores e seu conteúdo de microrganismos patogênicos (ANDREOLI, 2001).

Rico em macro e micronutrientes e matéria orgânica, o biossólido utilizado como fertilizante atua também como condicionador de solo, (LIRA et al., 2008) e sua utilização aumentou significativamente nos últimos anos (ABREU JUNIOR et al., 2019), pois confere aos solos maior capacidade de retenção de água e maior resistência à erosão (DORES-SILVA, 2011). O fósforo orgânico, presente no lodo de esgoto, constitui um importante reservatório de nutrição do eucalipto em solos altamente intemperizados (FOLTRAN et al., 2019), desse modo, a aplicação do lodo pode se tornar um estoque importante para suprir a demanda deste nutriente. Entretanto o lodo de esgoto é normalmente pobre em potássio, pois esse nutriente possui alta solubilidade em água e, dependendo da cultura, é necessário adicionar esse nutriente na fertilização (ZABOTTO et al., 2019).

Em recuperação de áreas degradadas o lodo e seus derivados proporcionam o rápido estabelecimento e crescimento da vegetação e melhor desenvolvimento radicular (BONINI et al., 2015), uma vez que o lodo apresenta decomposição lenta, disponibilizando gradualmente os nutrientes no solo (SILVA et al., 2012) diminuindo o risco de poluição ao meio ambiente (IBRAHIM et al., 2019).

Segundo Quintana et al. (2011), o uso deste material em substituição a fertilizantes industriais evita gastos econômicos e energéticos próprios dos mecanismos de fertilização do solo, pois a energia contida na composição do lodo que poderia ser aplicada na fertilidade do solo é perdida quando este é depositado em aterros sanitários com altos custos de manutenção.

Todavia, por ser altamente rico em nutrientes, o lodo apresenta também alto teor de metais pesados (DEDE e OZDEMIR, 2016), como o cobre (Cu), um dos metais pesados em maior proporção no lodo (MOSQUERA-LOSADA et al., 2016). Oliveira (2017), ressalta que para a reciclagem segura do lodo devem ser consideradas as condições do solo, a qualidade do lodo e a cultura agrícola pretendida.

De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na Resolução nº 375, há restrições de uso do lodo e seus derivados, as quais proíbem sua utilização em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, culturas inundadas, e culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo (CONAMA, 2006). Desta forma, o lodo pode ser usado sem maiores objeções, como fertilizante em espécies florestais, para recuperação de áreas degradadas, arborização urbana ou em reflorestamentos cujo foco é a geração de produtos não comestíveis como madeira e seus derivados, fibras e óleos essenciais. Portanto, não há risco para seres humanos ou animais se os contaminantes contidos no lodo forem incorporados na matriz da madeira (ABREU-JUNIOR, et al., 2017).

A aplicação do biossólido traz como benefícios a redução do descarte de lodo em aterros sanitários, incineradores, mares e corpos hídricos, ciclagem de nutrientes, teor de matéria orgânica no solo e redução de custos com o uso de fertilizantes minerais (AFÁZ et al., 2017).

O uso de lodo de esgoto é tecnicamente viável como fertilizante em plantações de eucalipto, sendo necessária fertilização adicional apenas em alguns casos, dependendo da origem do resíduo e da disponibilidade de nutrientes no solo (ZABOTTO, 2019). Estudos relatam efeitos benéficos à produtividade de plantios de eucalipto sob efeito da aplicação de lodo de esgoto. Afáz et al. (2017), demonstraram que tanto as plantas de *Eucalyptus urograndis* adubadas com fertilizante mineral como as plantas adubadas com lodo de esgoto apresentaram taxa relativa de crescimento semelhantes, corroborando o potencial de substituição do fertilizante comercial pelo lodo de esgoto.

Silva et al. (2012), constataram que a fertilização com aplicação de lodo em plantas de *Corymbia citriodora* promoveu incremento de biomassa foliar, óleo essencial e biomassa lenhosa. No cultivo de *Eucalyptus camaldulensis*, Leila et al. (2017), observaram que plantas sob aplicação do lodo obtiveram parâmetros biométricos aproximadamente 20% superiores quando comparadas às plantas adubadas convencionalmente, o mesmo estudo evidenciou que o tratamento com o lodo implicou em um aumento de 40% no número de folhas das plantas.

Estes efeitos positivos no cultivo de eucalipto estão relacionados ao aumento de matéria orgânica do solo e o nível de fertilidade, tendo maior disponibilidade de

nutrientes, principalmente N e P, aumentando a produtividade do eucalipto (ZABOTTO et al., 2019).

O uso do lodo em reflorestamentos como uma alternativa aos fertilizantes minerais pode ser mais interessante economicamente levando a uma produção adequada de biomassa florestal, além de incentivar o tratamento dos esgotos domésticos evitando que mais resíduos sejam lançados indevidamente no meio ambiente.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, composto por 4 tratamentos e 5 blocos, sendo cada parcela composta por 10 vasos com uma planta por vaso, totalizando 50 vasos por tratamento. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. Visando analisar a correlação entre as variáveis e variação entre os tratamentos foi gerada a análise multivariada de componentes principais (PCA), tendo como base as características avaliadas na pesquisa dos fatores referentes às duas primeiras componentes. Todas as análises foram feitas com auxílio do pacote estatístico Minitab 16.

Os tratamentos se constituíram de diferentes fontes de nutrientes para a planta, sendo:

- Fertilização com NPK;
- Água de reúso (AR);
- 25% do volume do vaso de lodo de esgoto (L25);
- 50% de volume do vaso com de lodo de esgoto (L50).

Figura 1 – Visão geral da área experimental



Foto: Dariane Priscila Franco de Oliveira - 2018

3.2 Descrição da área de estudo

A fase experimental da pesquisa ocorreu de fevereiro a junho de 2018, no Departamento de Química e Bioquímica do Instituto de Biociências-IBB/UNESP, Campus de Botucatu, SP, localizado nas coordenadas geográficas 22°53'42.4" de latitude Sul e 48°29'36.6" de longitude Oeste e aproximadamente 840 m de altitude, em estufa agrícola com 63 m² e pé direito de 3 metros.

O clima, segundo a classificação de Köeppen, é caracterizado como temperado quente e úmido, com verão chuvoso, inverno seco e com precipitação média anual de 1.428 mm. A temperatura média anual é de 20,3 °C, as maiores precipitações pluviométricas ocorrem entre os meses de dezembro a fevereiro e a estação seca entre os meses de junho a agosto (CUNHA; MARTINS, 2009).

A temperatura e umidade relativa do ar (UR) foram monitoradas por um *datalogger* situado no centro da estufa a uma altura de 1,5 m do solo programado para registrar leitura a cada 30 minutos.

Figura 2 – Temperatura do atmosférica (°C) máxima, média e mínima no interior da estufa agrícola durante o período experimental

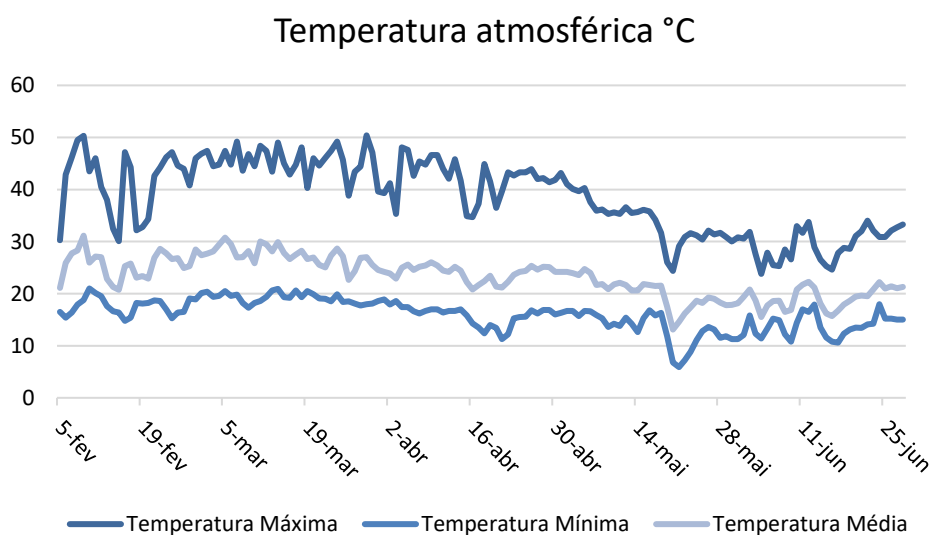
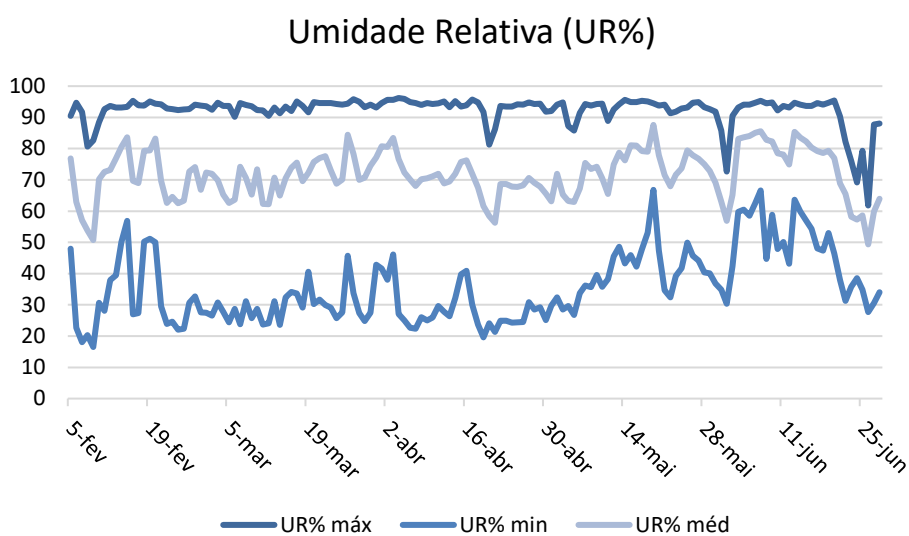


Figura 3 – Umidade relativa (%) atmosférica máxima, média e mínima no interior da estufa agrícola durante o período experimental



3.3 Caracterização da espécie utilizada

Amplamente plantado no Brasil, o material genético escolhido foi o híbrido denominado I 144 (*Eucalyptus urophylla* x *E. urophylla*), proveniente do viveiro de mudas Avaré, localizado no município de Avaré, SP. As mudas clonais foram plantadas aos 80 dias em vasos de polietileno com 30 cm de altura e capacidade volumétrica de 22 litros. O experimento teve duração de quatro meses que caracterizam o desenvolvimento inicial das plantas de eucalipto.

3.4 Caracterização do solo

O solo utilizado foi o Latossolo Vermelho Distrófico de textura franco arenosa coletado no município de São Manuel, SP, o qual variou em sua quantidade no vaso, conforme o tratamento aplicado (Tabela 1).

Após a análise química do solo natural, este recebeu 1,6 t ha⁻¹ de calcário agrícola (PRNT 70%) para fornecimento de Ca e Mg e correção de pH (Gonçalves, 1995) somente para os tratamentos com NPK e Água de reúso (AR).

O calcário foi aplicado ao tratamento AR porque embora a água de reúso apresente alto pH (6,25) e nutrientes, estes foram adicionados via irrigação ao longo do experimento. Desta forma, se optou por fazer a calagem neste tratamento para estabelecer um pH inicial semelhante aos demais tratamentos. Os tratamentos com lodo de esgoto não receberam calcário, visto que o lodo foi o suficiente para elevar o pH do meio (tabela 1).

Para adubação do tratamento NPK foram usados: ureia, superfosfato simples, cloreto de potássio, borax e sulfato de zinco (60 kg ha⁻¹ de N, 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 80 kg ha⁻¹ de K₂O, 1 kg ha⁻¹ de B e 1,5 kg ha⁻¹ de Zn) de acordo com Gonçalves (1995).

Tabela 1 – Características químicas do solo natural e após suplementação com 25% (L25) e 50% (L50) de lodo de esgoto ao volume do vaso

% lodo	pH	M.O.	P resina	S	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	g dm ⁻³	---mg dm ⁻³ ---		-----	mmolc	dm ⁻³	-----				-----	mg dm ⁻³	-----		
Solo	4,4	7	3	16	23	0,34	6	3	10	33	30	0,20	0,6	6	1,6	0,2
L25	5,1	17	1327	1175	22	2,78	86	18	107	145	73	0,69	1,2	34	13,8	5,5
L50	6	40	2029	2295	21	5,41	175	24	204	225	91	0,76	1,9	73	21,6	6

3.5 Caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto utilizado (Tabela 2) procedeu da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE - Sabesp), localizada no campus da Fazenda Experimental Lageado, município de Botucatu, SP.

A sair da lagoa de decantação o lodo de esgoto foi transferido para a baía de secagem onde passou cerca de 70 dias e atingiu temperatura superior a 55 °C, permitindo sua desinfecção de acordo com os processos de redução significativa de patógenos vigentes na Resolução CONAMA nº 375/2006.

Tabela 2 – Caracterização química do lodo de esgoto estabilizado

N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	U-65°C	MO	C	Na	B	Cu	Fe	Mn	Zn	C/N	pH
----- % -----									-----mg kg ⁻¹ -----							
2,5	3,2	0,1	1,2	0,2	2,4	29	33	18	568	145	159	33465	315	870	7/1	6,4

3.6 Caracterização da água residuária

A água residuária utilizada (Tabela 3) foi gerada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE - Sabesp), localizada no campus da Fazenda Experimental Lageado, município de Botucatu, SP. Para atender padrão classe 3 para culturas arbóreas do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2005), passou pelo sistema de tratamento primário na ETE e foi transportada em chorumeira até a área experimental, armazenada em reservatório de 3 mil litros.

A água residuária passou filtragem e ozonização. O filtro de 0,20 m de diâmetro e 0,70 m de altura acomodou a areia esterilizada com granulometria grossa e fina de 0,06 m, uma camada de 0,01 m de material esponjoso e uma de 0,09 m de brita n° 0, como proposto pela metodologia de GOMES (2016). Após passar pelo filtro a água residuária foi transferida via tubo plástico até o reator de ozônio, visando a eliminação da carga microbiana da água. Adequada para o reúso em plantas, a água foi armazenada em reservatório de mil litros.

Tabela 3 – Análise química, física e microbiológica da água de reúso (após tratamento secundário)

Parâmetros	Valores
N	51,80 mg L ⁻¹
P	0,93 mg L ⁻¹
K	19,0 mg L ⁻¹
Ca	23,00 mg L ⁻¹
Mg	3,00 mg L ⁻¹
S	10,36 mg L ⁻¹
Na	62,4 mg L ⁻¹
B	0,18 mg L ⁻¹
Cu	0,00 mg L ⁻¹
Fe	0,04 mg L ⁻¹
Mn	0,00 mg L ⁻¹
Zn	0,01 mg L ⁻¹
pH	6,25
C.E.	0,488 mS cm
DBO _{5,20}	5,00 mg L ⁻¹
Aspecto	turvo
Cor	20
Odor	não objetável
Turbidez	5,2 NTU
Ferro total	0,021 mg L ⁻¹
Dureza total	60 CaCO ₃ mg L ⁻¹
Dureza de cálcio	50 CaCO ₃ mg L ⁻¹
Dureza de magnésio	8,4 CaCO ₃ mg L ⁻¹
Cloreto	58,436
Sólidos totais dissolvidos	0,02 mg L ⁻¹
Sólidos totais em suspensão	0,7 g L ⁻¹
Fluoreto	0,025 mg L ⁻¹
TOC	30,6 mg L ⁻¹
Cloro residual livre	2,70 mg L ⁻¹
Cloro residual total	2,27 mg L ⁻¹
Coliformes totais	5,1 NMP.100 mg ⁻¹
Coliformes termotolerantes	5,1 NMP.100 mg ⁻¹

C.E. - condutividade elétrica, DBO - demanda bioquímica de oxigênio, TOC - teor de C total, NMP=número mais provável, NT - Unidade de Turbidez Nefelométrica.

3.7 Caracterização do sistema de irrigação e manejo hídrico

O sistema de irrigação utilizado foi composto por gotejadores com vazão de 2 L h⁻¹, com distribuidor de duas saídas, em cada saída foi integrado um microtubo e

um gotejador tipo flecha com vazão de 1 L h⁻¹. O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi calculado e o resultado encontrado foi de 98%, classificado como excelente de acordo com a classificação proposta por Bernardo et al. (2006).

