

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

TESE

**Efeitos de Diferentes Níveis de Irrigação
Sobre o Crescimento de Mudas de Pinus (*Pinus elliottii* var.
elliottii) e de Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*)
Cultivados em Substrato Contendo Lodo de Esgoto e
Sobre a Lixiviação de Metais Pesados Presentes no Composto**

Marcelo Luz Matos



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

**EFEITOS DE DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO SOBRE O
CRESCIMENTO DE MUDAS DE PINUS (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) E DE
EUCALIPTO (*Eucalyptus urograndis*) CULTIVADOS EM SUBSTRATO
CONTENDO LODO DE ESGOTO E SOBRE A LIXIVIAÇÃO DE
METAIS PESADOS PRESENTES NO COMPOSTO**

MARCELO LUZ MATOS

Sob a Orientação do Professor

Leonardo Duarte Batista da Silva

e Co-orientação do Professor

Gustavo Bastos Lyra

Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, Área de Concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

Seropédica, RJ
Outubro de 2017

L27e Luz Matos, Marcelo , 1971-
Efeitos de diferentes níveis de irrigação sobre o crescimento de mudas de Pinus (Pinus elliottii var. elliottii) e de Eucalipto (Eucalyptus urograndis) cultivados em substrato contendo lodo de esgoto e sobre a lixiviação de metais pesados presentes no composto / Marcelo Luz Matos. - 2017.
187 f.

Orientador: Leonardo Duarte Batista da Silva.
Coorientador: Gustavo Bastos Lyra.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, PPGCTIA, 2017.

1. Evapotranspiração. 2. Mudas Florestais. 3. Lisímetro. 4. Metais Pesados. 5. Lodo de Esgoto. I. Duarte Batista da Silva, Leonardo , 1971-, orient. II. Bastos Lyra, Gustavo, -, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. PPGCTIA. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou integral desta Tese, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
EM AGROPECUÁRIA**

MARCELO LUZ MATOS

Tese submetida como requerimento parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, área de concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

TESE APROVADA EM 28/10/2017

Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr. UFRRJ
Orientador

Alexandre Lioi Nascentes. Dr. UFRRJ

Carlos Rodrigues Pereira. Dr. UFF

Conan Ayade Salvador. Dr.. UFRRJ

Lusimar Lamarte Gonzaga Galindo da Silva. Dr. IPJBRJ

A minha Mãe, exemplo do verdadeiro amor.
Ao meu Pai (*in memorium*), exemplo de dedicação à família.
Aos meus irmãos, Claudio, Vania e Elaine, e aos meus tios pelos incentivos.
A minha esposa, Cristiane, pela compreensão e toda ajuda.
E aos meus filhos, Lucas e Isabela.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, que dedicou integralmente sua vida na criação dos filhos e netos, sempre com muito amor e generosidade.

À minha esposa Cristiane e aos meus filhos Lucas e Isabela, pela compreensão e apoio na realização deste trabalho, e por me confortar sempre com muito carinho.

Aos meus irmãos e tios pelos incentivos na superação dos momentos mais difíceis.

Ao Professor Leonardo Duarte Batista da Silva, pela orientação, amizade, oportunidade, paciência e pelo exemplo de dedicação na condução de seus trabalhos.

Aos amigos Carlos Henrique, Vanderlei, Edson e Cleber, do Jardim Botânico do Rio de Janeiro, por todo apoio e incentivo dados para a execução do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pela oportunidade dada para que eu pudesse realizar o curso.

Ao PPGCTIA pelo acolhimento e apoio dado na execução deste trabalho, ressaltando o trabalho de toda a coordenação pelo empenho no crescimento do curso.

A Renata, funcionária da secretaria do PPGCTIA, por toda ajuda ao longo destes anos.

Aos membros das Bancas Examinadoras, da qualificação e de defesa, que com seus conhecimentos me orientaram e ajudaram a enriquecer a pesquisa por meio de críticas e sugestões.

A colega de curso, Doutora Erica Souto Abreu Lima, e ao Laboratório de Química e Poluição do Solo, pelo auxílio nas análises químicas.

Ao biólogo César Seleri Bittencourt e a CEDAE pela parceria no desenvolvimento e execução da pesquisa, fornecendo todo o material necessário.

A todos os meus amigos *Karassus*, que me incentivaram neste importante passo dado em minha vida. Ao *Karassu* Leonardo Hamacher, pelas companhias diárias nas jornadas a UFRRJ e ao *Karassu* Luciano Passos, pelos auxílios e incentivos dados.

Ao bolsista Bernardo Almeida, pela ajuda nas coletas dos dados e demais atividades.

A todos que auxiliaram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

Muito Obrigado!

BIOGRAFIA

Marcelo Luz Matos, filho de Maria Marcia Luz Matos e Helio da Silva Matos, nasceu na cidade do Rio de Janeiro - RJ em, 12 de agosto de 1971. No ano de 1992 ingressou no curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), graduando-se em 1997. No ano de 2000 concluiu o Mestrado em Engenharia Agrícola na mesma universidade (UFV). Em 2002 ingressou como Tecnologista no Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ), atuando nas áreas de Irrigação e Mecanização. Entre 2003 e 2005 exerceu o cargo de Coordenador de Conservação da Área Verde do JBRJ, e entre 2006 e 2008 foi professor-substituto no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal Fluminense (UFF).

RESUMO GERAL

MATOS, Marcelo Luz. **Efeitos de Diferentes níveis de irrigação sobre o crescimento de mudas de Pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) e de Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivados em substrato contendo lodo de esgoto e sobre a lixiviação de metais pesados presentes no composto.** 2017. 187 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Pró-reitoria de Pesquisa e Pós Graduação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

No Brasil, aproximadamente 70% de toda água consumida é utilizada na agricultura. Expectativas de aumento na demanda, por diferentes segmentos, exigem ações que garantam a todos o direito de acesso a este recurso. O tratamento de esgotos além de demandar água produz um resíduo (lodo de esgoto), que descartado em aterros sanitários reduz a vida útil dos mesmos, no entanto é amplamente utilizado na melhoria da fertilidade do solo, embora haja riscos associados a presença de metais pesados. Seu uso como substrato na produção de mudas florestais é uma interessante alternativa. Considerando a importância do pinus e do eucalipto para as indústrias madeireiras no Brasil e na Argentina, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura) sobre o crescimento de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), por meio das variáveis: altura (H), diâmetro do coleto (DC), relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), biomassa seca total (MST), relação das biomassas da parte aérea e radicular (MSPAMSR), Índice de qualidade de Dickson (IQD) e Eficiência no Uso da Água (EUA), cultivados em substrato contendo lodo de esgoto (60% + 40% vermiculita) e sobre a lixiviação de metais pesados (zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo) presentes no composto. O experimento foi conduzido no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. O minilímetro construído para medir a evapotranspiração das mudas teve seu desempenho considerado satisfatório para medições em escalas inferiores a diária, avaliados por meio de indicadores de precisão (r), de exatidão (d) e de confiança (c) e com erros inferiores a 1 grama por tubete. A evapotranspiração (ET_c) das mudas de pinus e eucalipto, observadas nos minilímetros apresentaram médias de 2,30 e 1,66 mm d⁻¹, respectivamente, obtendo valores médios de K_c iguais a 0,95 e 1,48, respectivamente. Não foram verificados efeitos das diferentes lâminas aplicadas (níveis de irrigação) sobre as variáveis de crescimento estudados (H, DC, RHDC, MST, MSPAMSR e IQD). No entanto a lâmina correspondente a 100% da ET_c mostrou-se mais eficiente (maiores EUA), de forma que o excesso de água aplicado pelos tratamentos superiores não resultou em benefícios efetivos (ganho de massa) para as mudas de pinus e de eucalipto, representando desperdício de água. O uso de lodo de esgoto, na composição do substrato, foi viável, mantendo os valores semelhantes aos da literatura. Em relação aos metais pesados, o elemento mais preocupante foi o zinco, pois, inicialmente, o seu teor, no substrato, esteve 27% acima do limite estabelecido pela resolução N° 375/2006 do CONAMA; e no efluente gerado pelo excesso de irrigação esteve nas lâminas equivalentes a 200% e 300% da evapotranspiração acima 39,4% e 15,6%, respectivamente, dos limites da resolução N° 430/2011 do CONAMA. Os demais elementos estudados estiveram sempre abaixo dos limites definidos pelas duas resoluções. A utilização do lodo de esgoto como substrato para produção de mudas florestais é uma alternativa interessante mas que exige cuidados no manejo da irrigação.

Palavras-chave: Lodo de Esgoto. Níveis de Irrigação. Mudas Florestais.

GENERAL ABSTRACT

MATOS, Marcelo Luz. **Effects of different irrigation levels on the growth of Pine (*Pinus elliottii* var. *Elliottii*) and Eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*) seedlings cultivated in substrates containing sewage sludge and on the leaching of heavy metals present in compost.** 2017. 187 p. Thesis (Doctorate in Science, Technology and Innovation in Agriculture). Pró-reitoria de Pesquisa e Pós Graduação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

In Brazil, approximately 70% of all water consumed is used in agriculture. Expectations of increased demand, by different segments, require actions that guarantee everyone the right of access to this resource. The treatment of sewage in addition to demanding water produces a residue (sewage sludge), which discarded in landfills reduces the useful life of the same, however is widely used in improving soil fertility, although there are risks associated with the presence of heavy metals. Its use as a substrate in the production of forest seedlings is an interesting alternative. Considering the importance of pine and eucalyptus for the timber industries in Brazil and Argentina, the objective of this study was to evaluate the effects of different levels of irrigation (100%, 200%, 300% and 400% of crop evapotranspiration) on the growth of pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) and eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*) seedlings, by means of the following variables: height (H), collar diameter (CD), height:collar diameter ratio (HCDR), total dry biomass (TDM), ratio of shoot and root biomass (SMRMR), Dickson Quality Index (DQI) and Water Use Efficiency (WUE), grown on substrate containing sewage sludge (60% + 40% vermiculite) and on the leaching of heavy metals (zinc, cadmium, lead, copper, nickel and chrome) present in the compound. The experiment was conducted at the Botanical Garden of Rio de Janeiro. The mini-lysimeter constructed to measure the evapotranspiration of the seedlings had its performance considered satisfactory for measurements in scales lower than the daily, evaluated by precision (r), accuracy (d) and confidence (c) indicators and with errors less than 1 gram per carton. The evapotranspiration (ET_c) of the pine and eucalyptus seedlings, observed in the minilimeters presented averages of 2.30 and 1.66 mm d⁻¹, respectively, obtaining average values of K_c equal to 0.95 and 1.48, respectively. No effects of the different applied slides (irrigation levels) on the studied growth variables (H, CD, HCDR, TDM, SMRMR and DQI) were verified. However, the depth corresponding to 100% ET_c showed to be more efficient (greater WUE), so that the excess water applied by the superior treatments did not result in effective benefits (mass gain) for the pine and eucalyptus seedlings, representing waste of water. The use of sewage sludge in the substrate composition was feasible, maintaining values similar to those observed in the literature. Regarding heavy metals, the most worrying element was zinc, since, initially, its content in the substrate was 27% above the limit established by resolution No. 375/2006 of CONAMA; and in the effluent generated by the excess irrigation was in the blades equivalent to 200% and 300% of evapotranspiration above 39.4% and 15.6%, respectively, of the limits of resolution No. 430/2011 of CONAMA. The other elements studied were always below the limits defined by the two resolutions. The use of sewage sludge as a substrate for the production of forest seedlings is an interesting alternative but requires careful management of irrigation.

Keywords: Sewage Sludge. Irrigation Levels. Forest seedlings.

RESUMEN AMPLIADO

MATOS, Marcelo Luz. **Efectos de diferentes niveles de irrigación sobre el crecimiento de las plantines de Pinos (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) y de Eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivados en sustrato que contiene lodo de depuradora y sobre la lixiviación de metales pesados presentes en el compuesto.** 2017. 187 p. Tesis (Doctorado en Ciencia, Tecnología e Innovación en Agricultura). Pró-reitoria de Pesquisa e Pós Graduação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, 2017.

1. Introducción

En Brasil el consumo de agua por la agricultura representa aproximadamente el 70% de toda el agua consumida en el país, seguido por los consumos industriales (22%) y domésticos (8%), de acuerdo con los datos del Ministerio de Medio Ambiente. Aunque se encuentran variaciones de estos números en la literatura, la discrepancia entre los volúmenes utilizados en la agricultura y consumidos domesticamente, resalta la importancia y la necesidad de planificación, gestión, y manejo de los recursos hídricos, de forma eficiente, permitiendo a toda población, urbana y rural, acceso al agua, en cantidades y calidades satisfactorias.

Expectativas de aumento de la demanda de agua, para usos agrícolas, industriales y domésticos, exigen acciones de todos los segmentos de la sociedad, visando la garantía al acceso al agua por todos los brasileños. En 2003/2004 investigaciones indicaban que aproximadamente 3,44 millones de hectáreas (5,9% del área cultivada) tenían irrigación. En 2006, el censo agropecuario del Instituto Brasileña de Geografía y Estadística (IBGE), presentaba un área irrigada equivalente a 4,54 millones de hectáreas, equivalente al 7,5% del área total de cultivos. En el año 2016 el gobierno federal anunció el Plan para la expansión, mejora y desarrollo sostenido de la agricultura irrigada, con el objetivo de fomentar la expansión de 5 millones de hectáreas irrigadas en el país en 10 años, pasando de los 6,1 millones a 11,2 millones de hectáreas el tamaño del área irrigada (MAPA, 2016).

Los datos del Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento - SNIS, vinculado al Ministerio de las Ciudades, señalan una tendencia de aumento en la demanda por agua, destinada al uso doméstico. Los levantamientos apuntan que mientras que el 93,2% de la población urbana (o el 82% de la población nacional), en promedio, es atendida por redes de abastecimiento de agua, sólo el 57,6% de esta población es atendida por red de alcantarillado. En cuanto al tratamiento de las aguas residuales, los datos indican que el índice promedio del país llega al 40,8% para la estimación de las alcantarillas generadas y el 70,9% para las alcantarillas que se recogen. Los déficit existentes, en relación al abastecimiento de agua y la recolección y tratamiento de aguas residuales, hicieron que en 2013 el gobierno federal presentara el Plan Nacional de Saneamiento Básico, que entre sus metas pretende ampliar al 93%, hasta 2033, porcentaje de tratamiento del alcantarillado recogido en el país (MAPA, 2016).

El tratamiento de aguas residuales genera inevitablemente un residuo sólido en cantidades variables según el tipo de alcantarillado y el sistema de tratamiento adoptado, denominado lodo de desagüe, cuyo volumen producido en una Estación de Tratamiento de aguas residuales (ET) representa cerca de 1-2 % del volumen de aguas residuales tratado, sin

embargo, su tratamiento y disposición final alcanzan entre el 30% y el 50% del costo operativo de ET (FERREIRA e ANDREOLLI, 1999); este material es una fuente potencial de riesgos para la salud pública y el medio ambiente, pudiendo contribuir a la proliferación de organismos vectores de enfermedades, conteniendo metales pesados, compuestos orgánicos persistentes y patógenos, en concentraciones nocivas.

Aproximadamente el 45% de los municipios que realizan tratamiento del desagüe destinan el lodo generado a los rellenos sanitarios, reduciendo la vida útil de estos locales debido a los grandes volúmenes depositados. De esta forma el reciclaje agrícola aparece como alternativa para la disposición final de este material, aliando bajo costo e impacto ambiental positivo, cuando se realiza cumpliendo los criterios de seguridad, definidos por el Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), que en 2006, editó la resolución n ° 375, que define criterios y procedimientos, para el uso agrícola de lodos de depuradora generados en ET y sus productos derivados, estableciendo parámetros para la utilización segura del lodo en la agricultura.

Los estudios, con enfoques variados, han sido realizados en el país visando el conocimiento sobre los efectos de la utilización del lodo de depuradora en la agricultura. En la literatura se encuentran numerosos trabajos que abordaron, principalmente, la caracterización química y la variabilidad temporal de la composición de los lodos de depuradoras producidos en diferentes estaciones de tratamiento (RIBEIRO et al., 2012; CORREIA, 2009; SANTOS, 2009); las influencias del lodo de depuradora en las propiedades del suelo (CHUEIRI et al., 2007; DE MARIA et al., 2010; SOUZA et al., 2005); los impactos de la aplicación de diferentes dosis en el crecimiento de especies vegetales (PONTONI, 2011; SIMONETE et al., 2003, LOBO et al., 2012) y en la contaminación de los suelos (OLIVEIRA, 1998; MAIA, 2008; TSUTIYA, 1999) entre otros involucrando sus procesos de producción (FERNANDES et al., 1993; CORRÊA et al., 2007; ZAPPAROLI et al., 2007).

La presencia de metales pesados en el lodo de depuradora ha recibido especial atención de los investigadores, que por medio de relevantes contribuciones encontradas en la literatura, enfocaron los estudios en las cuantificaciones de los metales (OLIVEIRA e MATTIAZZO, 2001; NASCIMENTO et al. 2004); en las movilidades de estos elementos, tanto en el suelo (SILVA et al., 1998; PACHECO e NETO, 2004) y en las plantas (OLIVEIRA et al., 2009; ANDRADE e MATTIAZZO, 2000); se destacan principalmente los procesos de lixiviación en el suelo (BERTONCINI e MATTIAZZO, 1999; DYNIA et al., 2006; ANJOS e MATTIAZZO, 2000).

Una de las alternativas de utilización del lodo de depuradora que ganaron fuerza es su uso como componente de sustratos para la producción de mudas forestales, aliando reducciones de los costos y de los riesgos de contaminación del suelo, además de la disponibilidad de grandes volúmenes, existiendo en la literatura trabajos de caracterización del sustrato compuesto por lodo de desagüe asociado a otros materiales (cáscara de arroz carbonizada, fibra de coco triturada, vermiculita, paja de café, sustratos comerciales, etc) (SANTOS et al., 2014; CUNHA et al., 2006; SCHEER et al., 2012) de análisis de los efectos de diferentes dosis, en el crecimiento de plantas nativas (PAIVA et al., 2009; SCHEER et al., 2012; DELARMELINA et al., 2014; MAAS, 2010) y exóticas (GOMES et al., 2013; CALDEIRA et al., 2013; ROCHA et al., 2013; SCHIRMER, 2010).

Sin embargo, cuando el lodo de depuradora se utiliza como sustrato, en viveros forestales, son escasos los estudios sobre los impactos de la aplicación excesiva de agua, por medio de la irrigación, en la lixiviación de metales pesados presentes en el biosólido. En la mayoría de los viveros forestales brasileños, el manejo de riego sólo se determina a través del examen visual de las mudas, ocasionando grandes desperdicios por emplear, diariamente, altos volúmenes de agua en el riego. La existencia de limitaciones técnicas, económicas y culturales en el empleo de herramientas que ayudan en el correcto manejo de los sistemas de

riego, contribuyen a estas pérdidas, aunque muchos trabajos ya se han desarrollado para identificar el volumen de agua necesario, diariamente, para diferentes especies forestales, las mejores formas de aplicación del agua (métodos de riego), y la frecuencia de aplicación de estas láminas; el manejo de riego es descuidado en la mayoría de los viveros, motivando la realización de investigaciones para evaluar los riesgos de la utilización del lodo de depuradora, como sustrato, cuando asociado a riego excesivo verificado en viveros forestales.

De esta forma el trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos de diferentes niveles de irrigación sobre el crecimiento de las plantines de pino (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) y de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivados en sustrato que contenía lodo de depuradora y sobre la lixiviación de metales pesados presentes en el compuesto.

2. Materiales y Métodos

En el capítulo I se describió la construcción de un minilímetro de pesaje electrónico, portátil y de bajo costo, para estudios de evapotranspiración en ambientes protegidos; la calibración del minilímetro con el análisis de la curva de calibración; y evaluación del desempeño, en condición de campo, en el cultivo de plantines de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) y de pino (*Pinus elliottii* var. *elliottii*), en ambiente protegido, sometidos a tres distintas láminas de riego, correspondientes al 100%, 200% y 400% de la evapotranspiración del cultivo. Los coeficientes de determinación (r^2) y los valores de error estándar de estimación (EEE) se utilizaron para evaluar la calidad de los modelos (ecuaciones) obtenidos. En la evaluación del desempeño para la condición de campo, cultivando plantines de pino y de eucalipto en bandejas; se utilizó la correlación de los valores estimados, a través de la ecuación de regresión, y de los valores de los conjuntos (estándar) siendo utilizados los siguientes indicadores: de precisión, por medio del coeficiente de correlación "r"; de exactitud, por medio del índice de Willmott "d"; y de confianza, a través del índice de rendimiento "c".

En el capítulo II se realizó la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_oPM), en el área externa y en invernadero ubicada en el Huerto Forestal del Jardín Botánico de Río de Janeiro (JBRJ); la determinación de la evapotranspiración real de las plantines de pino (*Pinus elliottii* var. *elliottii*); la determinación de la evapotranspiración real de las plantines de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*); y determinación de los Coeficientes de Cultura (K_c), de las plantines de pino y de eucalipto, utilizando el método de Penman-Monteith-FAO.

En el capítulo III se evaluó el crecimiento de las plantines de pinos (*Pinus elliottii* var. *elliottii*), y de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivadas en sustrato que contenía 60% lodo de depuradora (proveniente de ET Alegria- RJ) y 40% de vermiculita, sometidas a cuatro láminas de riego correspondientes al 100%, 200%, 300% y 400% de la evapotranspiración del cultivo, por medio de las siguientes variables: altura (H); el diámetro del colecto (DC); relación altura: diámetro del colecto (RHDC); biomasa seca total (MST); y la relación biomasa seca de la parte aérea: biomasa seca de las raíces (MSPA:MSR) además de los Índices de calidad de Dickson (ICD); así como evaluar la eficiencia del uso del agua por las plantines. El diseño experimental fue en bloques casualizados, con repeticiones, siendo los tres bloques formados por las bancadas conteniendo dos repeticiones por bloque. Los parámetros fueron sometidos a análisis de varianzas con medidas repetidas (ANOVA-RM), utilizando el procedimiento GLM del software STATISTICA.

Finalmente, en el capítulo IV se observó el efecto de diferentes láminas de riego, correspondientes al 100%, 200%, 300% y 400% de la evapotranspiración, sobre las concentraciones de metales pesados presentes en sustratos que contengan lodo de depuradora y cultivados con plantines de pinos (*Pinus elliottii* var. *elliottii*) y de eucalipto (*Eucalyptus*

urograndis); así como el comportamiento, a lo largo del tiempo, de estos metales; y , cuantificar el volumen de efluentes generado por las hojas de riego, las concentraciones de metales pesados (zinc, cadmio, plomo, cobre, níquel y cromo) presentes en diferentes períodos y los riesgos potenciales de contaminación del medio con miras a la legislación ambiental vigente (resoluciones n° 375/2006 y n° 430/2011 del CONAMA). El delineamiento utilizado fue completamente casualizado, siendo los contenidos de metales en el sustrato sometido a ANOVA, y cuando se detectó diferencia fueron aplicados el test de Tukey, al nivel del 5% de probabilidad, en la comparación de las medias. En el efluente, sólo el análisis cuantitativo fue realizado de forma semejante al sustrato, el análisis químico no fue sometido a ANOVA por ser muestra única.

3. Resultados y Discusión

En el primer capítulo, se observó que con un costo de aproximadamente 1.304 dólares, se construyó el minilímetro. El modelo lineal describió la relación masa x tensión, en todos los tratamientos, con valores del coeficiente de determinación (r^2), por encima del 99,4%. El mayor valor de EEE (2,44 gramos), fue obtenido para curva de calibración referente al tratamiento Eucalipto 400%, siendo que este valor esta abajo del límite detectable de la célula que es de 4 gramos. En la evaluación en condición de campo todos los tratamientos tuvieron valores de coeficiente de correlación, de índice de Willmott y de índice de rendimiento "c" por encima de 0,999, con EEE variando de 6,2 a 36,2 gramos (menos de 1 gramo por tubo).

En el capítulo II, a evapotranspiración (ETc) de las plantines de pino y de eucalipto fueron obtenidas diariamente con el uso de un minilímetro de pesaje electrónico; y la determinación del Coeficiente de Cultura (Kc) fue determinado por la relación entre la ETc y la EToPM. La evapotranspiración de referencia calculada para los ambientes interno y externo, presentaron promedios de 1,91 y 2,67 mm d⁻¹, máximas de 2,78 y 4,53 mm d⁻¹, y mínimas de 0,84 y 1,15 mm d⁻¹, respectivamente. La evapotranspiración de las plantines de pino y eucalipto, obtenidas por medio de los minilímetros presentaron promedios de 2,30 y 1,66 mm d⁻¹, máximas de 4,12 y 3,53 mm d⁻¹, y mínimas de 0,74 y 0,16 mm d⁻¹, respectivamente. Los valores de Kc, calculados para los cultivos del pino y del eucalipto, obtuvieron promedios de 0,95 y 1,48, respectivamente.

En el capítulo III, utilizando un minilímetro para controlar la aplicación de diferentes niveles de riego, los resultados mostraron que, para el cultivo del eucalipto, sólo el DC presentó diferencia entre tratamientos, siendo que los menores niveles (100% y 200%) tuvieron menores DC que los mayores niveles (300% y 400%); los demás parámetros no presentaron diferencias entre tratamientos. Para la cultura del pino, teniendo el DC como el RHDC, presentaron diferencias significativas entre el 200% y el 300%, solamente en el período inicial (T0). Los resultados de eficiencia del uso del agua (EUA) indicaron que el exceso de agua aplicado por los tratamientos superiores al 100% de la evapotranspiración, no resultó en beneficios efectivos (ganancia de masa) para las plantines de pino y de eucalipto, representando desperdicio de agua y, resaltando la importancia del correcto manejo de la irrigación

Los resultados del capítulo IV indican que, inicialmente, el contenido de zinc, en el sustrato, estuvo arriba (27%) del límite establecido por la resolución N ° 375/2006 del CONAMA; en el período final no hubo diferencia, en el pino y en el eucalipto, quedando por debajo de la norma. Las hojas correspondientes al 100%, 200%, 300% y 400% generaron, aproximadamente 0,225 L, 0,465 L, 0,740 L y 1,025 L de efluentes, por bandeja. El contenido de zinc presente en el efluente estuvo en las láminas equivalentes al 200% y el 300% de la evapotranspiración por encima del 39,4% y el 15,6%, respectivamente, de los límites de la resolución N ° 430/2011 del CONAMA, mientras que los tratamientos del 100% y el 400%,

estuvieron, el 34,6% y el 23,2%, respectivamente, abajo. Al principio (30DT) las concentraciones de cinc, cadmio, plomo, cobre, níquel y cromo se situaron por debajo de 4,97; 0,003; 0,014; 0,043; 0,05 y 0,046 mg L⁻¹, respectivamente. En los demás momentos (90 y 150 DT), las concentraciones estuvieron por debajo de 0,4; 0,002; 0,012; 0,031; 0,02 y 0,04 mg L⁻¹, respectivamente, para los mismos elementos.

4. Conclusiones

Considerando los resultados, el rendimiento de los minilímetros se mostró satisfactorio para la determinación de la evapotranspiración en escalas inferiores a la diaria.

La evapotranspiración de las plantines de pino y de eucalipto, obtenidas por medio de los minilímetros presentaron promedios de 2,30 y 1,66 mm d⁻¹, respectivamente. Los valores de Kc, calculados para los cultivos del pino y del eucalipto, obtuvieron promedios de 0,95 y 1,48, respectivamente.

En general, sobre la base de las variables de crecimiento estudiadas, se verificó que los diferentes niveles de riego (equivalentes al 100%, 200%, 300% y 400% de la evapotranspiración), no influenciaron el crecimiento de las plantines de pino y, de eucalipto. Sin embargo, los resultados de eficiencia del uso del agua (EUA) indicaron que el exceso de agua aplicado por los tratamientos superiores al 100% de la evapotranspiración, no resultó en beneficios efectivos (ganancia de masa) para las plantines de pino y de eucalipto, representando desperdicio de agua y, resaltando la importancia del correcto manejo del riego.