O manejo hídrico foi definido de acordo com as três curvas de retenção de água no solo (solo; solo e 25% lodo de volume do vaso; solo e 50% lodo de volume do vaso) pelo método da câmara de pressão de Richards e ajustadas pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980). Cinco tensiômetros por parcela experimental foram instalados em vasos, na profundidade de 0,15 m, totalizando 20 tensiômetros. O monitoramento da tensão de água no solo foi realizado duas vezes ao dia, pela manhã (9h) e tarde (15h) com o auxílio de um tensímetro digital de punção e os valores de tensão convertidos em umidade volumétrica com base na equação de ajuste da curva de retenção de água no solo.

Todos os tratamentos foram irrigados elevando ou mantendo a umidade do solo a tensão de 14 kPa considerada como tensão correspondente a umidade controle, próxima à capacidade de campo. O tratamento que recebeu água de reúso foi irrigado exclusivamente com este insumo. Os demais tratamentos foram irrigados com a água proveniente da estação de tratamento de águas do município.

Figura 4 – Curva de retenção de umidade do solo

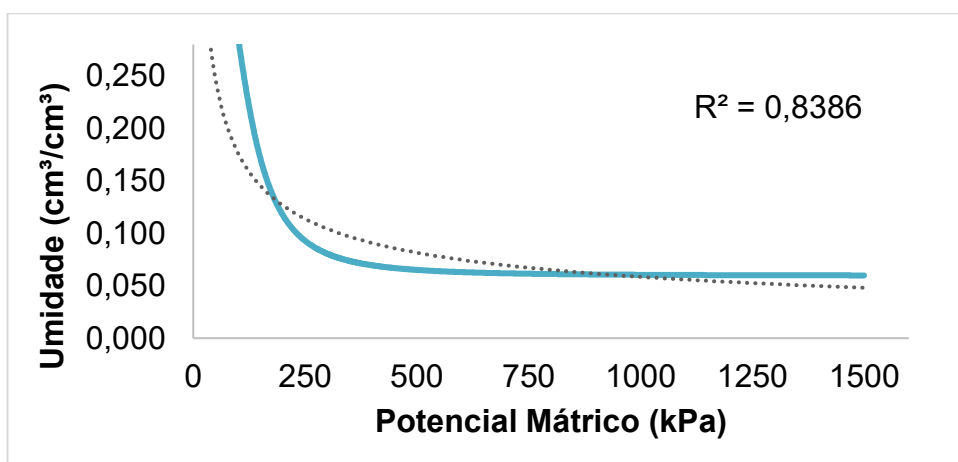


Figura 5 – Curva de retenção de umidade do solo com adição de 25% de lodo ao volume do vaso

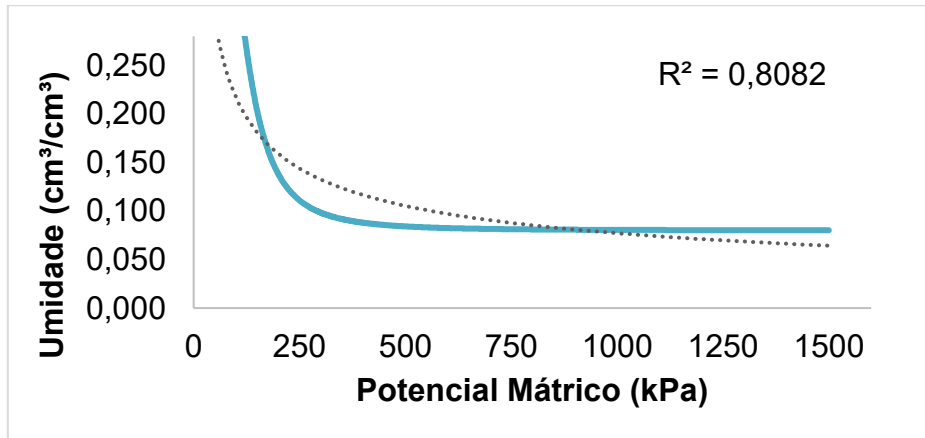
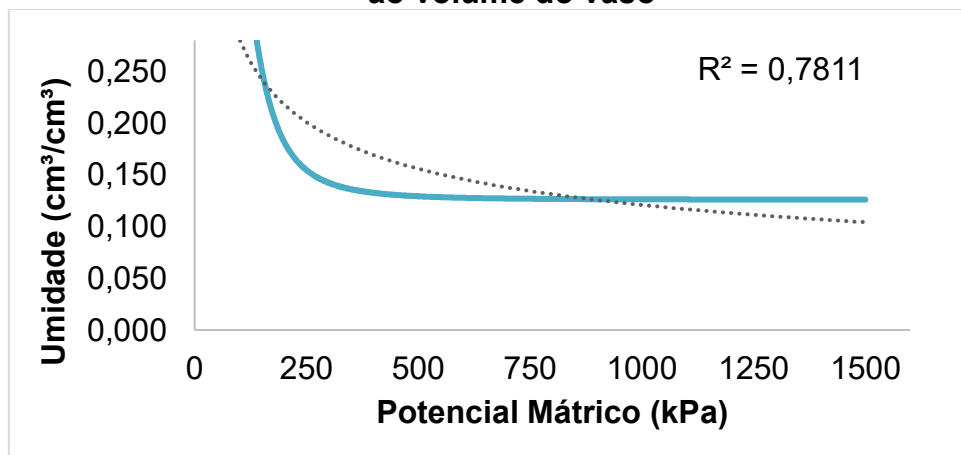


Figura 6 – Curva de retenção de umidade do solo com adição de 50% de lodo ao volume do vaso



3.8 Parâmetros de crescimento

Para analisar o crescimento das plantas a variáveis utilizadas foram: altura das plantas, medida mensalmente (0, 30, 60, 90 e 120 dias) com auxílio de uma fita métrica em cm, a partir do nível do solo até o ápice da planta; diâmetro do caule, medido com auxílio de um paquímetro digital, em *mm*, a partir do colo da planta; área foliar, em que foram coletadas todas as folhas de cada planta e tiveram suas áreas mensuradas por um integrador de área foliar modelo Li-3100C, Li-COR®, cujos resultados são expressos em $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$.

3.9 Biomassa

Ao final do experimento (120 dias) foi feita a análise de matéria seca, em que cinco plantas por tratamento foram separadas em folha, caule e raiz e levadas para estufa com circulação de ar forçado a $60^{\circ}\text{C} \pm 5$ até massa constante.

Para a análise de nutrientes no tecido vegetal, quatro plantas por tratamento foram selecionadas.

3.10 Índices de crescimento

Para o cálculo dos índices de crescimento foram utilizados os valores de biomassa vegetal das folhas, caule e raízes e área foliar. Com estes valores foi possível avaliar frações de biomassa investidos em determinadas partes da planta.

A partir da determinação dos parâmetros de crescimento e biomassa vegetal, foram determinados os seguintes índices de crescimento, de acordo com o método de Hunt (1982). Os índices foram analisados ao final do experimento (120 dias).

- SLA (*Specific Leaf Area*) área foliar específica que indica a relação entre a área foliar (AF) e a massa seca foliar (MSF), consoante a equação 1:

$$SLA = AF/MSF \quad (1)$$

Onde:

SLA – área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$);

AF – área foliar (m^2);

MSF -massa seca das folhas (g).

- LWR (*Leaf Weight Ratio* é a relação inversa de SLA) que informa a fração da biomassa total alocada nas folhas, podendo ser calculada segundo a equação 2:

$$LWR = MSF/MST \quad (2)$$

Onde:

LWR – fração da biomassa total alocada nas folhas (g MSF g⁻¹ MST);

MSF -massa seca das folhas (g);

MST -massa seca total da planta (g).

• LAR (*Leaf Area Ratio* é a relação da superfície foliar) que reflete no tamanho da superfície fotossintética em relação a massa respiratória segundo a equação

3:

$$LAR = AF/MST \quad (3)$$

Onde:

LAR - relação da superfície foliar;

AF – área foliar (m²);

MST -massa seca total da planta (g).

3.11 Teor de nutrientes em tecido vegetal

Ao final do experimento, aos 120 dias, após secagem, as amostras de folhas, caule e raízes dos diferentes tratamentos foram moídas e encaminhadas ao laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da FCA/UNESP – Botucatu, SP, para determinar macro (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês e zinco) com metodologia de acordo com Malavolta et al. (1997).

3.12 Trocas gasosas

A avaliação das trocas gasosas de cada tratamento foi realizada mensalmente (30, 60, 90 e 120 dias) no período das 9 às 11h da manhã, em um ramo do terço médio da planta, em folhas maduras completamente expandidas e totalmente expostas a radiação solar. Para tal utilizou-se o equipamento portátil IRGA, modelo LI-6400, LI-COR®. O equipamento foi ajustado para trabalhar utilizando uma fonte luminosa fixa em 1500 mol m⁻² s⁻¹ de intensidade de PAR (*photosynthetic active radiation* - radiação fotossinteticamente ativa) (TATAGIBA et al., 2015) e fluxo de ar

de 350 $\mu\text{mol s}^{-1}$. Foram avaliadas as variáveis: taxa fotossintética líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e a concentração interna de carbono (C_i).

3.13 Potencial hídrico

No final do dia que antecedeu a medição, todas as plantas de todos os tratamentos foram irrigadas excedendo a capacidade de campo, de modo que o excesso de água foi drenado durante a noite. Para a determinação do potencial hídrico foliar foi utilizada a bomba de pressão PMS 1003 (PMS Instruments Co.), segundo Sholander et al. (1965), em uma folha do terço médio totalmente expandida de quatro plantas por tratamento. A avaliação ocorreu mensalmente (30, 60, 90 e 120 dias) em um único horário durante o dia, às 5 horas (antemanhã).

3.14 Conteúdo relativo de água

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado pela relação da massa de tecido vegetal fresco (MF), túrgido (MT) e seco (MS), mediante a coleta mensal (30, 60, 90 e 120 dias) pela manhã (9h) de três discos foliares (0,69 cm^2 cada). A massa do tecido fresco foi pesada e em seguida os discos foram colocados em placas de Petri para hidratação durante 4 horas contendo água deionizada em temperatura ambiente. Após este tempo, o excesso de água dos discos foi retirada para determinar a massa do tecido túrgido. Para obtenção do tecido seco os discos foram secos por 24 h a 80 $^{\circ}\text{C} \pm 5$ em estufa de circulação de ar forçada. O conteúdo relativo de água (CRA) foi calculado por intermédio da equação 4, conforme o método proposto por Barr e Weatherley (1962):

$$\text{CRA} = [(MF - MS) / (MS - MT)] \times 100 \quad (4)$$

Em que:

CRA- Conteúdo relativo de água;

MF - massa fresca (mg);

MT - massa túrgida (mg);

MS - massa seca (mg).

3.15 Teor de pigmentos fotossintéticos

Para a análise de pigmentos, foram coletadas mensalmente (30, 60, 90 e 120 dias) folhas do terço médio da planta no período da manhã (9 h) e utilizados discos foliares frescos de 1,0 cm de diâmetro, mantidos em um volume de 2 mL dimetilformamida (DMF) por 24 h, no escuro, para extração de clorofila (*a* e *b*), e carotenoides. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 480, 646,8 e 663,8 nm para clorofila total e carotenoides. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g cm}^{-2}$, conforme método de Lee et al. (1987) (Equações 5, 6 e 7).

Equações para cálculo:

$$\text{Clorofila } a = (12 \times A_{663,8} - 3,11 \times A_{646,8}) / \text{área} \quad (5)$$

$$\text{Clorofila } b = (20,76 \times A_{646,8} - 4,88 \times A_{663,8}) \quad (6)$$

$$\text{Carotenoides} = (1000 \times A_{480} - 1,12 \text{ Clorofila } a - 34,07 \text{ Clorofila } b) / 245 \quad (7)$$

Em que, A = absorbância no comprimento de onda indicado (em nm).

3.16 Perda de eletrólitos

Para determinação mensal (30, 60, 90 e 120 dias) da perda de eletrólitos as folhas foram coletadas às 9 horas totalizando quatro amostras por tratamento. De cada amostra foram obtidos 30 discos foliares de 2 mm de diâmetro. Os discos foram incubados em solução de manitol (0,3 M). Após 24h de agitação, foi realizada a primeira medida da condutividade elétrica (C1). Na sequência, os frascos foram pesados e mantidos sob fervura por 10 minutos. Após o resfriamento, os frascos foram novamente pesados, onde foi feita a reposição da diferença de volume evaporado, com água destilada. Os tubos foram mantidos por 30 minutos sob agitação e por fim foi realizada a segunda leitura de condutividade elétrica (C2). A perda de eletrólitos foi determinada pela metodologia descrita por Lafuente et al. (1991) (Equação 8):

$$PE (\%) = (C1 / C2) \times 100 \quad (8)$$

Onde:

PE – perda de eletrólitos (%);

C1 – primeira leitura da condutividade elétrica da solução;

C2 – segunda leitura da condutividade elétrica da solução

3.17 Análise enzimática

Para determinação mensal (30, 60, 90 e 120 dias) da atividade da enzima nitrato redutase (NR), foram coletadas folhas do terço médio das plantas no período da manhã (9 às 10h). Para a realização da análise, foram cortadas 100 mg de tecido foliar e acondicionadas em tubos com 5 mL da solução de extração, contendo tampão fosfato (KH_2PO_4 0,1 M; pH 7,5), KNO_3 (0,1M) e n-propanol (3% v/v). Os tubos foram incubados a vácuo em 3 ciclos de 2 minutos cada, com intervalo de um minuto. Posteriormente os tubos foram mantidos no escuro, sob agitação e em banho-maria a 30°C por 1 hora. Em seguida foi adicionado 1 mL da solução para outro tubo e acrescentado 1 mL de sulfanilamida 1% e 1 mL de N-naftil-etilenodiamino 0,02%. Os tubos foram incubados novamente sob agitação, no escuro e em banho-maria a 30°C por 15 minutos. Ao final da incubação a detecção da formação de nitrito foi realizada por leitura em espectrofotômetro, a 540 nm. Com resultados e a partir de uma curva padrão de nitrito (0-250 nM), foi calculada a atividade da NR em $\text{nM NO}_2 \text{ h}^{-1}\text{g}^{-1} \text{ MF}$, (JAWORSKI, 1971).

3.18 Preparo do material vegetal para determinação Fenóis e Açúcares Totais

Amostras do tecido foliar de quatro plantas por tratamento, foram coletadas após 120 dias, colocadas em tubos *Falcon*, congeladas em nitrogênio líquido e armazenadas em freezer (-80°C). Posteriormente, as amostras foram moídas na presença de N líquido, até a obtenção de um pó fino. Após pesagem, as amostras foram mantidas em frascos eppendorf, em freezer a - 80° C. A partir deste material foram feitas as análises do teor de fenóis e açúcares totais.

3.19 Teor de fenóis

Os fenólicos totais foram determinados pelo procedimento descrito por Singleton e Rossi (1965), usando o reagente de Folin-Ciocalteu e ácido pirogálico como padrão.

Para o preparo do extrato foram adicionados em tubos 200 mg de material vegetal (item 3.18) e solução 2 mL de 80% de metanol contendo ácido clorídrico a 1%. Após duas horas em agitador orbital a temperatura ambiente (200 rpm), a mistura foi para uma centrífuga a 1000 g durante quinze minutos para coleta do sobrenadante, obtendo-se assim o extrato.

Foi adicionado 200 μ L do extrato em 1,5 mL de reagente Folin-Ciocalteu (previamente diluído 10 vezes). Após repouso de cinco minutos (22 ° C), foi adicionado 1,5 mL de solução de bicarbonato de sódio (60 g / L) à mistura. Após 90 minutos a 22° C, foi medida a absorvância a 725 nm. Os resultados foram expressos como equivalentes de ácido gálico em miligrama por grama de matéria fresca (mg g⁻¹ MF).

3.20 Teor de açúcares totais

A presença de açúcares totais foi determinada pelo método fenol-sulfúrico segundo Dubois et al. (1956) e utilizada glicose como padrão.

O extrato bruto foi obtido pela ressuspensão de 300 mg do material vegetal (item 3.18) moído em 5,0 mL de tampão fosfato de potássio 0,1 M, pH 7,8 na presença de 200 mg de polivinilpolipirrolidona.