La utilización de lodo de desagüe en la producción de plantines requiere manejo cuidadoso de la irrigación, pues aunque el sustrato atiende los límites máximos establecidos en la resolución n° 375/2006 del CONAMA, la lixiviación de metales debido al exceso de irrigación puede generar efluentes con contenidos de estos metales por encima de los valores establecidos en la resolución n° 430/2011 del propio CONAMA

Palabras-clave: Lodo de depuradora. Niveles de riego. Plantines forestales.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Modelos de minilísímetros com sistema de pesagem eletrônica desenvolvidos por (a) GERVÁSIO e JÚNIOR (2014), (b) RUIZ-PEÑALVER et al. (2015), (c) WHERLEY et al. (2009) e (d) OLIVEIRA (2012) para estudos de evapotranspiração.	15
Figura 2	Casa de Vegetação localizada nas instalações do Horto Florestal do JBRJ	18
Figura 3	Ilustração com os componentes e a forma de montagem utilizada no minilísímetro	19
Figura 4	Minilísímetro de pesagem posicionado no interior da casa de vegetação	20
Figura 5	Célula de carga posicionada na extremidade do braço de sustentação do minilísímetro	20
Figura 6	Registrador Eletrônico (“Datalogger”) Novus modelo Fieldlogger	21
Figura 7	Formulário do software FieldloggerConfig para configuração dos canais analógicos.	21
Figura 8	Obtenção da massa-padrão confeccionada com sacos plásticos preenchidos de areia. .	22
Figura 9	Processo de calibração dos minilísímetros utilizando sacos de areia como pesos-padrão.	23
Figura 10	Orientação das bancadas na casa de vegetação, posicionamento dos minilísímetros (em verde) e localização dos tratamentos referentes a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, definidas como 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	24
Figura 11	Embalagem contendo o lodo de esgoto estabilizado proveniente da CEDAE	25
Figura 12	Aspecto do lodo de esgoto estabilizado (12a) e da vermiculita (12b) antes da mistura.	25
Figura 13	Homogeneização e peneiramento manual do composto contendo lodo de esgoto.	25
Figura 14	Relação entre a variação da massa (em gramas) e as tensões (em mV), e as respectivas curvas de calibração dos minilísímetros destinados ao eucalipto, submetidos a lâminas correspondentes a 100% (a), 200% (b) e 400% (c) da evapotranspiração; e destinados ao pinus submetidos a lâminas correspondentes a 100% (d), 200% (e), e 400% (f) da evapotranspiração.	29
Figura 15	Formulário de configuração do Fieldlogger, referente ao recurso “Canais Virtuais”, com as inserções das operações matemáticas utilizadas no tratamento Pinus 100%.	34
Figura 16	Tela do software Fieldlogger, denominada “Gráfico de Registros”, com a representação das variações observadas nos lisímetros com aplicação de lâminas de irrigação correspondente a 100% (Eucalipto1 e Pinus 1) e a 200% (Eucalipto 2 e Pinus 2) da evapotranspiração.	35
Figura 17	Estação meteorológica marca WatchDog 2000 instalada no ambiente interno.	46
Figura 18	Estação meteorológica instalado no ambiente externo (a) e datalogger	47

Campbell Scientific, modelo CR1000 (b)

Figura 19	Imersão dos tubetes contendo mudas de eucalipto e pinus para saturação do substrato	51
Figura 20	Obtenção das massas dos conjuntos (bandeja+tubete+substrato+planta) contendo eucalipto e pinus na condição de “capacidade de campo”.	51
Figura 21	Gráfico gerado pelo software FieldloggerConfig mostrando as variações de massas nos minilísímetros contendo mudas de eucalipto, ocorridas no período de 07 a 15/06/2015.	52
Figura 22	Gráfico gerado pelo software FieldloggerConfig mostrando as variações de massas nos minilísímetros contendo mudas de pinus, ocorridas no período de 07 a 15/06/2015	52
Figura 23	Valores diários da evapotranspiração de referência interna (ET _o INT calc) e externa (ET _o EXT calc) obtida pela equação de Penman-Monteith -FAO.	54
Figura 24	Variação diária das temperaturas máximas (T _{max}) e mínimas (T _{min}) observadas nos ambientes interno (Int) e externo (Ext).	55
Figura 25	Dados de saldo de radiação (R _n) nos ambientes interno (Rad Interna) e externo (Rad Externa), no período experimental.	56
Figura 26	Variação da umidade relativa mínima (U _{rmin}) e máxima (U _{rmax}), nos ambientes interno (INT) e externo (EXT), e de Pluviometria durante o período experimental.	57
Figura 27	Valores medidos da evapotranspiração real da cultura, das mudas de eucalipto, em mm d ⁻¹ , obtidas diariamente por meio do minilísímetro.	58
Figura 28	Valores medidos da evapotranspiração real da cultura, das mudas de pinus, em mm d ⁻¹ , obtidas diariamente por meio do minilísímetro.	59
Figura 29	Valores do coeficiente da cultura (K _c) do eucalipto, obtido pela relação diária entre a evapotranspiração real da cultura e a evapotranspiração de referência.	60
Figura 30	Valores do coeficiente da cultura (K _c) do pinus, obtido pela relação diária entre a evapotranspiração real da cultura e a evapotranspiração de referência.	61
Figura 31	Orientação das bancadas na casa de vegetação, posicionamento dos minilísímetros (em verde) e localização dos tratamentos referentes a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, definidas como 1, 2, 3 e 4, respectivamente.	89
Figura 32	Embalagem com informações sobre o modelo de microaspersor da Rain Bird utilizado (a) e forma de inserção na linha lateral correspondente ao tratamento equivalente a 400% da evapotranspiração da cultura (4 microaspersores) (b).	89
Figura 33	Coleta de água junto aos microaspersores (a) e determinação das vazões com auxílio de proveta graduada (b).	90
Figura 34	Ilustração do esquema de ligação elétrica entre o quadro controlador do sistema de irrigação e o módulo de aquisição de dados (“datalogger”) integrante do minilísímetro	91
Figura 35	Detalhe da medição do diâmetro do coleto com auxílio de paquímetro digital (a) e preparação das mudas para secagem na estufa (b).	92
Figura 36	Valores médios de altura da parte aérea das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> , observados em diferentes períodos.	98

Figura 37	Valores médios de altura da parte aérea (H) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E., observados em diferentes períodos.	100
Figura 38	Valores médios de diâmetro do coleto (DC) observados nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> submetidas a diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura).	102
Figura 39	Valores médios de diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> observados em diferentes períodos.	103
Figura 40	Valores médios de diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E., observados em diferentes períodos	106
Figura 41	Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) observados nas mudas de eucalipto, nas bancadas I, II e III.	107
Figura 42	Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> , observadas em diferentes períodos.	108
Figura 43	Variação da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de eucalipto, durante o período do experimento.	112
Figura 44	Valores médios da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E. durante o período do experimento.	114
Figura 45	Valores da relação biomassa seca da parte aérea:biomassa seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de eucalipto, durante o experimento.	117
Figura 46	Variação da relação biomassa seca da parte aérea:biomassa seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de pinus, durante o experimento.	118
Figura 47	Valores médios do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), observadas nas mudas de eucalipto, durante o período do experimento.	120
Figura 48	Valores médios do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), observados nas mudas de pinus, durante o período do experimento.	122
Figura 49	Eficiência no Uso da Água (EUA) por muda de eucalipto, expressa em gramas de biomassa seca por metro cúbico de água utilizada, observada nos tratamentos com aplicação de níveis de irrigação correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura, nos períodos: inicial (T0-T60), final (T60-T120) e global (T0-T120).	123
Figura 50	Eficiência no Uso da Água (EUA), expressa em gramas de biomassa seca por metro cúbico de água utilizada por muda de pinus, observada nos tratamentos com aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura, nos períodos: inicial (T0-T60), final (T60-T120) e global (T0-T120).	125
Figura 51	Estrutura de coleta e de contenção de água sobre as bandejas, os plásticos coloridos identificavam os tratamentos.	147
Figura 52	Concentrações médias dos metais zinco (dividido por 10), cádmio (multiplicado por 1000), chumbo (multiplicado por 10), cobre, níquel e cromo, observado aos 30, 90 e 150 dias de aplicação dos tratamentos no cultivo de mudas de pinus.	152
Figura 53	Concentrações médias dos metais zinco (dividido por 10), cádmio (multiplicado por 1000), chumbo (multiplicado por 10), cobre, níquel e cromo, observado aos 30, 90 e 150 dias de aplicação dos tratamentos no cultivo de mudas de eucalipto.	153

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1	Critério de interpretação de desempenho pelo índice “c”, proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997).	27
Tabela 2	Valores de tensão (em milivolts), obtidos pelas médias das leituras observadas nos processos de carregamento e de descarregamento, de acordo com a massa-padrão (em gramas) depositada nas bandejas destinadas às mudas de pinus e de eucalipto, que serão submetidas as lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração da cultura.	28
Tabela 3	Resultado das análises dos coeficientes da equação de regressão e dos valores de erro padrão de estimativa (EPE), entre parênteses, obtidos para os minilísímetros destinados ao cultivo de pinus e de eucalipto submetidos a lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.	30
Tabela 4	Equações das curvas de calibração para cada um dos tratamentos, e seus respectivos coeficientes de determinação (“ r^2 ”), erros-padrão de estimativa (“EPE”) e Desvios-padrão (“ S_y ”) dos modelos.	30
Tabela 5	Relação entre a leitura obtida, em mV, e a massa aplicada nas bandejas, em gramas, nos tratamentos referentes às culturas de pinus e de eucalipto, destinados a aplicação de lâminas de irrigação correspondentes a 100% e 400% da evapotranspiração.	31
Tabela 6	Relação entre a leitura obtida, em mV, e a massa aplicada nas bandejas, em gramas, nos tratamentos referentes às culturas de pinus e de eucalipto, destinados a aplicação de lâmina de irrigação correspondente a 200% da evapotranspiração.	31
Tabela 7	Valores das massas (g), obtidas pela equação de calibração e pela pesagem direta (real) e os erros relativos (E.R., em %), no cultivo de pinus, destinados a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.	32
Tabela 8	Valores das massas (g), obtidas pela equação de calibração e pela pesagem direta (real) e os erros relativos (E.R., em %), no cultivo de eucalipto, destinados a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.	32
Tabela 9	Indicadores estatísticos de coeficiente de correlação (r), índice de Willmott (d), Índice de desempenho (c) e o erro-padrão de estimativa (EPE), para as relações estabelecidas entre os valores obtidos através do modelo de regressão linear e os valores tidos como padrão (reais) observados nos pinus e de eucalipto, destinados a receberem lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.	33
Tabela 10	Valores absolutos máximos e mínimos e valores médios de temperatura, em °C; radiação solar, em MJ m ⁻² ; velocidade do vento, em m s ⁻¹ ; e umidade relativa, em %, registrados nos ambientes interno e externo.	55
Tabela 11	Resultado da análise do potencial agrônômico realizada em três amostras do substrato inicial utilizado nos cultivos das mudas de pinus e de eucalipto.	88

Tabela 12	Valores de vazão média, em mililitros por minuto, uniformidade de distribuição (UD), em percentagem, coeficiente de uniformidade estatístico (CUE), em percentagem, e a relação final entre as vazões, com base no tratamento equivalente a 100% da evapotranspiração, observados nos tratamentos contendo mudas de eucalipto e de pinus.	95
Tabela 13	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i>	96
Tabela 14	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, dos resultados da variável altura da parte aérea (H), de mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	97
Tabela 15	Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i>	97
Tabela 16	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	99
Tabela 17	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	99
Tabela 18	Resultado da análise multivariada do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	99
Tabela 19	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o diâmetro do coleto (DC) observados nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	101
Tabela 20	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	102
Tabela 21	Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo) e suas interações, para o diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	147
Tabela 22	Diâmetro do coleto (DC) médio das mudas de eucalipto (<i>Eucalyptus urograndis</i>), observado em cada tratamento (níveis de irrigação), nos diferentes períodos de observação (0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de tratamento).	104
Tabela 23	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, para o diâmetro do coleto (DC) observados nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	105
Tabela 24.	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	105
Tabela 25	Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo), obtido para o diâmetro do coleto (DC) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	105
Tabela 26	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	106
Tabela 27	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), de mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	107

Tabela 28	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), observadas nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	109
Tabela 29	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	109
Tabela 30	Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) observadas nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E. submetidos a 4 níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) e avaliados em 6 diferentes tempos (T0, T30, T60, T90, T120 e T150).	110
Tabela 31	Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E., observados nos diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de aplicação dos tratamentos (DT)	110
Tabela 32	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	111
Tabela 33	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a biomassa seca total (MST) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	112
Tabela 34	Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo), obtido para a biomassa seca total (MST) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	112
Tabela 35	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	113
Tabela 36	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para o parâmetro biomassa seca total (MST) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E..	113
Tabela 37	Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	114
Tabela 38	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	115
Tabela 39	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	116
Tabela 40	Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i>	116
Tabela 41	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	117

Tabela 42	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação biomassa seca da parte aérea: peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	118
Tabela 43	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) observados nas mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	119
Tabela 44	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a biomassa seca total (MST) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	120
Tabela 45	Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, do fator intra-indivíduos (tempo), para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> .	120
Tabela 46	Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) observados nas mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	121
Tabela 47	Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de <i>Pinus elliottii</i> E.	121
Tabela 48	Valores médios da Eficiência no Uso da Água (EUA), no cultivo de mudas de eucalipto e de pinus, observados nos níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%), durante os períodos inicial (30-90 DT), final (90-150DT) e total (30-150DT).	123
Tabela 49	Concentrações máximas de substâncias inorgânicas (em mg kg ⁻¹) permitidas no lodo de esgoto ou produto derivado conforme a Resolução n° 357/2006 do CONAMA.	138
Tabela 50	Concentrações máximas de patógenos permitidas no lodo de esgoto ou produto derivado de acordo com a Resolução n°375/2006 do CONAMA.	139
Tabela 51	Resultado da análise do potencial agrônômico realizada em três amostras do substrato inicial utilizado nos cultivos de mudas de pinus e de eucalipto	146
Tabela 52	Vazão média dos microaspersores, em mL min ⁻¹ , determinados para cada um dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) nos cultivos de pinus e de eucalipto.	148
Tabela 53	Resumo da análise de variância dos dados de concentração dos metais zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, de mudas de <i>Pinus elliottii</i> E., observados no período final do trabalho (90-150 DT) e submetidos aos níveis de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração.	150
Tabela 54	Resumo da análise de variância dos dados de concentração dos metais zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, de mudas de <i>Eucalyptus urograndis</i> , submetidas aos níveis de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração.	150
Tabela 55	Concentração dos metais pesados zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, em mg kg ⁻¹ , observados nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto, submetidos a diferentes níveis de irrigação.	151
Tabela 56	Concentrações médias de zinco, cádmio, cobre, chumbo, níquel e cromo, em mg kg ⁻¹ , observadas nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto, nos períodos médio (P.Médio -90 DT) e final (P.Final-150 DT) do experimento.	152
Tabela 57	Valores médios das concentrações de Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, em mg.kg ⁻¹ , observados nos substratos cultivados com <i>Pinus elliotti</i> E., nos períodos	154

inicial (30 DT), médio (90 DT) e final (150 DT).

- Tabela 58** Valores médios das concentrações de Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, em $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, observados nos substratos cultivados com *Eucalyptus urograndis*, nos períodos inicial (30 DT), médio (90 DT) e final (150 DT). 154
- Tabela 59** Concentrações de zinco (em mg kg^{-1}) observadas por diversos autores, em lodo de esgoto proveniente de diferentes estações de tratamento de esgoto (ETE) e/ou em diferentes anos no Brasil. 155
- Tabela 60** Concentração dos metais (em mg L^{-1}) verificados no líquido lixiviado, no período inicial (T0) do experimento, oriundo dos substratos cultivados com mudas de eucalipto, e submetidos a lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração. 156
- Tabela 61** Concentração dos metais (em mg L^{-1}) verificados no material lixiviado, aos 60 e 120 dias do experimento, nos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) contendo mudas de eucalipto. 157
- Tabela 62** Concentração dos metais (em mg L^{-1}) verificados no material lixiviado, aos 60 e 120 dias do experimento, nos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) contendo mudas de pinus. 157
- Tabela 63** Valores da concentração inicial dos metais presentes do lixiviado, da carga aplicada diariamente na área da bandeja, carga máxima de acúmulo, limitada pela resolução n° 375/2006 do CONAMA e estimativa de tempo para atingir valor limítrofe no cultivo de pinus. 158
- Tabela 64** Valores da concentração inicial dos metais presentes do lixiviado, da carga aplicada diariamente na área da bandeja, carga máxima de acúmulo, limitada pela resolução n° 375/2006 do CONAMA e estimativa de tempo para atingir valor limítrofe no cultivo de eucalipto. 159
- Tabela 65** Volumes totais aplicados e lixiviados (em litros) e o volume médio diário lixiviados por bandeja (em litros), com o percentual em relação ao aplicado (entre parênteses) nos diferentes tratamentos com mudas de eucalipto. 160
- Tabela 66** Volumes totais aplicados e lixiviados (em litros) e o volume médio diário lixiviados por bandeja (em litros), com o percentual em relação ao aplicado (entre parênteses) nos diferentes tratamentos com mudas de pinus. 160

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO I:	4
CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE MINILISÍMETRO PARA ESTUDOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM AMBIENTES PROTEGIDOS	
2.1 RESUMO.....	5
2.2 ABSTRACT.....	6
2.3. INTRODUÇÃO.....	7
2.3.1 Evapotranspiração.....	7
2.3.2 Fatores que afetam a evapotranspiração.....	8
2.3.3 Métodos de determinação da evapotranspiração.....	9
2.3.4 Lisímetros.....	11
2.3.5 Considerações sobre os lisímetros.....	14
2.3.6 Minilímetros.....	15
2.3.7 Objetivos.....	16
2.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
2.4.1 Descrição do local.....	18
2.4.2 Construção do minilímetro.....	18
2.4.3 Calibração dos minilímetros e obtenção de curvas.....	22
2.4.4 Desempenho do minilímetro em condições de campo.....	23
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
2.5.1 Calibração do minilímetro.....	28
2.5.2 Desempenho do minilímetro na condição de campo.....	30
2.5.3 Representação gráfica dos registros.....	34
2.6 CONCLUSÕES.....	36
3. CAPÍTULO II:	37
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA (E_{Tc}) E DO COEFICIENTE DA CULTURA (K_c) DE MUDAS DE PINUS E EUCALIPTO CULTIVADAS EM AMBIENTE PROTEGIDO	
3.1 RESUMO.....	38
3.2 ABSTRACT.....	39
3.3. INTRODUÇÃO.....	40
3.3.1 Métodos de estimativa da evapotranspiração.....	40
3.3.2 Modelos matemáticos (Equações).....	40
3.3.3 Equações empíricas: Considerações.....	41
3.3.4 Evapotranspiração em ambientes protegidos.....	42

3.3.5	Coeficiente de cultura.....	44
3.3.6	Objetivos.....	45
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.4.1	Descrição do local.....	46
3.4.2	Dados meteorológicos.....	46
3.4.3	Estimativa da evapotranspiração de referência.....	48
3.4.4	Determinação da evapotranspiração real da cultura.....	49
3.4.5	Determinação do coeficiente da cultura.....	50
3.4.6	Manejo da irrigação.....	50
3.4.7	Registro das medições.....	52
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.5.1	Determinação da evapotranspiração de referência.....	54
3.5.2	Medição da evapotranspiração real da cultura.....	58
3.5.3	Determinação dos coeficientes da cultura do Pinus e do Eucalipto.....	59
3.6	CONCLUSÕES.....	63
4.	CAPÍTULO III	64
	AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE MUDAS DE PINUS E DE EUCALIPTO, CULTIVADAS EM SUBSTRATO CONTENDO LODO DE ESGOTO, SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO	
4.1	RESUMO.....	65
4.2	ABSTRACT.....	66
4.3.	INTRODUÇÃO.....	67
4.3.1.	As culturas do pinus e do eucalipto no Brasil e na Argentina.....	67
4.3.2	Produção de mudas.....	68
4.3.3	Irrigação de mudas.....	69
4.3.4	Sistemas de irrigação em viveiros.....	71
4.3.5	Evapotranspiração de mudas de pinus e de eucalipto.....	71
4.3.6.	Efeito do excesso de água no crescimento de plantas.....	74
4.3.7	Parâmetros de avaliação da qualidade das mudas.....	75
4.3.8	Eficiência no uso da água.....	84
4.3.9.	Objetivos.....	86
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	87
4.4.1	Descrição do local.....	87
4.4.2	Espécies cultivadas.....	87
4.4.3	Substrato.....	87
4.4.4	Bandejas e tubetes.....	88
4.4.5	Irrigação.....	88
4.4.6	Dados morfofisiológicos.....	92

4.4.7	Determinação da eficiência do uso da água.....	93
4.4.8	Análises estatísticas.....	93
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	95
4.5.1	Calibração dos aspersores.....	95
4.5.2	Análises preliminares.....	96
4.5.3	Análise das variáveis não destrutivas.....	96
4.5.4	Análise das variáveis destrutivas.....	111
4.5.5	Eficiência no uso de água.....	122
4.6	CONCLUSÕES.....	127
5.	CAPÍTULO IV.....	128
	EFEITOS DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO SOBRE A LIXIVIAÇÃO DE METAIS PESADOS PRESENTES EM SUBSTRATO CONTENDO LODO DE ESGOTO	
5.1	RESUMO.....	129
5.2	ABSTRACT.....	130
5.3	INTRODUÇÃO.....	131
5.3.1	Saneamento no Brasil.....	131
5.3.2	Biossólido como substrato.....	132
5.3.3	Influência do biossólido nos atributos físicos do solo.....	133
5.3.4	Riscos associados ao uso do biossólido.....	136
5.3.5	Produção de mudas com biossólidos.....	139
5.3.6	Excesso de água aplicada na irrigação.....	143
5.3.7	Objetivos.....	144
5.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	146
5.4.1	Descrição do local.....	146
5.4.2	Substrato contendo lodo de esgoto.....	146
5.4.3	Material drenado.....	147
5.4.4	Análise química do lixiviado.....	148
5.4.5	Análises estatísticas.....	149
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	150
5.5.1	Análise química dos substratos.....	150
5.5.2	Análise do efluente.....	156
5.6	CONCLUSÕES.....	162
6.	CONCLUSÕES GERAIS.....	163
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164

1. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil o consumo de água pela agricultura representa, aproximadamente, 70% de toda a água consumida no país, seguido pelos consumos industriais (22%) e domésticos (8%), de acordo com os dados do Ministério do Meio Ambiente. Embora sejam encontradas variações destes números na literatura, a discrepância entre os volumes utilizados na agricultura e consumidos domesticamente, ressalta a importância e a necessidade de planejamento, gestão, e manejo dos recursos hídricos, de forma eficiente, permitindo a toda população, urbana e rural, acesso à água, em quantidades e qualidades satisfatórias.

Expectativas de aumento da demanda por água, para usos agrícola, industrial e doméstico, exigem ações de todos os segmentos da sociedade, visando a garantia ao acesso à água por todos os brasileiros. Em 2003/2004 pesquisas indicavam que aproximadamente 3,44 milhões de hectares (5,9% da área cultivada) possuíam irrigação. Em 2006, o censo agropecuário do Instituto Brasileira de Geografia e Estatística (IBGE), apresentava uma área irrigada equivalente a 4,54 milhões de hectares, equivalente a 7,5% da área total de lavouras. Já no ano de 2016 o governo federal anunciou o Plano para Expansão, Aprimoramento e Desenvolvimento Sustentável da Agricultura Irrigada, com objetivo de fomentar a expansão de 5 milhões de hectares irrigados no país em 10 anos, passando dos 6,1 milhões para 11,2 milhões de hectares o tamanho da área irrigada.

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, vinculado ao Ministério das Cidades, sinalizam uma tendência de aumento na demanda por água, destinada ao uso doméstico. Os levantamentos apontam que, enquanto 93,2% da população urbana (ou 82% da população nacional), em média, é atendida por redes de abastecimento de água, somente 57,6% desta população é atendida por rede de esgoto. Quanto ao tratamento dos esgotos, os dados indicam que o índice médio do país chega a 40,8% para a estimativa dos esgotos gerados e 70,9% para os esgotos que são coletados. Os déficits existentes, em relação ao abastecimento de água e a coleta e tratamento de esgoto, fizeram com que, em 2013, o governo federal apresentasse o Plano Nacional de Saneamento Básico, que dentre suas metas pretende ampliar para 93%, até 2033, o percentual de tratamento do esgoto coletado no país.

O tratamento de esgoto gera, inevitavelmente, um resíduo sólido em quantidades variáveis segundo o tipo de esgoto e o sistema de tratamento adotado, denominado lodo de esgoto, cujo volume produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) representa cerca de 1-2% do volume de esgoto tratado, porém, seu tratamento e disposição final chegam a atingir entre 30% e 50% do custo operacional da ETE; este material é uma fonte potencial de riscos à saúde pública e ao ambiente, podendo contribuir para a proliferação de organismos vetores de doenças, contendo metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos, em concentrações nocivas.

Aproximadamente 45% dos municípios que realizam tratamento do esgoto destinam o lodo gerado aos aterros sanitários, reduzindo a vida útil destes locais devido aos grandes volumes depositados. Desta forma a reciclagem agrícola aparece como alternativa visando a disposição final deste material, aliando baixo custo e impacto ambiental positivo, quando realizado obedecendo aos critérios de segurança, definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que em 2006, editou a resolução nº 375, que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETE e seus produtos derivados, estabelecendo parâmetros para a utilização segura do lodo na agricultura.

Estudos, com enfoques variados, têm sido realizados no país visando o conhecimento sobre os efeitos da utilização do lodo de esgoto na agricultura. Na literatura são encontrados numerosos trabalhos que abordaram, principalmente, a caracterização química e a

variabilidade temporal da composição dos lodos de esgoto produzidos em diferentes estações de tratamento; as influências do lodo de esgoto nas propriedades do solo; os impactos da aplicação de diferentes dosagens no crescimento de espécies vegetais e na contaminação dos solos dentre outros envolvendo seus processos de produção.

A presença de metais pesados no lodo de esgoto tem recebido especial atenção dos pesquisadores, que por meio de relevantes contribuições encontradas na literatura, focaram os estudos nas quantificações dos metais; nas mobilidades destes elementos, tanto no solo quanto nas plantas; destacando-se, principalmente, os processos de lixiviação no solo.

Uma das alternativas de utilização do lodo de esgoto que ganharam força é o seu uso como componente de substratos para a produção de mudas florestais, aliando reduções dos custos e dos riscos de contaminação do solo, além da disponibilidade de grandes volumes, existindo na literatura trabalhos de caracterização do substrato composto por lodo de esgoto associado a outros materiais (casca de arroz carbonizada, fibra de coco triturada, vermiculita, palha de café, substratos comerciais, etc.), e de análise dos efeitos de diferentes dosagens, no crescimento de plantas nativas e exóticas.

No entanto, quando o lodo de esgoto é utilizado como substrato, em viveiros florestais, são escassos os estudos sobre os impactos da aplicação excessiva de água, por meio da irrigação, na lixiviação de metais pesados presentes no biossólido. Ainda hoje, na maioria dos viveiros florestais brasileiros, o manejo de irrigação é determinado apenas por meio do exame visual das mudas, ocasionando grandes desperdícios por empregarem, diariamente, altos volumes de água na rega.

A existência de limitações técnicas, econômicas e culturais no emprego de ferramentas que auxiliem no correto manejo dos sistemas de irrigação, contribui para estas perdas, embora muitos trabalhos já tenham sido desenvolvidos visando: identificar o volume de água necessário, diariamente, para diferentes espécies florestais, as melhores formas de aplicação da água (métodos de irrigação), e a frequência de aplicação destas lâminas; ainda assim, o manejo de irrigação é negligenciado na maioria dos viveiros, motivando a realização de pesquisas visando avaliar os riscos da utilização do lodo de esgoto, como substrato, quando associado a irrigação excessiva verificado em viveiros florestais.

Assim o trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes níveis de irrigação sobre o crescimento de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var *elliottii* E.) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivados em substrato contendo lodo de esgoto e sobre a lixiviação de metais pesados presentes no composto. Os objetivos específicos foram:

- a) desenvolver um minilímetro capaz de monitorar, diariamente, a evapotranspiração das mudas, possibilitando a aplicação de diferentes níveis de irrigação com base na evapotranspiração real da cultura;
- b) determinar as perdas diárias, por evapotranspiração, das mudas de pinus e de eucalipto,
- c) calcular a evapotranspiração de referência e estabelecer um coeficiente da cultura (K_c) para o pinus e para o eucalipto na fase de desenvolvimento inicial;
- d) avaliar o efeito de diferentes níveis de irrigação no crescimento inicial das mudas de pinus e de eucalipto, e
- e) avaliar os efeitos dos diferentes níveis de irrigação na lixiviação de metais pesados presentes no substrato contendo lodo de esgoto.

Para alcançar os objetivos foram realizados quatro trabalhos, agrupados em quatro Capítulos. No Capítulo I foi descrito a construção, calibração e avaliação de um protótipo de minilímetro para estudos de evapotranspiração em ambientes protegidos. No Capítulo II foi feita a determinação da evapotranspiração de referência (E_{To}) e do coeficiente da cultura (K_c)

das mudas de pinus e eucalipto, cultivadas em ambiente protegido. No Capítulo III houve a avaliação do crescimento das mudas de pinus e de eucalipto, cultivados em substrato contendo lodo de esgoto e submetidos a diferentes níveis de irrigação e, finalmente, no Capítulo IV foram avaliados os efeitos da aplicação de diferentes níveis de irrigação na lixiviação de metais pesados presentes no substrato contendo lodo de esgoto.

2. CAPÍTULO I

CONSTRUÇÃO, CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MINILISÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM AMBIENTES PROTEGIDOS

2.1 RESUMO

Em muitos estudos envolvendo plantas é necessária a determinação da evapotranspiração (ET) ocorrida em certo intervalo de tempo. Dentre as metodologias para a determinação da ET a lisimetria é considerada o método padrão por medir diretamente as perdas ocorridas, porém, sua estrutura, geralmente, apresenta grandes dimensões e custos elevados. Na produção de plantas em viveiros, cujo cultivo é realizado em vasos ou bandejas, pode-se utilizar lisímetros de dimensões reduzidas denominados minilímetros, que auxiliam no processo de monitoramento dos ganhos e das perdas de água ocorridas no cultivo, possibilitando o manejo da irrigação de forma mais racional. Considerando a importância do manejo da irrigação em viveiros, onde o consumo de água é alto e com grandes desperdícios, devido ao excesso de irrigação, o trabalho teve como objetivo a construção de um minilímetro de pesagem eletrônica portátil para estudos de evapotranspiração em ambientes protegidos; a calibração do minilímetro com a respectiva análise da curva de calibração; e avaliação do desempenho, na produção em ambiente protegido, de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), submetidos a três distintas lâminas de irrigação, correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração da cultura. A construção do minilímetro foi feita em uma estrutura de metálica, onde foi fixada uma célula de carga com capacidade para 20 kg. As variações de tensão oriundas da célula de carga, devido a alterações no peso, foram registradas em um datalogger. Foram utilizadas massas-padrão para a obtenção da relação massa x tensão, permitindo a construção da curva de calibração, sendo os dados submetidos à análise estatística de regressão. Os coeficientes de determinação e os valores de Erro Padrão de Estimativa (EPE) foram utilizados para avaliar a qualidade dos modelos obtidos. Na avaliação do desempenho para a condição de campo foram utilizados no minilímetro bandejas para 54 tubetes, preenchidos com substrato composto por lodo de esgoto, cultivados com mudas de pinus e de eucalipto; para verificar se os valores estimados por meio da equação de regressão estavam correlacionados com os valores dos conjuntos (padrão) foram utilizados os seguintes indicadores: de precisão, por meio do coeficiente de correlação; de exatidão, por meio do índice de Willmott; e de confiança, por meio do índice de desempenho. O modelo linear descreveu a relação massa x tensão, em todos os tratamentos, com valores do coeficiente de determinação, acima de 99,4%. O maior valor de EPE (2,44 g) foi obtido para curva de calibração referente ao tratamento Eucalipto 400%, sendo que este valor está abaixo do limite detectável da célula que é de 4 g. Na avaliação em condição de campo todos os tratamentos tiveram valores de coeficiente de correlação, de índice de Willmott e de índice de desempenho acima de 0,999, com EPE variando de 6,2 a 36,2 g (menos de 1 g por tubete). Considerando os resultados de desempenho do minilímetro, o mesmo se mostrou satisfatório para a determinação da evapotranspiração em escalas inferiores a diária, tendo na apresentação gráfica dos registros realizados, uma importante ferramenta auxiliar.

PALAVRAS-CHAVE: Lisimetria. Células de Carga. Mudanças Florestais.

2.2 ABSTRACT

In many studies involving plants, it is necessary to determine the evapotranspiration (ET) that occurs within a certain time interval. Among the methodologies for the determination of ET, lysimetry is considered the standard method for measuring losses directly, but its structure is generally large and costly. In the production of plants in nurseries, whose cultivation is carried out in pots or trays, it is possible to use lysimeters of small dimensions denominated mini-lysimeters, that aid in the process of monitoring the gains and losses of water occurred in the crop, allowing the management of the irrigation of more rational way. Considering the importance of irrigation management in nurseries, where water consumption is high and with large waste due to excessive irrigation, the objective of this work was to construct a portable electronic weighing mini-lysimeter for studies of evapotranspiration in protected environments; the calibration of the mini-lysimeter with the respective analysis of the calibration curve; eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*) and pine (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) seedlings, submitted to three different irrigation slides, corresponding to 100%, 200% and 400% of crop evapotranspiration. The construction of the mini-lysimeter was made in a metal structure, where a load cell with a capacity of 20 kg was fixed. Voltage variations from the load cell, due to changes in weight, were recorded in a datalogger. Standard masses were used to obtain the mass x voltage relationship, allowing the construction of the calibration curve, and the data were subjected to statistical analysis of regression. The coefficients of determination and the values of Standard Error of Estimation (EPE) were used to evaluate the quality of the obtained models. In the evaluation of the performance for the field condition were used in the mini-lysimeter trays for 54 tubes, filled with substrate composed of sewage sludge, cultivated with pine and eucalyptus seedlings; to verify if the values estimated by means of the regression equation were correlated with the values of the sets (standard), the following indicators were used: precision, through the correlation coefficient; of accuracy, by means of the Willmott index; and reliable, through the index of performance. The linear model described the mass x voltage relationship in all treatments with determination coefficient values above 99.4%. The highest value of EPE (2.44 g) was obtained for the calibration curve for the Eucalyptus 400% treatment, which is below the detectable limit of the cell, which is 4 g. In the field condition evaluation, all treatments had values of correlation coefficient, Willmott index and performance index above 0.999, with EPE ranging from 6.2 to 36.2 g (less than 1 g per tube). Considering the performance results of the mini-lysimeter, it was satisfactory for the determination of the evapotranspiration in scales lower than the daily one, having in the graphical presentation of the records, an important auxiliary tool.

KEY WORDS: Lysimetry. Load Cells. Forest Seedlings.

2.3 INTRODUÇÃO

2.3.1 Evapotranspiração

A água é um dos insumos mais importante utilizados na agricultura, sendo fator determinante na produtividade agrícola. A utilização de forma racional deste recurso na agricultura exige o conhecimento da dinâmica de armazenamento, e consequente disponibilidade às plantas. O balanço hídrico entre as quantidades de entrada, por meio da irrigação e da chuva, e de saída, via evaporação, transpiração e drenagem da água formam a base para o manejo adequado.

A evapotranspiração (ET), termo introduzido por Thornthwaite e Wilm em 1944, é o processo oposto à precipitação e depende principalmente da energia solar disponível. De acordo com ALLEN et al. (1998) a ET é a combinação de dois processos distintos que ocorrem simultaneamente, sendo difícil a separação da quantidade de água perdida por cada um deles. A evaporação é o processo na qual a água no estado líquido é convertida em vapor d'água (vaporização) e é removida da superfície evaporante, onde a água está livre, tais como os reservatórios (lagos, açudes, etc.), poças, rios, superfícies vegetais e do solo. Enquanto a transpiração consiste na vaporização da água contida nos tecidos vegetais (no estado líquido) e sua remoção na forma de vapor para a atmosfera, através dos estômatos. O processo envolve a remoção da água do solo pelas raízes da planta, o transporte dessa água através do caule até as folhas e por fim a evaporação da água do interior das folhas para a superfície. Somente uma pequena fração da água que é absorvida pelas raízes da planta é efetivamente utilizada e a maior parte é perdida pela transpiração.

Segundo BLANCO e FOLEGATTI (2004) a determinação adequada da evapotranspiração (ET) de uma cultura pode evitar a aplicação excessiva ou deficitária de água, com impactos consequentes sobre a disponibilidade de nutrientes para as plantas, salinidade do solo e contaminação do lençol freático.

De acordo com CARVALHO et al. (2011), os estudos sobre evapotranspiração resultaram em importantes contribuições científicas não somente para a agricultura, mas, também para a climatologia e hidrologia, destacando-se dois importantes trabalhos: “An approach towards a rational classification of climate”, de Warren Thornthwaite (1948) e “Natural evaporation from open water, bare soil and grass”, de Howard Penman (1948). O trabalho apresentado pelo primeiro autor, segundo SEDYAMA (1996), buscava explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentava definir as diferenças regionais do clima, enquanto que o trabalho desenvolvido por Penman (1948) estava mais voltado aos processos físicos envolvidos na evaporação.

CAMARGO e CAMARGO (2000) descreveram que Thornthwaite conduziu seu trabalho de forma analítica (dedutiva, fundamentada no conhecimento dos fatores causais do fato) caracterizada pela confiabilidade do que pela precisão das conclusões, enquanto que Penman conduziu seu trabalho de forma sintética (científica) baseado em grande número de dados referentes a seus efeitos, podendo chegar a resultados mais precisos.

Segundo FUCHS (2007) o impacto conceitual do método de Thornthwaite (baseado na temperatura do ar) ultrapassou o significado prático na hidrologia, climatologia e irrigação. Enquanto que o trabalho realizado por Penman viabilizou o cálculo da evapotranspiração por meio de medidas padrão em estações meteorológicas.

A partir desses trabalhos, conforme apresentado por CARVALHO et al. (2011), surge o conceito de evapotranspiração potencial (ETp), caracterizada como a transferência de água do

sistema solo-planta para atmosfera em uma área com extensa superfície natural, totalmente coberta por vegetação baixa, de altura uniforme e com elevado índice de área foliar (IAF), de crescimento ativo na fase adulta (a grama é a principal vegetação adotada e, em alguns climas, adota-se a alfafa) e teor de água do solo próximo ou na capacidade de campo.

FUCHS (2007) comenta que, inicialmente, a alfafa serviu como superfície de referência, mas devido ao crescimento irregular, depois de repetidas roçadas, e a abrangência limitada deste cultivo, devido ao clima, favoreceu o uso da grama mantida entre 0,08 m e 0,15 m. O autor ressalta que o termo evapotranspiração potencial deve ser mantido para o limite superior teórico de perda de vapor d'água para um dado tipo de vegetação quando a resistência do vapor através dos tecidos da planta aproxima-se de zero.

Por meio do boletim número 24 publicado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), que teve o assessoramento de pesquisadores de diferentes países, DOORENBOS e PRUITT (1975), introduziram o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o), substituindo o termo evapotranspiração potencial (ET_p) utilizado por Thornthwaite (CAMARGO e CAMARGO, 2000; CARVALHO et al., 2011). No entanto, em 1990, a FAO promoveu um encontro de especialistas e dentre os objetivos do evento estava o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET, com enfoque no estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e o método que pudesse estimar a ET para esta referência. Assim a cultura de referência é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham à ET da grama. Os parâmetros para a cultura hipotética são: altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m⁻¹ (ALLEN et al., 1998).

BERNARDO et al. (2008) também descreve a evapotranspiração de referência, com base no conceito proposto pela FAO, como a evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica nem nutricional, isto é, com ótimas condições de crescimento, com altura média de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência da superfície de 70 s m⁻¹.

2.3.2 Fatores que afetam a evapotranspiração

Segundo BERNARDO et al. (2008) a quantidade de água evapotranspirada depende principalmente da planta, do solo e do clima, sendo este último é preponderante sobre os demais. Desse modo, a quantidade de água requerida por uma cultura pode variar na área coberta pela vegetação e com as estações do ano (em locais onde o clima varia acentuadamente com as estações).

Os principais fatores climáticos que afetam a evapotranspiração (ET) são: a radiação solar, a temperatura e umidade do ar, e a velocidade do vento. ARAÚJO et al. (2011) estudando a correlação entre as variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração, observaram que a radiação solar global foi a variável explicativa de maior efeito sobre a ET.

Em relação à planta, fatores como espécie e variedade, coeficiente de reflexão, área foliar, altura e profundidade do sistema radicular são citados por SENTELHAS (2001) como determinantes da ET. Outros fatores relacionados ao solo e ao manejo também são considerados pelo autor na avaliação da evapotranspiração, tais como: espaçamento/densidade de plantio, tipo de solo, disponibilidade de água no solo, além de impedimentos físicos e químicos, envolvendo a salinidade do solo, fertilidade, presença de horizontes mais impermeáveis, e incidência de pragas e doenças.

Mesmo sendo simples o entendimento conceitual de ET sua determinação é complexa. De acordo com BURMAN (2007), a medição da ET é dispendiosa, difícil e a análise adequada dos dados é árdua. KIRDA et al. (1994) apud BLANCO e FOLEGATTI (2004)

também citam que os métodos disponíveis para estimar a demanda hídrica da cultura requerem instrumentos caros ou de complicada operação para serem utilizados rotineiramente pelos produtores.

2.3.3 Métodos de determinação da evapotranspiração

Segundo PEREIRA et al. (2001), a escolha de um determinado método de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) depende de uma série de fatores. Primeiramente deve-se considerar a disponibilidade de dados meteorológicos, pois os métodos considerados mais complexos, e conseqüentemente, mais precisos, exigem um grande número de variáveis. O segundo fator a ser considerado é a escala de tempo requerida. Alguns métodos apresentam boas estimativas em escalas temporais maiores (mensais, por exemplo) enquanto outros métodos permitem a utilização na escala horária. Por fim, o terceiro fator considerado pelo autor está relacionado à adaptabilidade dos métodos empíricos à região estudada, pois esses não possuem aplicação universal e necessitam ajustes locais.

CARVALHO et al. (2011) citam que para efeito de planejamento do uso do solo, estimativas de ET_o podem ser efetuadas com base em imagens de satélites, de acordo com trabalhos desenvolvidos por BEZERRA et al. (2008) e FOLHES et al. (2009).

2.3.3.1 Métodos diretos

De acordo com BERNARDO et al. (2008) existem vários métodos para a determinação direta da evapotranspiração. Dentre os fatores que devem ser considerados na seleção do método, a fonte de água utilizada pelos vegetais é a principal delas, podendo ser por precipitação, irrigação ou água subterrânea. De acordo com os autores os principais métodos diretos são: a) lisímetros; b) parcelas experimentais no campo; c) controle de umidade do solo e d) método da “Entrada-Saída”; sendo estes três últimos baseados no balanço de água no solo.

CARVALHO e OLIVEIRA (2012) citam que os métodos diretos utilizados na determinação da ET são: o método de balanço de água no solo e os lisímetros. Segundo SENTELHAS (2001) dentre os métodos utilizados para a medição direta da ET, destacam-se o método de balanço de água no solo e os lisímetros, segundo o autor devido à dificuldade de se obter medidas precisas de ET_o, o mais comum é a estimativa por meio de modelos matemáticos (empíricos ou semi-empírico).

2.3.3.2 Métodos indiretos

Os métodos indiretos podem ser definidos como aqueles que os valores de evapotranspiração são estimados por meio de equações empíricas, ou baseados em princípios físico-fisiológicos, ou ainda, por meio de correlação entre as medidas de evaporação da água (evaporímetros). De acordo com SEDYAMA (1996) as estimativas da ET pelos métodos empíricos, geralmente, são aplicáveis apenas para períodos longos, valores mensais, por exemplo, e a exatidão das estimativas está limitada pela dependência de poucas variáveis.

Segundo BERNARDO et al. (2008), os métodos indiretos podem ser divididos em dois grandes grupos: evaporímetros (tanques de evaporação e atmômetros) e as equações empíricas (também denominadas modelos agrometeorológicos, de acordo com SANTOS et al.; 2008).

Os evaporímetros são equipamentos usados para medir a evaporação da água, existindo dois tipos básicos: no primeiro, a superfície da água fica livremente exposta (tanque de evaporação); e no segundo, a evaporação se dá através de uma superfície porosa

(atmômetros). Existem vários tipos de tanques de evaporação, alguns mais utilizados em determinadas regiões e outros mais difundidos, conhecidos internacionalmente, tais como: Tanque USWB Classe A, Colorado, CGI-3000, Russo, dentre outros. (BERNARDO et al., 2008)

Um grande número de métodos empíricos e semi-empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência foi desenvolvido desde a década de quarenta. No entanto muitos desses métodos são de aplicação restrita, sendo válidos somente para condições climáticas específicas. Outros métodos possuem base física mais sólida, sendo universais, integrando todos os elementos que condicionam o processo de ET, mas, mesmo possuindo resultados confiáveis, seu emprego dependerá da disponibilidade de uma série de dados meteorológicos do local de interesse. (SENTELHAS, 2001)

BERNARDO et al. (2008) citam que atualmente existem várias equações baseadas em dados meteorológicos para o cálculo da ET, sendo a maioria de difícil aplicação, não somente pela complexidade do cálculo, mas também pela exigência de um grande número de elementos climatológicos.

BURMAN (2007) cita que a escolha de uma equação para determinação da ET envolve uma série de fatores, tais como a experiência profissional, a aceitação do método e a disponibilidade ou histórico de dados climáticos. Conforme o autor é necessário classificar e identificar claramente os propósitos dos cálculos, a fim de se obter o método mais adequado possível (por exemplo: necessidade de obtenção de ETo, resultados horários, diários, semanais, ou mensais).

As equações desenvolvidas são normalmente classificadas conforme o principal parâmetro climático existente no modelo. Geralmente estas classificações incluem os modelos baseados em temperatura (Thornthwaite, Blaney-Criddle; e Hargreaves-Samani); modelos baseados na radiação solar (Priestley-Taylor e Makkink); e os modelos combinados, que são aqueles baseados nos princípios de balanço de energia e transferência de massa (Penman, Penman Modificado e Penman-Monteith FAO). (SHAHIDIAN et al. 2011). Para CARVALHO et al. (2011) o grande número de métodos desenvolvidos visando a estimativa da ETo é devido a três importantes situações: adequação do método às condições climáticas da região; simplicidade de uso e limitação dos elementos meteorológicos que alimentam esses métodos.

Dentre os diferentes modelos de estimativa da evapotranspiração existentes, o modelo de Penman-Monteith (PM) é recomendado pela FAO, e tem sido relatado como capaz de obter valores consistentes em diferentes regiões e climas e, por isso, é aceito mundialmente e é considerado como padrão (CARVALHO et al., 2011). O método PM é a principal modificação ao método de Penman, o qual não foi desenvolvido originariamente para o cálculo da ET de referência (BURMAN, 2007). A determinação usando a equação de PM tem sido utilizada, historicamente, para estimativas da ET de referência (geralmente a grama).

De acordo com ALLEN et al. (1998), para o cálculo da ETo é utilizada a equação parametrizada pela FAO (Equação 1):

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{Tm + 273} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que: $ET_{o_{PM}}$ é a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão do vapor d'água do ar no ponto da temperatura do ar média ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); U_2 é a velocidade do vento à 2 m de altura (m s^{-1}); es é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa); ea é a pressão de saturação do vapor atual (kPa); e Tm é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

A principal deficiência apontada no modelo de PM é o requerimento de numerosos elementos climáticos, o que nem sempre estão disponíveis em vários locais. Segundo SENTELHAS (2011) este método vem sendo empregado em todo mundo; no Brasil, seu emprego já é difundido, sendo o maior entrave a falta de dados para o uso em algumas localidades.

2.3.4 Lisímetros

HOWELL et al. (1991) descreveram o lisímetro (palavra derivada do grego *Lysis* que é dissolução ou movimento, e *metron*, que significa mensurar) como tanques ou recipientes usados para definir o movimento da água através dos limites do solo, sendo utilizados em pesquisas de evapotranspiração além de outras aplicações – como estudos sobre a qualidade da água percolada ou a lixiviação de pesticidas, por exemplo. CAMPECHE (2002) comenta que, inicialmente, os lisímetros foram desenvolvidos para quantificação e qualificação da água do solo percolada em estudos hidrológicos.

De acordo com ABOUKHALED et al. (1982) o uso de lisímetros foi relatado pela primeira vez na França em 1688, onde La Hire usou recipientes preenchidos de solo e observou a percolação de água em dois solos cobertos. Na ocasião, os estudos eram focados na quantificação e qualificação da água percolada sem as medições de escoamento superficial, armazenamento de água no solo, ou uma eventual evapotranspiração. Segundo os autores, somente no início do século XX os estudos para determinação da evapotranspiração se iniciaram. Primeiro, em 1906 na Alemanha e depois em 1923 nos Estados Unidos. Thornthwaite foi o primeiro pesquisador a utilizar lisímetros em condições de campo, sendo que no Brasil, os primeiros relatos de uso de lisímetros datam dos anos 50 quando Camargo (1962) usou lisímetros de drenagem para determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. (FELTRIM et al., 2011)

Segundo SILVA et al. (1999) para a utilização de modelos de estimativa da evapotranspiração baseados em dados climáticos ou em variáveis vegetais, há a necessidade de se realizar a calibração e adequação do modelo para as condições específicas do local onde será empregado. Portanto, de acordo com os autores a estimativa da evapotranspiração por meio de medidas diretas, com o uso de lisímetros se faz necessário. As medidas diretas podem ser mais acuradas, porém são de uso restrito à instituições de pesquisa devido ao seu maior custo e ao manejo mais rigoroso. Adicionalmente, com o avanço tecnológico em sistemas de armazenamento de dados, tornou-se mais econômico e fácil a construção de lisímetros capazes de mensurar dados de evapotranspiração diários.

ALLEN et al. (2011) relatam que as principais vantagens do lisímetro para medição da ET são: calibração pode ser validada mecanicamente; requerimento de bordadura é menor quando comparada a outros métodos, como o micrometeorológico, por exemplo; podem ser completamente automatizados e o sistema é quase totalmente visível para inspeções.

O uso da água (evaporação, transpiração ou ET) pode ser determinado pelo balanço da água através dos limites dos lisímetros. Segundo HOWELL et al. (1991) os lisímetros de pesagem (mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação) determinam a ET diretamente pelo balanço de massa da água, enquanto que os lisímetros de não-pesagem (drenagem e de lençol freático constante) determinam a ET indiretamente por meio do balanço de volume.

Os lisímetros ainda podem ser classificados de acordo com o perfil do solo, reconstruído ou monolítico, e quanto ao mecanismo de drenagem utilizado, à vácuo ou por gravidade. Na literatura são descritos diferentes tipos de lisímetros, sendo que o tamanho e o projeto de montagem de cada um é baseado no requerimento específico do estudo e das condições de construção e custos envolvidos. Alguns trabalhos como de ALLEN et al (2011) relatam sobre os custos envolvidos na construção de lisímetros. No entanto, diversos autores

(FARIA et al., 2006; SANTOS et al., 2008 e VILELA et al., 2015) têm relatado a redução dos custos e viabilidade de construção de lisímetros de pesagem usando o mecanismo de células de carga para as medições.

SILVA et al. (1999) estudando o uso de lisímetros (de pesagem, de drenagem e de lençol freático constante) para as medições da ETo, tendo o modelo de PM-FAO como referência, observou que as medidas diárias da ETo obtida pelo lisímetro de pesagem apresentaram boa concordância com os valores diários estimados pelo modelo PM-FAO. Entretanto, as estimativas de evapotranspiração, utilizando os lisímetros de drenagem e de lençol freático constante apresentam resultados inconsistentes em base diária de cálculo, evidenciando, para os autores, que esses dispositivos possuem um melhor funcionamento para intervalos acima de cinco dias.

2.3.4.1 Lisímetros de pesagem mecânica

De acordo com BERNARDO et al. (2008), consiste em um tanque apoiado sobre uma balança mecânica, sendo este tanque livre (sem o contato de suas paredes laterais com as paredes do tanque externo) e apoiado sobre a balança que indica toda a variação de seu peso, e que está relacionada com a perda de água por evapotranspiração. Ainda conforme os autores, este modelo permite a determinação da ET em períodos curtos (ET horária ou diária) o que não acontece com os lisímetros não-pesáveis.

STONE e SILVEIRA (1995) consideram esse instrumento o mais exato para a determinação direta da evapotranspiração, podendo ser obtidas medidas precisas para curtos intervalos de tempo como estudos da variação diária da evapotranspiração. Entretanto, considerando os custos de instalação e cuidados de operação, seu uso é indicado apenas em pesquisas e como padrão para calibração de outros métodos de estimativa da evapotranspiração. SANTOS et al. (2008), relatam que o uso de lisímetros convencionais de pesagem é limitado pelo alto custo da mão-de-obra especializada tanto na construção quanto na operação, assim como pelas dimensões, equipamentos especiais e materiais utilizados.

HOWELL et al. (1991) comentam que a escala de precisão dos lisímetros mecânicos é de 0,05 a 0,02 mm dependendo da incerteza de medição do sensor assim como da área e da massa do lisímetro. Os autores alertam sobre a necessidade de cuidados especiais com os mecanismos de pesagem a fim de evitar problemas de corrosão pela condensação e ferrugem nos pontos dos pivôs, sendo instalados muitas vezes equipamentos condicionadores de ar/aquecimento/desumidificação.

2.3.4.2 Lisímetros de pesagem eletrônica

Os lisímetros de pesagem eletrônica possuem o mesmo princípio de funcionamento do tipo mecânico, sendo que, em vez de balanças, o mecanismo de pesagem é feito por meio de células de carga. De acordo com CARVALHO e OLIVEIRA (2012) os lisímetros equipados com mecanismos de pesagem por células de carga são os mais modernos e permitem a realização de medidas automatizadas com a instalação das células sob a caixa impermeável e são geralmente acopladas a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados com maior confiabilidade, possibilidade de medidas na escala horária, representando assim uma vantagem sobre os demais tipos de lisímetros.

No entanto, a sensibilidade das células de carga, gera dificuldades na operação em escalas de tempo menores. CARVALHO et al. (2007) comentam que estas dificuldades operacionais são observadas em dias de chuvas intensas, em sequência de dias com chuvas intermitentes e também em dias com ventos intermitentes.

2.3.4.3 Lisímetro de flutuação

KING et al. (1956) apud HOWELL et al. (1991), construíram um lisímetro usando o princípio da flutuação, e descreveram-no como um lisímetro que flutua em um tanque cheio de um fluido e as variações de massa (entrada e saída de água no solo do lisímetro) são medidas pela alteração do nível desse fluido (água ou cloreto de zinco) em um piezômetro. KLAR (1988) cita que a água foi o primeiro líquido a se usar, porém com o uso do cloreto de zinco, cujo peso específico é de $1,90 \text{ g cm}^{-3}$, o espaço total para manter o tanque em flutuação é reduzido.

BERNARDO et al. (2008) citam que esse modelo é menos preciso do que o de pesagem mecânica, porém mais simples e barato para ser construído. No entanto, de acordo com HOWELL et al. (1991) a precisão desses lisímetros é de 0,025 mm, sendo frequentemente mais precisos do que os do tipo mecânico.

2.3.4.4 Lisímetro hidráulico

Segundo HOWELL et al. (1991) diversos lisímetros hidráulicos foram construídos desde os anos 50. Segundo os autores estes lisímetros possuem inerentes limitações devido à estabilidade térmica do fluido de medição. BERNARDO et al. (2008) descreve-os como dois tanques, um dentro do outro, sendo o tanque interno apoiado sobre câmaras de borracha flexíveis, cheias de água. Como o tanque interno se apóia unicamente sobre as câmaras (células hidráulicas), a variação do seu peso é que faz variar a leitura de um manômetro. Os autores citam que os problemas que podem ocorrer nesse sistema estão associados à dilatação do material em contato com as células hidráulicas e a dilatação do tubo do manômetro, em virtude da variação da temperatura.

Segundo HOWELL et al. (1991) esse tipo de lisímetro possui precisão entre 0,05 e 0,1 mm dependendo da área e massa do lisímetro e são convenientes para medições em escalas diárias ou menores.

2.3.4.5 Lisímetro de drenagem

De acordo com KLAR (1988), os lisímetro de drenagem ou de percolação operam baseados no princípio do balanço de água, onde são medidas as águas precipitada e percolada. Trata-se de um processo mais demorado, preciso para períodos longos, que variam de acordo com o regime de chuva ou irrigação, com a profundidade do lisímetro e com o movimento de água no perfil do solo de controle.

BERNARDO et al. (2008) descrevem que a ETo determinada por esse método, deve ser aplicada em médias semanais, quinzenais ou mensais. Conforme os autores este modelo consiste em um tanque enterrado, sendo que do fundo deste tanque sai um cano que conduz a água drenada para um recipiente. De acordo com SILVA et al. (1999) o modelo de lisímetro de drenagem é o mais simples e é muito difundido devido sua simplicidade, porém apresenta restrições para obtenção de dados diários.

2.3.4.6 Lisímetro de lençol freático constante

De acordo com BERNARDO et al. (2008), tal método é uma adaptação ao lisímetro de percolação que permite boa precisão na medida da evapotranspiração. Nesse lisímetro o lençol freático é mantido constante e, em resposta ao consumo de água pela cultura, a água se desloca para a zona radicular por capilaridade. Salienta-se que, embora não permitam medidas com o mesmo grau de exatidão e em intervalos tão curtos quanto os lisímetros de pesagem,

possuem custos de instalação e operação menores e são bastante utilizados para a determinação da evapotranspiração das culturas em condições padrão de cada fase de crescimento.

2.3.5 Considerações sobre os lisímetros

De acordo com CAMPECHE et al. (2011), apesar da técnica de lisimetria ser considerada padrão no estudo de calibração de outros métodos, ela não está isenta de críticas, principalmente, quando se calcula a evapotranspiração em períodos menores que um dia. Segundo KLAR (1988), dentre os lisímetros atualmente existentes, os mais convenientes para a micrometeorologia são os de pesagem. Os de flutuação são mais baratos, porém apresentam o problema de interferência da temperatura sobre o líquido ou gás que recebe o tanque.

Os problemas mais comuns relacionados ao meio circundante, envolvendo lisímetros são: áreas não representativas na vegetação ao longo dos limites do lisímetro; diferença de altura e de densidade da vegetação dentro e fora do lisímetro; diferença da vegetação entre as áreas do lisímetro e a área da estação meteorológica; condições térmicas do bloco de solo do lisímetro e diferenças no perfil do solo; condições térmicas e efeitos advectivos devido à altura, exposição da borda ou falta de isolamento do tanque; efeito buquê e efeitos da profundidade do tanque no desenvolvimento das raízes; e efeitos do perfil de umidade específica ou lençol freático no interior do lisímetro na evaporação e na retirada de umidade. (ALLEN et al., 2011; CAMPECHE et al., 2011).

SEDYAMA (1996) cita que os valores de E_{To} determinados em lisímetros, para atender a definição correta de E_{To} fica frequentemente prejudicada, tendo em vista ser muito difícil manter as condições internas e externas semelhantes. O “efeito buquê” é, de acordo com o autor, uma dessas dificuldades, devido à tendência de maior crescimento das plantas no interior do lisímetro ou do crescimento além dos limites da sua borda externa. Essa diferença no crescimento (maior no interior) provoca uma perturbação maior no movimento horizontal do ar, aumenta o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura e aumenta a transpiração da vegetação. Adicionalmente a interceptação da radiação solar incidente também aumenta numa proporção que pode chegar a 40%.