Foram pipetados para tubos de reação em uma triplicata por amostra na seguinte ordem : 195 μ L de água destilada, 500 μ L de solução de fenol a 5%, 5 μ L do extrato bruto e 2,5 mL de H₂SO₄ concentrado. Após quinze minutos de incubação em temperatura ambiente foi feita a leitura da absorvância em espectrofotômetro a 490 nm. Os resultados foram expressos em miligramas de açúcares solúveis totais por grama de matéria fresca.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variáveis de crescimento

Foram registrados valores mensais de altura e diâmetro de colo do híbrido *Eucalyptus urophylla* durante 120 dias, de modo que os valores da coleta final foram submetidos ao teste estatístico de Tukey ($p \leq 0,05$), onde foram verificadas diferenças quanto a resposta das plantas aos tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 – Altura (H), diâmetro do caule (DC) e área foliar (AF) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

Tratamentos	H (cm)	DC (mm)	AF (cm ²)
NPK	219,8 C	13,7 B	7010,0 B
AR	236,6 BC	13,2 B	11033,4 B
L25	291,0 AB	20,0 A	15728,8 AB
L50	316,2 A	20,4 A	21316,7 A

As médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

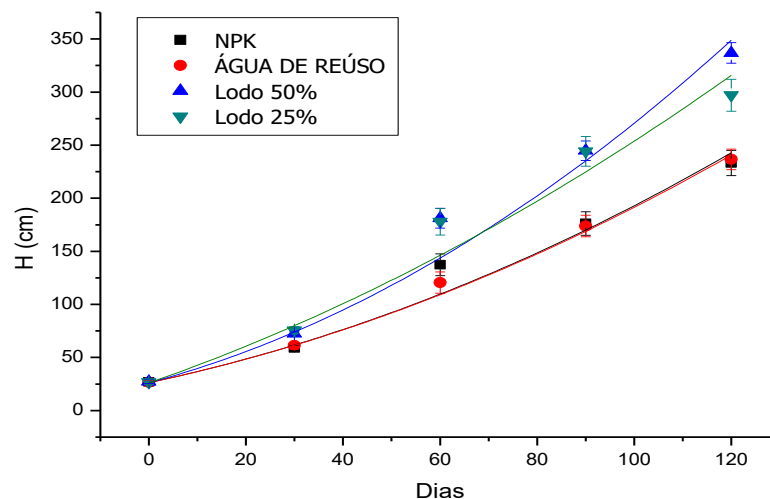
A aplicação do lodo de esgoto produziu maior altura das plantas (Tabela 4) em relação ao tratamento controle (NPK), com L25 e L50 atingindo 291,0 cm e 316,2 cm, respectivamente. No estudo de Leila *et al.* (2017), a maior altura das plantas de *Eucalyptus camaldulensis* também foi resultante da maior dose de lodo de esgoto aplicada (60%). As plantas dos tratamentos L25 e L50 apresentaram maior diâmetro de colo com 20,0 e 20,4 mm, respectivamente. Em relação à área foliar, o tratamento L50 apresentou média superior (21316,7 cm²), diferindo dos tratamentos AR e NPK. Minhas *et al.* (2015), compararam a irrigação de água residuária e águas subterrâneas em um plantio *Eucalyptus tereticornis* Sm. por um período de 10 anos. Os autores encontraram o crescimento em altura e diâmetro superior nas plantas irrigadas com água residuária.

As plantas do tratamento AR estudadas neste ensaio apresentaram crescimento semelhante ao tratamento controle (NPK). É possível que a aplicação constante da água de reúso por um período maior, promova maior crescimento das plantas, visto que o período analisado foi de apenas 120 dias e que as plantas do tratamento AR mostraram uma tendência de aumento em crescimento (Figuras 7 e 8).

O desenvolvimento das plantas deste tratamento foi satisfatório, no entanto, visivelmente as folhas estavam levemente amareladas e menos vigorosas quando comparadas aos demais tratamentos.

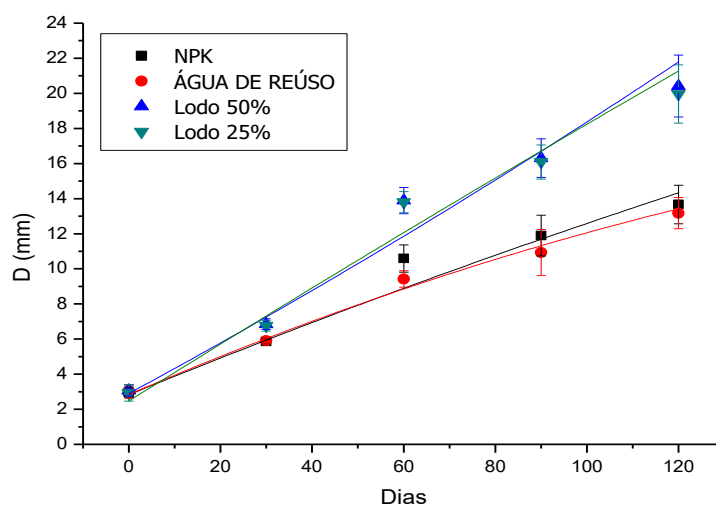
Foi possível observar aumento gradativo em altura e diâmetro de colo das plantas ao longo dos 120 dias, no entanto, a diferença entre os tratamentos foi aumentando a partir dos 30 dias, mostrando superioridade para os tratamentos com lodo (Figuras 7 e 8). Ao final do ensaio, plantas do tratamento L50 apresentaram crescimento superior ao das plantas do tratamento L25. Apesar desta diferença não ser significativa, destaca-se que o acréscimo de lodo leva ao aumento em altura e diâmetro de colo das plantas o que poderia ser verificado com maior número de dias de experimento. Bertolazi et al. (2016), ao conduzirem um experimento com doses crescentes do composto de lodo de esgoto (25%, 50% e 75% do volume do vaso) em plantas de *E. urograndis*, verificaram uma superioridade em altura das plantas que receberam a maior dose do composto. Andrade et al. (2013), encontraram maior velocidade de mineralização em solos com maiores doses de lodo de esgoto. Encontrou-se resultados semelhantes no presente ensaio, portanto, é possível que o maior crescimento das plantas esteja associado ao processo de mineralização gradual da matéria orgânica nos tratamentos L25 e L50. Nesse sentido, com o tempo de cultivo, houve disponibilização de nutrientes. As taxas de crescimento das plantas dos tratamentos NPK e AR mantiveram-se constantes até os 120 dias.

Figura 7 – Crescimento em altura de plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Figura 8 – Crescimento em diâmetro de colo de plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Constatou-se maior produção de biomassa seca de folha, caule, raiz e total (Tabela 5) das plantas do tratamento L25 e L50, com médias superiores aos tratamentos NPK e AR. As plantas dos tratamentos L25 e L50 acumularam mais do

que dobro de massa seca foliar (117,6 e 127,6 g respectivamente) em relação às plantas do NPK (45,6 g). Comportamento similar ocorreu com a variável massa seca radicular. O maior valor médio da massa seca do caule foi ainda mais expressivo nos tratamentos com aplicação do lodo (L50 e L25). A massa seca do caule do tratamento L50 (310,8 g) apresentou média de aproximadamente quatro vezes maior em relação ao tratamento NPK (74,8 g). Esse resultado evidencia as excelentes propriedades de fertilização do lodo.

Tabela 5 – Massa seca foliar (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca radicular (MSR), massa seca total (MST), área foliar específica (SLA), fração da biomassa total alocada nas folhas (LWR) e relação da superfície foliar (LAR) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

Tratamentos	MSF (g)	MSC (g)	MSR (g)	MST(g)	SLA (m ² g ⁻¹)	LWR (g MSF g ⁻¹ MST)	LAR (m ² g ⁻¹)
NPK	45,6 B	74,8 B	52,4 B	172,8 B	1541,8 A	0,268 AB	409,3 AB
AR	57,6 B	72,0 B	53,6 B	183,2 B	1889,2 A	0,319 A	620,4 A
L25	117,6 A	271,6 A	130,4 A	519,6 A	1660,2 A	0,226 B	375,4 AB
L50	127,6 A	310,8 A	139,2 A	577,6 A	1681,6 A	0,220 B	369,7 B

As médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

A análise de índices de crescimento (Tabela 5), indicou que a área foliar específica (SLA) não foi afetada pelos tratamentos. A maior fração de biomassa total alocada nas folhas (LWR) foi verificada nas plantas do tratamento AR (0,319 g MSF g⁻¹ MST), não diferindo-se do tratamento NPK, de modo que nestes tratamentos as plantas investiram mais em biomassa foliar do que as plantas dos tratamentos com lodo de esgoto. Quanto a relação da superfície foliar (LAR), as plantas do tratamento AR apresentaram maior valor (620,4 m² g⁻¹), diferindo-se das plantas do tratamento L50 (369,7 m² g⁻¹).

Os resultados de altura, diâmetro de colo, área foliar e biomassa seca das plantas estão relacionados ao maior teor de macro e micronutrientes nos solos enriquecidos com lodo, confirmado pelas análises químicas do solo natural e dos solos suplementados com lodo (Tabela 1), evidenciando uma maior disponibilidade nutricional às plantas. A presença de nutrientes adicionais e matéria orgânica nas misturas com o lodo estão de acordo com resultados publicados por Bouriou et al. (2014) e Zabotto et. (2020). SILVA (2019), obteve resultados similares a este estudo também em plantas de *E. urograndis* em que, as maiores doses de lodo e de composto

de lodo (40 e 50 Mg ha⁻¹) promoveram incremento para a maioria das variáveis biométricas, quando comparado ao tratamento com adubação inorgânica.

4.2 Variáveis fisiológicas e bioquímicas

A análise das alterações na fisiologia das plantas é importante porque tais alterações podem ser induzidas antes mesmo de ocorrerem danos morfológicos macroscópicos (ASSADI et al.; 2011). A resposta fisiológica das plantas diferiu em função das variáveis analisadas (Tabela 6).

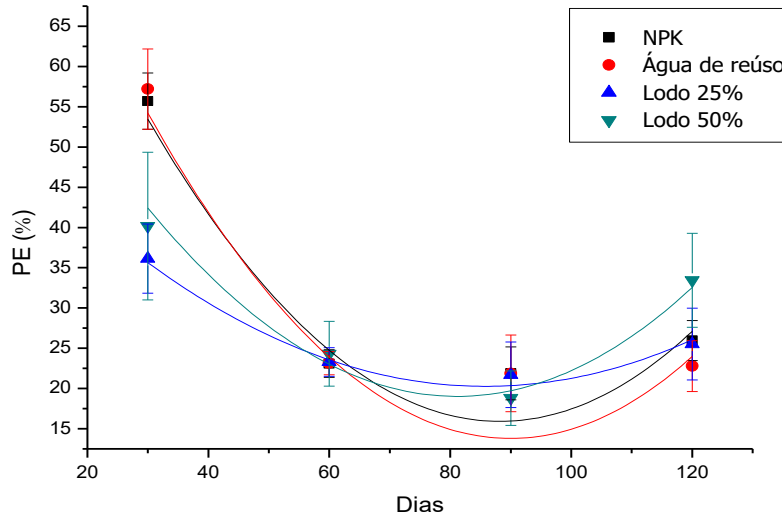
Tabela 6 – Perda de eletrólitos (PE), clorofila a (Cl a), clorofila b (Cl b), carotenoides (Car), atividade da enzima nitrato redutase (NR), teor de fenóis e açúcares totais (AT) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

Tratamentos	PE	Cl a	Cl b	Car	NR	Fenóis	AT
	%	-----µg cm ⁻² -----			nM NO ₂ h ⁻¹ g ⁻¹ MF	----mg g ⁻¹ MF---	
NPK	28,9 A	10,0 B	3,9 B	2,3 B	459,3 B	2527,2 A	48,9 B
AR	24,9 A	16,3 A	7,0 A	3,9 A	399,1 B	2521,8 A	57,8 B
L25	29,5 A	16,8 A	7,7 A	4,2 A	1029,0 A	2407,4 B	126,0 A
L50	26,6 A	17,1 A	7,2 A	4,2 A	822,6 AB	2446,8 AB	113,2 A

As médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste Tukey (p≤0,05). MF – Matéria Fresca.

Para perda de eletrólitos (PE) não houve diferenças entre os tratamentos ao final do experimento. Entretanto, o comportamento das plantas para esta variável ao longo dos dias (Figura 9) mostrou maior PE em todos os tratamentos nos primeiros 30 dias, revelando menor resistência da estrutura da membrana ao extravasamento de eletrólitos para o meio extracelular.

Figura 9 – Perda de eletrólitos (PE) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo

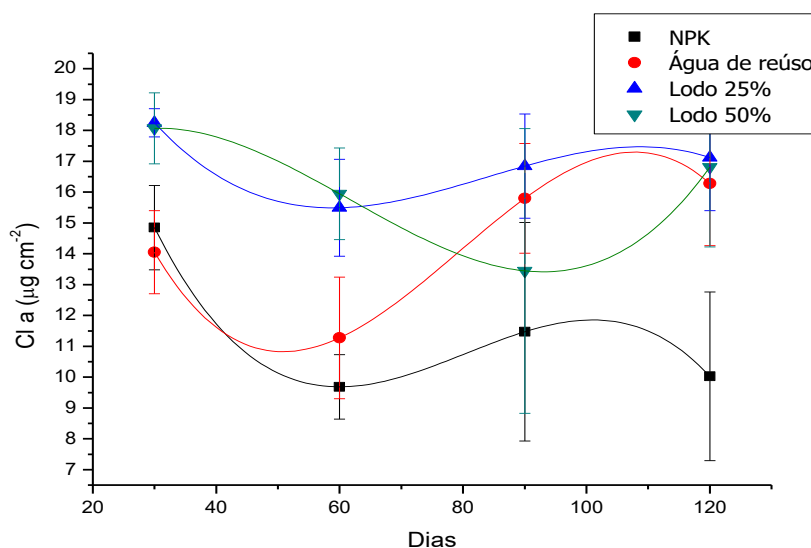


Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Com relação às clorofilas *a*, *b* e carotenoides (Tabela 6), as plantas tratadas com NPK apresentaram médias inferiores (10, 3,9 e 2,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$, respectivamente) aos demais tratamentos.

A concentração de clorofila *a* sofreu menor oscilação durante o tempo experimental (Figura 10) nas plantas do L25. Ao longo dos 120 dias do período experimental, plantas fertilizadas com NPK apresentaram redução no teor de clorofila *a* e as plantas do tratamento AR, comportamento inverso. Aos 90 dias as plantas do L50 reduziram o teor de clorofila *a*, voltando a acumular aos 120 dias.

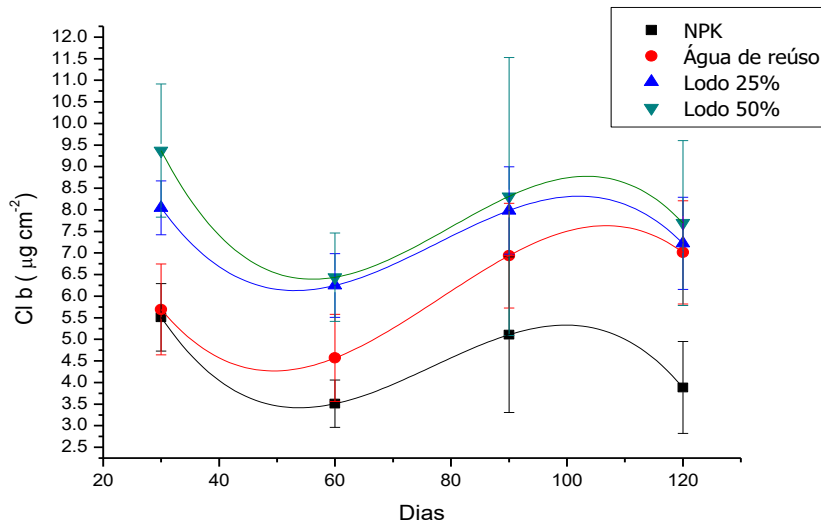
Figura 10 – Clorofila a (Cl a) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Quanto à clorofila b (Figura 11) houve acúmulo semelhante nos quatro tratamentos, havendo uma queda no teor aos 60 dias, tornando a subir aos 90 dias com leve queda aos 120 dias. As plantas fertilizadas com NPK apresentaram concentração de clorofila b inferior aos demais tratamentos durante todo período experimental. O conteúdo de clorofila está fortemente relacionado ao funcionamento fotossintético da vegetação (BARRY et al., 2009) e por consequência relacionado ao ganho de biomassa vegetal, desta forma, os menores teores inicial e final de clorofila a e b em plantas do tratamento NPK interferiram nos menores ganhos de biomassa destas plantas (Tabela 5).