De acordo com ALLEN et al. (2011) outra forma de erro, de particular importância em lisímetros que contêm árvores, está relacionado à área do dossel que, frequentemente, é maior do que a do lisímetro, acarretando em valores inconsistentes de ET. Os autores citam que a estimativa incorreta da área evaporativa efetiva de um lisímetro é provavelmente o erro mais comum encontrado nos cálculos de evapotranspiração.

HOWELL et al. (1985) apud. CARVALHO et al. (2007) afirmam que para minimizar os efeitos das paredes do lisímetro sobre a evapotranspiração medida, essas devem ser construídas com a menor espessura possível e deve-se reduzir ao máximo a abertura existente entre as paredes interna e externa.

Segundo SEDYAMA (1996) existe consenso de que a relação entre a borda do lisímetro com a sua área efetiva deve ser menor que 0,1. Assim, um lisímetro com 1 metro quadrado de área interna, e que possui paredes interna e externa de 5 mm com folga de 10 mm entre elas, teria uma relação de $0,08 (4 \times 0,02) \times (1,02) / 1,00$, isto é, o erro seria no mínimo de oito por cento considerando apenas a folga e a espessura das bordas do lisímetro.

Dentre as desvantagens do sistema de lisímetro para medição da ET, ALLEN et al. (2011) citam: pequena representatividade da área do lisímetro; dificuldade de manter ou reconstruir o solo em seu interior; dificuldade de reduzir quaisquer efeitos de bordadura na vegetação; problemas na medição de árvores e plantas com maior espaçamento; dificuldades de manutenção das condições de solo, água e vegetação iguais no interior e exterior do lisímetro; dificuldades de reproduzir as características de enraizamento nos ambientes;

dificuldade de detectar a presença de baixos níveis de estresse hídrico devido a efeitos visuais sutis e dificuldade em medidas acuradas de ET em vegetação com estresse hídrico.

2.3.6 Minilísímetros de pesagem

São denominados “minilísímetros” os lisímetros de dimensões reduzidas desenvolvidos para a medição da evapotranspiração de plantas cultivadas em vasos ou em tubetes dispostos em bandejas. Tendo em vistas as grandes dimensões dos lisímetros e a necessidade de realizar estudos em espaços reduzidos, como o interior de casas de vegetação, diversos autores (GERVÁSIO e MELO JÚNIOR, 2014; GRIMMOND et al., 1992; MISRA et al., 2011; OLIVEIRA, 2012; RUIZ-PEÑALVER et al., 2015) desenvolveram lisímetros de pesagens com estruturas menores para a elaboração de seus estudos (Figura 1).



Figura 1. Modelos de minilísímetros com sistema de pesagem eletrônica desenvolvidos por (a) GERVÁSIO e JÚNIOR (2014), (b) RUIZ-PEÑALVER et al. (2015), (c) WHERLEY et al. (2009) e (d) OLIVEIRA (2012) para estudos de evapotranspiração.

A utilização de células de carga como dispositivo sensor da variação da massa de água armazenada em pequenos volumes de solo, viabilizou a construção de estruturas menores, para uso em ambientes como estufas e casas de vegetação.

As células de carga são transdutores de força, as quais transformam uma grandeza física (força) em um sinal elétrico, cujo princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro (“strain gage”). Os principais critérios utilizados na escolha de uma célula de carga são: a capacidade nominal, isto é a força máxima que deverá ser medida; a sensibilidade, ou seja, a variação da tensão de saída em

função da tensão de excitação aplicada; a precisão, sendo o erro máximo admissível relacionado em divisões da capacidade nominal; e o formato, de acordo com a aplicação da célula. (CONCEIÇÃO, 2005)

Segundo GRIMMOND et al. (1992) os minilímetros possuem as seguintes vantagens: permite a medição do fluxo evaporativo em pequenas áreas; permite a mudança de posição (portátil); reduz a escala ou interface quanto a perturbação no ambiente de estudo; e possui construção e instalação mais barata.

Para o monitoramento da irrigação do tipo localizada em vasos de planta com espécies da família *Heliconiaceae*, GERVÁSIO e JÚNIOR (2014) construíram seis minilímetros (Figura 1a) de baixo custo (U\$ 140,67). De acordo com os autores o modelo desenvolvido, e que utilizou células de carga como elemento sensor, com capacidades de 20 kg e de 30 kg, permitiu medir com precisão o consumo de água pelas plantas, destacando sua versatilidade.

O minilímetro desenvolvido por RUIZ-PEÑALVER et al. (2015) (Figura 1b) para a medição da evapotranspiração de plantas em vasos, com capacidade para 60 kg, foi testado e validado pelos autores, no cultivo de videiras (*Vitis Vinifera L.*). O minilímetro desenvolvido por GRIMMOND et al. (1992), com capacidade para 22,7 kg (50 lbs), apresentou segundo os autores, resultados precisos e confiáveis, em níveis horários e/ou diários, ressaltando que o aspecto negativo de seu uso está associado à profundidade do recipiente em relação ao crescimento das raízes.

Para a avaliação do consumo de água em gramados, WHERLEY et al. (2009) projetaram e construíram dois minilímetros (Figura 1c), possuindo capacidade para, aproximadamente, 30 kg. Segundo os autores os equipamentos apresentam as seguintes vantagens: baixo custo de fabricação; permite a instalação de grande número de repetições em campo e; a velocidade e a praticidade permitem que apenas uma pessoa realize as medições.

Visando estudos com eucalipto, OLIVEIRA (2012) desenvolveu um minilímetro de pesagem portátil (Figura 1d), com capacidade nominal para 20 kg. De acordo com a autora o equipamento se mostrou eficiente na determinação da evapotranspiração em ambientes protegidos.

Para o monitoramento do balanço de água em recipientes contendo trigo (*Triticum aestivum L.*, cv. Lang.), MISRA et al. (2011) construíram doze minilímetros possuindo células de carga com capacidade para 20 kg, e concluíram que é possível medir de forma precisa e econômica a evapotranspiração em maiores períodos de tempo, utilizando uma calibração mais robusta. Salientaram também que as variáveis: histerese, temperatura ambiente e tempo de resposta do sinal, não influenciaram de forma significativa o desempenho do minilímetro.

Para verificar o balanço hídrico em vasos contendo videiras (*Vitis Vinifera L.* cv. Bobal R-110), CANALES et al. (2013) realizaram estudos utilizando minilímetros. De acordo com os autores os minilímetros (possuindo três células de carga com capacidade para 30 kg cada) mostraram-se viáveis no monitoramento das variações de massa sendo uma importante ferramenta para o manejo da irrigação e sua automação.

GOMIDE et al. (1996) desenvolveram um minilímetro de pesagem, com células de carga, avaliando o consumo das culturas de milho e de feijão. Os autores concluíram que o protótipo apresentou sensibilidade para detectar o requerimento de água, resultante de uma variação da massa ao longo do tempo compatível com a calibração realizada.

2.3.7 Objetivos

Considerando a importância do manejo da irrigação na preservação dos recursos hídricos e os benefícios que o uso de lisímetros propiciam na medição das perdas de água pelas culturas, tanto no âmbito científico quanto no âmbito comercial, associado a

complexidade e aos custos para a construção de um lisímetro, objetivou-se com este trabalho:

- a) desenvolver um modelo de minilísímetro de pesagem eletrônica, que seja portátil para operação em casas de vegetação;
- b) calibrar o minilísímetro, avaliando a respectiva equação de calibração obtida; e
- c) avaliar o desempenho de minilísímetros, em condição de campo, no cultivo de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – Engelm), em ambiente protegido.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado nas dependências do Horto Florestal do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ) - Latitude 22° 58' 05" Sul, Longitude 43° 14' 20" Oeste, altitude de 92 m - na cidade do Rio de Janeiro, RJ, Brasil. O clima local é do tipo Aw de Köppen, caracterizado por estação chuvosa com índices pluviométricos elevados no verão e uma estação seca no inverno, com precipitação média anual em torno de 2.000 mm, temperatura do ar média anual de 23,8 °C, com máxima de 30,3 °C registrada em fevereiro e mínima de 16 °C em julho. (INMET, 2014).

Os ensaios foram realizados numa casa de vegetação (Figura 2), posicionada no sentido leste-oeste, medindo 12 m de comprimento e 4 m de largura. As laterais da construção possuíam altura de 1,70 m e foram revestidas por tela de sombreamento (sombrite) com 50% de proteção da luminosidade. A cobertura em formato de arco foi revestida com filme plástico para estufas marca Agroplas modelo Extra Longa Vida, de 100 micras, e sobre a cobertura de plástico, foi instalada tela de sombreamento de 50% de proteção. As extremidades foram revestidas com tela de sombreamento mantendo a mesma altura das laterais e o restante foi revestido pelo mesmo filme plástico utilizado na cobertura. No vão central, o pé-direito da estufa possuía 3,00 metros. O piso, no interior da casa de vegetação e no entorno, era revestido por malha de cobertura do solo (ráfia de solo).



Figura 2. Casa de vegetação localizada nas instalações do Horto Florestal do Jardim Botânico do Rio de Janeiro.

2.4.2 Construção dos minilímetros

2.4.2.1 Estrutura física

Com objetivo de monitorar a variação da quantidade de água, que ocorre na produção de mudas em tubetes dispostos em bandejas, foram construídos seis minilímetros portáteis. A estrutura foi confeccionada possuindo base de sustentação móvel, permitindo o deslocamento do minilímetro.

Considerando sua utilização em casas de vegetação que, eventualmente, possuem

obstáculos, como bancadas, sacos com substratos, dentre outros, optou-se pela instalação de um sistema de pesagem com a plataforma (bandeja) suspensa, a fim de possibilitar o posicionamento da estrutura em qualquer ponto no interior da construção. Nas Figuras 3 e 4 são apresentados o esquema estrutural e a imagem do minilísímetro construído, respectivamente.

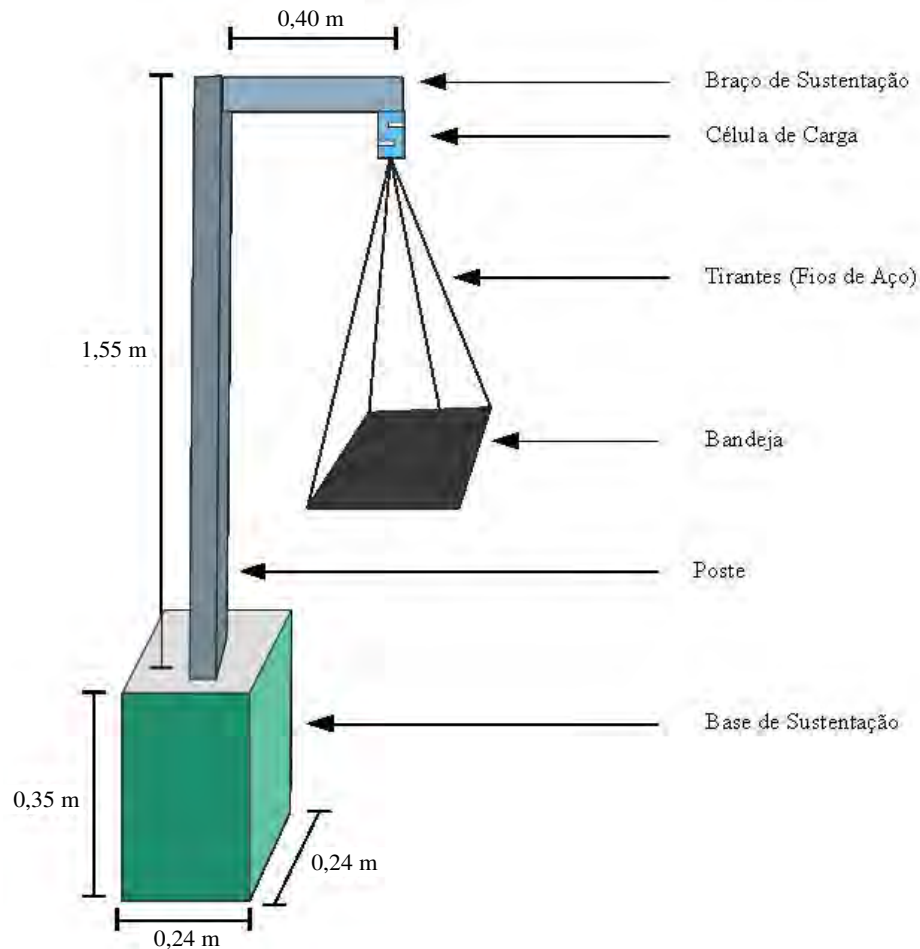


Figura 3. Ilustração com os componentes estruturais e forma de montagem utilizada no minilísímetro.

A base de sustentação foi feita com um latão de 20 l (altura de 0,35 m e largura de 0,24 m) semelhante aos utilizados em recipientes de tinta. O latão foi preenchido com concreto em 2/3 do volume, visando aumentar o peso e, conseqüentemente, a estabilidade, assim como permitir a fixação central de um poste fabricado em aço galvanizado. O poste possui perfil quadrado com 0,06 m de lado e altura de 1,9 m, tendo na extremidade superior, fixado com parafusos, um braço de sustentação, em metalon, com perfil retangular (0,05 m x 0,03 m), tendo 0,4 m de comprimento, onde foi fixada a célula de carga.

Na extremidade do braço de sustentação foi fixada uma célula de carga (Figura 5), tipo “S”, marca BERMAN, modelo BTS-20, construída em alumínio possuindo 0,0051m de largura e 0,0076 m de altura, com capacidade máxima de 20 kg, precisão de 0,02% da capacidade total (4 g) e sensibilidade de $2 \pm 0,2$ mV/V. As células de carga sustentavam, por meio de fios de aço cobertos com plástico (diâmetro de 0,00165 m), as bandejas destinadas à produção das mudas.



Figura 4. Minilímetro de pesagem posicionado no interior da casa de vegetação.

As bandejas utilizadas foram fabricadas em polipropileno pela empresa MECPREC, modelo PE54, com capacidade para 54 tubetes de 280 cm³, e possuíam as seguintes dimensões: 0,58 m de comprimento, 0,38 m de largura e 0,16 m de altura, a massa média, verificado em amostra contendo 12 bandejas, foi de 1.270 g.



Figura 5. Célula de carga posicionada na extremidade do braço de sustentação do minilímetro.

Para evitar possíveis deformações das bandejas, devido ao peso do conjunto, de forma a melhorar o suporte e a estabilidade, os fios de aço cobertos com plásticos, com comprimento total de 2,40 m foram transpassados longitudinalmente por baixo das mesmas, através de orifícios com diâmetro de 0,005 m, feitos com furadeira. As extremidades dos fios foram unidas e conectadas à célula de carga por meio de um parafuso metálico dotado de ilhós, mantendo uma distância entre a célula de carga e o orifício na bandeja de, aproximadamente, 0,85 m (comprimento do fio de aço).

2.4.2.2 Sistema de coleta e registro dos dados

A aquisição e o registro dos dados fornecidos pelos minilísímetros, por intermédio das células de carga, foi feita por um módulo de leitura e registro eletrônico de dados (datalogger) modelo Fieldlogger 512K fabricado pela Novus (Figura 6), instalado em uma sala distante, aproximadamente, 3 m da entrada da casa de vegetação.



Figura 6. Registrador Eletrônico (Datalogger) fabricado pela Novus modelo Fieldlogger.

A escolha deste modelo de equipamento seguiu critérios como custo de aquisição, facilidade de configuração, capacidade de armazenamento dos dados, interface homem-máquina simples, além de recursos específicos como: acionamento de relés, alarmes de saída, e entrada USB, dentre outros.

Cada célula de carga dos minilísímetros foi conectada a uma porta de entrada de sinal analógico do “datalogger”, onde, internamente um conversor A/D de 24 bits realizava a conversão dos sinais recebidos.



Figura 7. Formulário do software FieldloggerConfig para configuração dos canais analógicos.

Por meio de um software (FieldloggerConfig V 1.6.0) cada canal foi configurado,

individualmente, sendo definidos parâmetros como nome da porta, limites de medição, casas decimais, unidade de medida, intervalo de varredura, e valor de exibição para o caso de erros (Figura 7). O registro dos dados foi programado para ocorrer de forma contínua ao longo do dia, em intervalos de 1 minuto (intervalo de varredura).

O Fieldlogger contém um recurso extra denominado “canal virtual” que possibilitou a inserção de uma operação matemática (equação) permitindo a conversão direta das leituras finais. Com este recurso, configurável por meio do software FieldloggerConfig, foi possível transformar cada canal de entrada analógica em um operando, o que permitiu, após a devida calibração do minilísímetro, estabelecer uma relação direta entre tensão de saída da célula de carga e a massa medida conforme a equação obtida.

2.4.3 Calibração dos minilísímetros e obtenção dos modelos matemáticos

Para que os valores observados no datalogger representassem diretamente os valores de massa existentes nas bandejas foram realizadas calibrações, de forma a relacionar os valores de tensão (mV), medidos por meio das células de carga, em valores de massa (g), lidos no datalogger.

Para o procedimento de calibração foram confeccionadas massas-padrão, constituindo-se de areia em sacos plásticos, possuindo 50, 150, 300, 500, 750, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500 e 6000 g. A obtenção das massas-padrão foi feita com o auxílio de uma balança eletrônica de precisão fabricado pela BEL, modelo THB-3000, com sensibilidade de 0,05 g (Figura 8).



Figura 8. Obtenção da massa-padrão confeccionada com sacos plásticos preenchidos de areia.

As massas-padrão foram colocadas sobre as bandejas, isentas de tubetes, de cada minilísímetro (Figura 9), de forma crescente, durante o carregamento, e após cada estabilização da leitura (1-2 min) foram anotados os valores registrados no datalogger. Posteriormente, ocorreu o processo inverso, de descarregamento, de forma decrescente, no mesmo intervalo de tempo, com o objetivo de verificar se existiam efeitos de histerese, conforme metodologia descrita por CAMPECHE (2002).

As curvas de calibração que relacionavam a tensão de saída (mV) e a massa (g) e as respectivas equações foram obtidas por meio de planilha eletrônica. Para a obtenção das equações de cada minilísímetro foram consideradas, para cada massa, as médias entre os valores de leitura obtidos durante os processos de carregamento e de descarregamento, determinando assim a relação entre o valor de leitura e de massa.



Figura 9. Processo de calibração dos minilísímetros utilizando sacos de areia como massas-padrão.

2.4.3.1 Análise da calibração

Os resultados da relação massa-padrão e valor da leitura foram submetidos à análise estatística de regressão. Os coeficientes de determinação (r^2) e os valores de erro padrão de estimativa (EPE) foram utilizados para avaliar a qualidade dos modelos (equações) obtidos.

Os valores do r^2 foram utilizados para determinar a proporção da variação total dos valores lidos que são explicadas pela variação dos valores das massas-padrão. A equação do coeficiente de determinação é dada por:

$$r^2 = \frac{\sum (V_L - V_{MP})^2}{\sum (V_P - V_{MP})^2} \quad (2)$$

Em que: V_L são os valores medidos (leituras); V_{MP} são as médias dos valores padrão; e “ V_P ” são os valores padrões (reais).

Os valores do EPE foram utilizados para verificar a influência de outros fatores nos valores lidos no Fieldlogger. Para a determinação do EPE foi utilizada a equação dada por:

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (V_P - V_L)^2}{n - 2}} \quad (3)$$

Em que: n é o número de observações realizadas.

2.4.4 Avaliação do desempenho do minilísímetro em condições de campo

Para avaliar o desempenho dos minilísímetros, na condição de campo, foram realizados testes de operação com as bandejas contendo tubetes com mudas de pinus e de eucalipto. As bandejas foram organizadas em seis bancadas, que possuíam aproximadamente, 1,0 m de altura, 2,4 m de comprimento e 1,0 m de largura e estavam orientadas transversalmente na casa de vegetação, conforme Figura 10.

As bancadas possuíam espaçamento de, aproximadamente, 1,20 m na área central e de 0,80 m entre si. Após sorteio ficou definido que as bancadas 1, 3 e 5 seriam destinadas às mudas de pinus e as bancadas 2, 4 e 6, às mudas de eucalipto. Outros sorteios foram realizados a fim de determinar o posicionamento de cada tratamento (100, 200, 300 e 400%) dentro das bancadas.

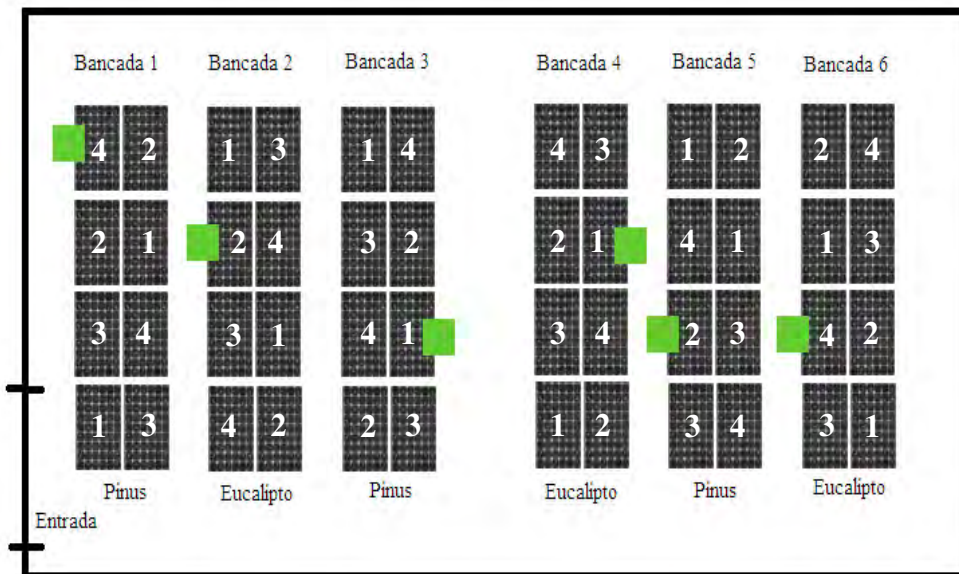


Figura 10. Esquema de orientação das bancadas na casa de vegetação, posicionamento dos minilísímetros (em destaque) e localização dos tratamentos referentes a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, definidas como 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

2.4.4.1 Tubetes

Foram utilizados tubetes fabricados em polietileno pela MECPREC. Os tubetes (modelo T280) possuíam capacidade volumétrica de 280 cm³, altura de 0,190 m, diâmetro de abertura superior de 0,063 m; diâmetro de abertura inferior de 0,013 m. O peso médio, observado em amostra contendo 50 tubetes, foi de 35,2 g. Os tubetes foram acondicionados nas bandejas, que possuíam capacidade para 54 unidades.

2.4.4.2 Substrato

Para o preenchimento dos tubetes foi utilizado composto contendo lodo de esgoto (LE) e vermiculita (VE), na proporção, em volume, de 70:30 (LE:VE). Esta proporção foi estabelecida para que após o envasamento das mudas de pinus e de eucalipto, cultivadas inicialmente em tubetes de 45 cm³, resultasse em uma quantidade final de lodo de esgoto de, aproximadamente, 60% do volume dos tubetes. Essa proporção considerou o volume de substrato comercial aderidos às raízes das mudas, composto basicamente por vermiculita e casca de pinus (Tropstrato Florestal).

O lodo de esgoto foi fornecido pela Companhia Estadual de Água e Esgoto do Rio de Janeiro (CEDAE) em sacos de, aproximadamente, 20 kg. O material estabilizado fornecido pela empresa era proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto da Alegria (ETE Alegria) e possuía a indicação de “Adubo Florestal” na embalagem (Figura 11). Ao lodo de esgoto estabilizado (Figura 12a) foi adicionada a vermiculita que possuía granulometria média (Figura 12b).

A homogeneização do material foi feita com o uso de enxada e, após a mistura, o composto foi peneirado em malha de 4 mm sendo levemente umedecido antes de ser colocado nos tubetes. Durante todo o manuseio do lodo de esgoto e, posteriormente, no composto,

foram adotadas medidas de segurança, seguindo as orientações da Resolução N° 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto, exigindo a manipulação por funcionários dotados de equipamentos de proteção individual (EPI's).



Figura 11. Embalagem contendo o lodo de esgoto estabilizado proveniente da Companhia Estadual de Água e Esgoto do Rio de Janeiro (CEDAE).

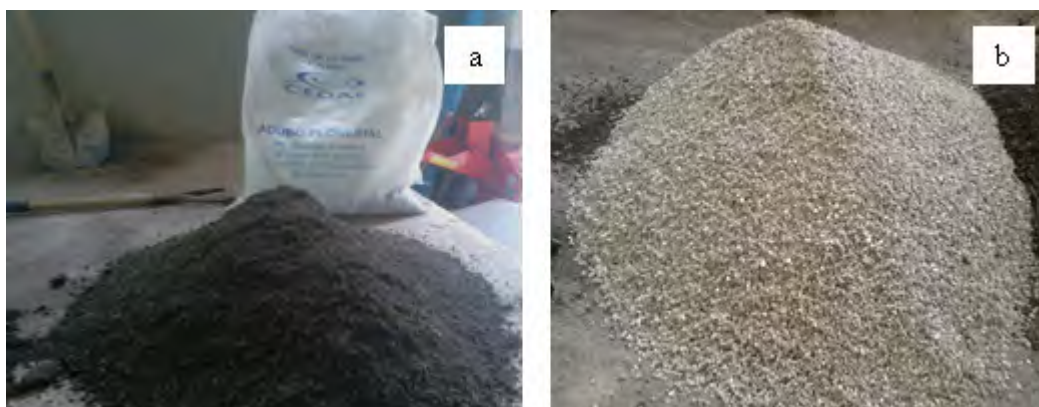


Figura 12. Aspecto do lodo de esgoto estabilizado (12a) e da vermiculita (12b) antes da mistura.



Figura 13. Homogeneização e peneiramento manual do composto contendo lodo de esgoto.

2.4.4.3 Espécies cultivadas

As espécies florestais utilizadas no experimento foram o eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e o pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), ambas adquiridas no Instituto Refloresta localizado na cidade de São Paulo-SP. Em relação ao eucalipto, foram utilizadas mudas do clone A211 (Suzano Papel e Celulose), híbrido das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Ambas as espécies foram adquiridas em 26 de fevereiro de 2015, e nas duas semanas subsequentes (março de 2015) as mesmas foram envasadas nos tubetes com capacidade volumétrica de 280 cm³.

2.4.4.4 Procedimento para avaliação do desempenho

Após a realização da calibração utilizando as massas-padrão foram inseridas as equações lineares (obtidas por regressão) no datalogger, por meio do recurso denominado “Canal Virtual”. Para avaliar o desempenho em todo o espectro de detecção da célula de carga (0 a 20 kg) foram realizadas duas metodologias: uma elevando a carga tendendo ao limite superior da célula de carga (20 kg), e outro reduzindo a carga tendendo ao limite inferior da célula (0 kg).

Na primeira metodologia adotada, utilizou-se as bandejas destinadas aos tratamentos que receberão lâminas diárias de irrigação correspondentes à 100% e 400% da evapotranspiração da cultura, tanto do pinus (bancadas: 1 e 3) quanto do eucalipto (bancadas: 4 e 6); e na segunda, foram empregadas somente as bandejas referentes aos tratamentos que receberão lâminas de irrigação correspondentes à 200% da evapotranspiração da cultura, para ambas as culturas (bancada 2 com mudas de eucalipto, e bancada 5 com mudas de pinus).

Foram adotados os mesmos procedimentos realizados no processo de calibração, no entanto, em vez de utilizar as massas-padrão foram utilizadas as massas dos conjuntos (tubete+substrato+muda) com 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 e 54 unidades. As massas dos conjuntos foram obtidas utilizando-se balança digital, marca MICHELETTI, modelo MIC P15, com capacidade para 15 kg e resolução de 0,005 kg.

No primeiro ensaio, visando alcançar o limite superior, foi adotado o seguinte procedimento: em uma balança digital foram obtidas as massas do conjunto contendo 24, 30, 36, 42, 48 e 54 tubetes. Esses conjuntos foram, gradualmente, transferidos para as bandejas no minilímetro. Após preencher cada uma das bandejas com os 54 tubetes foram acrescentadas massas-padrão, contendo 998 g, 2.488 g, 3.473 g e 4.458 g ao conjunto, totalizando dez relações “massa x tensão”, sendo seis com tubetes e quatro com massas externas, tanto no carregamento quanto no descarregamento.

O segundo ensaio seguiu os mesmos procedimentos do primeiro, sendo que foram obtidas as massas do conjunto contendo 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 e 54 tubetes, para cada uma das culturas (pinus e eucalipto), referente ao tratamento de 200%, totalizando, também, dez relações “massa x tensão”.

2.4.4.5 Análise do desempenho

Para avaliar se os valores estimados por meio da equação de regressão estavam correlacionados com os valores dos conjuntos (padrão) foram utilizados os seguintes indicadores: de precisão, por meio do coeficiente de correlação (r); de exatidão, por meio do índice de Willmott (d); e de confiança, por meio do índice de desempenho (c), proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997).

O coeficiente de correlação foi utilizado para determinar a precisão da equação de calibração, indicando a repetibilidade e a estabilidade da mensuração, haja vista que esse

indica o grau de dispersão dos dados obtidos (estimados pela equação) em relação à média, isto é, o erro aleatório.

$$r = \frac{n \sum V_P V_E - \sum V_P \sum V_E}{\sqrt{n \sum V_P^2 - \left(\sum V_P\right)^2} * \sqrt{n \sum V_E^2 - \left(\sum V_E\right)^2}} \quad (4)$$

Em que: V_P é o valor do conjunto (padrão); V_E é o valor estimado pela equação; e “n” é o número de valores observados.

Na determinação da exatidão foi utilizado o índice de Willmott, uma vez que o mesmo relaciona o afastamento dos valores estimados pela equação em relação aos valores padrão. Seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita. O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_E - V_P)^2}{\sum_{i=1}^n ((V_E - V_M) + (V_P - V_M))^2} \quad (5)$$

Em que: V_M é o valor médio dos conjuntos (padrão).

Foi utilizado o índice “c”, proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997) para enquadrar, por meio de um único valor, reunindo os índices de precisão “r” e de exatidão “d”, o desempenho do modelo. Os autores propõem que, de acordo com o valor de “c” obtido, o modelo seja classificado conforme a Tabela 1, sendo “c” expresso da seguinte forma:

$$c = r * d \quad (6)$$

Tabela 1. Critério de interpretação de desempenho pelo índice “c”, proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997).

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,41	Péssimo

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Calibração do minilísímetro

Após a realização das leituras em ambos os processos (carregamento e descarregamento) foram obtidos os valores médios (mV) apresentados na Tabela 2. O efeito de histerese observado foi considerado desprezível, semelhante ao constatado por outros autores que trabalharam com lisímetros de pesagem com célula de carga (CARVALHO et al., 2013; FARIA et al., 2005; GERVÁSIO e MELO JÚNIOR, 2014; OLIVEIRA, 2012 e SILVA et al., 1999).

Tabela 2. Valores de tensão (mV), obtidos pelas médias das leituras observadas nos processos de carregamento e de descarregamento, de acordo com a massa-padrão (g) depositada nas bandejas destinadas às mudas de pinus e de eucalipto, que serão submetidas as lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração da cultura.

Massa Padrão (g)	Leitura (mV)			Leitura (mV)		
	Pinus			Eucalipto		
	100%	200%	400%	100%	200%	400%
0	0,56	1,83	0,24	0,38	2,28	9,86
50	0,61	1,91	0,31	0,44	2,34	10,32
150	0,73	2,03	0,58	0,58	2,49	10,92
250	0,90	2,14	0,74	0,69	2,61	11,91
500	1,14	2,43	1,09	0,96	2,92	13,94
750	1,37	2,73	1,22	1,15	3,17	15,02
1.000	1,61	3,06	1,54	1,49	3,66	18,05
1.250	2,05	3,29	1,88	1,86	3,85	20,11
1.500	2,40	3,57	2,18	2,11	4,04	22,15
2.000	2,98	4,58	2,54	2,71	4,93	26,18
3.000	4,15	5,74	3,46	3,85	5,72	28,72
4.000	5,30	6,38	4,28	4,88	6,94	31,15
5.000	6,47	7,77	5,14	5,96	8,54	33,54
7.500	9,36	10,65	7,46	8,94	11,05	48,82
10.000	12,15	13,22	10,29	11,24	13,94	64,05
12.000	14,52	15,72	13,12	14,19	16,35	76,23
14.000	16,77	18,12	14,86	16,05	18,61	88,35
16.000	18,96	20,46	18,54	18,78	19,92	100,61
18.000	21,48	22,93	19,45	21,17	22,31	114,25

Além da própria variação de sensibilidade existente entre as células de carga, a variação dos comprimentos dos fios de transmissão de dados, também exerceu influencia nos valores de leituras observadas entre os minilísímetros (pinus: 100%, 200%, 400%; e eucalipto: 100%, 200%, 400%). Pelo fato de estarem posicionadas em locais distintos, dentro da casa de vegetação, os comprimentos dos fios de alimentação e transmissão de dados eram diferentes, ressaltando ainda mais as diferenças de tensões lidas pelo datalogger devido às resistências. A necessidade de uso de fios com bitolas maiores na alimentação e transmissão dos dados referentes ao tratamento Eucalipto 400%, que estava mais distante, ocasionou maiores valores de tensão como resposta, salientando o efeito da resistência elétrica nos sinais.

Na Figura 14, encontram-se as equações de calibração obtidas por regressão linear, utilizando os valores médios de carregamento e descarregamento, que relacionam a variação de massa e a leitura da tensão da célula de carga do minilímetro.

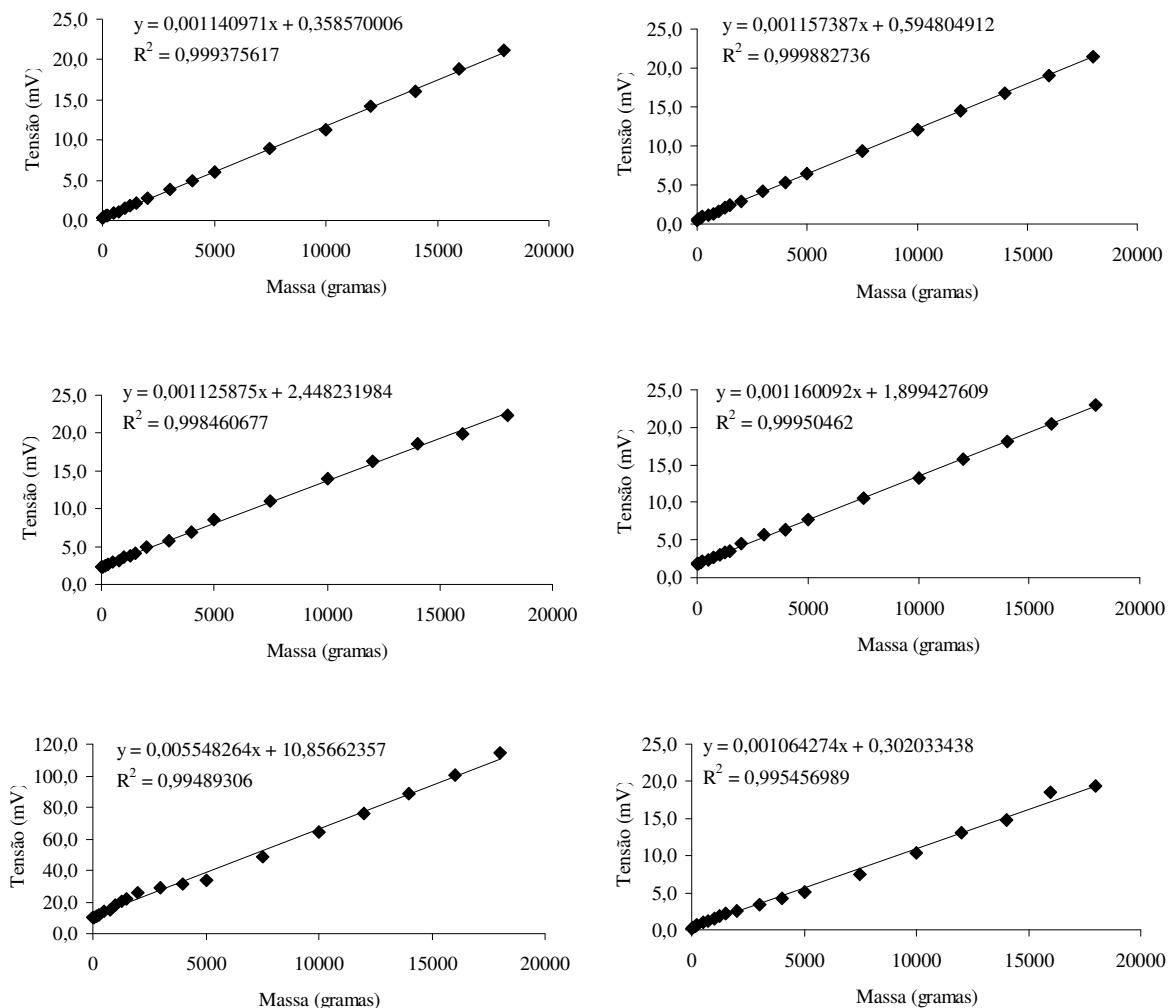


Figura 14. Relação entre a variação da massa (g) e as tensões (mV), com as respectivas curvas de calibração dos minilímetros destinados ao eucalipto, submetidos a lâminas correspondentes a 100% (a), 200% (c) e 400% (e) da evapotranspiração; e destinados ao pinus submetidos a lâminas correspondentes a 100% (b), 200% (d), e 400% (f) da evapotranspiração.

O modelo linear mostrou-se adequado para expressar a relação massa x tensão, em todos os tratamentos, tendo em vista os valores do coeficiente de determinação, acima de 99,4%. Todos os coeficientes da equação de regressão apresentaram significância estatística quando submetidos ao teste t de Student ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 3).

A linearidade era um comportamento esperado e também foi observada por outros autores (CAMARGO, 2012; CARVALHO et al., 2007; CRUZ, 2005; GERVÁSIO e MELO JÚNIOR, 2014; GOMIDE et al., 1996; OLIVEIRA, 2012), pois está relacionada às respostas que esses transdutores de força apresentam.

Tabela 3. Resultado das análises dos coeficientes da equação de regressão e dos valores de erro padrão de estimativa, entre parênteses, obtidos para os minilísímetros destinados ao cultivo de pinus e de eucalipto submetidos a lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Coeficientes	Pinus			Eucalipto		
	100%	200%	400%	100%	200%	400%
Constante	0,5948* (0,0235)	1,8994* (0,0484)	0,3020* (0,1348)	0,3586* (0,0535)	2,4482* (0,0829)	10,8566* (0,7455)
x ₁	0,0011574* (3,04x10 ⁻⁶)	0,0011600* (6,26x10 ⁻⁶)	0,0010642* (1,74x10 ⁻⁵)	0,0011409* (6,92x10 ⁻⁶)	0,0011258* (1,07x10 ⁻⁵)	0,0055482* (9,6x10 ⁻⁵)
N	19	19	19	19	19	19

* Significância a p<0,01; x₁ – coeficiente angular; N – número de dados.

Na Tabela 4 são apresentadas as equações de calibração, os coeficientes de determinação, os erros padrões de estimativa e os desvios padrões, observados nos minilísímetros destinados ao cultivo de mudas de pinus e de eucalipto que, posteriormente, receberão lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Tabela 4. Equações das curvas de calibração para cada um dos tratamentos, e seus respectivos coeficientes de determinação (r²), erros padrões de estimativa (EPE) e Desvios padrões (Sy) dos modelos.

Tratamento	Equação de Calibração	r ²	EPE	Sy
Pinus 100%	y = 0,001157387x + 0,594804912	0,999882736	0,078821	6,908533
Pinus 200%	y = 0,001160092x + 1,899427609	0,99950462	0,158622	6,925894
Pinus 400%	y = 0,001064274x + 0,302033438	0,995456989	0,441578	6,366838
Eucalipto 100%	y = 0,001140971x + 0,358570006	0,999375617	0,175158	6,812272
Eucalipto 200%	y = 0,001125875x + 2,448231984	0,998460677	0,271508	6,725218
Eucalipto 400%	y = 0,005548264x + 10,85662357	0,99489306	2,441421	33,20095

Em relação aos valores do erro padrão de estimativa (EPE), apresentados na Tabela 4, verificou-se que o maior valor, referente ao minilísímetro denominado Eucalipto 400%, foi de 2,44 g; este valor está abaixo do limite mínimo detectável pela célula de carga, que possui sensibilidade de 4 gramas. Considerando a área superficial da bandeja (0,2204 m²) os 2,44 g observados no erro-padrão de estimativa correspondem a uma lâmina de, aproximadamente, 0,011mm (ou 0,015 mm, considerando o somatório das áreas dos tubetes), valores abaixo daqueles observados por outros autores na calibração de lisímetros “convencionais”, como CARVALHO et al. (2012) (0,2 mm); CARVALHO et al. (2007) (0,278 mm), CARVALHO et al. (2013) (0,66 mm), que se deve a capacidade e fundo de escala das células de carga utilizados em cada estudo.

2.5.2 Desempenho do minilísímetro na condição de campo

Nas Tabelas 5 e 6, são apresentados os resultados dos ensaios cujos valores tenderam ao limite máximo (simulando condições de saturação) e mínimo (simulando condições de secagem), respectivamente, da célula de carga.

Tabela 5. Relação entre a leitura obtida, em mV, e a massa aplicada nas bandejas, em g, nos tratamentos referentes às culturas de pinus e de eucalipto, destinados a aplicação de lâminas de irrigação correspondentes a 100% e 400% da evapotranspiração.

Condição	Pinus 100%		Pinus 400%		Eucalipto 100%		Eucalipto 400%	
	Massa (g)	Leitura (mV)	Massa (g)	Leitura (mV)	Massa (g)	Leitura (mV)	Massa (g)	Leitura (mV)
24 tubetes	5.935	7,30	6.695	6,5	5.950	7,14	6.265	41,26
30 tubetes	7.155	8,72	8.060	8,07	7.160	8,55	7.615	49,50
36 tubetes	8.265	10,01	9.295	9,49	8.280	9,85	8.810	56,77
42 tubetes	9.385	11,31	10.740	11,17	9.440	11,21	10.175	65,13
48 tubetes	10.500	12,61	11.980	12,59	10.560	12,50	11.450	72,92
54 tubetes	11.625	13,92	13.330	14,15	11.735	13,90	12.665	80,30
54 tub ¹ + 998 g	12.623	15,03	14.328	15,28	12.733	15,01	13.663	86,28
54 tub ¹ + 2.488 g	14.113	16,74	15.818	16,98	14.223	16,74	15.153	95,40
54 tub ¹ + 3.473 g	15.098	17,89	16.803	18,11	15.208	17,89	16.138	101,41
54 tub ¹ + 4.458 g	16.083	19,06	17.788	19,24	16.193	19,04	17.123	107,43

¹tub = tubetes

Tabela 6. Relação entre a leitura obtida, em mV, e a massa aplicada nas bandejas, em gramas, nos tratamentos referentes às culturas de pinus e de eucalipto, destinados a aplicação de lâmina de irrigação correspondente a 200% da evapotranspiração.

Condição	Pinus 200%		Eucalipto 200%	
	Massa (g)	Leitura (mV)	Massa (g)	Leitura (mV)
Sem Tubete	0	1,86	0	2,32
6 tubetes	1.635	3,76	1.085	3,56
12 tubetes	3.365	5,77	3.970	6,90
18 tubetes	5.180	7,87	6.580	9,91
24 tubetes	7.110	10,11	9.120	12,85
30 tubetes	9.101	12,43	11.285	15,48
36 tubetes	11.250	14,92	12.270	16,58
42 tubetes	12.860	16,69	13.260	17,73
48 tubetes	13.845	17,78	14.258	18,92
54 tubetes	14.843	18,97	15.753	20,67

Por meio das curvas de calibração (Tabela 4), foram obtidos os valores estimados, com base nas leituras de tensão. As massas calculadas pelo modelo e os valores das massas padrão determinadas com auxílio de uma balança digital, tanto para os tratamentos com a cultura de pinus quanto de eucalipto, são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Com base nos resultados, observou-se que os erros relativos (%) entre a massa real e a massa calculada (modelo) foram de 1,35%, 0,79% e 4,36%, para os valores dos tratamentos Pinus 100%, Pinus 200% e Pinus 400%, respectivamente; e de 0,73%, 2,67% e 3,85%, para os valores dos tratamentos Eucalipto 100%, Eucalipto 200% e Eucalipto 400%, respectivamente.

Tabela 7. Valores das massas (g), obtidas pela equação de calibração e pela pesagem direta (real) e os erros relativos (E.R., em %), no cultivo de pinus, destinados a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Pinus 100%			Pinus 200%			Pinus 400%		
Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)	Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)	Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)
5.793	5.935	2,39	-34	0.000	-	5.824	6.695	13,01
7.020	7.155	1,89	1.604	1.635	1,90	7.299	8.060	9,44
8.135	8.265	1,57	3.336	3.365	0,86	8.633	9.295	7,12
9.258	9.385	1,35	5.147	5.180	0,64	10.212	10.740	4,92
10.381	10.500	1,13	7.078	7.110	0,45	11.546	11.980	3,62
11.513	11.625	0,96	9.077	9.101	0,26	13.012	13.330	2,39
12.472	12.623	1,20	11.224	11.250	0,23	14.073	14.328	1,78
13.950	14.113	1,15	12.749	12.860	0,86	15.671	15.818	0,93
14.943	15.098	1,03	13.689	13.845	1,13	16.733	16.803	0,42
15.954	16.083	0,80	14.715	14.843	0,86	17.794	17.788	0,03
Média do Erro Relativo		1,35	Média do Erro Relativo		0,79	Média do Erro Relativo		4,36

Tabela 8. Valores das massas (g), obtidas pela equação de calibração e pela pesagem direta (real) e os erros relativos (E.R., em %), no cultivo de eucalipto, destinados a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Eucalipto 100%			Eucalipto 200%			Eucalipto 400%		
Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)	Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)	Modelo (g)	Real (g)	E.R. (%)
5.944	5.950	0,10	-114	0.000	-	5.480	6.265	12,53
7.179	7.160	0,27	987	1.085	9,03	6.965	7.615	8,54
8.319	8.280	0,47	3.954	3.970	0,40	8.275	8.810	6,07
9.511	9.440	0,75	6.628	6.580	0,73	9.782	10.175	3,86
10.641	10.560	0,77	9.239	9.120	1,30	11.186	11.450	2,31
11.851	11.735	0,99	11.575	11.285	2,57	12.511	12.665	1,22
12.841	12.733	0,85	12.552	12.270	2,30	13.594	13.663	0,51
14.357	14.223	0,94	13.573	13.260	2,36	15.238	15.153	0,56
15.365	15.208	1,03	14.630	14.258	2,61	16.325	16.138	1,16
16.373	16.193	1,11	16.185	15.753	2,74	17.406	17.123	1,65
Média do Erro Relativo		0,73	Média do Erro Relativo		2,67	Média do Erro Relativo		3,84

Embora os tratamentos Pinus 400% e Eucalipto 400% tenham apresentado as maiores médias (4,36% e 3,84%, respectivamente) verificou-se que com as menores massas provocaram maiores erros relativos, e com o aumento das massas esses erros diminuíram. Quando as bandejas estavam mais leves ocorriam maiores oscilações durante as leituras, gerando muita instabilidade, de forma que os valores registrados destoaram daqueles que realmente expressariam as massas dos conjuntos. No entanto, conforme ocorreu o aumento da

massa nas bandejas, reduziram-se a instabilidade das leituras no momento dos registros, melhorando o resultado da relação, expressos por menores erros relativos.

Na Tabela 9 são apresentados os coeficientes de correlação (r), os índices de Willmott, os índices de desempenhos e os erros padrões de estimativa observados nos minilísimetros contendo bandejas cultivadas com mudas de pinus e de eucalipto, destinados a receberem lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Tabela 9. Indicadores estatísticos de coeficiente de correlação (r), índice de Willmott (d), Índice de desempenho (c) e o erro-padrão de estimativa (EPE, em g), para as relações estabelecidas entre os valores obtidos através do modelo de regressão linear e os valores tidos como padrão observados nos pinus e de eucalipto, destinados a receberem lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200% e 400% da evapotranspiração.

Tratamentos	Parâmetros			
	r	d	c	EPE
Pinus 100%	0,99999	0,999557	0,999546	16,4872
Pinus 200%	0,999979	0,999983	0,999962	36,26079
Pinus 400%	0,999997	0,99963	0,999627	11,31948
Eucalipto 100%	0,999997	0,999743	0,99974	8,638657
Eucalipto 200%	0,999987	0,999854	0,999841	31,90891
Eucalipto 400%	0,999999	0,999721	0,99972	6,206062

Com base nos coeficientes de correlação (r) pode-se inferir que todos os minilísimetros, representados pelos tratamentos de pinus e eucalipto, apresentaram uma correlação muito forte ($r > 0,9$), o que indicou que as equações de calibração, apresentadas na Tabela 4, possuem precisão que podem ser consideradas satisfatórias.

De acordo com os valores do índice de Willmott (d) ($d > 0,9$) verificou-se que existe boa concordância entre os valores tidos como padrão e os obtidos pela equação de regressão.

Verificou-se com base nos valores do índice de desempenho “c”, que os desempenhos dos minilísimetros podem ser classificados como ótimos, segundo os critérios de CAMARGO e SENTELHAS (1997), apresentados no Quadro 1.

O erro padrão de estimativa das regressões lineares foi de, aproximadamente, 16,5 g, 36,3 g e 11,3 g para os valores dos tratamentos Pinus 100%, Pinus 200% e Pinus 400%, respectivamente; e de, aproximadamente, 8,6 g, 31,9 g e 6,2 g para os tratamentos Eucalipto 100%, Eucalipto 200% e Eucalipto 400%, respectivamente. Baseando-se nestes valores verificou-se que as equações de regressão se ajustam bem aos dados amostrais. Ressaltando que as bandejas dos minilísimetros continham 54 tubetes, o que resultaria em erros menores que 1 grama por tubete.

Os maiores erros-padrão de estimativa ocorreram para os valores de Pinus 200% e Eucalipto 200%. As relações para estes tratamentos simularam uma condição de “seca” tendendo para valores mais baixos. Esta condição pode ter interferido na estabilidade do sinal no momento da leitura, principalmente quando eram utilizadas massas-padrão menores, contribuindo mais nas diferenças observadas. Embora fosse aguardado um maior tempo para a estabilização dos valores apresentados no datalogger, estes nunca se mantinham totalmente estáveis, sempre oscilando, aparentemente, em torno de um valor que foi aquele registrado. Este fenômeno ocorria tanto no processo de carregamento quanto no descarregamento, o que provavelmente ampliou a discrepância entre os valores.

2.5.3. Representação gráfica dos registros

Após os trabalhos de calibração e avaliação dos resultados observados por meio das equações de regressão, foram obtidas, graficamente, as variações registradas nos minilísímetros simulando as condições reais de operação. Para esta determinação foram inseridas, através do software de configuração do Fieldlogger, as equações de regressão obtidas na etapa de calibração, possibilitando ao recurso denominado “Canal Virtual” realizar as devidas operações matemáticas exigidas para se obter as relações. A Figura 15 apresenta a tela de configuração do Fieldlogger onde foram inseridas as operações matemáticas, na ordem em que foram executadas para o tratamento Pinus 100%

Canais Virtuais

Tag: Pinus 100 Canal 1: x2 Operador: + Canal 2: x3

Unidade: gramas Valor de Erro: 999999,000 Casas Decimais: 2 + Adicionar

Tag	Descrição
x1	= 0,001157
x2	= x1 x pinus 1
x3	= 0,594805
Pinus 100	= x2 + x3

Remove Remove Todos

Voltar Seguinte

Figura 15. Formulário de configuração do Fieldlogger, referente ao recurso “Canais Virtuais”, com as inserções das operações matemáticas utilizadas no tratamento Pinus 100%.

O software atribui um valor constante (0,001157) ao “tag” denominado x1; na sequência ele multiplica o valor lido no canal analógico denominado “pinus 1” (local onde a célula de carga está conectada) pelo “tag” x1, dando origem ao “tag” x2. Posteriormente, ele atribuiu outro valor constante (0,594805) ao “tag” x3 e, finalmente, realiza a soma dos “tags” x2 e x3. Este procedimento foi adotado em todos os minilísímetros utilizados (pinus e eucalipto: 100%, 200% e 400% da ET).

Os ensaios consistiram em aplicar pequenos volumes de água, de forma a evitar e/ou minimizar a sua drenagem. Os volumes aplicados, previamente definidos, eram monitorados através do software Fieldlogger, onde foram observados graficamente os valores registrados no equipamento.

Na Figura 16, é apresentado o formulário do Fieldlogger denominada “Gráfico de Registros” onde foram visualizadas as respostas de quatro minilísímetros: Eucalipto 1 (100%) Eucalipto 2 (200%), Pinus 1 (100%) e Pinus 2 (200%), entre os dias 08/04/2015 e 11/04/2015.



Figura 16: Formulário do software Fieldlogger, denominada “Gráfico de Registros”, com a representação das variações observadas nos lisímetros simulando a aplicação de lâminas de irrigação correspondente a 100% (Eucalpto1 e Pinus 1) e a 200% (Eucalpto 2 e Pinus 2) da evapotranspiração.

Embora o equipamento permitisse o monitoramento da variação de massa a cada segundo esta hipótese foi descartada, devido a considerável redução na capacidade de armazenamento dos dados no datalogger, somado ao fato de que, para intervalos de tempo maiores (diários), foco dos estudos à serem realizados com o minilísímetro, os registros demonstravam de forma clara os ganhos e perdas de água ocorridos durante o período.

A representação gráfica, demonstrando a variação de massa no minilísímetro, foi semelhante aos obtidos por CANALES et al. (2013) e por RUIZ-PEÑALVER et al. (2013) onde ficam evidenciados os processos de ganho de água, pela irrigação e/ou pela condensação, e os processos de perda de água, pela drenagem e pela evapotranspiração. O aumento repentino no peso registrado foi devido aos ganhos com irrigação; e a variação de peso após atingir o ápice e passados 30 minutos foi considerado como perdas por drenagem.

Embora o tempo de drenagem observado tenha variado conforme o volume de água aplicado e as condições atmosféricas no momento de aplicação da água, o tempo de 30 minutos foi considerado satisfatório, pois as observações realizadas indicaram que caso a drenagem ocorresse em tempo menor que este, o incremento nos valores calculados como “perdas por evapotranspiração” poderiam ser consideradas desprezíveis ao longo do dia; e caso contrário, se a drenagem se estendesse acima deste tempo, a redução nos valores calculados como “perdas com drenagem” seriam ínfimas.

2.6 CONCLUSÕES

Considerando a utilidade que os minilísímetros possuem no monitoramento do balanço hídrico que ocorre em pequenos recipientes cultivados, como vasos de plantas e/ou bandejas, e seus benefícios no controle da irrigação, feito tanto por pesquisadores quanto por produtores comerciais, e com base nos resultados observados no presente trabalho pode-se concluir que:

- a) O modelo de minilísímetro desenvolvido mostrou-se viável para a utilização em casas de vegetação tendo em vista que as dimensões reduzidas permitiram sua movimentação com facilidade.
- b) A calibração do minilísímetro gerou equações que se mostraram bem ajustadas aos dados amostrais.
- c) O desempenho dos minilísímetros se mostrou satisfatório para a determinação da evapotranspiração em escalas inferiores a diária; e as representações gráficas, geradas pelo software utilizado, serviram como ferramentas na determinação de valores ganhos pela irrigação e pela condensação, e de valores perdidos pela drenagem e pela evapotranspiração.

3. CAPÍTULO II

DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA E DO COEFICIENTE DA CULTURA DE MUDAS DE PINUS E EUCALIPTO CULTIVADAS EM AMBIENTE PROTEGIDO

3.1 RESUMO

Para o dimensionamento ou manejo de um sistema de irrigação se faz necessário conhecer a evapotranspiração da cultura de interesse. Esses valores podem ser obtidos por meio de modelos matemáticos que relacionam parâmetros climáticos e da cultura, sendo a evapotranspiração da cultura (ET_c) definida como o produto do coeficiente de cultura (K_c) pela evapotranspiração de referência (ET_o). O K_c é um parâmetro que varia de acordo com a cultura, o estágio de desenvolvimento e as condições climáticas locais, enquanto que a ET_o, expressa a demanda evaporativa da atmosfera ocorrida em uma cultura hipotética, e pode ser determinada por meio do modelo de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, sendo esse método recomendado como padrão pelo fato de prever corretamente a ET_o em uma ampla variedade de locais e clima. Considerando que a produção de mudas florestais em viveiros ocorre de forma contínua, ao longo do ano, exigindo o suprimento de água por meio da irrigação, se faz necessário conhecer a demanda hídrica dessas mudas, ou dos seus respectivos K_c, de forma a possibilitar o adequado dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação, principalmente na época de seca, quando o uso da água deve ser ainda mais criterioso. No entanto a limitação de informações sobre esses parâmetros no cultivo de mudas de eucalipto e de pinus, na fase de viveiro, incentivou a realização do presente trabalho, que teve como objetivos: determinar a evapotranspiração (ET_c) de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* –Engelm) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*); determinar a evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (ET_oPM), dentro e fora da casa de vegetação localizada no Horto Florestal do Jardim Botânico do Rio de Janeiro (JBRJ); e determinar o K_c, das mudas de pinus e de eucalipto, na fase de viveiro. Por meio de estações meteorológicas localizadas nas áreas externa e interna da casa de vegetação, foram obtidos os dados meteorológicos para o cálculo da ET_oPM. A evapotranspiração (ET_c) das mudas de pinus e de eucalipto foram obtidas diariamente com o uso de minilísimetros de pesagem eletrônica; e a determinação do K_c foi obtida pela relação entre a ET_c e a ET_oPM. A evapotranspiração de referência calculada para os ambientes interno e externo, apresentou médias de 1,91 e 2,67 mm d⁻¹, com máximas de 2,78 e 4,53 mm d⁻¹ e mínimas de 0,84 e 1,15 mm d⁻¹, respectivamente. A evapotranspiração das mudas de pinus e eucalipto, obtidas por meio dos minilísimetros apresentaram médias de 2,30 e 1,66 mm d⁻¹, com máximas de 4,12 e 3,53 mm d⁻¹ e mínimas de 0,74 e 0,16 mm d⁻¹, respectivamente. Os valores de K_c, calculados para as culturas do pinus e do eucalipto, no período de seca, obtiveram médias de 0,95 e 1,48, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Penman-Monteith. Manejo da irrigação. Mudas Florestais.