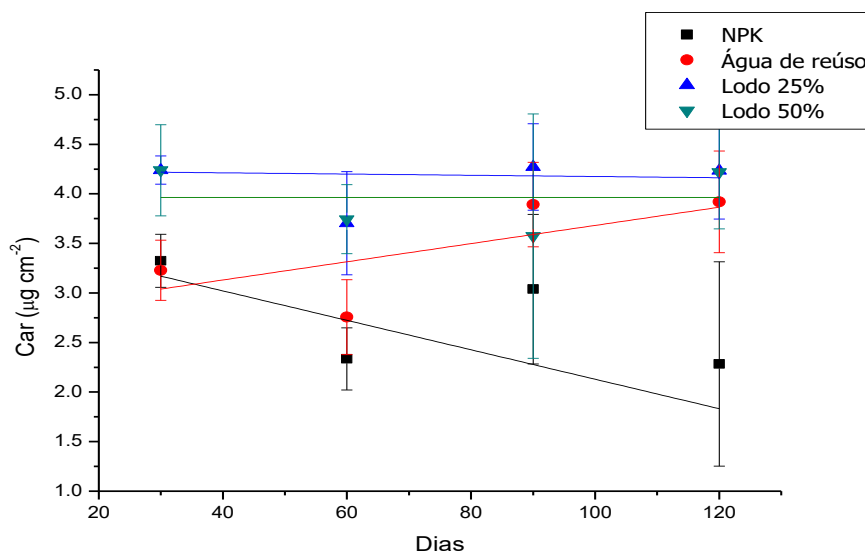
Figura 11 – Clorofila b (Cl b) de plantas em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Para o comportamento da concentração de carotenóides (Figura 12), não houve variação significativa durante os 120 dias para plantas fertilizadas com lodo (L25 e L50). A aplicação de AR promoveu um aumento do teor de carotenóides ao longo do tempo e em plantas adubadas com NPK ao contrário, houve queda do teor desse pigmento.

Figura 12 – Concentração de carotenoides (Car) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



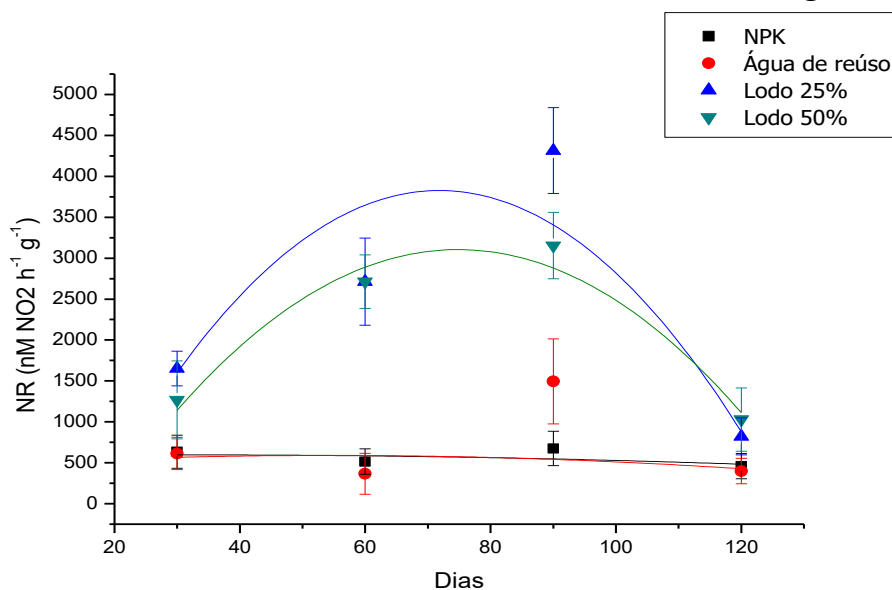
Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Ao final do experimento, plantas fertilizadas com AR apresentaram médias superiores da concentração de pigmentos (clorofila *a*, *b* e carotenóides) em relação as plantas do tratamento NPK. Além das médias superiores, apresentaram aumento no teor destes pigmentos no decorrer dos 120 dias (Figuras 10, 11 e 12). Tal fato pode estar associado à adição gradual de nutrientes fornecidos às plantas via fertirrigação, estimulando a produção dos pigmentos fotossintéticos. Shah et al. (2010), constataram maior teor de clorofila *a* em plantas fertilizadas com AR diluída a 50% em água comum em comparação às plantas do tratamento que não receberam AR. Resultados diferentes foram verificados por Silva et al. (2014) em que o conteúdo total de clorofila em mudas de *E. urograndis* fertirrigadas com AR foi reduzido em 50% em comparação à mudas fertirrigadas com fertilizante comercial. Em mudas de *Terminalia angustifolia* e *Rademarcher ignea* irrigadas com AR, Hashish et al. (2017), verificaram aumento dos teores de clorofila *a* e *b* e redução do teor de carotenoides. Por outro lado, no mesmo estudo, em mudas de *Ficus mango* houve redução dos três pigmentos avaliados quando comparadas à plantas irrigadas convencionalmente. As características físicas e químicas da AR variam em função de sua origem e período de coleta, portanto seu efeito nas plantas tende a ser divergente de acordo com as particularidades da água utilizada e da espécie vegetal.

A clorofila e os carotenóides são a parte central da produção de energia vegetal, portanto, qualquer alteração significativa em seus níveis pode causar um efeito marcante em todo o metabolismo das plantas (SHWETA e AGRAWAL, 2006). A maior quantidade desses pigmentos nas plantas adubadas com L25 e L50 em relação ao tratamento com NPK (Tabela 6), se correlacionaram com o acúmulo de biomassa nesses tratamentos (Tabela 5).

A atividade da enzima nitrato redutase (NR) foi maior nos tratamentos L25 e L50 (1029,0 e 822,6 nM $\text{NO}_2 \text{ h}^{-1}\text{g}^{-1}$ MF, respectivamente), contribuindo para o desenvolvimento destas plantas. A atividade dessa enzima é fundamental no processo de redução assimilatória do nitrogênio para compor as moléculas de clorofila, proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos (DNA e RNA), bases nitrogenadas dentre outras (OLIVEIRA et al., 2018). A atividade não variou ao longo do tempo nas plantas fertilizadas com NPK e AR, as quais permaneceram com valores inferiores às plantas fertilizadas L25 e L50 (Figura 13). Uma atividade mais intensa da nitrato redutase pode indicar uma maior taxa de assimilação de N ao longo do tempo (SANTOS et al., 2017), demonstrando a maior disponibilidade deste nutriente nas plantas fertilizadas com L25 e L50, que atingiram máximo da atividade da nitrato redutase por volta dos 70 dias. Além disso, no tratamento NPK a fonte de nitrogênio foi adicionada por meio da ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), desta forma, neste tratamento não há o substrato para a ação desta enzima, que é o nitrato (NO_3^-).

Figura 13 – Atividade da nitrato redutase (NR) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Os fenóis são compostos bioativos com potente atividade antioxidante que protegem as células contra os efeitos danosos de espécies reativas de oxigênio envolvidas na produção de estresse oxidativo, levando a danos celulares (VÂȘCĂ-ZAMFIR et al., 2018). O teor de fenóis totais foi influenciado pela fertilização (Tabela 6), de modo que as plantas dos tratamentos com NPK e AR apresentaram as maiores médias (2527,2 e 2521,8 mg g⁻¹ MF, respectivamente), não diferindo do tratamento com L50. Glynn et al. (2003), relataram que a disponibilidade de nutrientes para *Populus nigra* afetou a concentração foliar de fenóis totais que foi 11% maior nas plantas de baixa fertilidade do que nas de alta fertilidade. Além disso, a concentração fenólica total foi inversamente relacionada ao crescimento da planta. No presente estudo, os maiores teores de fenóis totais também se correlacionaram com as plantas dos tratamentos NPK e AR as quais tiveram menores médias de crescimento em biomassa (Tabela 5). Similarmente, Nguyen e Niemeyer (2008) em plantas de *Ocimum basilicum* e Otalora et al. (2018) em plantas de *Cichorium endivia*, verificaram que a fertilização com a menor dose de nitrogênio induziu maior nível de produção de fenóis totais. Uma vez que os compostos fenólicos são provenientes do metabolismo vegetal secundário, estes resultados podem ser explicados pela teoria do equilíbrio de crescimento e diferenciação (*growth-differentiation balance* - GDB), que tem como

princípio a existência de uma "troca fisiológica" entre o crescimento da planta e a produção de metabólitos secundários (diferenciação). De acordo com essa teoria, sob condições ambientais e níveis de macronutrientes adequados, o crescimento das plantas é favorecido, com a produção de proteínas fotossintéticas recebendo prioridade de recursos. Entretanto, sob condições ambientais adversas e a disponibilidade de um nutriente essencial limitada, a alocação do crescimento do vegetal diminui enquanto a produção de metabólitos secundários aumenta auxiliando no armazenamento e defesa (HERMS e MATTSON, 1992). Desta forma, o menor crescimento em biomassa (Tabela 5) e maior produção de fenóis totais (Tabela 6) das plantas dos tratamentos com NKP e AR sugere a menor capacidade nutricional destes tratamentos.

Os açúcares são os principais produtos de carbono e energia durante a fotossíntese (MA et al., 2017) e desempenham papel fundamental no metabolismo vegetal incluindo transporte, metabolismo energético e osmorregulação (HARTMANN e TRUMBORE, 2016). As plantas tratadas com L25 e L50 denotaram médias maiores (Tabela 6) para a presença de açúcares totais (126,0 e 113, 2 mg g⁻¹ MF respectivamente). Esse efeito, é benéfico às árvores que são organismos de vida longa e estão propensas a passar por muitos estresses e por isso podem ter que alocar carboidratos para armazenamento de longo prazo, neste caso, na forma de açúcares solúveis (NIINEMETS, 2010; WILEY e HELLIKER, 2012).

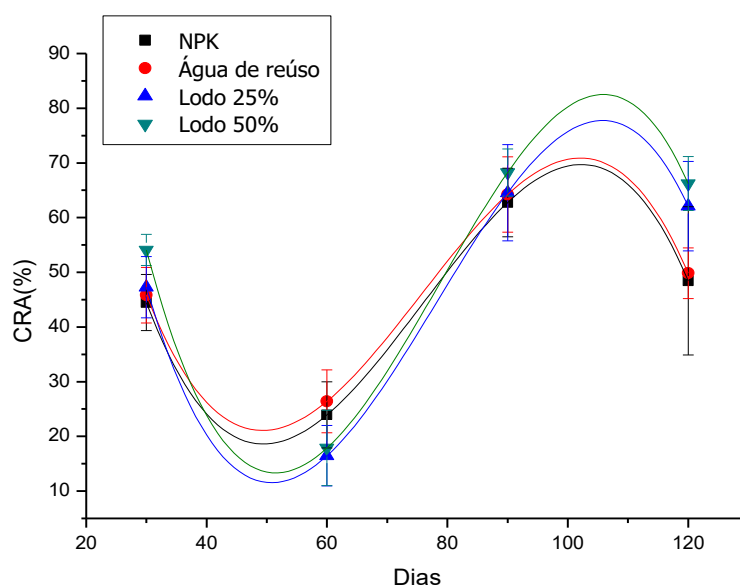
Variáveis relacionadas a relações hídricas e trocas gasosas estão resumidas na Tabela 7. O conteúdo relativo de água das plantas de todos os tratamentos apresentou oscilação semelhante, havendo redução por volta dos 60 dias, ápice próximo aos 100 dias e pequena redução aos 120 dias (Figura 14), mas não exerceu influência significativa ($p \leq 0,05$) ao final do experimento (Tabela 7).

Tabela 7 – Conteúdo relativo de água (CRA), potencial hídrico (ψ_{hf}), fotossíntese líquida (A; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de carbono nas células (C_i ; $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (g_s ; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), e transpiração (E; $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) de plantas de *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

Tratamentos	CRA	ψ_{hf}	A	C_i	g_s	E
NPK	48,4 A	- 0,330 AB	17,4 C	356,8 A	0,622 A	8,3 A
AR	49,8 A	- 0,300 AB	19,0 BC	360,4 A	0,579 A	7,9 A
L25	66,2 A	- 0,260 A	23,6 AB	320,5 B	0,613 A	8,4 A
L50	49,7 A	- 0,420 B	27,3 A	324,4 B	0,618 A	8,5 A

As médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Figura 14 – Conteúdo relativo de água (CRA) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas a diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo

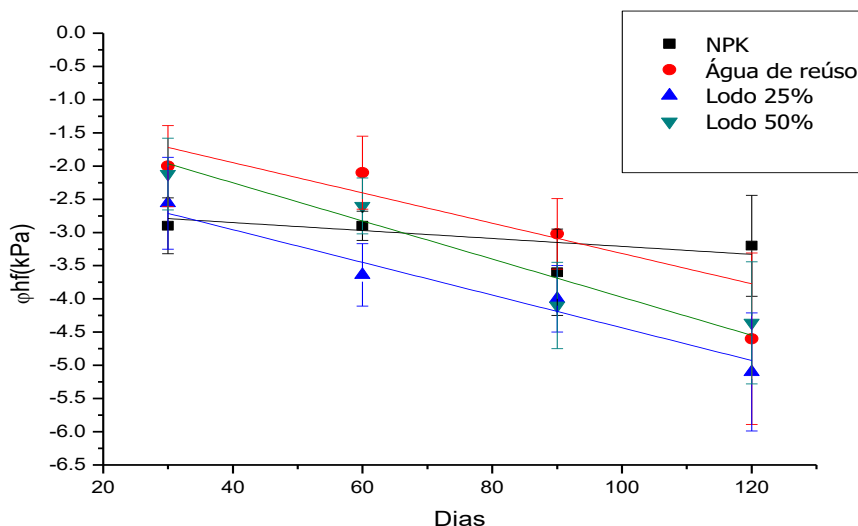


Barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 5$)

Para a análise do potencial hídrico foliar, a maior média (-0,260 MPa) foi encontrada no tratamento L25, não diferindo dos tratamentos NPK e AR (Tabela 7). O menor potencial hídrico observado nas plantas do tratamento L50 (-0,420 MPa), pode estar relacionado com a maior quantidade de macro poros no solo resultante da maior quantidade de lodo incorporada, pois para manter a tensão de 14 kPa (próxima à capacidade de campo), essas plantas consumiram maior volume de água durante o ensaio. Este comportamento não foi notado para as plantas do tratamento L25. As

plantas do tratamento NPK manifestaram pequena oscilação do potencial hídrico (Figura 15) durante os 120 dias de cultivo e os demais tratamentos apresentaram redução nos valores.

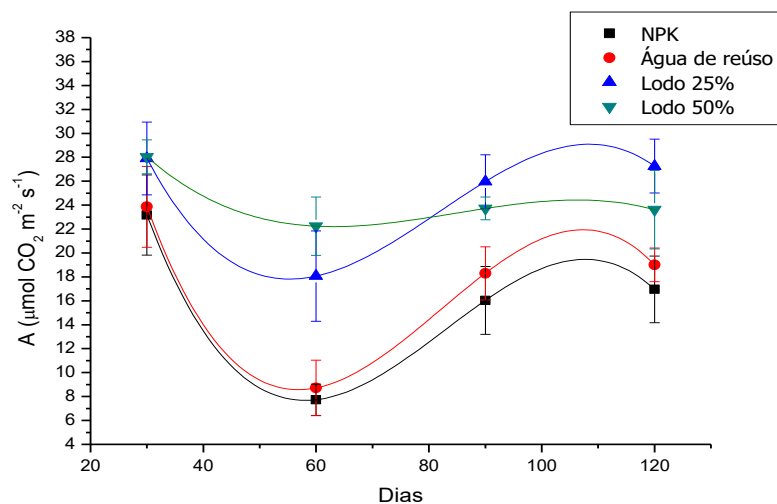
Figura 15 – Potencial hídrico foliar (ψ_{hf}) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

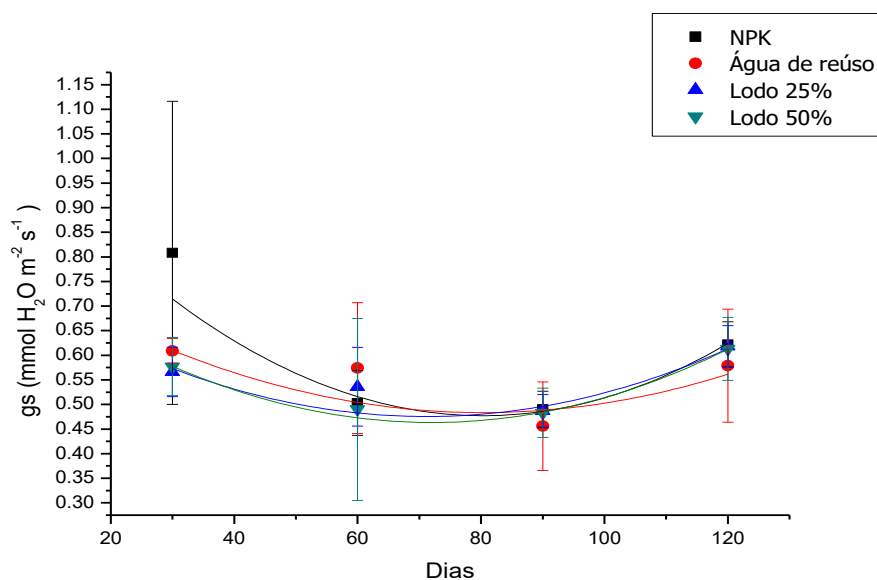
Em relação às variáveis fotossintéticas (Tabela 7), plantas do tratamento L50 apresentaram maior taxa de fotossíntese líquida ($A = 27,3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) aos 120 dias, porém baixa variação ao longo do experimento (Tabela 7 e Figura 16). Esse tratamento não diferiu quando comparado ao tratamento L25 ($A = 23,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Por outro lado, a condutância estomática (g_s) manteve-se estável nos diferentes pontos de análise (Tabela 7 e Figura 17). Zabotto et al. (2020), verificaram que plantas de *Eucalyptus urophylla* tratadas com 60 e 90 Mg ha^{-1} de lodo de esgoto apresentaram maiores taxas fotossintéticas e maior condutância estomática em relação ao tratamento controle. Estudos com outras espécies também relataram forte relação entre a maior atividade fotossintética e o fornecimento adequado de nutrientes pela adição de lodo de esgoto (BAIOUI et al., 2017; MOREIRA et al., 2020; NISSIM et al., 2018).

Figura 16 – Fotossíntese líquida (A) de plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Figura 17 – Condutância estomática (g_s) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



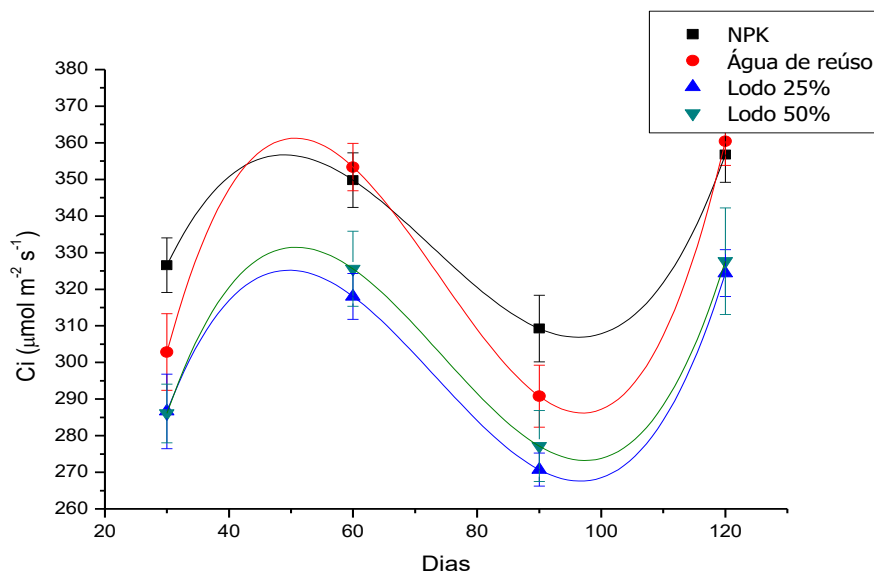
Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

Neste ensaio, as propriedades nutritivas do lodo influenciaram positivamente o funcionamento fotossintético das plantas. Todavia, plantas do tratamento NPK, apresentaram a menor taxa fotossintética ($17,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Pigmentos

fotossintéticos, como clorofilas e carotenoides, desempenham papel central no processo fotossintético (SINGH et al., 2017) favorecendo sua atividade. A menor taxa fotossintética verificada nas plantas fertilizadas com NPK pode ser explicada pela menor produção de pigmentos fotossintéticos, principalmente a clorofila *a* (Tabela 6).

A concentração interna de carbono (C_i) nas células foi superior nas plantas dos tratamentos NPK e AR ($356,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $360,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente) (Tabela 7) e manteve-se superior para estes tratamentos ao longo dos 120 dias (Figura 18). Todos os tratamentos apresentaram valores mínimos da concentração interna de carbono por volta dos 90 dias e valores máximos aos 120 dias.

Figura 18 – Concentração interna de carbono nas células (C_i) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas a diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo

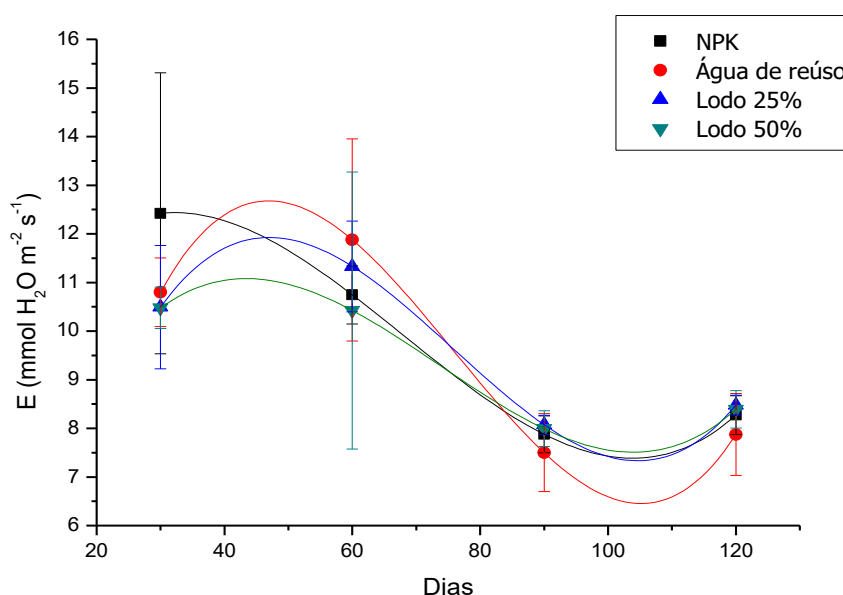


Barras verticais representam o erro padrão da média ($n=5$)

A transpiração das plantas não apresentou diferença significativa entre os diferentes tratamentos aplicados e apresentou redução ao longo dos 120 dias (Figura 19). Similarmente MOHAMED et al. (2018), em plantas de *Helianthus annuus* fertilizadas com maiores doses de lodo de esgoto, verificaram que níveis intercelulares de CO_2 (C_i) diminuíram significativamente em comparação com as plantas do tratamento controle (fertilização com NPK). Além disso, para a transpiração (E) não foram encontradas diferenças entre as plantas que receberam fertilização com NPK e aquelas corrigidas com a maior aplicação de lodo (120 t ha^{-1}).

Silva et al. (2014), observaram maior concentração interna de CO₂ e menor taxa fotossintética em plantas de eucalipto irrigadas com água residuária quando comparadas às plantas irrigadas com água subterrânea, sugerindo que a fotossíntese está sob limitação do mesofilo, o que reduziu a demanda por CO₂.

Figura 19 – Transpiração (*E*) em plantas de *Eucalyptus urophylla* submetidas à diferentes fontes nutricionais ao longo do tempo



Barras verticais representam o erro padrão da média (n= 5)

4.3 Variáveis nutricionais

Houve variação em relação a concentração de cada nutriente nas folhas, caule e raiz de *Eucalyptus urophylla* em função dos tratamentos aplicados (Tabelas 8, 9 e 10).

Os tratamentos L25 e L50 apresentaram as maiores médias de N nos tecidos foliares (27,4 g kg⁻¹ e 28,9 g kg⁻¹, respectivamente), conforme a Tabela 8. Entretanto, não houve diferença da concentração de N nas plantas do tratamento AR (21,4 g kg⁻¹).

Tabela 8 – Concentração de macro e micronutrientes nas folhas *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

	Tratamentos			
	NPK	AR	L25	L50
	-----g kg ⁻¹ -----			
N	13,8 b	21,4 ab	27,4 a	28,9 a
P	1,1 b	0,7 c	1,6 a	1,6 a
K	11,7 a	6,7 b	5,1 b	5,8 b
Ca	14,3 a	12,1 ab	9,7 b	10,8 b
Mg	3,4 a	2,6 b	2,5 b	2,7 b
S	1,0 c	1,4 b	2,0 a	2,2 a
	-----mg kg ⁻¹ -----			
B	18,9 b	26,5 a	20,5 b	22,9 ab
Cu	44,5 a	32,3 a	23,7 a	34,5 a
Fe	305,8 a	313,5 a	217,3 a	224,0 a
Mn	650,8 b	862,7 b	1523,0 a	1083,0 ab
Zn	39,2 b	33,3 b	156,5 a	160,0 a

As médias seguidas por letras iguais na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

As plantas do tratamento NPK apresentaram a menor média para o N (13,8 g kg⁻¹) em correlação direta com os teores de clorofila (Tabela 6). O N é principal elemento necessário para a biossíntese da clorofila (ADRIANTO et al., 2017), desta forma, o menor teor do pigmento decorreu da menor disponibilidade de N às plantas fertilizadas com NPK. As concentrações de N observadas nas folhas de todos os tratamentos estiveram acima do valor mínimo (13,0 g kg⁻¹) referenciado por Raij et al. (1997), para a cultura do eucalipto. O uso de lodo e AR demonstraram maior potencial para suprir a demanda de N no híbrido de *Eucalyptus urophylla* em comparação com as plantas fertilizadas com NPK. Todavia, o teor de N nas folhas das plantas fertilizadas com AR não refletiu em maior crescimento (Tabelas 4 e 5).

Para o nutriente P, as maiores médias foram encontradas nas plantas dos tratamentos L25 e L50 (1,6 g kg⁻¹ em ambos os tratamentos). As respostas à aplicação de P têm sido mais frequentes e em maior grau para o eucalipto, uma vez que os solos brasileiros geralmente apresentam baixa disponibilidade desse elemento e alta capacidade de adsorção (BASSACO et al., 2018), ademais, o eucalipto possui uma grande exigência de P na fase de implantação do povoamento (DIAS et al., 2015; FERNANDEZ et al., 2000). As maiores concentrações de P encontradas nas folhas (Tabela 8) e caule (Tabela 9) e raiz (Tabela 10) de plantas fertilizadas L25 e L50, é

uma das principais explicações para o maior desempenho em crescimento das plantas nestes tratamentos. O fósforo orgânico constitui importante reservatório de nutrição do eucalipto em solos altamente intemperizados (FOLTRAN et al., 2019), destarte, a aplicação do lodo de esgoto em plantas de eucalipto demonstrou neste estudo, alto potencial de fonte alternativa de P, capaz de suprir a demanda por este nutriente.

As plantas do tratamento AR apresentaram menor média de P nas folhas, com $0,7 \text{ g kg}^{-1}$, valor inferior ao referenciado por Raij et al. (1997). Segundo Graciano et al. (2006), o nitrogênio e o fósforo são os nutrientes que mais comumente limitam o crescimento das árvores. Os mesmos autores verificaram que em plantas de *Eucalyptus grandis*, a fertilização com P aumentou o crescimento mais do que a fertilização com N. Plantas de *Eucalyptus urophylla* cultivadas no sul do Brasil mostraram-se mais responsivas à fertilização com P, mas não à adição de N (BASSACO et al., 2018). Desta forma, uma vez que a concentração de N nas folhas das plantas fertilizadas com AR (Tabela 8) estava dentro da faixa recomendada por RAIJ et al. (1997), portanto o nutriente mais limitante para o crescimento foi o P.

A fertilização com NPK resultou na maior média para concentração de K nas folhas ($11,7 \text{ g kg}^{-1}$). Esperava-se maior concentração de K nas folhas das plantas tratadas com AR, uma vez que este nutriente é altamente solúvel em água. Todavia, a concentração de K nas folhas para este tratamento foi de $6,7 \text{ g kg}^{-1}$, valor inferior ao recomendado por Raij et al. (1997). Uma substituição parcial do K pelo Na na fisiologia das árvores, pode explicar esse comportamento, pois na análise química da água de reúso (Tabela 3), foi verificada uma concentração aproximadamente três vezes maior de Na ($62,4 \text{ mg L}^{-1}$) quando comparada a de K ($19,0 \text{ mg L}^{-1}$). Minhas et al. (2018), verificaram que o valor encontrado para o Na no solo aumentou após a irrigação com água residuária, em virtude da alta concentração deste elemento no efluente. Há diversos relatos sobre a capacidade de substituição de K por Na no cultivo do eucalipto (AMEIDA et al., 2010; BATTIE-LACLAU et al., 2016; CHAMBI-LEGOAS et al., 2020; EPRON et al., 2012). Almeida et al. (2010), observaram que o Na foi considerado um fertilizante potencial em solos com deficiência de K porque o crescimento de *Eucalyptus grandis* mostrou uma resposta positiva às aplicações de NaCl em substituição parcial de KCl. Esta substituição em algumas plantas é possível quando o Na é utilizado para funções inespecíficas desempenhadas pelo K^+ na célula vegetal,

como a manutenção do potencial osmótico em vacúolos que pode ser alcançada por outros cátions, como o Na^+ (WAKEEL et al., 2011).

Com relação às concentrações de Ca e Mg nas folhas, as maiores médias foram verificadas no tratamento NPK ($14,3 \text{ g kg}^{-1}$ e $3,4 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente). A concentração de Ca nas folhas dos quatro tratamentos estava acima ou dentro da faixa recomenda para eucalipto (RAIJ et al., 1997) e foram superiores aos valores encontrados por Zabotto et al. (2020) em *Eucalyptus urograndis* fertilizadas com doses crescentes de lodo de esgoto. As concentrações de Ca nos tratamentos L25 e L50 ($9,7 \text{ g kg}^{-1}$ e $10,8 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente) foram comparáveis aos valores relatados por Silva et al. (2018) em mudas de *Eucalyptus urograndis* cultivadas em substratos com lodo de esgoto. A concentração de Mg, estava abaixo do recomendado (RAIJ et al., 1997) em todos os tratamentos, entretanto, nos tratamentos L25 e L50 estas concentrações ($2,5 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,7 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente) estão acima dos valores observados ($1,05 \text{ g kg}^{-1}$ e $1,17 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente) por Bertolazi et al. (2017), trabalhando com o mesmo híbrido nas mesmas concentrações de lodo.

As maiores médias de S decorreram das plantas dos tratamentos L25 e L50 e ($2,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $2,2 \text{ g kg}^{-1}$), valores superiores aos encontrados por Silva et al. (2008), Bertolazi et al. (2017) e Ferraz et al. (2016) e inferiores ao relatado por Zabotto et al. (2020).

Com relação à concentração de micronutrientes nas folhas não houve diferença estatística entre os tratamentos para Cu e Fe que obtiveram médias acima do valor mínimo de referência (RAIJ et al., 1997). As plantas fertilizadas com AR apresentaram a maior média para o teor de B ($26,5 \text{ mg kg}^{-1}$), podendo estar relacionado ao fato de que B é facilmente lixiviado e solúvel em água (CHEN et al., 2017), todavia as médias das concentrações para este nutriente encontraram-se abaixo do mínimo recomendado que é de 30 mg kg^{-1} de biomassa foliar (RAIJ et al., 1997), ainda assim, não foi observado nenhum sintoma de deficiência de B nas plantas como folhas novas pequenas, deformadas e espessas, morte de gema apical, morte do ponteiro e superbrotamento das gemas laterais (SILVEIRA et al., 2015).

As maiores médias para os teores de Mn na folha foram encontradas nas plantas dos tratamentos L25 e L50, sendo que o L25 se diferiu dos tratamentos com NPK e AR. Os teores de Mn em todos os tratamentos apresentaram-se acima da faixa

de referência (RAIJ et al., 1997), entretanto não houve sintoma visual de toxidez como necroses amarronzadas e encarquilhamento de folhas novas (LACERDA, 2013).

O zinco é absorvido pelas plantas na forma catiônica Zn^{2+} e auxilia no crescimento e nos sistemas enzimáticos, além de essencial para a produção da clorofila e carboidratos (CAMARGO et al., 2013). Nota-se na Tabela 8 que os teores foliares de Zn foram superiores nos tratamentos L 25 e L50, entretanto, nas plantas fertilizadas com AR o teor deste nutriente estava abaixo do recomendado (RAIJ et al., 1997). Rocha et al. (2014), também observaram teores foliares de zinco abaixo da faixa recomendada em mudas de *Eucalyptus urograndis* fertilizadas com água residuária de esgoto municipal. O Zn é um dos principais micronutrientes cuja deficiência em culturas temporárias e perenes é a mais comum no Brasil (MALAVOLTA, 2006). Desta forma, o lodo mostrou-se mais promissor que a água de reúso no fornecimento deste nutriente.