3.2 ABSTRACT

For the design or management of an irrigation system it is necessary to know the evapotranspiration of the crop of interest. These values can be obtained through mathematical models that relate climatic and crop parameters, and crop evapotranspiration (ETc) is defined as the product of the crop coefficient (Kc) by reference evapotranspiration (ETo). Kc is a parameter that varies according to the crop, stage of development and local climatic conditions, while ETo expresses the atmospheric evaporative demand occurring in a hypothetical crop, and can be determined using the Penman-Monteith model parameterized by the FAO, this method being recommended as a standard by correctly predicting ETo in a wide variety of locations and climate. Considering that the production of forest seedlings in nurseries occurs continuously, throughout the year, requiring the supply of water through irrigation, it is necessary to know the water demand of these seedlings, or their respective Kc, in order to adequate design and management of irrigation systems, especially in the dry season, when water use should be even more judicious. However, the limitation of information on these parameters in the cultivation of eucalyptus and pinus seedlings during the nursery phase encouraged the accomplishment of the present work, whose objectives were: to determine the evapotranspiration (ETc) of pine seedlings (*Pinus elliottii* var. *elliottii-Engelm*) and eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*); to determine the reference evapotranspiration by the Penman-Monteith method (EToPM), inside and outside the greenhouse located in the Botanical Garden of Rio de Janeiro (JBRJ); and to determine the Kc of the pine and eucalyptus seedlings in the nursery phase. By means of meteorological stations located in the external and internal areas of the greenhouse, meteorological data were obtained for the calculation of EToPM. The evapotranspiration (ETc) of the pine and eucalyptus seedlings were obtained daily with the use of electronic weighing mini-lysimeters; and the determination of Kc was obtained by the relationship between ETc and EToPM. The reference evapotranspiration calculated for indoor and outdoor environments presented averages of 1.91 and 2.67 mm d⁻¹, with maximums of 2.78 and 4.53 mm d⁻¹, and minimums of 0.84 and 1, 15 mm d⁻¹, respectively. The evapotranspiration of pine and eucalyptus seedlings obtained through the mini-lysimeters, presented averages of 2.30 and 1.66 mm d⁻¹, with maximums of 4.12 and 3.53 mm d⁻¹ and minimums of 0.74 and 0.16 mm d⁻¹, respectively. The values of Kc, calculated for pinus and eucalyptus crops during the dry season, obtained averages of 0.95 and 1.48, respectively

KEY WORDS: Crop Coefficient. Reference Evapotranspiration. Forest Seedlings.

3.3 INTRODUÇÃO

3.3.1 Métodos de estimativa da evapotranspiração

A crescente preocupação com o uso da água tem exigido de todos os segmentos da sociedade, medidas imediatas que visem sua conservação. A irrigação é a atividade de maior consumo deste recurso, de forma que muitos estudos têm sido desenvolvidos com intuito de tornar mais eficiente sua utilização na produção agrícola. Para o correto manejo da irrigação se faz necessário conhecer as perdas de água ocorridas, devido a evapotranspiração, em um determinado intervalo de tempo, que, por sua vez, dependem das características do solo, das plantas e do clima.

De acordo com STONE e SILVEIRA (1995) a demanda evaporativa da atmosfera é que determina a magnitude de perda de água por evapotranspiração e, conseqüentemente, a quantidade de água que a planta necessita absorver.

Segundo CUNHA et al. (2013) a evapotranspiração é um dos parâmetros de maior incerteza no gerenciamento de recursos hídricos e manejo da irrigação. Por meio do balanço hídrico pode-se determinar as perdas ocorridas por meio da Evapotranspiração (ET) aplicando a lei de conservação da massa:

$$ET = P + I \pm \Delta S - D - R \quad (7)$$

Em que: ET é a evapotranspiração; P são os ganhos com a chuva; I são os ganhos com irrigação; ΔS são as variações no armazenamento de água no solo; D são as perdas por drenagem; e R são os escoamentos superficiais.

De acordo com OLIVEIRA et al. (2001) a estimativa adequada da evapotranspiração da cultura (ETc), que totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período, é obtida por meio de coeficientes relacionados à planta, ao solo, às condições atmosféricas e da evapotranspiração de referência (ETo). Segundo CARVALHO et al. (2011), diferentes métodos foram desenvolvidos para estimar a evapotranspiração de referência (ETo), definida como a perda de água de uma cultura hipotética com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m⁻¹. Para os autores a existência destes diferentes métodos são devidos à três fatores: necessidade de adequar o método à determinada região, simplicidade de uso e limitação de elementos climáticos ou meteorológicos que alimentem os modelos. VILELA et al. (2015) relataram que os métodos indiretos, para determinar a Evapotranspiração de Referência (ETo), e que estimam por meio de dados e modelos agrometeorológicos, ou tanques de evaporação, são muito utilizados no manejo da irrigação.

3.3.2 Modelos matemáticos (Equações)

Um grande número de métodos empíricos e semi-empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência foi desenvolvido desde a década de quarenta. No entanto muitos desses métodos são de aplicação restrita sendo válidos somente para condições climáticas específicas. Outros métodos possuem base física mais sólida, sendo universais, integrando todos os elementos que condicionam o processo de ET, mas, mesmo possuindo resultados confiáveis, seu emprego dependerá da disponibilidade de uma série de dados meteorológicos do local de interesse (SENTELHAS, 2001).

BERNARDO et al. (2008) citam que existem várias equações baseadas em dados meteorológicos, para o cálculo da ET, sendo a maioria de difícil aplicação, não somente pela complexidade do cálculo, mas também pela exigência de um grande número de elementos climatológicos.

BURMAN (2007) cita que a escolha de uma equação para determinação da ET é difícil e envolve uma série de fatores, tais como: a experiência profissional, a aceitação do método e a disponibilidade ou histórico de dados climáticos. Conforme o autor é necessário classificar e identificar claramente os propósitos dos cálculos, visando a obtenção do método mais adequado possível (ex. Necessidade de obtenção de ETo ou ETp; resultados horários, diários, semanais, ou mensais).

De acordo com SHAHIDIAN et al. 2011, as equações desenvolvidas são normalmente classificadas conforme o principal parâmetro climático existente no modelo. Geralmente estas classificações incluem os modelos baseados em temperatura (Ex.: Thornthwaite, Blaney-Criddle; e Hargreaves e Samani); modelos baseados na radiação solar (Ex.: Priestley-Taylor e Makink); e os modelos combinados, aqueles baseados nos princípios de balanço de energia e transferência de massa (Ex.: Penman, Penman Modificado e Penman-Monteith FAO).

Outros autores como GOCIC e TRAJKOVIC (2010) sugerem outras classificações para as numerosas equações agrupando-as como: baseadas em temperatura; baseadas em radiação; baseadas na evaporação de tanques do tipo pan; baseadas na transferência de massa; e modelos combinados. As equações tem sido desenvolvidas para estimar a ETo, mas os seus desempenhos, em diferentes ambientes, têm variado. AL-DARIR e ALDOUBIAT (2005) citam a existência de métodos baseados na umidade relativa, como Albrecht e Haude.

3.3.3 Equações empíricas: Considerações

É vasta a literatura técnica de abordagem sobre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, citando-se ALLEN et al. (1998), CAMARGO e CAMARGO (2000), DOORENBOS e PRUITT (1977), JENSEN et al. (1990), PEREIRA et al. (1999), SEDIYAMA (1996), SOUSA et al. (2010) e VEGA e JARA (2009) dentre outros.

Vários estudos foram realizados, para diferentes locais, com diferentes climas, e para diferentes culturas, sendo que os resultados sobre o uso dos métodos para determinação da ET, segundo ALLEN et al. (1998), podem ser resumidos da seguinte forma:

- o método de Penman pode exigir calibração local da função vento para alcançar resultados satisfatórios;
- os métodos de radiação mostraram bons resultados em climas úmidos onde o termo aerodinâmico é relativamente pequeno, mas o desempenho em condições áridas é falho e tende a subestimar a evapotranspiração;
- os métodos de temperatura requerem calibração local para obter resultados satisfatório, com possível exceção do método de Hargreaves no qual mostrou resultados razoáveis de ETo, com validade em nível global;
- os métodos de evapotranspiração Pan refletem claramente as deficiências da previsão de evapotranspiração da cultura pela evaporação livre da água. Os métodos são susceptíveis as condições microclimáticas em que os tanques estão operando e o rigor na manutenção da estação. Seu desempenho foi comprovadamente irregular; e
- o desempenho com relativa precisão e a consistência da abordagem de Penman-Monteith em ambos os climas, áridos e úmidos, foi observado em estudos tanto na América quanto na Europa.

O método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, divulgado no Boletim de Irrigação e Drenagem de número 56, baseado em seu desempenho, foi considerado como método padrão para determinação da evapotranspiração de referência, pelo fato do método

prever corretamente a ETo em uma ampla variedade de locais e de climas. CARVALHO et al. (2011) relatam que, quando há disponibilidade de dados para o método PM-FAO, este deve ser recomendado como padrão, tendo em vista a comprovada precisão, independentemente da escala temporal e espacial.

3.3.4 Evapotranspiração em ambientes protegidos

De acordo com CUNHA (2011), a demanda evaporativa do ar no interior de ambiente protegido (casas de vegetação) é menor do que as observadas na condição externa, devido principalmente à atenuação da radiação solar e diminuição da velocidade do vento. Segundo o autor esta menor demanda varia de acordo com as condições meteorológicas predominantemente de cada dia, local e/ou região. Estudos relatam que as condições internas podem ser de 60 a 80% menores do que em relação à condição externa.

Diversos autores (CUNHA, 2011; FARIAS et al., 1994; FERNANDES et al., 2003; FOLEGATTI et al., 1997; SHAHIDIAN et al., 2011) citam que a menor evapotranspiração no interior da estufa é devido, principalmente, à parcial opacidade do filme plástico à radiação solar e à redução da ação dos ventos, que são os principais fatores da demanda evaporativa da atmosfera, embora a temperatura do ar e a umidade relativa, em alguns momentos, possam ser, respectivamente, maior e menor no interior da estufa do que a céu aberto, o que contribuiria para maior evapotranspiração.

Em experimento conduzido na condição de primavera-verão, FARIAS et al. (1994) compararam os resultados obtidos entre os dois ambientes, verificando que a ETo no interior correspondeu a 71 % da verificada no exterior da estufa plástica. BRAGA e KLAR (2000) observaram que, os valores da ETo no ambiente interno, foram 85% dos valores observados no ambiente externo, em casas de vegetação orientadas no sentido Leste-Oeste.

FOLEGATTI et al. (1997) verificaram que a radiação global é o elemento meteorológico mais importante na estimativa da evapotranspiração em ambientes protegidos (estufas). MPUSIA (2006), comparando o consumo de água no cultivo de rosas, em ambiente protegido e no ambiente externo, concluiu que a radiação solar e o déficit de pressão de vapor são os fatores que mais influenciaram na evapotranspiração.

De acordo com FERNANDES et al. (2003) as coberturas plásticas utilizada em casas de vegetação alteram significativamente o saldo de radiação, em relação ao ambiente externo, devido a atenuação (absorção e reflexão) da radiação solar incidente, resultando na redução do saldo de radiação interna e conseqüentemente na evapotranspiração. Segundo BURIOL et al. (1993) o polietileno de baixa densidade (PEBD), utilizado na cobertura, é um material que apresenta boa transparência à radiação solar, deixando passar em média 70 a 80% e máximo de 95% da radiação solar.

EVANGELISTA e PEREIRA (2001) também verificaram menores valores de radiação solar no interior de casas de vegetação, sendo, em média 80% da observada externamente. CAMACHO et al. (1995) observaram que densidade de fluxo da radiação solar global no interior de uma estufa foi sempre inferior ao observado externamente, variando de 65% (céu claro) a 89% (céu nublado), com média de 78%. VÁSQUEZ et al. (2005) observaram que a radiação solar global externa foi 26,8% superior à radiação interna em experimento conduzido na condição de verão; segundo os autores a quantidade de energia solar não transmitida é função do tipo de cobertura plástica e do ângulo de incidência dos raios solares, que são condicionados pela orientação da cobertura e posição do sol. PALOMINO MONTES (2008) verificou que os valores de radiação incidentes sobre as plantas dentro de ambiente protegido foi 20,9% menor que aqueles observados no ambiente externo, em condição de verão. De acordo com SHAHIDIAN et al. (2011), avaliando diferentes métodos de estimativa da ETo em estufas plásticas, observaram que no interior há uma diminuição da radiação em 44%.

Embora estudos tenham demonstrado que o vento é uma fonte importante da variabilidade no valor da ETo em ambientes externos, SHAHIDIAN et al. (2011) ressaltam que em ambientes protegidos (estufas) a velocidade do vento é desprezível, sugerindo que equações que não contabilizam o vento, como a de Hargreaves, possam produzir resultados mais satisfatórios. O estudo de HOSSOKAWA (2007) corrobora esta afirmação; segundo o autor na estimativa da ETp pelo método de Penman-Monteith a contribuição do termo aerodinâmico foi praticamente desprezível no interior da casa de vegetação, refletindo as condições do vento.

Para BOULARD (2011) a análise da evapotranspiração em ambientes protegidos está associada ao balanço de energia em todo o sistema e depende fortemente das características da casa de vegetação (material de revestimento) e do uso de equipamentos para o controle do clima (ventiladores, aquecedores, sistema de nebulização, tela de sombreamento, etc.).

A cobertura da casa de vegetação altera parâmetros como temperatura do ar e do solo, umidade do ar, vento, balanço de radiação e energia e, por consequência a evapotranspiração (GALVANI et al., 1998). Segundo FARIAS et al. (1994) a cobertura plástica apresenta uma parcial transmissividade à radiação solar global e aumenta a fração da radiação solar difusa no interior da estufa. CAMACHO et al. (1995) verificaram que no interior da estufa plástica a densidade de fluxo de radiação solar global era menor, mas a fração difusa era maior; que a transmissividade do polietileno de baixa densidade à radiação solar global na primavera é maior que no outono e, durante o dia, a maior transmissividade ocorre nas horas próximas ao meio-dia; e que o maior efeito da estufa na temperatura do ar é sobre os valores máximos.

A cobertura plástica de estufas de polietileno transparente de baixa densidade (PEBD) altera, de acordo com FARIAS et al. (1994), acentuadamente os valores da temperatura máxima do ar. A estufa plástica aumenta a amplitude diária da umidade relativa do ar, não alterando os valores médios. O efeito da cobertura plástica sobre a temperatura e umidade relativa do ar está intimamente relacionado com as condições atmosféricas do ambiente externo.

Estudando o efeito das estufas de polietileno de baixa densidade sobre as temperaturas mínimas, BURIOL et al. (1993) concluíram que: nos dias mais frios o “efeito estufa” faz com que a temperatura mínima seja maior; conforme as condições meteorológicas da atmosfera, a temperatura mínima do ar no interior da estufa pode ser menor que do ambiente externo; e que o manejo da ventilação da estufa influi na temperatura mínima.

Estudando a influência dos elementos meteorológicos na estimativa da evapotranspiração potencial em casa de vegetação, HOSSOKAWA (2007) verificou que as temperaturas máxima, mínima e média do ar, em média, apresentaram valores superiores aos do ambiente externo, enquanto que a umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e horas de brilho solar foram inferiores. Os valores de evapotranspiração potencial da cultura estimados no interior da casa de vegetação foram inferiores aos estimados no ambiente externo.

De acordo com BURIOL et al. (1993), o valor médio de temperatura mínima do ar no interior de estufas cobertas com PEBD tende a ser igual ou ligeiramente superior, quando comparado com o ambiente externo, sendo afetadas pelo manejo da ventilação das estufas durante o dia.

VÁSQUEZ et al. (2005) ressaltam que, em alguns momentos, a temperatura e a umidade relativa do ar observadas no ambiente interno podem ser mais altas do que aquelas observadas no ambiente externo, conforme as condições meteorológicas. Nos estudos desenvolvidos, os autores observaram que: a temperatura no ambiente interno foi 4% superior a externa e a umidade relativa interna foi menor que a externa, exceto no período de 30 a 60 dias após o transplante, em função da maior evapotranspiração da cultura. SHAHIDIAN et al. (2011), avaliando diferentes métodos de estimativa da ETo em estufas plásticas,

observaram que no interior da estufa há um aumento da temperatura máxima em 2,4°C e da temperatura mínima em 3,7°C.

3.3.4.1 Estimativa da evapotranspiração em ambientes protegidos

Estudos realizados por ZHANG e LEMEURE (1992) verificaram que as estimativas de evapotranspiração usando a equação de Penman-Monteith foram altamente correlacionadas com os fluxos de calor latente medidos. A equação se mostrou sensível aos erros da resistência aerodinâmica e devido a este fato, a equação de Penman-Monteith superestima, ligeiramente, a evapotranspiração real. Em ambientes protegidos o modelo de Penman-Monteith tem sido utilizado com sucesso por muitos pesquisadores para fornecer estimativas exatas da transpiração e evapotranspiração de várias culturas (LYRA, 2002; ZHANG e LEMEURE, 1992).

ILAHY (2009) comparou 10 modelos de estimativas de evapotranspiração (Penman-Monteith FAO, Penman-FAO, Stanghellini, Finn, Penman-Monteith para ambiente protegido, Balanço de Energia, Radiação Solar FAO, Priestley-Taylor, Hargreaves e Penman-Monteith modificado) em casas de vegetação com diferentes níveis de tecnologia. Em casas de vegetação de baixa tecnologia (estruturas de baixo custo, cobertura com filme plástico, ventilação natural e sem controle do clima), os modelos de Penman-FAO e de Hargreaves foram os mais indicados para modelos de casa de vegetação com laterais em plástico e telada, respectivamente. O modelo de Stanghellini foi o mais preciso para estimar a evapotranspiração em casas de vegetação de média (estruturas construtivas melhores que os modelos de baixa e alguns equipamentos de controle do ambiente, como abertura de telhados) e de alta tecnologia (controle total do clima). Este modelo (Stanghellini) também apresentou resultados notadamente melhores em comparação com o método de Penman-Monteith, em trabalho conduzido por MPUSIA (2006), no cultivo de rosas jovens em ambientes protegidos.

FERNANDES et al. (2006) analisando o desempenho de dez modelos de estimativa (Tanque evaporimétrico, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Penman, Penman-Piche e Penman-Monteith) em comparação com o lisímetro de pesagem eletrônica, verificaram que os métodos que apresentaram os melhores índices de correlação foram Jensen-Haise (72,5%), Penman (72,1%), Radiação Solar (71,5%), Makkink (71,5%), Penman-Monteith (71,2%).

Avaliando seis modelos de estimativa (Tanque Classe A, Atmômetro de Piche Fixo, Atmômetro de Piche Móvel, Evaporímetro de Anderson, Penman-Monteith, Radiação Solar-FAO) em comparação com o lisímetro, CASANOVA et al. (2009) verificaram que o modelo mais recomendado foi o evaporímetro de Anderson.

De acordo com MOAZED et al (2014), que compararam 13 modelos de estimativa de evapotranspiração de referência (Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Blaney-Cridde, Radiação Solar-FAO, Priestley-Taylor, Makkink, Turc, Linacre, Jensen-Haise, Copais, Tanque Evaporação PAN, Radiação Global e Saldo de Radiação) com as médias obtidas com lisímetro, para as condições de ambiente protegido, os autores concluíram que o modelo de Penman-Monteith foi o mais indicado para valores diários, assim como os métodos de Priestley-Taylor e Radiação Solar-FAO.

3.3.5 Coeficiente de cultura

O Coeficiente de Cultura (K_c) é um parâmetro que auxilia no projeto e no manejo da irrigação, o qual relaciona a evapotranspiração da cultura (E_{Tc}) com a evapotranspiração de referência. Os valores de K_c variam de acordo com a cultura e variedade, o estágio de desenvolvimento (fase fenológica) e as condições climáticas, sendo suas determinações

baseadas em pesquisas desenvolvidas em diferentes regiões do mundo. Alguns valores de K_c são apresentados em tabelas como as de DOORENBOS E PRUITT (1977) e ALLEN et al. (1998).

Segundo PEREIRA et al. (1997) o K_c representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a evapotranspiração de qualquer cultura da de referência: a) a altura da cultura (h) que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; b) a resistência da superfície relativa ao sistema solo-planta, que é afetada pela área foliar (determinando o número de estômatos), pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas, e pelo teor de umidade à superfície do solo e, c) o albedo da superfície solo-planta, que é influenciado pela fração de cobertura do solo pela vegetação e pelo teor de umidade à superfície do solo, e influencia o saldo de radiação disponível à superfície, R_n , que é a principal fonte de energia para as trocas de calor e de massa no processo de evaporação.

De acordo com POSSE (2008) a padronização dos valores de K_c é difícil, pois variam de acordo com o método de estimativa da E_{To} empregado (Penman-Monteith, Penman, Radiação Solar, Tanque Classe “A”, Hargreaves, Linacre, Thornthwaite, dentre outros.); de acordo com as variedades ou cultivares, em função do tempo (alguns trabalhos apresentam valores de K_c obtidos em períodos médios de 5 dias, 10 dias, 15 dias ou mensal; outros em dias após o plantio ou dias após a sementeira) ou mesmo quando os ciclos fenológicos ou estádios de desenvolvimento para uma mesma cultura são apresentados de maneira diferenciada (alguns autores apresentam os valores de K_c em função dos ciclos fenológicos ou em estádios de desenvolvimento).

Os valores de K_c também são influenciados pelo método de irrigação empregado, uma vez que esse método afeta a porcentagem da área de solo umedecida e, conseqüentemente, a evaporação da água no solo (PEREIRA et al., 2010).

3.3.6 Objetivos

Considerando a importância do gerenciamento da irrigação, na economia de água, e do conhecimento de alguns parâmetros utilizados no dimensionamento e manejo dos sistemas, o presente trabalho teve por objetivo:

- a) determinar a evapotranspiração de referência (E_{To}), observada nos ambientes externo e interno da casa de vegetação, por meio da equação de Penman-Monteith, parametrizada pela FAO;
- b) determinar a evapotranspiração de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), na fase de viveiro, com o uso de um minilímetro de pesagem eletrônica;
- c) determinar a evapotranspiração de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), na fase de viveiro, com o uso de um minilímetro de pesagem eletrônica; e
- d) determinar os coeficientes de cultura, das mudas de pinus e de eucalipto, na fase de viveiro.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado em casa de vegetação instalada no Horto Florestal do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (Latitude 22° 58' 05" Sul, Longitude 43° 14' 20" Oeste, altitude de 92 metros) situado no Bairro do Jardim Botânico, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil.

O clima local é do tipo Aw segundo a classificação de Köppen, caracterizado por estação chuvosa com índices pluviométricos elevados no verão e uma estação seca no inverno, com precipitação média anual em torno de 2.000 mm, temperatura média anual de 23,8°C, com máxima de 30,3°C registrada em fevereiro e mínima de 16°C em julho. (INMET, 2014).

3.4.2 Dados meteorológicos

3.4.2.1 Ambiente interno

Para o cálculo da evapotranspiração no ambiente interno da casa de vegetação, foram obtidos os valores de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação fotossinteticamente ativa, com auxílio de uma estação meteorológica marca WatchDog 2000 series, modelo 2550, instalado no centro geométrico da estufa (Figura 17).



Figura 17. Estação meteorológica marca WatchDog 2000 instalada no ambiente interno.

A estação possuía os seguintes sensores: de temperatura do ar, com faixa de leitura de -32 a 100°C e acurácia de $\pm 0,6^\circ\text{C}$; de umidade, com faixa de leitura de 10 a 100% e acurácia de $\pm 3\%$; de velocidade do vento, com faixa de leitura de 0,1 a 322 km.h^{-1} e acurácia de $\pm 3 \text{ km.h}^{-1}$; de direção do vento, com leitura de 1° e acurácia de $\pm 3^\circ$. Na estação ainda foram conectados dois sensores de radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) com faixa de leitura de 0 a 2500 $\mu\text{Mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e acurácia de $\pm 5\%$, uma referente ao ambiente interno e outro

referente ao ambiente externo posicionado entre a casa de vegetação e a estação meteorológica externa.

As leituras foram registradas, a cada 5 min, 24 h d⁻¹ e coletadas ao final de cada semana. Utilizou-se o software específico do equipamento, SPECWARE PRO, para a obtenção dos dados diários de: temperatura máxima (TMax), temperatura mínima (TMin), umidade relativa máxima (URMax), umidade relativa mínima (URMin), número de horas de brilho solar (N), velocidade média do ar (Vmed), medida a 2 m do solo, e de radiação fotossinteticamente ativa (PAR).

3.4.2.2 Ambiente externo

Para o cálculo da evapotranspiração no ambiente externo foram obtidos os valores das variáveis meteorológicas por meio de uma estação meteorológica, instalada a uma distancia de 12 m da casa de vegetação (Figura 18a).

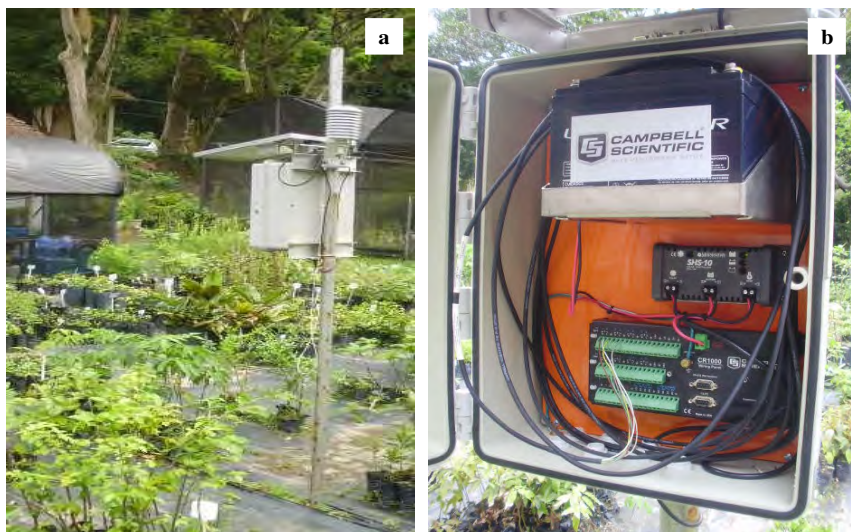


Figura 18. Estação meteorológica instalado no ambiente externo (a) e datalogger Campbell Scientific, modelo CR1000 (b).

Os valores obtidos na estação foram registrados em um sistema automático de aquisição de dados (“datalogger”) marca Campbell Scientific, modelo CR1000 (Figura 18b), sendo a ele conectado um sensor de temperatura e umidade do ar, modelo HC2S3 da Campbell Scientific, com faixa de operação, para temperatura, de -40 a 60°C e acurácia de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (a 23°C); e faixa de operação, para a umidade relativa do ar, de 0 a 100% e acurácia de $\pm 0,8\%$ (a 23°C).

No ambiente externo ainda foi instalado um sensor de radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR), a uma distância de 6 m da casa de vegetação. O sensor com faixa de leitura de 0 a 2500 $\mu\text{Mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e acurácia de $\pm 5\%$ foi ligado à estação meteorológica interna à casa de vegetação.

As leituras foram registradas, a cada 5 minutos, 24 horas por dia e coletadas ao final de cada semana. De forma semelhante ao que foi realizado no ambiente interno, a partir dos valores registrados foram obtidos, com auxílio do software PC200W, da Campbell Scientific, os valores diários de: temperatura máxima (TMax); temperatura mínima (TMin); umidade relativa máxima (URMax); umidade relativa mínima (URMin).

Os valores diários relativos à radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e o número de horas de brilho solar (n), observados no ambiente externo, foram obtidos com auxílio do

software SPECWARE PRO. Os valores da velocidade média do vento (Vmed) verificados no ambiente externo foram obtidos com auxílio da estação meteorológica pertencente à Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro, localizada a, aproximadamente, 800 metros da casa de vegetação.

3.4.3 Estimativa da evapotranspiração de referência

Tendo em vista o desempenho satisfatório na determinação da ETo em ambientes protegidos, observado por diversos autores, o método de Penman-Monteith-FAO foi utilizado para calcular os valores da ETo por meio da Equação 8:

$$ET_{o_{PM}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{Tm + 273} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (8)$$

Em que: $ET_{o_{PM}}$ é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão do vapor na temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); 0,408 é o fator de conversão para o termo $(Rn - G)$ de $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para mm. d^{-1} , Rn é a radiação líquida na superfície da planta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), considerado igual a zero, para valores diários; γ é a constante psicrométrica igual a $0,0725 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$; U_2 é a velocidade do vento à 2 m de altura (m s^{-1}); es é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa); ea é a pressão atual do vapor (kPa), e Tm é a temperatura média do ar a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$).

A pressão de saturação (e_s), em kPa , o valor da declividade da curva de pressão do vapor (Δ), em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ e a pressão atual do vapor (e_a), em kPa , foram obtidas por meio das Equações 9, 10 e 11, respectivamente:

$$e_s = 6,1078.10^{\frac{7,5t}{(237,3 + t)}} \quad (9)$$

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(t + 237,3)^2} \quad (10)$$

$$e_a = \frac{(e_s \cdot UR)}{100} \quad (11)$$

Em que: t é a temperatura média do ar, em $^\circ\text{C}$, e UR é a umidade relativa média, em %.

O saldo de radiação (Rn) foi obtido a partir dos valores de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR). Para a conversão dos valores obtidos de PAR (em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) considerou-se o fator proposto por McCree (1972), citado por STEIDLE NETO et al. (2008), de $4,57 \text{ mol MJ}^{-1}$, para condições de incidência de radiação solar direta e difusa. Conforme recomendado pelos autores foi considerado um valor de 45% para a relação PAR/Rs. Considerou-se o valor proposto por ALLEN et al. (1998) de 0,23 para o albedo (α). Para o cálculo do saldo de radiação (Rn) foram utilizadas as equações 12 a 16, conforme descrito por ALLEN et al. (1998):

$$R_s = (0,25 + 0,50 \cdot \frac{n}{N}) \cdot R_a \quad (12)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (13)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (14)$$

$$R_{nl} = \left[\frac{\sigma(T_{\max}^4 + T_{\min}^4)}{2} \right] [0,34 - (0,14 \cdot e_a^{1/2})] \left[\left(1,35 \cdot \frac{R_s}{R_{so}}\right) - 0,35 \right] \quad (15)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (16)$$

Onde: R_s é a radiação solar global, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; n é a insolação, número de horas efetivo de brilho solar, em h; N é o fotoperíodo, número máximo de horas de brilho solar, em h; R_a é a radiação extraterrestre, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; R_{so} é a radiação solar com céu limpo, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; z é a elevação do local, em metros; R_{ns} é a radiação líquida de ondas curtas, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; R_{nl} é a radiação líquida de ondas longas, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; T_{\max} é a temperatura máxima, em K; T_{\min} é a temperatura mínima diária, em K; e_a é a pressão atual de vapor, em kPa; e R_n é o saldo de radiação, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Para cálculo da radiação extraterrestre foi utilizada a equação descrita por ALLEN et al. (1998):

$$R_a = \left(\frac{24,60}{\pi} \right) \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)] \quad (17)$$

Em que: R_a é a radiação extraterrestre, em $\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; G_{sc} é a constante solar no valor de $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; d_r é a distância relativa inversa terra-sol, em radiano; ω_s é o ângulo horário por do sol, em radiano; ϕ é a latitude local, em radiano; δ é a declinação solar, em radiano.

A distancia relativa terra-sol (d_r), a declinação solar (δ), e o ângulo horário do pôr do sol (ω_s) foram obtidas pelas equações 18, 19 e 20, dadas por:

$$d = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi DJ}{365}\right) \quad (18)$$

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen}\left[\left(\frac{2\pi \cdot DJ}{365}\right) - 1,39\right] \quad (19)$$

$$\omega_s = \arccos[(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta))] \quad (20)$$

Em que; DJ é o Dia Juliano, δ é a declinação solar e ϕ é a latitude do local, ambos em radianos.

3.4.4 Determinação da evapotranspiração real da cultura

A determinação da evapotranspiração ocorrida diariamente com as mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – Engelm) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) foi feita pelo método da lisimetria, utilizando-se minilímetros instalados na casa de vegetação.

Os valores da ETc foram obtidas por meio do balanço hídrico, aplicando-se a lei de conservação de massa, apresentada por REICHARDT (1985), por meio da Equação 7, com a adaptação das unidades, em milímetros (mm) originariamente, para gramas dia^{-1} :

$$\text{ETc} = P + I \pm \Delta S - D - R \quad (7)$$

Em que: ET_c é a evapotranspiração real da cultura, em gramas.dia^{-1} ; P é a precipitação natural, no caso considerado igual a zero devido a existência de cobertura com filme plástico na casa de vegetação; I é a irrigação, em gramas.dia^{-1} , obtida pela diferença entre o valor de leitura realizado antes da irrigação (7:00 h para o pinus e 7:30 h para o eucalipto) e logo após a irrigação (o horário de término da irrigação variava em função das perdas ocorridas no dia anterior); ΔS é a variação de armazenamento, em gramas.dia^{-1} , obtida pela diferença de massa logo após o término da drenagem e a massa registrada as 19 h; D é a drenagem, em gramas.dia^{-1} , obtida pela diferença entre os valores das massas observadas logo após o término da irrigação e a massa observada 30 min após o término da irrigação. Os gráficos de variação diária de massa, mostraram que, existiam uma mudança de trajetória da curva de perda de água após cerca de 30 min do término da irrigação, sendo antes desse momento mais acentuada (drenagem) e posteriormente mais suavizada (evapotranspiração); R é o escoamento superficial, considerado igual a zero, pois existiam contenções nas laterais das bandejas que impediam estas perdas.

Os valores da evapotranspiração diária, em gramas (g), foram convertidas para milímetros (mm) considerando-se a área da bandeja como a área evapotranspirométrica igual a $0,2204 \text{ m}^2$ ($0,58 \text{ m} \times 0,38 \text{ m}$) e a correspondência pluviométrica ($1 \text{ mm} = 1 \text{ kg.m}^{-2}$) por meio da seguinte equação:

$$ET_c (\text{mm}) = \frac{ET_c (\text{g})}{0,2204 \cdot 1000} \quad (21)$$

3.4.5 Determinação do coeficiente da cultura (K_c)

Com base nos valores diários das evapotranspirações de referência e da cultura, foram calculados os coeficientes de cultura para o período de 16/05 a 18/08/2015, por meio da Equação 22, apresentada por DOORENBOS e PRUITT (1977), como:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (22)$$

Em que: ET_c é a evapotranspiração da cultura e ET_o é a evapotranspiração de referência, ambos em mm d^{-1} .

3.4.6 Manejo da irrigação

A irrigação foi programada para acontecer uma vez ao dia, iniciando as 7:00 h para as mudas de pinus e as 7:30 h para as mudas de eucalipto. A condição para encerramento da irrigação foi estabelecida por meio da massa do conjunto “bandeja + tubetes” na condição de “capacidade de campo”.

Para definir a massa do conjunto na condição de “capacidade de campo”, promoveu-se inicialmente a saturação do substrato, sendo utilizados reservatórios plásticos (caixas d’água), com água em um nível que permitia a imersão parcial dos tubetes (Figura 19). Os fundos dos tubetes foram protegidos por espuma para evitar a perda do substrato.

Após um período de aproximadamente 12 h, suficiente para que houvesse a saturação do substrato, os conjuntos foram retirados dos reservatórios e levados à sombra, onde, após permitir o escoamento da água livre (aproximadamente 30-40 min). Este tempo foi definido com base em observações feitas em testes utilizando o minilímetro.

Após o escoamento da água foram registradas as massas com auxílio de uma balança digital, marca MICHELETTI, modelo MIC P15, com capacidade para 15 Kg e resolução de 0,005 Kg (Figura 20).

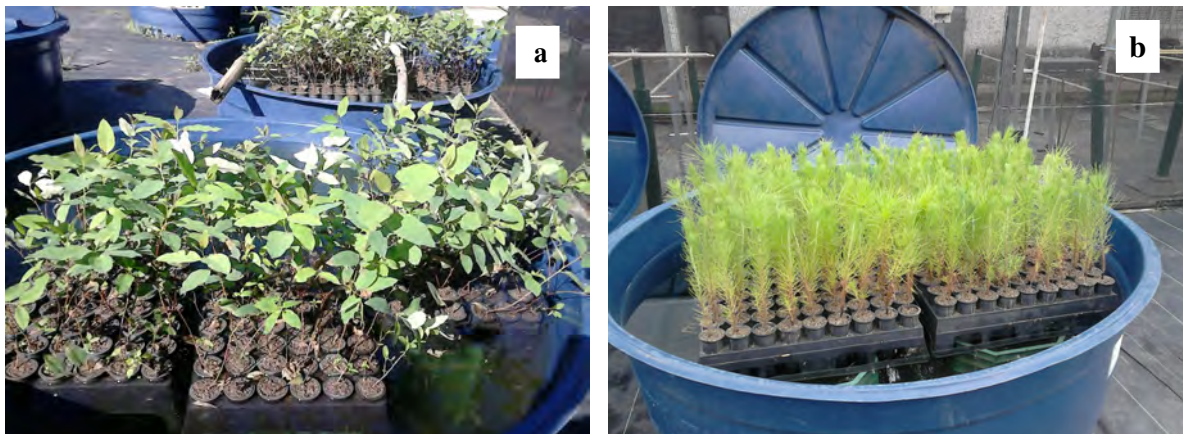


Figura 19. Imersão, em água, dos tubetes contendo mudas de eucalipto (a) e de pinus (b) para saturação do substrato.

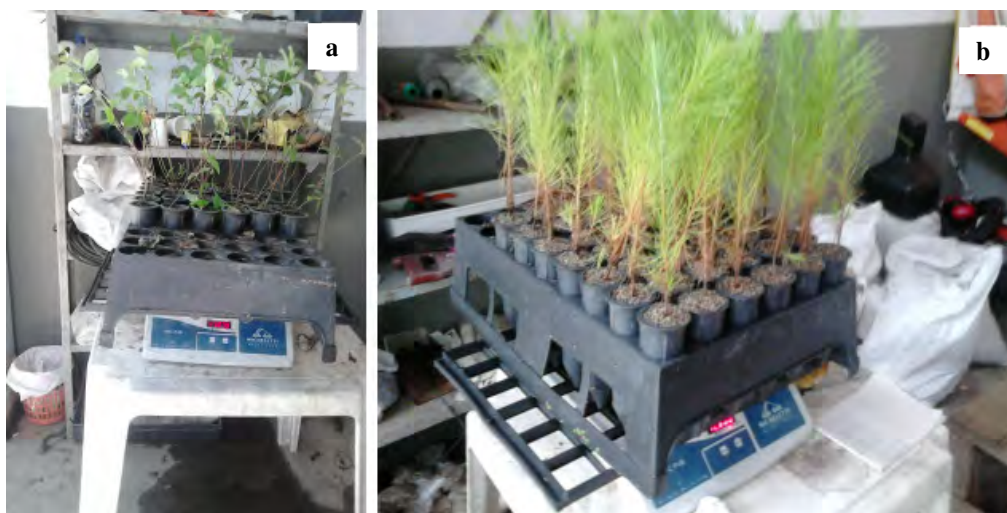


Figura 20. Obtenção das massas dos conjuntos (bandeja+tubete+substrato+planta) contendo eucalipto e pinus na condição de “capacidade de campo”.

Posteriormente a realização das 24 pesagens (oito bandejas em cada uma das três bancadas), em cada uma das culturas, foram definidas as massas de 12.600 g para os conjuntos (bandeja+tubetes+substrato+plantas) contendo as mudas de pinus na condição considerada de máxima capacidade de retenção de água (“capacidade de campo”) e de 10.750 g para os conjuntos contendo as mudas de eucalipto.

Conforme as mudas foram retiradas das bandejas para a realização de análises destrutivas ou verificadas as mortalidades, novos indivíduos foram colocados em substituição, sendo então ajustadas às novas massas de desligamento do sistema de irrigação formado por microaspersores Rain Bird, modelo X360 Mister, com vazão aproximada de $0,65 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

3.4.7 Registros das medições

Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os gráficos gerados pelo software FieldloggerConfig, com as variações das massas observadas nas bandejas contendo as mudas de eucalipto e pinus, respectivamente, no período experimental de 07 a 15/06/2015.



Figura 21. Gráfico gerado pelo software FieldloggerConfig mostrando as variações de massas nos minilísimetros contendo mudas de eucalipto, ocorridas no período de 07 a 15/06/2015.



Figura 22. Gráfico gerado pelo software FieldloggerConfig mostrando as variações de massas nos minilísimetros contendo mudas de pinus, ocorridas no período de 07 a 15/06/2015.

Os gráficos mostram os registros de algumas oscilações (ocorridas nos dias 9, 11 e 13/06) resultantes de ações realizadas nas bandejas como: limpeza de ervas daninhas, retirada de amostras para medições morfofisiológicas, substituição de plantas mortas, e até mesmo o trânsito de pessoas junto às bancadas provocando pequenas oscilações.

Nas representações gráficas, geradas após os registros, ficam evidenciados as variações de massas decorrentes da irrigação, da drenagem livre da água, da evapotranspiração e, eventualmente, alguns ganhos devido a condensação, sendo representados graficamente por linhas verticais maiores, linhas verticais menores, linhas descendentes e linhas ascendentes, respectivamente.

Estas representações auxiliam a interpretação dos resultados, esclarecendo eventuais variações verificadas nos registros. Quando detectada qualquer anormalidade é possível a correção dos valores adotados nas determinações das evapotranspirações das mudas de pinus e de eucalipto.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Determinação da evapotranspiração de referência

De acordo com os resultados apresentados na Figura 23, verificou-se que existe uma forte correlação entre os dados internos e externos ($r = 79,6\%$). Os valores da ETo no ambiente externo foram, na maioria das vezes, superiores aqueles obtidos no ambiente interno, sendo em média, 31,3 % maiores. A média da ETo calculada para o ambiente externo foi de $2,91 \text{ mm d}^{-1}$ enquanto que para o ambiente interno foi de $2,00 \text{ mm d}^{-1}$. Os valores máximos de ETo verificados nos ambientes interno e externo foram de $3,43$ e $5,45 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, e os valores mínimos foram de $0,84$ e $1,15 \text{ mm d}^{-1}$, para os ambientes interno e externo, respectivamente.

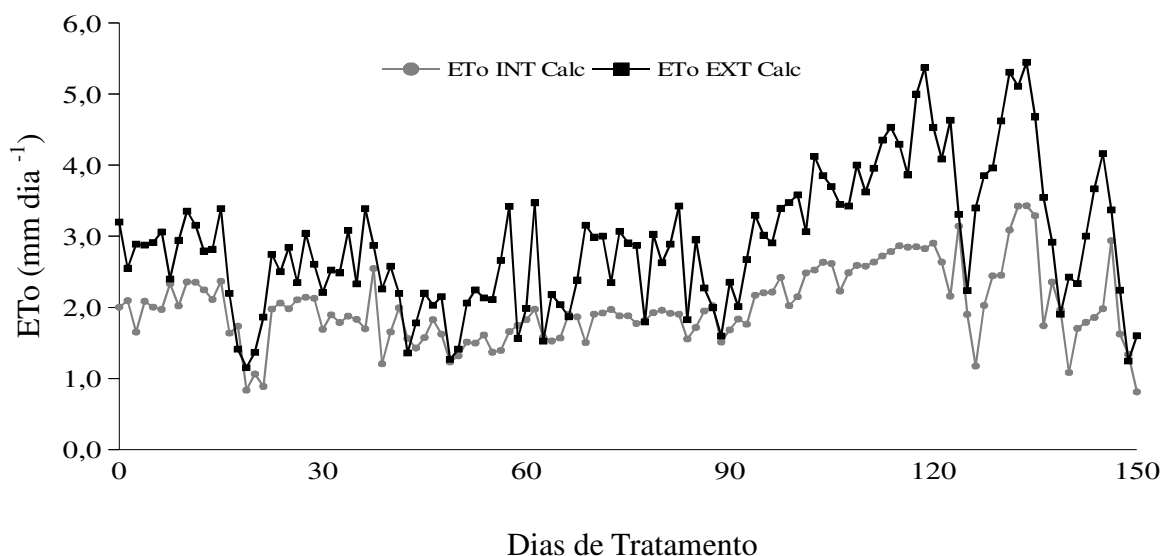


Figura 23: Valores diários da evapotranspiração de referência interna (ETo INT calc) e externa (ETo EXT calc) obtida pela equação de Penman-Monteith -FAO.

Este comportamento também foi observado por CUNHA, 2011; FARIAS et al., 1994; FERNANDES et al., 2003; FOLEGATTI et al., 1997 e SHAHIDIAN et al., 2011, que verificaram maiores valores de ETo no ambiente externo em comparação ao ambiente interno. No presente trabalho os valores de ETo calculados para o ambiente interno representaram, em média, 68,7% dos valores calculados no ambiente externo, estando dentro da faixa de 60 a 80%, citados por CUNHA (2011), e abaixo dos 85% observados por BRAGA e KLAR (2000).

Tais resultados podem estar associados à época de desenvolvimento do trabalho (outono-inverno), onde existiu uma menor amplitude de temperatura; uma umidade relativa mais alta e menor incidência de radiação solar, reduzindo as perdas por evapotranspiração, principalmente no ambiente externo. PALOMINO MONTES (2008) observou, em experimento conduzido na condição de verão, uma redução de 16,5% na ETo calculada no ambiente interno em relação ao externo, valor abaixo dos 31,3% verificado.

A média das temperaturas máximas (T_{max}) observadas no ambiente interno foi de

31,3°C, enquanto que no ambiente externo foi de 26,0°C; e a média das temperaturas mínimas (Tmin) observadas no ambiente interno foi de 17,4°C e no ambiente externo foi de 17,7°C.

Tabela 10. Valores absolutos máximos e mínimos e valores médios de temperatura, em °C; radiação solar, em MJ m⁻²; velocidade do vento, em m s⁻¹; e umidade relativa, em %, registrados nos ambientes interno e externo.

Parâmetro	Ambiente Externo			Ambiente Interno		
	Máximo Absoluto	Mínimo Absoluto	Média	Máximo Absoluto	Mínimo Absoluto	Média
Temperatura (°C)	37,8	14,8	21,9	42,7	14,2	24,4
Radiação (MJ m ⁻²)	19,8	3,7	8,1	5,9	2,6	3,8
Velocidade do Vento (m s ⁻¹)	3,2	0,9	1,54	-	-	-
Umidade Relativa (%)	98,2	30,3	77,3	100,0	9,0	60,9

Em relação à temperatura máxima a diferença foi de 4,9°C entre os valores observados nos dois ambientes. Este resultado embora esteja próximo ao observado por PALOMINO MONTES (2008), que constatou diferença de 3,6°C, mostrou-se superior àquelas relatadas por FARIAS et al. (1993); que constataram maior efeito da cobertura plástica sobre as temperaturas máximas com valores de 1,2°C a 4,4°C acima das observadas externamente. As pequenas dimensões da casa de vegetação e, conseqüentemente, o menor volume de ar pode ter contribuído para que a diferença entre as temperaturas máximas fosse maior, porém essa diferença de, aproximadamente 12,9%, verificada entre as temperaturas máximas, interno e externamente, está próxima dos 14,8% verificados por FOLEGATTI et al. (1997).

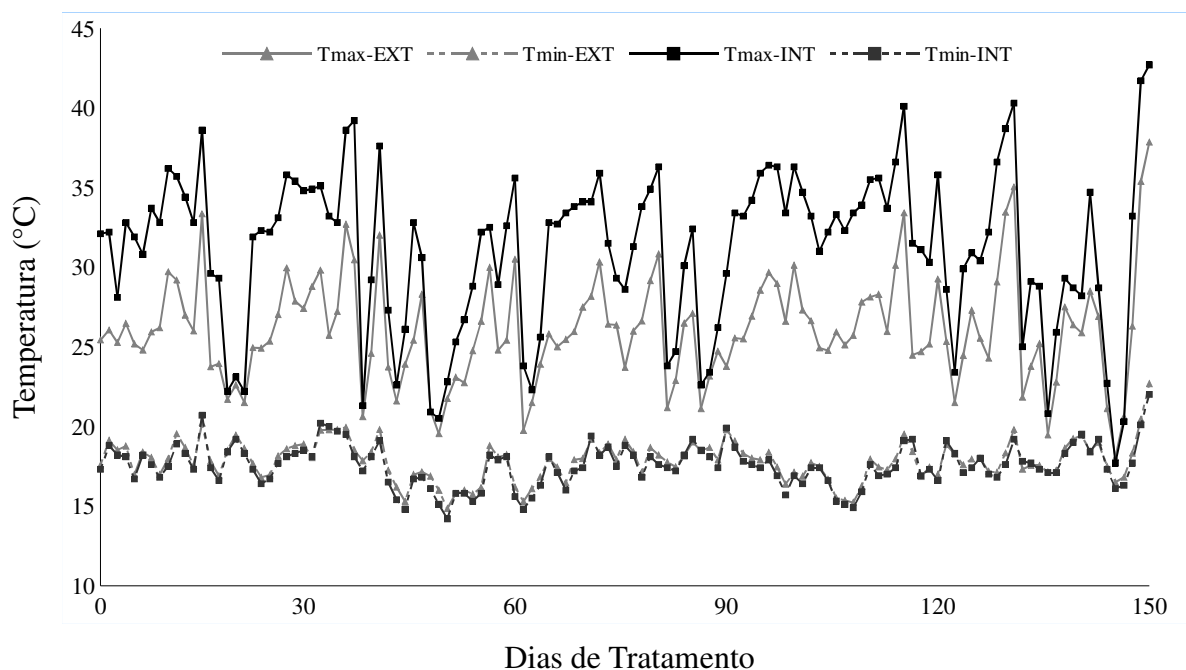


Figura 24. Variação diária das temperaturas máximas (Tmax) e mínimas (Tmin) observadas nos ambientes interno (Int) e externo (Ext).

As temperaturas mínimas externas foram ligeiramente superiores à interna, diferentemente do que foi observado por BURIOL et al. (1993); porém mesmo comportamento foi observado por CAMACHO et al. (1995) e FARIAS et al. (1994). A possível explicação para essa condição reside no fato de que: a céu aberto, embora haja perdas consideráveis de energia térmica, existem também movimentos verticais e horizontais de

massa de ar que transportam calor, podendo resultar no aquecimento deste ambiente pela mistura de camadas de ar. Esse movimento de massa de ar não ocorre no interior da casa de vegetação, devido ao fechamento de suas estruturas (coberturas e laterais) impedindo a ação dos ventos, resultando em maiores temperaturas mínimas observadas no ambiente externo.

A diferença entre as médias das temperaturas mínimas (T_{min}) dos dois ambientes foi de apenas $0,3^{\circ}\text{C}$. PALOMINA MONTES (2008) também observou uma pequena diferença de $0,1^{\circ}\text{C}$ entre as temperaturas mínimas. A diferença observada entre os valores absolutos de temperaturas mínimas no ambiente interno e externo, de aproximadamente, 4,1% esta próxima da diferença de 5,9% observada por FOLEGATTI et al. (1997).

A diferença observada nas temperaturas médias (T_{med}), dos ambientes interno e externo, foi de $2,5^{\circ}\text{C}$. Esta superioridade da temperatura média no interior de estufas também foi observada por outros pesquisadores (FARIAS et al.;1997, FOLEGATTI et al., 1997; HOSSOKAWA, 1997, e PALOMINO MONTES, 2008). De acordo com REBOUÇAS et al. (2015) a temperatura média diária no interior da estufa é sempre mais elevada que no exterior, e as diferenças variam em torno de $0,5$ a $9,0^{\circ}\text{C}$. Os principais fatores que contribuem para que as temperaturas médias no interior da estufa sejam maiores à externa são: menor volume de ar a ser aquecido, pouca ou nenhuma troca devido a movimentação da massa de ar entre os ambientes e calor irradiado pelos elementos construtivos do ambiente protegido (pilares, cobertura, bancadas, etc).

Outro fator que contribuiu para os resultados observados foi a radiação solar. Na Figura 25 são apresentados os valores dos saldos de radiação (R_n), nos ambientes interno e externo. No ambiente interno o saldo de radiação representou, em média, 55,8% do saldo observado no ambiente externo. Esta redução é o resultado combinado da ação do filme plástico em conjunto com a tela de sombreamento (50%) que compunham a cobertura da casa de vegetação, além da tela de ráfia sobre o piso (tela de cor preta) que diminuíam os efeitos da radiação refletida no ambiente interno. Esta condição de menor radiação interna contribuiu para os menores valores de E_{To} observados nesse local.

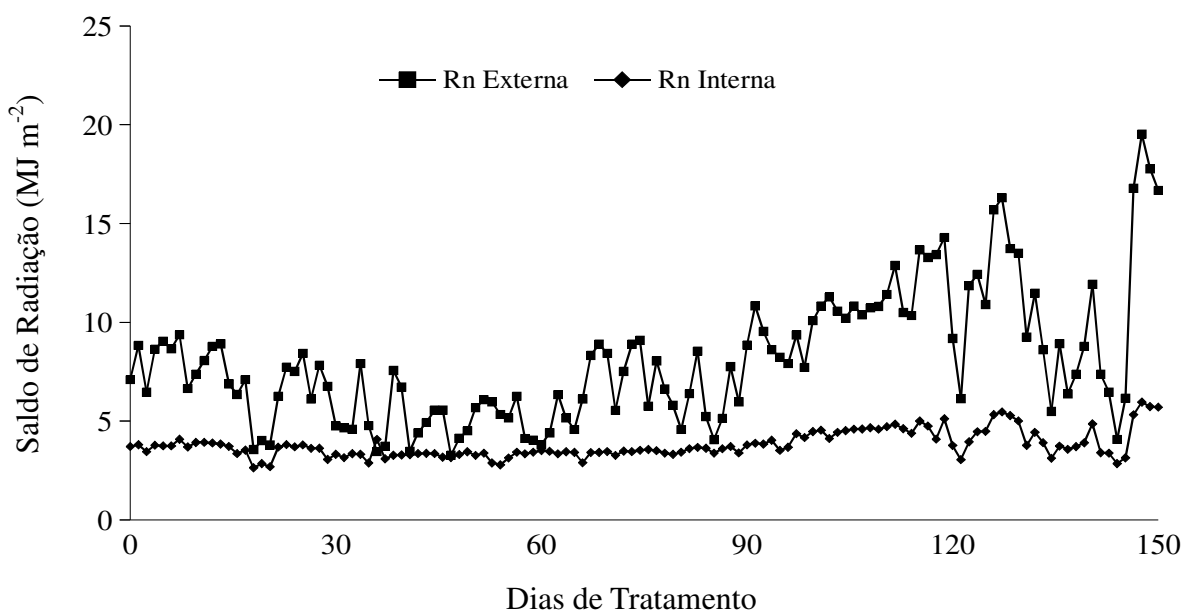


Figura 25. Dados de saldo de radiação (R_n) nos ambientes interno (R_n Interna) e externo (R_n Externa), no período experimental.

A média (55,8%) está dentro da faixa observada por FOLEGATTI et al (1997). Os

autores verificaram que, a razão entre os totais diários de radiação interna e externa variou entre 48% e 71%. SENTELHAS et al. (1997) citam que uma cobertura com tela preta (50%) atenua em 49,7%, em média a Radiação Líquida (Rn), reforçando a afirmação de que a tela de sombreamento (50%) utilizada por sobre a cobertura, contribuiu para os valores obtidos de radiação.

Outro fator que pode ter contribuído para os maiores valores observados no ambiente externo é a movimentação do ar, aumentando o poder evapotranspirante. Enquanto que a velocidade média do vento no interior da casa de vegetação foi praticamente nula, no ambiente externo, a velocidade média foi superior ($1,66 \text{ m s}^{-1}$) contribuindo de forma mais significativa com as perdas de água externamente.

FERNANDES et al. (2003) citam que além dos fatores radiação solar e velocidade do vento, as maiores umidades relativas do ar observadas em ambiente protegido também influenciam na evapotranspiração. De acordo com SCATOLINI (1996), em ambientes fechados a evapotranspiração influencia diretamente a umidade relativa do ar devido ao aumento da tensão de vapor d'água e da reduzida renovação do ar em seu interior.

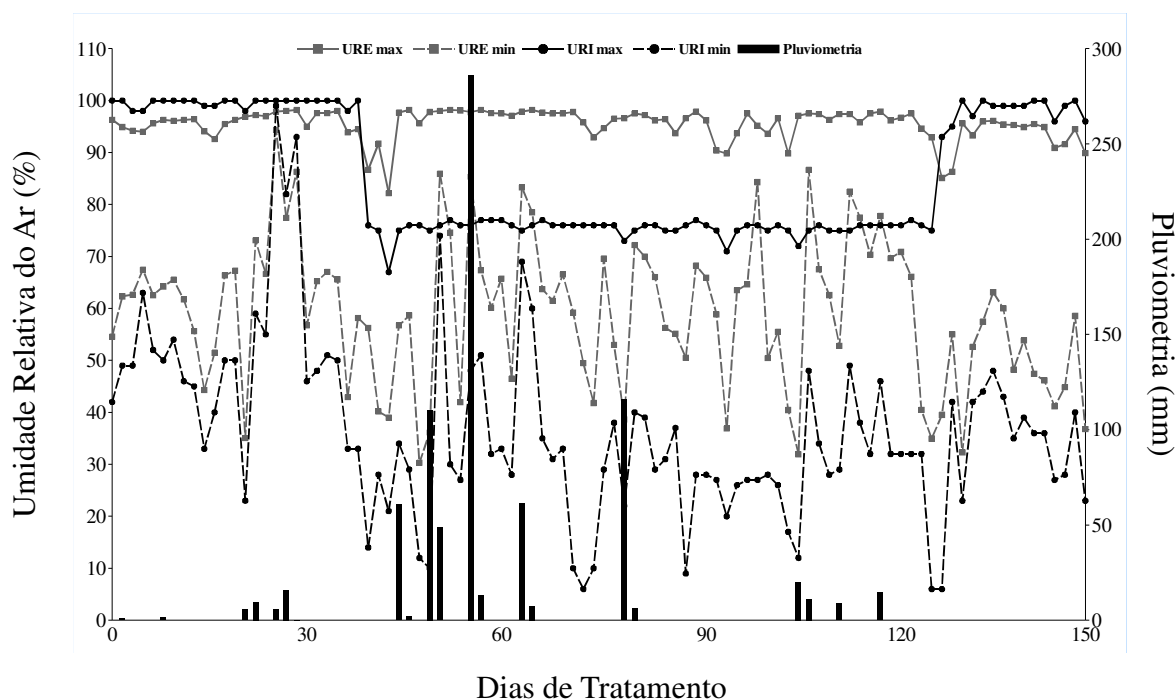


Figura 26. Variação da umidade relativa mínima (Urmin) e máxima (URmax), nos ambientes interno (INT) e externo (EXT), e de Pluviometria durante o período experimental.

Verificou-se que no ambiente externo os valores da umidade relativa foram, em média, superiores aos observados no ambiente interno. A umidade relativa média observada nos ambientes externos e internos foi de 77,3% e 60,9%, respectivamente. A média da URmax no ambiente externo foi de 95,4%, enquanto que no ambiente interno foi de 85,3%; e a média da URmin no ambiente externo foi de 59,1%, enquanto que no ambiente interno foi de 36,6%.