As plantas do tratamento AR apresentaram mais nutrientes (P, K, Mg, S, B e Zn) com teores foliares abaixo do referenciado por Raij et al. (1997) em relação aos demais tratamentos, demonstrando maior desbalanceamento nutricional e resultando em menor crescimento em relação às plantas tratadas com lodo (Tabelas 4 e 5).

Assim como para as folhas (Tabela 8), a concentração de N no caule (Tabela 9) foi positivamente afetada pelos tratamentos L25 e L50 (9,5 g kg⁻¹ e 9,9 g kg⁻¹), diferindo-se do tratamento NPK (6,8 g kg⁻¹).

Tabela 9 – Concentração de macro e micronutrientes no caule *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

	Tratamentos			
	NPK	AR	L25	L50
	-----g kg ⁻¹ -----			
N	6,8 b	8,2 ab	9,5 a	9,9 a
P	0,8 b	0,3 c	1,0 ab	1,1 a
K	8,2 a	5,7 b	2,8 c	3,3 c
Ca	6,8 b	8,6 a	6,4 b	5,7 b
Mg	1,0 b	1,3 a	1,0 b	0,9 b
S	0,6 b	0,6 ab	0,7 a	0,7 a
	-----mg kg ⁻¹ -----			
B	15,2 a	13,7 a	14,0 a	12,7 a
Cu	5,5 b	11,2 a	8,0 ab	8,8 ab
Fe	81,5 a	58,3 a	28,5 a	34,7 a
Mn	205,5 a	443,7 a	456,0 a	302,0 a
Zn	24,7 b	14,7 b	149,2 a	157,5 a

As médias seguidas por letras iguais na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O teor de P no caule foi estatisticamente superior nas plantas dos tratamentos L50 (1,1 g kg⁻¹). Tal como ocorreu nas folhas, o teor de P no caule das plantas do tratamento AR foi inferior (0,3 g kg⁻¹) aos demais tratamentos, demonstrando a baixa disponibilidade deste nutriente e corroborando com a ideia de que o P foi limitante ao crescimento das plantas neste tratamento. Para a concentração de K, a maior média foi observada nas plantas do tratamento com NPK (8,2 g kg⁻¹) e as menores médias nas plantas dos tratamentos L25 e L50 (2,8 g kg⁻¹ e 3,3 g kg⁻¹ respectivamente). Como este comportamento também ocorreu nas folhas, reitera-se a evidencia de que a alta concentração do Na verificada na água de reúso possa ter substituído parcialmente a absorção de K.

As concentrações de Ca e Mg no caule (8,6 g kg⁻¹ e 1,3 g kg⁻¹, respectivamente) foram significativamente influenciadas pela aplicação da água de reúso. O Ca, depois do Na e N, é o nutriente presente em maior concentração (23,00 mg L⁻¹) na análise química da água de reúso (Tabela 3), fato que justifica os teores de Ca encontrados tanto no caule, quantos nas folhas (Tabela 8) e raiz (Tabela 10) das plantas deste tratamento.

Para o S, as maiores médias foram encontradas nas plantas dos tratamentos L25 e L50 (7,0 g kg⁻¹), não diferindo do tratamento AR.

Com relação aos teores de B, Fe e Mn não foram constatadas diferenças com a aplicação de nenhum dos tratamentos. Pôde-se observar maior média para concentração de Cu nas plantas do tratamento AR (11,2 mg g⁻¹), não diferindo-se dos tratamentos L25 e L50 (8,0 mg kg⁻¹ e 8,8 mg kg⁻¹ respectivamente).

As concentrações de Mn nas folhas (Tabela 8) e caule (Tabela 9) em todos os tratamentos foi maior do que nas raízes (Tabela 10), comportamento semelhante foi verificado por Dick et al. (2017), ao avaliar estoques de micronutrientes de um povoamento de *Eucalyptus dunnii* com 60 meses de idade. Nos tratamentos L25 e L50, houve maiores médias para o teor de Zn (149,2 mg kg⁻¹ e 157,5 mg kg⁻¹, respectivamente).

Quanto a concentração de nutrientes na raiz (Tabela 10), os tratamentos L25 e L50 apresentaram as maiores médias de N (15,2 g kg⁻¹ e 16,2 g kg⁻¹, respectivamente), P (2,8 g kg⁻¹ e 3,5 g kg⁻¹, respectivamente) e S (2,6 g kg⁻¹ e 2,5 g kg⁻¹, respectivamente). A aplicação do lodo em eucalipto aumenta a disponibilidade principalmente de N e P no solo (GOUQING, et al., 2019; ZABOTTO et al. 2019), justificando os maiores teores de N e P em folhas, caule e raiz (Tabelas 10, 11 e 12) nas plantas dos tratamentos L25 e L50, o que representa uma alternativa ao uso de fertilizantes N e P minerais (ABREU-JUNIOR, et al., 2017).

Tabela 10 – Concentração de macro e micronutrientes na raiz *Eucalyptus urophylla* após 120 dias de plantio, submetidas à diferentes fontes nutricionais

	Tratamentos			
	NPK	AR	L25	L50
	-----g kg ⁻¹ -----			
N	7,4 b	8,5 b	15,2 a	16,2 a
P	0,3 b	0,3 b	2,8 a	3,5 a
K	6,1 a	3,8 b	2,9 b	2,8 b
Ca	5,6 a	5,3 a	5,7 a	5,5 a
Mg	1,5 ab	1,7 a	1,3 b	1,1 b
S	0,8 b	1,0 b	2,6 a	2,5 a
	-----mg kg ⁻¹ -----			
B	19,8 ab	21,4 a	15,7 b	17,3 ab
Cu	8,2 b	13,0 b	34,3 ab	44,3 a
Fe	5221,3 b	7828,2 ab	9053,5 a	8295,0 ab
Mn	123,5 a	150,3 a	190,0 a	140,5 a
Zn	60,5 b	24,3 b	378,2 a	368,5 a

As médias seguidas por letras iguais na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para o K, assim como ocorreu nas folhas (Tabela 8) e no caule (Tabela 9), a maior média foi observada nas plantas do tratamento NPK (6,1 g kg⁻¹). Em plantas de álamo tratadas com lodo de esgoto foi verificado que teor de K nas raízes diminuiu com aumento das doses de lodo, os autores atribuíram este efeito a inibição de K por dos metais pesados (GOUQING et al., 2019).

Para os teores de Ca e Mn na raiz não foram constatadas diferenças estatísticas com a aplicação de nenhum dos tratamentos.

As plantas do tratamento AR apresentaram maior média com relação à concentração de Mg (1,7 g kg⁻¹), não diferindo-se do tratamento NPK (1,5 g kg⁻¹). Para a concentração de B a maior média também foi observada no tratamento AR (21,4 g kg⁻¹), diferindo-se do tratamento L25. Como citado anteriormente, o B é altamente solúvel, por isso sua disponibilidade é maior na fase líquida (água residuária) do que na fase sólida (lodo) do esgoto. A maior média de concentração de Cu na raiz foi observada em plantas que receberam o tratamento L50 (44,3 mg kg⁻¹), não diferindo-se do tratamento L25.

O maior teor médio de Fe foi observado nas plantas do tratamento L25 (9053,5 mg g⁻¹), diferindo-se do tratamento com NPK. O ferro (Fe) é o micronutriente em maior demanda pelos vegetais (MALAVOLTA, 2006) e é essencial para a biossíntese de proteínas constitutivas de cloroplastos, mitocôndrias e outras organelas (LIMA et al., 2018). Destaca-se que independentemente do tratamento aplicado, a retenção de Fe foi muito maior nas raízes, assim como constatado por Dick et al. (2017) em *Eucalyptus dunnii*. Esta maior concentração pode estar relacionada a baixa translocação deste nutriente para a parte aérea e/ou a adsorção de partículas de óxido na superfície da raiz, de difícil remoção no processo de amostragem (MAVOLTA et al., 1997).

As maiores médias do teor de Zn foram observadas nas plantas dos tratamentos L25 e L50 com 378,2 mg kg⁻¹ e 368,5 mg kg⁻¹, respectivamente, médias consideravelmente superiores quando comparadas às médias das plantas dos tratamentos NPK e AR (60,5 mg kg⁻¹ e 24,6 mg kg⁻¹). O Zn quando presente em níveis tóxicos no ambiente pode afetar o desenvolvimento vegetal (PINTO et al., 2009), todavia as doses de lodo aplicadas não foram suficientes para gerar toxidez nas plantas uma vez que não foi verificado sintomas e o crescimento foi favorecido para as plantas dos tratamentos L25 e L50.

A concentração de Zn na raiz das plantas do tratamento NPK foi aproximadamente 2,5 vezes maior que a concentração no tratamento AR, divergindo dos resultados verificados por Rasheed et al. (2020), em que a concentração de Zn nas raízes de *Conocarpus lancifolius* fertilizadas com água de reúso foi significativamente superior em relação tratamento às plantas irrigadas com água de torneira.

O lodo de esgoto costuma conter compostos orgânicos não tóxicos (matéria orgânica), compostos inorgânicos e uma quantidade relativamente pequena de metais pesados como Cd, Pb, Zn, Cu, Mn e Fe (NISSIM et al., 2018; SIMONETTE e KIEHL, 2002). Por conseguinte, as maiores concentrações de Fe e Zn no sistema radicular das plantas fertilizadas L25 e L50 podem estar relacionadas a alta quantidade destes metais verificadas na análise química do lodo de esgoto puro (Tabela 2).

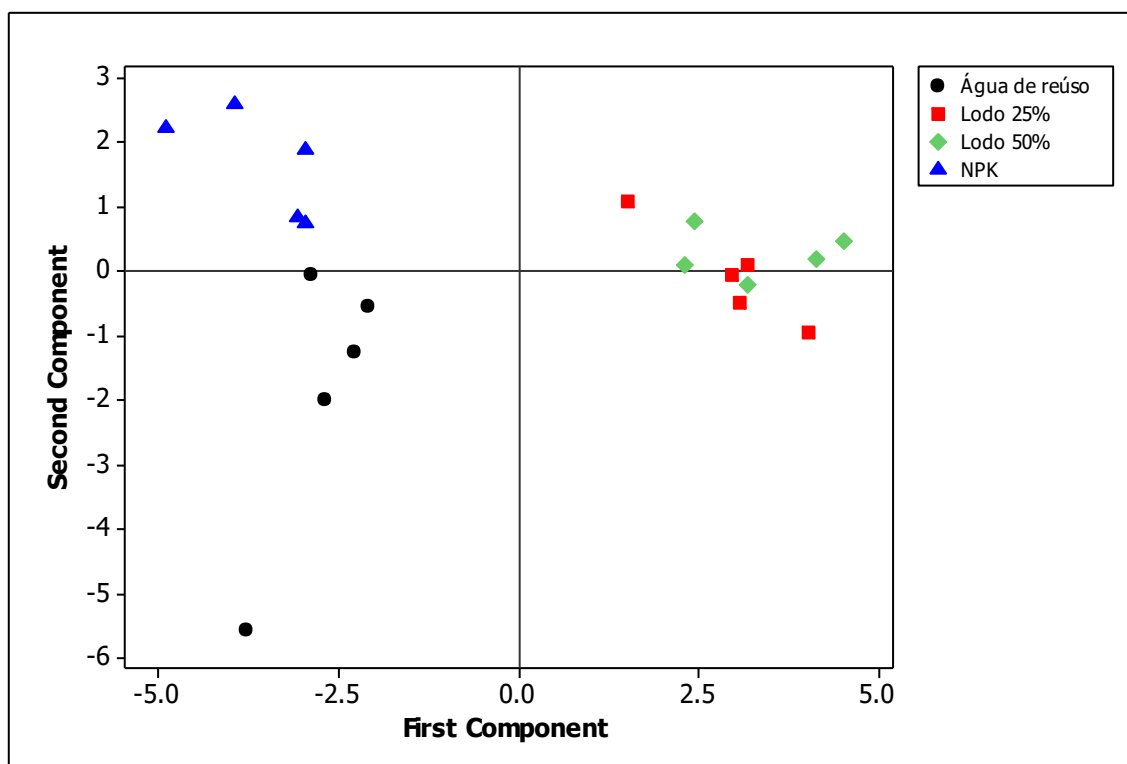
4.4 Análise de componentes principais

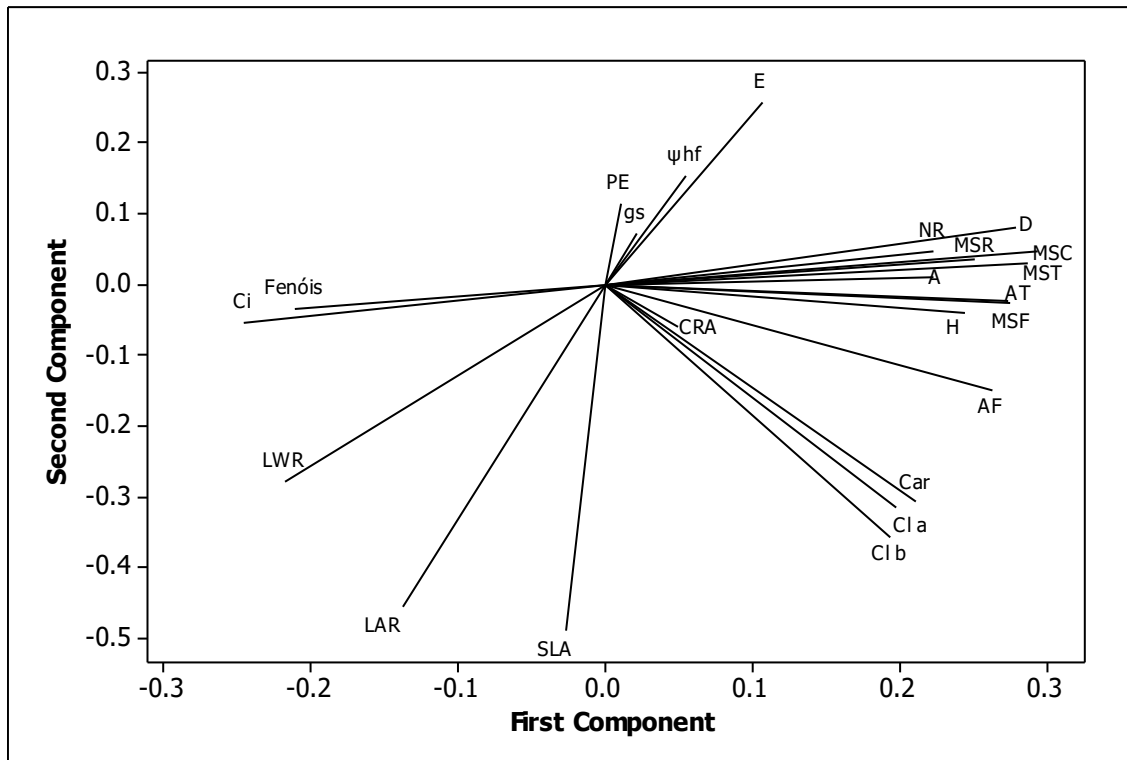
A análise de componentes principais (ACP) é uma técnica da estatística multivariada que consiste em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão denominadas de componentes principais (Hongyu et al., 2016).

Baseado no elevado número de variáveis geradas no ensaio, desenvolveu-se este estudo estatístico para agrupar os componentes principais, em função de suas respostas aos tratamentos.

Assim, de acordo com a primeira e a segunda componentes principais (x e y) com 61,6% da variância amostral, foi possível constatar que houve um comportamento de agrupamento específico, onde os tratamentos com NPK e AR formaram grupo oposto ao grupo dos tratamentos L25 e L50 (Figura 20).

Figura 20 – Agrupamento dos tratamentos considerados (NPK, AR, L25 e L50) pela análise dos componentes principais. Correlacionando-se as variáveis altura (H), diâmetro do caule (DC), área foliar (AF), massa seca foliar (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca radicular (MSR), SLA (Specific Leaf Area), LWR (Leaf Weight Ratio), LAR (Leaf Area Ratio), perda de eletrólitos (PE), clorofila a (Cl a), clorofila b (Cl b), carotenoides (Car), nitrato redutase (NR), teor de fenóis, açúcares totais (AT), conteúdo relativo de água (CRA), potencial hídrico (ψ_{hf}), fotossíntese líquida (A), condutância estomática (g_s), concentração interna de carbono nas células (C_i) e transpiração (E)





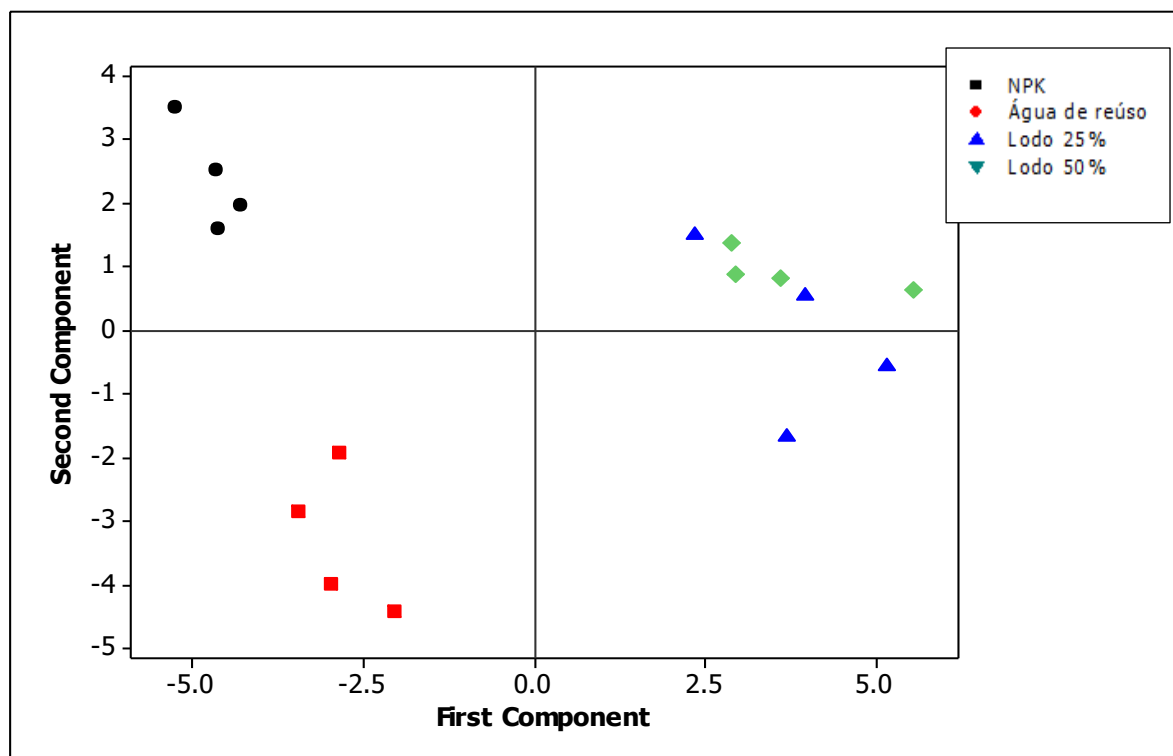
Esta dissimilaridade dos grupos indica maior resposta e correlação positiva para altura, diâmetro do caule, área foliar, massas seca de caule, raiz e folha, perda de eletrólitos, clorofila a, clorofila b, carotenoides, nitrato redutase, açúcares totais, conteúdo relativo de água, potencial hídrico, fotossíntese líquida, condutância estomática e transpiração para as plantas dos tratamentos com lodo. Por outro lado, houve correlação negativa para fenóis, concentração interna de CO₂, SLA (Specific Leaf Area), LWR (Leaf Weight Ratio), LAR (Leaf Area Ratio). Ainda para este grupo pode-se destacar que a representatividade do teor clorofila a, clorofila b e carotenoides foi similar.

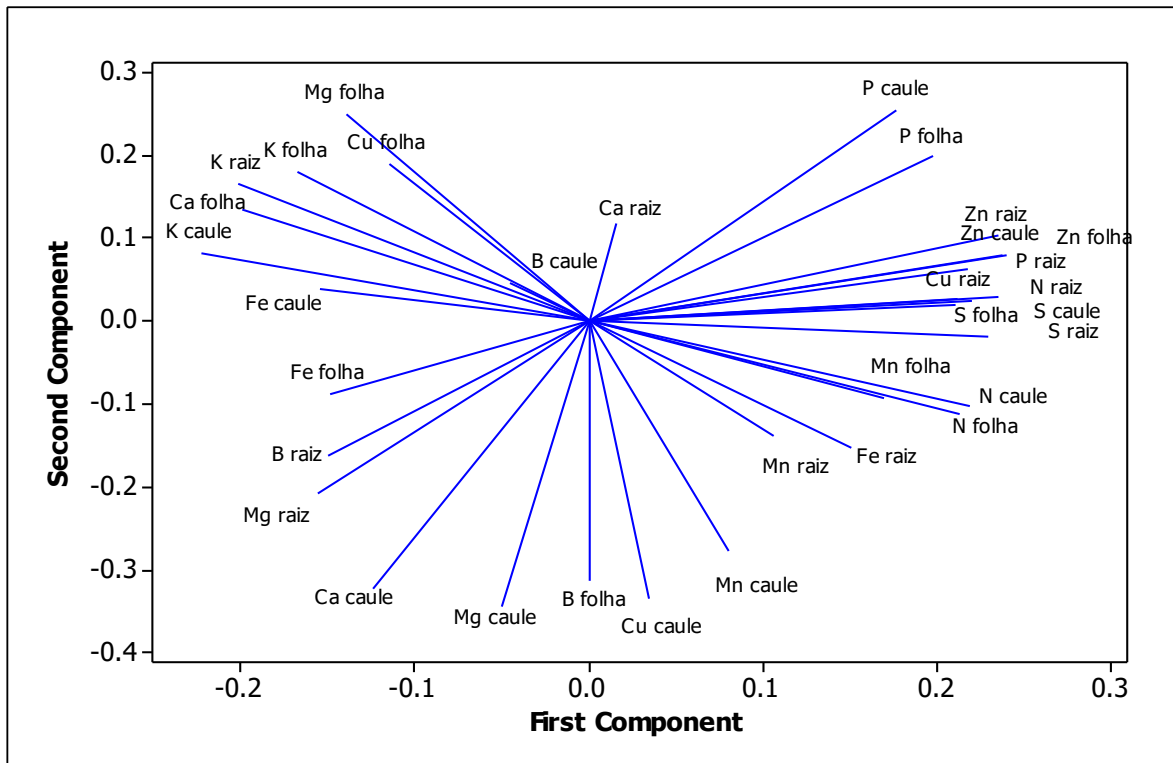
Para o tratamento com NPK houve maior representatividade para o teor de fenóis e concentração interna de carbono nas células. A perda de eletrólitos no tratamento com NPK foi mais similar aos tratamentos com lodo de esgoto. Além disso, essa variável denotou forte correlação negativa com a área foliar específica (SLA), isto é, plantas com maior área foliar específica apresentaram maior tendência a resistência de membrana ao extravasamento de eletrólitos para o meio extracelular. Nas plantas fertilizadas com AR a maior representatividade foi para as variáveis SLA (Specific Leaf Area), LWR (Leaf Weight Ratio), LAR (Leaf Area Ratio), evidenciando maior alocação de recursos na produção foliar para este tratamento.

A correlação positiva das plantas dos tratamentos L25 e L50 em relação à maioria das variáveis indica o desenvolvimento vegetal morfológico e fisiológico superior nestes tratamentos, evidenciando maior contribuição nutricional do lodo no desenvolvimento das plantas.

O tratamento estatístico para componentes principais em relação aos nutrientes (Figura 21), considerou a primeira e a segunda componentes principais (eixos x e y) com 65,9% da variância amostral. Assim, verificou-se a formação de três grupos distintos de resposta como o grupo do tratamento NPK, tratamento AR e tratamentos com lodo de esgoto (L25 e L50). Verificou-se maior similaridade entre o L25 e L50, provavelmente por se tratarem da mesma fonte nutricional.

Figura 21 – Dispersão dos tratamentos considerados (NPK, AR, L25 e L50) pela análise dos componentes principais de acordo com as concentrações de macro e micronutrientes na folha, caule e raiz das plantas de *Eucalyptus urophylla*





Para as plantas adubadas com NPK houve maior representatividade do teor de K em folhas, caule e raiz, enquanto que Ca e Mg foram mais representativos para tecido foliar.

Nas plantas que receberam AR, pôde-se observar maior representatividade para os teores de Ca no caule, B na raiz e Mg no caule e raiz. No tocante ao tecido foliar para este tratamento, apenas o teor de Fe foi representativo.

Os teores de P no caule, folhas e raiz mostraram maior variabilidade, sendo mais representativos nos tratamentos L50 e L25 e menos em plantas do tratamento AR.

Os tratamentos com lodo de esgoto também foram mais representativos para os teores de N, S e Zn em folhas, caule e raiz. Com exceção de B, os teores radiculares do demais micronutrientes analisados (Cu, Fe, Zn e Mn) foram mais representativos nos tratamentos L25 e L50.

A maior representatividade de nutrientes na raiz, sobretudo dos metais, nos tratamentos com lodo decorre da maior presença desses elementos no lodo e demonstram a capacidade do *Eucalyptus urophylla* de reter nas raízes altos teores desses elementos. Espécies florestais tem uma importante função protetora do meio

ambiente por absorver metais pesados nocivos do solo por meio do desenvolvimento sistemas radiculares extensos (BHATI e SINGH, 2003). Diversos estudos corroboram o potencial de espécies de eucalipto acumularem grandes quantidades destes metais (LUO et al., 2019; NISSIM et al., 2018; PENG et al., 2012; SIMONETTE e KIEHL, 2002).

O fato do B na raiz apresentar correlação negativa com os tratamentos com lodo 25 e L50 e positiva com o tratamento AR deve-se a alta solubilidade deste nutriente que concentra-se na água residuária quando esta é separada do lodo.

5 CONCLUSÕES

As plantas do tratamento AR apresentaram valores médios satisfatórios para as variáveis de crescimento, de modo que a aplicação deste efluente pode ser uma alternativa a nutrição de *Eucalyptus urophylla*.

A aplicação lodo de esgoto (L25 e L50) melhorou significativamente os parâmetros morfológicos, fisiológicos e nutricionais das plantas de *Eucalyptus urophylla* em relação demais tratamentos e demonstrou ser uma eficiente fonte principalmente de N, P, S e Zn.

A alta disponibilidade de P nos tratamentos com lodo foi o principal fator a promover maior desempenho em crescimento das plantas de *Eucalyptus urophylla*.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013, ano base 2012** / ABRAF, Brasília: 2013. 148 p. Disponível em: < <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-abraf13-br.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2017.
- ABREU JUNIOR, C. H. Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial Eucalyptus plantation, **Science of The Total Environment**, v. 655, p. 1457-1467. 2019.
- ABREU, A. H. M. et al. Caracterização de biossólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia Raddi*. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, p. 591-599, 2019.
- ABREU, A. H. M. et al. Resíduos sólidos urbanos na produção de mudas de *Lafoensia pacari*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 2, p. 83-87, 2017.
- ABREU-JUNIOR, C. H. et al. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in Eucalyptus plantations. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 51-58, 2017.
- AFÁZ, D. C. S. et al. Composto de lodo de esgoto para o cultivo inicial de eucalipto. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 1, 2017.
- AGRAFIOTI, E., DIAMADOPOULOS, E. A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete. **Agricultural Water Management**, v. 105, p. 57-64, 2012.
- ALMEIDA J.C.R., LACLAU J.-P., GONÇALVES J.L.M., RANGER J. & SAINT-ANDRÉ L. A positive growth response to NaCl applications in Eucalyptus plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology Management**, v. 259, p. 1786-1795, 2010.
- ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; ROGRIGUES, D. E.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efeito do déficit de pressão de vapor de água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 182-193, 2014
- ANDRADE, C. et al. Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo após sucessivas aplicações de lodo de esgoto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 48, n. 5, p. 536-544, 2013.
- ANDRADE, E. N. **O Eucalipto**. São Paulo: Chácaras e Quintais, 1939. 118 p.

- ANDREOLI, C. V. et al. **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282p.
- ANDRIANTO, H.; SUHARDI; FAIZAL, A. Measurement of chlorophyll content to determine nutrition deficiency in plants: A systematic literature review. **International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)**, p. 392-397, 2017.
- ARAÚJO, E.F. et al. Crescimento e balanço nutricional de mudas de *Enterolobium contortsiliquum* com aplicação de substratos orgânicos e água residuária. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 86, p. 169-177, 2016.
- ARIENZO, M.; CHRISTEN, E. W.; QUAYLE, W.; KUMARC, A. A review of the fate of potassium in the soil-plant system after land application of wastewaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 2-3, p. 415-422, 2009.
- ASSADI, A.; PIRBALOUTI, A. G.; MALEKPOOR, F.; TEIMORI, N.; ASSADI, L. Impact of air pollution on physiological and morphological characteristics of *Eucalyptus camaldulensis* Den. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.9, n. 2, p. 676-679, 2011.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Tradução).
- BAIOUI, R. et al. Agricultural valorization of domestic sewage sludge: Impact on growth, photosynthesis, nutrition and toxic metal accumulation in *Medicago sativa*. **Agrochimica**, v. 61, n. 1, p. 56-74, 2017.
- BARR, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficit in leaves. **Australian Journal Biological Sciences**, v.15, p.413-428, 1962.
- BARREIROS, R. M.; GONÇALVES, J. L. M.; SANSIGOLO, C. A.; POGGIANI, F. Modificações na produtividade e nas características físicas e químicas da madeira de *Eucalyptus grandis* causadas pela adubação com lodo de esgoto tratado. **Revista Árvore**, v.31, n.1, pp.103-111, 2007.
- BARRETO, P. A. B. et al. Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, 2010.
- BARRY, K. M.; NEWNHAM, G. J.; STONE, C. Estimation of chlorophyll content in *Eucalyptus globulus* foliage with the leaf reflectance model PROSPECT. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1209-1213, 2009.

BASSACO, M. V. M. et al. Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v.49, p. 681–697, 2018.

BATTIE-LACLAU, P. et al. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 364, p. 77– 89, 2016.

BAZANI, J. H. et al. Qualidade Silvicultural: a fertilização de base e sua influência no desenvolvimento inicial de plantações de eucalipto. **Série Técnica IPEF**, v. 24, n. 45, 2016.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BERTOLAZI, K. B. et al. Viabilidade da aplicação de composto de lodo de esgoto no cultivo inicial de eucalipto. **Ciência, tecnologia e ambiente**, v. 4, n. 1, p. 72-78, 2017.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312 p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349 p.

BEZERRA, L. J. D. et al. Análise de crescimento do algodão colorido sob os efeitos da aplicação de água residuária e biossólidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, 2005.

BHATI, M.; SINGH, G. Growth and mineral accumulation in *Eucalyptus camaldulensis* seedlings irrigated with mixed industrial effluents. **Bioresource Technology**, v. 88, n. 3, p. 221 – 228, 2003.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L. Sustainable management of Eucalyptus plantations in a changing world. In: **Proceedings of IUFRO Conference**, October. 2004. p. 11-15.

BITTENCOURT, S. et al. Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 315-324, 2012.

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**, p. 388-393, 2015.

BOURIOUG, M. et al. Evaluation of Sewage Sludge Effects on Soil Properties, Plant Growth, Mineral Nutrition State, and Heavy Metal Distribution in European

Larch Seedlings (*Larix decidua*). **Arabian Journal for Science and Engineering**, v.39, p. 5325–5335, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Brasília, 2006. 32p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 19 jul. 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. Brasília: SNS/MDR, 2019. 180 p.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54, de 28 de novembro de 2005 - Estabelece critérios gerais para reúso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direito não potável de água, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília – DF, novembro de 2005.

CABREIRA, G. V. et al. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 47, n. 2, p. 165-176, 2017.

CAMARGO, R.; MALDONADO, A. C. D.; DIAS, P. A. S.; SOUZA, M. F.; FRANÇA, M. S. Diagnose 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.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação (Norma P4.230). São Paulo: CETESB, 1999.

CHAMBI-LEGOAS, R.; CHAIX, G.; TOMAZELLO-FILHO, M. Effects of potassium/sodium fertilization and throughfall exclusion on growth patterns of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden during extreme drought periods. **New Forests**, v. 51, p. 21–40, 2020.

CHEN, Z.; TAYLOR, A. A.; ASTOR, S. R.; XIN, J.; TERRY, N. Removal of boron from wastewater: Evaluation of seven poplar clones for B accumulation and tolerance. **Chemosphere**, v.167, p. 146-154, 2017.

COSCIONI, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. **Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a Resolução nº 375 do CONAMA**. Botucatu: FEPAF, 2010. 407p.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga, Botucatu**, v. 14, n.1, p.1-11, jan, 2009.

DEDE, G.; OZDEMIR, S. Effects of elemental sulphur on heavy metal uptake by plants growing on municipal sewage sludge. **Journal of environmental management**, v. 166, p. 103-108, 2016.

DIAS, L. P. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SIMONETE, M. A.; BICARATTO B. Relative efficiency of rock phosphates in fertilization of planting seedlings *Eucalyptus dunnii* Maiden and *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage in soil with and without liming. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1. p. 37–48, 2015.

DICK, G. et al. Micronutrients and biomass in *Eucalyptus dunnii* Maiden stand. **Revista Árvore**, v. 41, n. 1, e410113, 2017.

DORES-SILVA, P. R.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. O. O. Acompanhamento químico da vermicompostagem de lodo de esgoto doméstico. **Química Nova**, v. 34, n. 6, p. 956-961, 2011.

DUBOIS, M. et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350-356, 1956.

EPRON, D. et al. Do changes in carbon allocation account for the growth response to potassium and sodium applications in tropical *Eucalyptus* plantations? **Tree Physiology**, v. 32, n. 6, p. 667–679, 2012.

FERNANDES, A. L. T.; FLORÊNCIO, T. M.; FARIA, M. F. Análise biométrica de florestas irrigadas de eucalipto nos cinco anos iniciais de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 505-513, 2012.

FERNANDEZ, J. Q. P.; DIAS, L. E.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R F.; MORAES, E. J. Productivity of *Eucalyptus camaldulensis* affected by rate and placement of two phosphorus fertilizers to a Brazilian Oxisol. **Forest Ecology and Management**. v.127, p. 93 – 102, 2000.

FERRAZ, A. D.; 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.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil: Zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF, 2016. 448p.

GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, 2005.

GLYNN, C. et al. Effects of nutrient availability on biomass allocation as well as constitutive and rapid induced herbivore resistance in poplar. **Oikos**, v. 101, p. 385-397, 2003.

GOMES, E. R. **Aplicação de água residuária e deficiência hídrica em espécies de interesse agrônomo**. 2016.157 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008.

GONÇALVES, J. L. M. **Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e espécies típicas da Mata Atlântica**. Documentos Florestais, Piracicaba, v.15, p.1-23, 1995.

GRACIANO, C. et al. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, v. 236, p. 202 – 210, 2006.

GUOQING, X.; XIUQIN, C.; LIPING, B.; HONGTAO, Q.; HAIBO, L. Absorption, accumulation and distribution of metals and nutrient elements in poplars planted in land amended with composted sewage sludge: A field trial. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 182, 2019.

HARTMANN, H.; TRUMBORE, S. Understanding the roles of non-structural carbohydrates in forest trees—From what we can measure to what we want to know. **New Phytologist**. v. 211, n. 2, p. 386–403, 2016.

HASHISH, K. I.; MAZHAR, A. A.M.; AZIZ, N. G. A.; MAHGOUB, M. H. Ability of some woody trees for growth under the stress of irrigation with wastewater. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, p. 234–238, 2017.

HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. The Dilemma of Plants: To Grow or Defend. **Q. Rev. Biol.** v. 67, p. 283–335, 1992.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 4, p. 75-95, 2002.

HOEK, W. V. et al. **Urban wastewater: a valuable resource for agriculture. A case study from Horoonabad, Pakistan**. Colombo: International Water Management Institute, 2002. 29 p.

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, v. 1, n. 5, p. 83 – 90, 2016.

HWETA, M.; AGRAWAL, S.B. Interactive effects between supplemental ultraviolet-B radiation and heavy metals on the growth and biochemical characteristics of *Spinacia oleracea* L. **Braz. J. Plant Physiol.**, Londrina, v. 18, n. 2, p. 307-314, 2006.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **IBÁ 2019, ano base 2018**, Brasília: 2019. 80 p. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 07/08/2020

IBRAHIM, J. F. D. O. N.; SILVA JUNIOR, I. V.; BARROS, F.C.; PAEZ, D. R. M., NASCENTES, A. L.; SILVA, L. D. B. Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas e no cultivo do eucalipto (*Eucalyptus* spp). **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 564-579, 2019.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Situação Saneamento no Brasil. Disponível em:<<http://www.tratabrasil.org.br/>>. Acesso em: 18 jul. 2017.

JAWORSKI, E. G. Nitrate reductase assay in intact plant tissues. **Biochemical and Biophysical Research Communications**. v.43, p. 1274 -1279, 1971.

LACERDA, F. J. P. **Papel da hipóxia e do manganês na tolerância diferencial de clones de eucalipto à Seca de Ponteiro no Vale do Rio Doce**. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

LAFUENTE, M. T.; BELVER, A.; GUYE, M. G.; SALVEIT, M. E. Effect of the temperature conditioning on chilling injury of cucumber cotyledons. **Plant Physiology**. 95: 443-449, 1991.

LEAL, R. M. P. et al. Carbon and nitrogen cycling in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with wastewater. **Agricultural water management**, v. 97, n. 1, p. 271-276, 2010.

LEE, D.W.; BREMMEIER, S.; SMITH, A.P. The selective advantage of anthocyanins in developing leaves of mango and cacao. **Biotropica**, v. 19, p. 40-49, 1987.

LIMA, M. D. R. et al. Brassinosteroids mitigate iron deficiency improving nutritional status and photochemical efficiency in *Eucalyptus urophylla* plants. **Trees**, v. 32, p. 1681–1694, 2018.

LIRA, A. C.; GUEDES, M. C.; SCHALCH, V. Reciclagem de lodo de esgoto em plantação de eucalipto: carbono e nitrogênio. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 207-216, 2008.

LUO, J. et al. The phytoremediation efficiency of *Eucalyptus globulus* treated by static magnetic fields before sowing. **Chemosphere**, v. 226, p. 891 – 897, 2019.

MA, Q. et al. Transcription Factor AREB2 Is Involved in Soluble Sugar Accumulation by Activating Sugar Transporter and Amylase Genes. **Plant Physiology**, v. 174, n. 4, p. 2348–2362, 2017.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1 Ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 Ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Potássio e do Fosfato, 1997.

MARINHO, E. L. et al. Evaluation of the productivity of irrigated *Eucalyptus grandis* with reclaimed wastewater and effects on soil. **Water, air and soil pollution**, v. 225, n. 1, p. 1, 2014.

MEDEIROS, S. de S. et al. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 109-115, 2008.

MINHAS, P. S.; YADAV, R. K.; LAL, K.; CHATURVEDI, R. K. Effect of long-term irrigation with wastewater on growth, biomass production and water use by *Eucalyptus (Eucalyptus tereticornis Sm.)* planted at variable stocking density. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 151-160, 2015.

MOHAMED, B. et al. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: Effects on certain soil properties, growth and yield componentes. **Science of The Total Environment**, v. 627, p. 681-688, 2018.

MOREIRA, R. S. et al. Nutritional status and physiological parameters of maize cultivated with sewage sludge. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, 2020.

MOSQUERA-LOSADA, M. R. et al. Sewage sludge stabilisation and fertiliser value in a silvopastoral system developed with *Eucalyptus nitens* Maiden in Lugo (Spain). **Science of The Total Environment**, v. 566, p. 806-815, 2016.

NASCIMENTO, J. S.; FIDELES FILHO, J. Crescimento, produção e alterações químicas do solo em algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 2, p. 36 – 45, abr. – jun., 2015.

NGUYEN, P. N.; NIEMEYER, E. D. Effects of Nitrogen Fertilization on the Phenolic Composition and Antioxidant Properties of Basil (*Ocimum basilicum L.*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 18, p. 8685-8691, 2008.

NIINEMETS Ü. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 623–1639, 2010.

NISSIM, W.G. et al. Phytoremediation of sewage sludge contaminated by trace elements and organic compounds. **Environmental Research**, v.164, p. 356-366, 2018.

OLIVEIRA, D. P. F., ANDRADE, T. C. O., BROETTO, F. Água Residuária: Usos e Legislação In: Zabotto, A. R. **Estudos Sobre Impactos Ambientais: Uma Abordagem Contemporânea**. Botucatu: FEPAF, 2019, cap. 2, p. 11-19.

OLIVEIRA, D. P. F.; SILVA, J. A.; GAONA-ACEVEDO, A. F.; MACHUCA, L. M. R.; BROETTO, F. Influência do manejo nutricional na atividade enzimática da nitrato redutase. In: BROETTO, F.; MINHONI, R. T. A.; OLIVEIRA, D. P. F. O. (Org.) **Seminários em Irrigação e drenagem**. 1 Ed. Botucatu: FEPAF, 2018, v.1, p. 86-93.

OLIVEIRA, R. L. Viabilidade do lodo de esgoto na agricultura. **Exatas & Engenharia**, v. 7, n. 17, 2017.

OTALORA, G.; PIÑERO, M.C.; LÓPEZ-MARÍN, J.; VARO, P.; DEL AMOR, M. F. Effects of foliar nitrogen fertilization on the phenolic, mineral, and amino acid composition of escarole (*Cichorium endivia L. var. latifolium*). **Scientia Horticulturae**, v. 239, p. 87-92. 2018.

PALLET, R. N.; SALE, G. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in Eucalyptus pulpwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1, p. 33-43, 2004.

PENG, X. et al. Lead tolerance and accumulation in three cultivars of *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*: implication for phytoremediation. **Environmental Earth Sciences**, v. 67, p. 1515–1520, 2012.

PEREIRA, F. C. M.; YAMAUTI, M. S.; ALVES, P. L. C. A. Interação entre manejo de plantas daninhas e adubação de cobertura no crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 941-950, 2012.

PEREIRA, V. G. M. F. et al. Irrigação e fertirrigação no desenvolvimento de eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1100-1114, 2019.

PINTO, S. I. C. et al. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, 2011.

PINTO, S. I. C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p.1005-1014, 2009.

QADIR, M. et al. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 561-568, 2010.

QUINTANA, N. R. G.; DO CARMO, M. S.; DE MELO, W. J. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. **Nucleus**, v. 8, n. 1, 2011.

RAIJ, B. V., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., & FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285 p. Boletim técnico, 100.

RASHEED, F. et al. Phytoaccumulation of Zn, Pb, and Cd in *Conocarpus lancifolius* irrigated with wastewater: does physiological response influence heavy metal uptake? **International Journal of Phytoremediation**, v. 22, n.3, p. 287-294, 2020.

ROCHA, S. A. et al. Growth and nutrition leaf of *Eucalyptus* sp. due to the use of different water qualities. **Rev. de Ciências Agrárias**, v. 37, n. 2, p.141-151, 2014.

RODRIGUES, L. N. et al. Aplicação de água residuária de esgoto doméstico e seus impactos sobre a fertilidade do solo. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 55-67, 2009a.

RODRIGUES, L. N. et al. Crescimento e produção de bagas da mamoneira irrigada com água residuária doméstica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, 2009b.

RODRÍGUEZ-LIÉBANA, J. A. et al. Irrigation of a Mediterranean soil under field conditions with urban wastewater: effect on pesticide behaviour. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 185, p. 176-185, 2014.

SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Teores de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.45-57, 2006.

SANTOS, H.G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS, S. G.; RIBEIRO, F. S.; FONSECA, C. S.; PEREIRA, W.; SANTOS, L. A.; REIS V. M. Development and nitrate reductase activity of sugarcane inoculated with five diazotrophic strains. **Archives of Microbiology**, v.199, n.6, p. 863–873, 2017.

SHAH, F. U. R. et al. Response of *Eucalyptus Camaldulensis* to irrigation with the Hudhara drain effluent. **International Journal of Phytoremediation**, v. 12, n. 4, p. 343-357, 2010.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P. SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant growth. **Waste Management**, v. 64, p. 117-132, 2017.

SHWETA, M.; AGRAWAL, S.B. Interactive effects between supplemental ultraviolet-B radiation and heavy metals on the growth and biochemical characteristics of *Spinacia oleracea* L. **Braz. J. Plant Physiol.**, Londrina, v. 18, n. 2, p. 307-314, 2006.

SILVA, C. R. P. **Desenvolvimento inicial do eucalipto e fertilidade do solo após aplicação de lodo de esgoto e composto de lodo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2019.

SILVA, F. A. M.; NUNES, G. M.; ZANON, J. A.; GUERRINI, I. A.; SILVA, R. B. Resíduo agroindustrial e lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *Eucalyptus urograndis*. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 827-828, 2018.

SILVA, J. A.; ZANETTE, M. M.; CECHIN, I. A influência das águas residuais tratadas municipais nas características morfo-fisiológicas de plantas de eucalipto. **Water Air Solo Pollut**, v. 225, n. 9, 8 p., 2014.

SILVA, J. A.; ZANETTE, M. M.; CECHIN, I. The influence of municipal treated wastewater on morpho-physiological characteristics of *Eucalyptus* plants. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 225, n. 9, p. 1, 2014.

SILVA, L.P. et al. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 16, n. 5, 2012.

SILVA, M. D. O. P.; CORREA, G. F.; COELHO, L.; RABELO, P. G. Avaliação de dois tratamentos de adubação em plantio de eucalipto clonal em solo arenoso. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, 2012b.

SILVA, P. H. M. et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67-78, 2013.

SILVA, Paulo H. M. et al. 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, 2012.

SILVEIRA, R. L. V. A.; MOREIRA, A.; TAKASHI, E. N.; SGARBI, F.; BRANCO, E. F. Deficiency symptoms of macronutrients and of boron in hybrids clones of *Eucalyptus grandis* with *Eucalyptus urophylla*. **Cerne**, v. 8, n. 2), p.107-116, 2015.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. C. Extração e fitodisponibilidade de metais em resposta a adição de lodo de esgoto no solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p.555-563, 2002.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R.; FLEISHER, D. H.; TIMLI, D. J. Relationship between photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence in soybean under varying phosphorus nutrition at ambient and elevated CO₂. **Photosynthetica**, v. 55, n. 3, p. 421-433, 2017.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Jr. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, Davis, v.16, n.3, p.144-158, 1965.

SONG, U.; LEE, E. J. Environmental and economical assessment of sewage sludge compost application on soil and plants in a landfill. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n.12, p. 1109-1116, 2010.

LEILA, S. et al. Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. **Biotechnology Reports**, v. 13, p. 8-12, 2017.

SOUSA, J. T. et al. Reúso de água residuária na produção de pimentão (*Capsicum annuum* L.). R. Bras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 89-96, 2006.

SOUZA, A. E. C. et al. Teor de óleo no pinhão manso em função de lâminas de água residuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.46, n.1, p.108-111, 2011.

- SOUZA, D. P. et al. Influência da fertirrigação por sulco utilizando água residuária e diferentes níveis de adubação na produtividade do feijoeiro. **Irriga**, v. 20, n. 2, p. 348, 2015.
- STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.
- TASSO JÚNIOR, L.C. et al. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, p. 276-283, 2007.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Fotossíntese em *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 4, p. 336-345, 2015.
- TOZE, S. Reuse of effluent water—benefits and risks. **Agricultural water management**, v. 80, n. 1, p. 147-159, 2006.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 1-15. 1996.
- USMAN, K. et al. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications *American Journal of Plant Sciences*, v.3, n.12, p. 1708-1721, 2012.
- VAN GENUTCHEN, M.T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated. **Soil Science Society American Journal**, v. 41, p. 892-898, 1980.
- VÂȘCĂ-ZAMFIR, D. et al. Effect of fertilization regime on *Murraya exotica* plants growth and bioactive compounds. **Romanian Biotechnological Letters**, v. 24, n. 2, p. 245-253, 2018.
- VIEIRA, G. E. G. et al. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto—uma revisão. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 81-95, 2011.
- WAKEEL, A.; FAROOQ, M.; QADIR, M.; SCHUBERT, S. Potassium Substitution by Sodium in Plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 30, n. 4, p. 401 – 413, 2011.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1, p. 113-140, 2004.

ZABOTTO, A. R. et al. Nutrition and physiology of hybrid *Eucalyptus urograndis* in soil fertilized with sewage sludge. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 32, n. 1, p. 19-24, 2020.

ZABOTTO, A. R. et al. Uso de lodos residuales como fertilizante en eucalipto - diagnóstico de investigación. *IDESIA*, v. 37, n. 2, 2019.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, 2004.

ZHANG, S. R. et al. Lanthanum tolerance and accumulation characteristics of two *Eucalyptus* species. *Ecological Engineering*, v. 77, p. 114-118, 2015.

ZHAO, J. et al. Effects of understory removal and nitrogen fertilization on soil microbial communities in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 310, p. 80-86, 2013.