A existência de um sistema de irrigação, no ambiente externo, acionado duas vezes ao dia, no início da manhã e no final da tarde, pode ter contribuído para a manutenção de um ambiente mais úmido no exterior da casa de vegetação. Já no ambiente interno, que possuíam telas nas laterais e filme plástico sobre a cobertura dificultando o ganho de umidade proveniente do ambiente externo, ocorria somente uma irrigação no início da manhã. Outros

fatores que podem ter contribuído para os altos valores de UR observados no ambiente externo foram a localização do experimento, próximo à Floresta da Tijuca, e a época de realização (outono-inverno) com menores temperaturas. Deve ser considerado, também, que a ocorrência de menores valores de UR no interior de estufas pode estar relacionada às maiores temperaturas observadas neste ambiente; aumentando a tensão de saturação de vapor d'água do ar.

Outros pesquisadores (HOSSOKAWA, 1997; PALOMINO MONTES, 2008; e VÁSQUEZ et al., 2005) também verificaram UR maiores no ambiente externo em relação ao ambiente interno. PALOMINO MONTES (2008) observou que no ambiente protegido a UR média foi de 75,5% enquanto que no ambiente externo foi de 80,5%; HOSSOKAWA (1997) observou média de 64,8% e 72,9%, para as umidades, interna e externa, respectivamente, enquanto que VÁSQUEZ et al. (2005) verificaram valores médios internos e externos de 71,2% e de 74,3%, respectivamente.

Em relação a UR_{max}, HOSSOKAWA (1997) também verificou superioridade dos valores no ambiente externo. Como a umidade relativa esta relacionada com a temperatura, e estas eram superiores no ambiente interno, mantinham este menos sensível às variações climáticas observadas fora da casa de vegetação.

EVANGELISTA e PEREIRA (2001) encontraram valores de UR_{mín} mais altas no ambiente externo, em média 15,1%; e HOSSOKAWA (1997) observou 7,2% superiores no ambiente interno. FARIAS et al. (1993) também verificaram maiores valores no ambiente externo, variando de 49,7 a 66,6%, enquanto no ambiente interno, variaram de 42,1 a 61,0%.

3.5.2 Medição da evapotranspiração real da cultura

3.5.2.1 Medição da evapotranspiração em mudas de eucalipto

As medições da evapotranspiração real da cultura das mudas de eucalipto (Figura 27), apresentaram valores absolutos variando de 0,16 mm d⁻¹, no mínimo, e de 3,53 mm d⁻¹, no máximo, sendo a média de 1,66 mm d⁻¹, valor inferior aos observados por OLIVEIRA (2012) e por TORRES (2012).

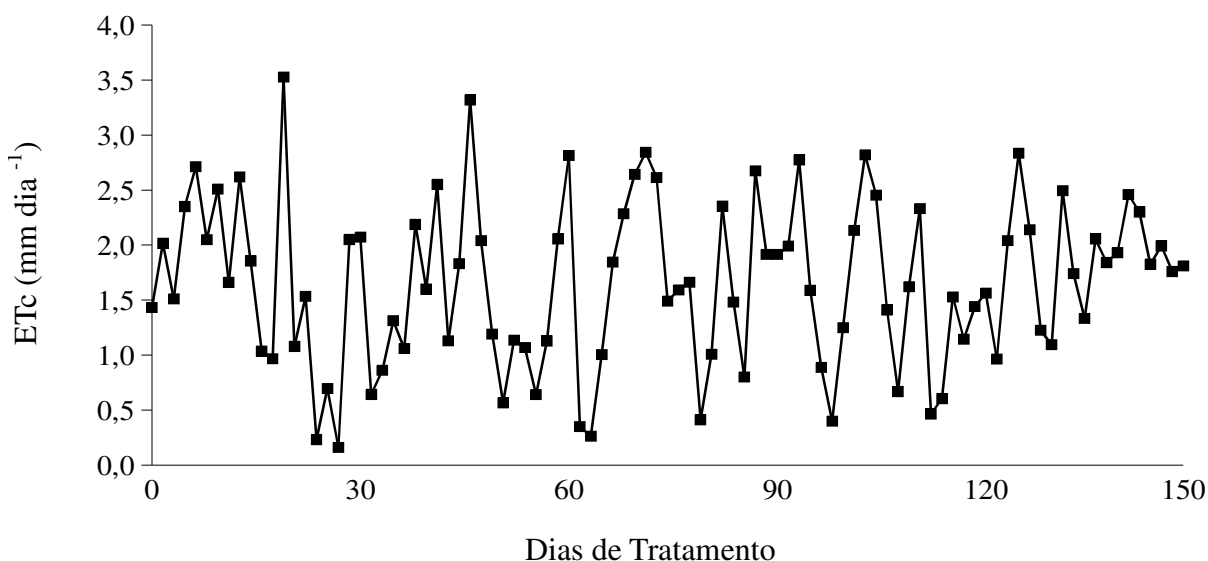


Figura 27. Valores medidos da evapotranspiração real da cultura, das mudas de eucalipto, em mm d⁻¹, obtidas diariamente por meio do minilísímetro.

O primeiro autor verificou que as médias da evapotranspiração das mudas de eucalipto

na fase de enraizamento, aclimação, crescimento e rustificação foram, respectivamente, iguais a 2,40 mm d⁻¹; 2,00 mm d⁻¹; 4,82 mm d⁻¹ e 3,84 mm d⁻¹. O segundo autor verificou valor médio diário da evapotranspiração de 3,21 mm, durante um período de 60 dias (de 42 à 102 dias após a germinação).

A temperatura média do ar influenciando a evapotranspiração das mudas contribuiu para os resultados obtidos. Embora o trabalho desenvolvido por TORRES (2012) também tenha sido desenvolvido na condição de inverno, a temperatura média observada pelo autor (25,7°C) foi superior ao do presente trabalho (23,3°C). O estudo desenvolvido por OLIVEIRA (2012) foi realizado no período de outubro a dezembro, período com temperaturas mais altas.

3.5.2.2 Medição da evapotranspiração em mudas de pinus

As medições da evapotranspiração real da cultura das mudas de pinus (Figura 28) apresentaram valores absolutos variando de 0,74 mm d⁻¹, no mínimo, e de 4,12 mm d⁻¹, no máximo, sendo a média de 2,30 mm d⁻¹.

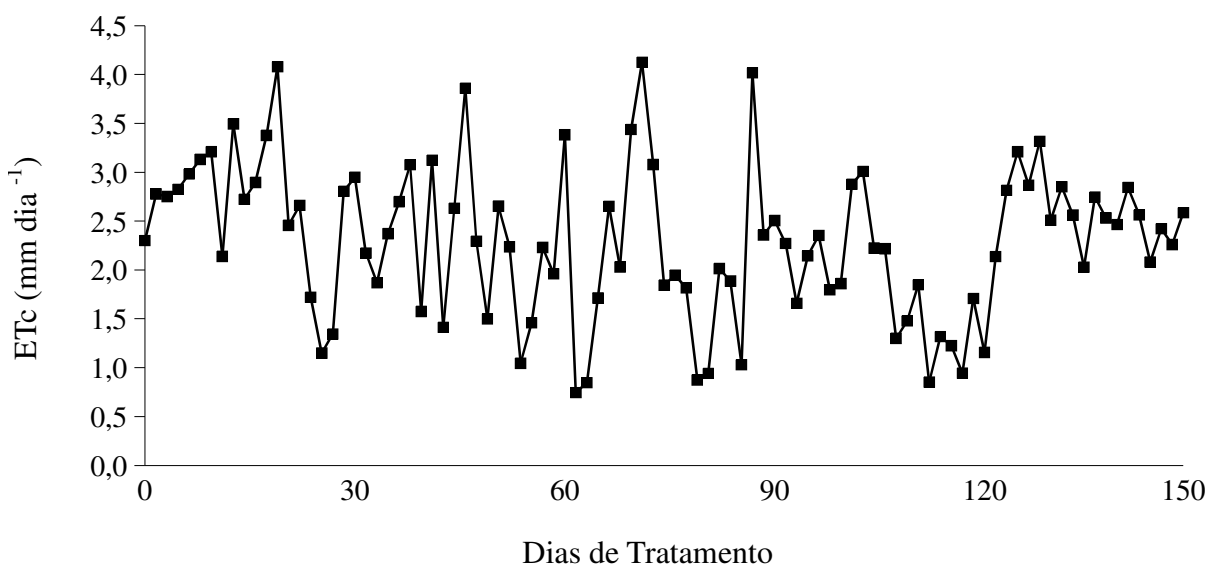


Figura 28. Valores medidos da evapotranspiração real da cultura, das mudas de pinus, em mm d⁻¹, obtidas diariamente por meio do minilísímetro.

A amplitude observada no presente trabalho (0,74 a 4,12 mm d⁻¹) está abaixo daquela observada por SILVA (2007), no crescimento de mudas de *Pinus oocarpa* Schiede. O autor constatou que a evapotranspiração das mudas ao longo do experimento ocorreu em uma faixa de 0,9 a 5,2 mm d⁻¹. Além de serem espécies distintas, a diferença observada está associada às épocas de desenvolvimento dos trabalhos, realizados na condição de inverno, no presente trabalho, e na condição de verão, no trabalho realizado por SILVA (2007).

3.5.3 Determinação dos coeficientes da cultura do pinus e do eucalipto

3.5.3.1 Coeficiente da cultura (Kc) do eucalipto

Os cálculos da ETo, pela equação de Penman-Monteith-FAO, apresentaram no ambiente interno média de 2,00 mm d⁻¹, com valores máximos e mínimos de 3,43 mm d⁻¹ e 0,84 mm d⁻¹, respectivamente. Com base nos valores diários de ETc e ETo foram calculados

os valores de Kc (Figura 29). Analisando a relação ETC:ETO, no período experimental, de 16/05/2015 a 18/08/2015 (dias julianos de 136 a 230), verificou-se uma tendência de redução dos valores do coeficiente da cultura (Kc) até o dia 15/07/2015 (dia juliano 196), após este dia a tendência passa a ser de aumento dos valores de Kc. Em valores absoluto o Kc oscilou entre, aproximadamente, 0,1 e 1,6. Utilizando a Equação 23, que descreve a variação diária do Kc, ocorrida no período de observação, verifica-se que os valores oscilaram entre o máximo de 1,05 e o mínimo de 0,73.

$$Kc = 0,00009.DJ^2 - 0,0352.DJ + 4,1754 \quad (23)$$

Em que DJ é o dia juliano do período experimental.

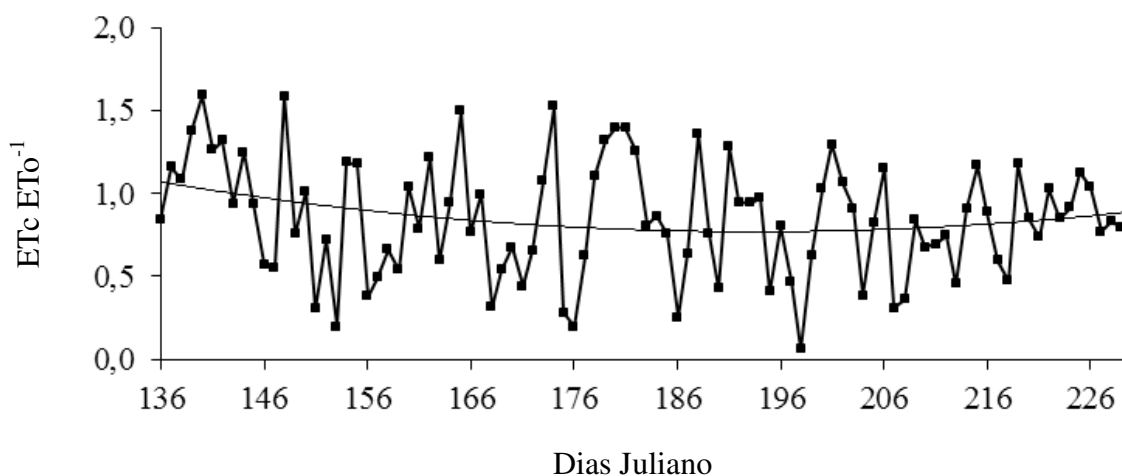


Figura 29. Valores do coeficiente da cultura (Kc) do eucalipto, obtido pela relação diária entre a evapotranspiração real da cultura e a evapotranspiração de referência.

De acordo com a Equação 23, para o período experimental o valor do Kc médio seria igual a 0,89. Este valor está acima daquele obtido por ALVES et al. (2013) que estudando o comportamento de três clones de *Eucalyptus grandis* e um híbrido clonal de *E. grandis* x *E. urophylla*, plantadas em solo argiloso, em Minas Gerais, encontraram um valor de Kc = 0,70 para as mudas na fase inicial de crescimento, isto é logo após a germinação, e Kc = 0,82 na fase média de crescimento, período compreendido entre o pós-germinação e a rustificação.

Os valores observados do Kc, apresentando inicialmente redução com posterior aumento, também foi observado por SATO et al. (2007) analisando o coeficiente de cultura do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras-MG. De acordo com os autores este comportamento estaria associado a fase fenológica do cafeeiro, sendo na fase de maturação/abotoamento (abril e maio), caracterizada por moderada atividade vegetativa, na fase de dormência (junho, julho e agosto), caracterizada por baixa atividade vegetativa, e na fase de expansão (setembro) caracterizada por plena atividade vegetativa.

TATAGIBA et al. (2015) estudando o crescimento de mudas de eucalipto (clone híbrido *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*), em Alegre-ES, durante 60 dias no período de inverno (dos 35 aos 55 dias após germinação), verificou um valor médio de Kc igual a 1,25, utilizando os dados de mudas que mantinham um nível de 90% da máxima capacidade de retenção de água (capacidade de campo). Mesmo apresentando valores de ETO, também calculados pela equação de Penman-Monteith, superiores aos obtidos no presente trabalho, os valores de ETC foram consideravelmente maiores que aqueles observados durante o experimento, resultando em um maior Kc. Segundo os autores a ETO apresentou valor médio

de $2,56 \text{ mm d}^{-1}$, atingindo valor máximo e mínimo de $3,73$ e de $0,28 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, enquanto que, no presente trabalho, o valor médio observado foi de $1,86 \text{ mm d}^{-1}$, e de $2,63$ e $0,75 \text{ mm d}^{-1}$, para os valores máximo e mínimo, respectivamente. No entanto, o valor médio de ET_c foi de $3,21 \text{ mm.dia}^{-1}$, registrando máxima e mínima de $4,81$ e $1,28 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. Esses valores foram consideravelmente superiores ($93,4\%$) aos observados no presente trabalho cujo valor médio foi de $1,66 \text{ mm d}^{-1}$, sendo a máxima e a mínima de $3,53 \text{ mm d}^{-1}$ e $0,23 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente.

Embora os trabalhos tenham sido realizados com mudas de mesma cultivar (eucalipto), no mesmo período (inverno), e a evapotranspiração da cultura (ET_c) tenha sido obtida da mesma forma (pesagem) outros fatores como as diferenças climáticas (temperatura, umidade, radiação e velocidade do ar), as diferenças existentes entre as fases de desenvolvimento das mudas, tipos de substratos, frequência das irrigações, características das casas de vegetação (principalmente, a tela de sombreamento sobre a cobertura, reduzindo a evapotranspiração), influenciaram na diferença nos resultados obtidos.

CARVALHO et al. (2011) afirmam que quando se utilizam coeficientes de culturas, para estimativa da evapotranspiração de uma cultura qualquer é importante identificar a origem de obtenção do K_c e que a estimativa da ET_0 siga o mesmo método e critérios adotados originalmente na determinação do K_c , indicando a necessidade da obtenção e calibração desses coeficientes.

3.5.3.2 Evapotranspiração da cultura do pinus

A evapotranspiração de referência (ET_0), calculada pela equação de Penman-Monteith (PM-FAO), apresentou média de $1,91 \text{ mm d}^{-1}$, com valores máximos e mínimos de $2,78 \text{ mm d}^{-1}$ e $0,84 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. Com base nos valores diários de ET_c e ET_0 foram calculados os valores de K_c (Figura 30).

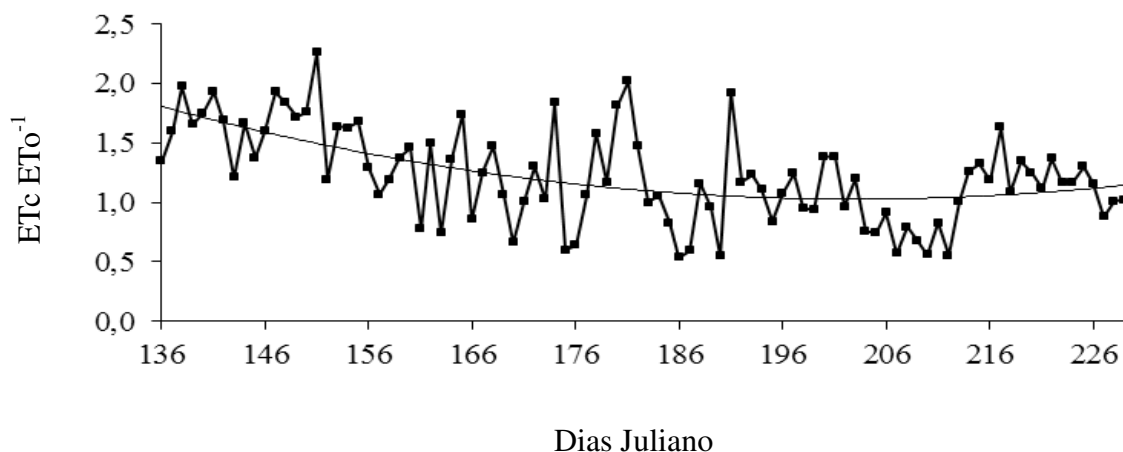


Figura 30. Valores do coeficiente da cultura (K_c) do pinus, obtido pela relação diária entre a evapotranspiração real da cultura e a evapotranspiração de referência.

Analisando a relação ($ET_c ET_0^{-1}$), durante o período de 16/05/2015 a 18/08/2015 (dias julianos de 136 a 230), verificou-se uma tendência de redução dos valores do coeficiente da cultura (K_c) até o dia 22/07/2015 (dia juliano 203). Neste período, os valores absolutos oscilaram entre $0,5$ a $2,3$, aproximadamente; e em média os valores oscilaram entre o máximo de $1,80$ e o mínimo de $1,01$, de acordo com a equação:

$$Kc = 0,000173.DJ^2 - 0,0704.DJ + 8,1757 \quad (24)$$

Em que DJ é o dia juliano do período experimental.

Com base na Equação 24 o valor do Kc médio, calculado para o período do experimento, é igual à 1,41. GURSKY et al. (2016) estudando o Kc em florestas de *Pinus taeda* cultivadas no Paraná observaram um valor médio de Kc = 1,32, superior também ao Kc = 1,0 sugerido por Allen et al. (1998). Esses autores verificaram que o Kc variou de 0,1 a 3,0, conforme mensuração ou estimativa e época do ano. Outro valor de Kc foi obtido pelos autores, com base na equação proposta por ALLEN et al. (1998), que agrega ao valor proposto pela FAO correções com base na velocidade média do vento, da média da umidade relativa mínima e da altura média da planta, sendo este valor igual a 0,78.

BONO e ALETÀ (2013) realizando experimento em Barcelona (Espanha), com *Pinus pinea* L. adultos, verificaram que o Kc variou de 0,32 a 0,92 ao longo do ano, sendo menores nos períodos de mais frio e maiores nos períodos mais quentes.

Estudando o crescimento de *Pinus eldarica* Medw. em plantações no Novo México (Estados Unidos) WHITE e FISHER (1985) concluíram que a utilização de Kc igual a 0,79 poderia ser feita de forma segura para estimar as necessidades de irrigação, utilizando a equação combinada de Penman, em plantações similares em idade e espaçamento.

3.6 CONCLUSÕES

Tendo em vista a utilidade de determinados parâmetros no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação e considerando a importância comercial das culturas de pinus e eucalipto, pode-se concluir, de acordo com os resultados observados, e para as condições em que foram desenvolvidos os estudos que:

- a) A evapotranspiração de referência no ambiente interno representou, aproximadamente 71,5% do valor observado no ambiente externo; sendo que, durante o período do experimento, os valores médios diários foram de 2,91 mm d⁻¹ e de 2,00 mm d⁻¹, para os ambientes externos e internos, respectivamente. Os valores máximos e mínimos observados no ambiente interno foram de 3,43 e 0,84 mm d⁻¹, enquanto que, no ambiente externo foram de 5,45 e 1,15 mm d⁻¹.
- b) As mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) apresentaram evapotranspiração média de 2,26 mm d⁻¹, sendo os valores, máximo e mínimo, observados iguais a 4,06 e 0,73 mm d⁻¹, respectivamente.
- c) As mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) apresentaram evapotranspiração média de 1,63 mm d⁻¹, sendo os valores, máximo e mínimo, observados iguais a 3,47 e 0,11 mm d⁻¹, respectivamente.
- d) Os valores médios de Kc, obtidos pela relação entre a evapotranspiração real da cultura, medida por meio do minilísímetro, e a evapotranspiração de referência (ET_o), calculada por meio da equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO, para as mudas de pinus e de eucalipto, no período de outono-inverno, foram iguais a 1,41 e 0,89, respectivamente.

4. CAPÍTULO III

**AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE MUDAS DE
PINUS E DE EUCALIPTO, CULTIVADAS EM SUBSTRATO
CONTENDO LODO DE ESGOTO,
SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE IRRIGAÇÃO**

4.1 RESUMO

No Brasil as culturas do eucalipto e do pinus ocupam lugar de destaque, representando mais de 90% dos cultivos florestais. Para melhorar a rentabilidade a indústria florestal tem procurado alternativas visando reduzir os custos de produção, como o uso de lodo de esgoto, na composição de substratos para a produção de mudas, motivados pela alta concentração de nutrientes encontrados neste produto. Embora numerosos estudos, envolvendo os elementos da cadeia produtiva tenham contribuído para o desenvolvimento do setor florestal, melhorando a qualidade e a quantidade das mudas produzidas, ainda hoje, o manejo da irrigação em muitos viveiros florestais, é feita de forma empírica, aplicando-se água de forma demasiada. Assim se faz necessário conhecer os possíveis impactos que podem ser ocasionados às plantas devido ao excesso de irrigação quando associado ao uso do lodo de esgoto, motivando a realização do presente trabalho que teve como objetivos: avaliar o crescimento de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) cultivadas em substrato contendo lodo de esgoto e submetidas a diferentes lâminas de irrigação além de avaliar a eficiência do uso da água pelas mudas. O substrato utilizado era composto por 60% lodo de esgoto, proveniente da estação de tratamento de esgoto de Alegria-RJ, e 40% de vermiculita. As mudas foram submetidas a quatro lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura, sendo utilizados minilímetros para controlar a aplicação das lâminas. O crescimento foi avaliado por meio das seguintes variáveis: altura, H; diâmetro do coleto, DC; relação altura:diâmetro do coleto, RHDC; biomassa seca total, MST; e relação biomassa seca da parte aérea: biomassa seca das raízes, MSPA:MSR, e índices de qualidade de Dickson, IQD. O desenho experimental foi em blocos casualizados com repetições, sendo os três blocos formados pelas bancadas, contendo duas repetições por bloco. As variáveis foram submetidas a análises de variâncias com medidas repetidas (ANOVA-RM). Os resultados do experimento desenvolvido em casa de vegetação localizada no Horto Florestal do Jardim Botânico do Rio de Janeiro, mostraram que, para a cultura do eucalipto, apenas o DC apresentou diferença entre tratamentos, sendo que os menores níveis (100% e 200%) tiveram menores DC do que os maiores níveis (300% e 400%); as demais variáveis não apresentaram diferenças entre os níveis de irrigação. Para a cultura do pinus, tanto o DC quanto o RHDC, apresentaram diferenças significativas entre 200% e 300%, somente no período inicial. Os resultados de eficiência do uso da água (EUA) indicaram que o excesso de água aplicado pelos tratamentos superiores a 100% da evapotranspiração, não resultou em benefícios efetivos (ganho de massa) para as mudas de pinus e de eucalipto, representando desperdício de água e, evidenciam a importância do correto manejo da irrigação. A utilização de lodo de esgoto, na composição do substrato, mostrou-se viável, mantendo as variáveis de crescimento estudados (H, DC, RHDC, MST, MSPA:MSR e IQD) semelhantes àqueles observados na literatura, sendo uma alternativa interessante para a produção de mudas desde que respeitadas as normas ambientais vigentes.

PALAVRAS-CHAVE: Biossólidos. Ambiente Protegido. Lisímetro de Pesagem

4.2 ABSTRACT

In Brazil, the eucalyptus and pinus cultures occupy a prominent position, representing more than 90% of the forest crops. To improve profitability the forestry industry has been seeking alternatives to reduce production costs, as the use of sewage sludge, the composition of substrates for seedling production, motivated by the high concentration of nutrients found in this product. Although numerous studies involving the elements of the productive chain have contributed to the development of the forest sector, improving the quality and quantity of the seedlings produced, still today, the management of irrigation in many forest nurseries, is done empirically, applying excess water. Thus, it is necessary to know the possible impacts that can be caused to the plants due to the excess of irrigation when associated to the use of sewage sludge, motivating the accomplishment of the present work that had as objectives: to evaluate the growth of pine (*Pinus elliottii* var *elliottii* – **Engelm**) and eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*) cultivated in substrate containing sewage sludge and submitted to different irrigation depths in addition to evaluating the efficiency of the water use by the seedlings. The substrate used was composed of 60% sewage sludge from the Alegria-RJ sewage treatment plant, and 40% vermiculite. The seedlings were subjected to four water depths corresponding to 100%, 200%, 300% and 400% of evapotranspiration, mini-lysimeters being used to control the application of the levels. Growth was assessed using the following variables: height, H; stem diameter, DC; height:stem diameter ratio, RHDC; total dry biomass, MST; and dry matter of shoot: dry biomass of roots ratio, MSPA:MSR, and quality indexes of Dickson, IQD. The experimental design was in randomized blocks with repetitions, the three blocks being formed by the benches, containing two replicates per block. The variables were submitted to analysis of variances with repeated measures (ANOVA-RM). The results of the experiment carried out in greenhouse located in the Horto Florestal of the Botanical Garden of Rio de Janeiro showed that, for the eucalyptus crop, only the DC presented a difference between treatments, with the lowest levels (100% and 200%), had lower DC than the highest levels (300% and 400%); the other variables did not show differences between irrigation levels. For the pinus culture, both DC and RHDC presented significant differences between 200% and 300%, only in the initial period. The water use efficiency (USA) results indicated that the excess water applied by the treatments superior to 100% of the evapotranspiration, did not result in effective benefits (gain of mass) for the pine and eucalyptus seedlings, representing waste of water and, evidences the importance of the correct irrigation management. The use of sewage sludge in the substrate composition was feasible, maintaining the growth variables studied (H, DC, RHDC, MST, MSPA:MSR and IQD) similar to those observed in the literature, being an interesting alternative for the production of seedlings provided that the current environmental standards are respected.

KEYWORDS: Biosolids. Protected Environment. Lysimeter Weighing

4.3 INTRODUÇÃO

4.3.1 Culturas do pinus e do eucalipto no Brasil e na Argentina

A indústria madeireira, de acordo com FREITAG (2007), necessita de florestas altamente produtivas e que possam fornecer matéria-prima de qualidade, com propriedades uniformes, densidade, cor, e características tecnológicas que satisfaçam as exigências de mercados segundo cada produto obtido do desdobramento final.

Os cultivos florestais para fins industriais fornecem matéria-prima para diferentes segmentos. A área ocupada com árvores plantadas no Brasil é destinada aos segmentos de Celulose e Papel (34%), de Siderurgia e Carvão Vegetal (14%), de Painéis e Madeiras (6%), Investidores Institucionais (10%), Produtores Independentes (29%) e destinados às outras atividades (7%) (IBÁ, 2016).

De acordo com o relatório 2016 (Ano base 2015) pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), entidade que reúne cerca de 70 empresas e associações estaduais que representam segmentos do setor madeireiro além de produtores independentes, a área plantada com árvores no Brasil alcançou 7,8 milhões de hectares no ano de 2015, com aumento de 0,8 % em relação ao ano anterior. Dentre as espécies florestais cultivadas no país o eucalipto responde por 71,8% deste total, enquanto que o pinus representa 20,5%. O restante da área cultivada é dividido entre outras espécies como acácia, teca, seringueira e paricá (IBÁ, 2016).

O cultivo de eucalipto alcançou um total de 5,6 milhões de hectares, sendo que 67% da área são cultivadas nos estados de Minas Gerais (1,34 milhão de hectare), São Paulo (952 mil hectares), Mato Grosso do Sul (840 mil hectares) e Bahia (616 mil hectares). Em relação ao pinus que possui uma área total de 1,6 milhão de hectares, os estados do Paraná e Santa Catarina são os maiores produtores possuindo juntos 77% da área plantada, tendo o Paraná uma área de 672 mil hectares e Santa Catarina área de 544 mil hectares (IBÁ, 2016).

De acordo com a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS) as principais razões que tornam o gênero *Eucalyptus* o mais plantado no Brasil são a fácil adaptação a vários tipos de solos e clima, a elevada produtividade e, ainda, a possibilidade de utilização da madeira para os mais variados fins, como celulose e papel, óleos essenciais, produtos de higiene e limpeza, móveis, construção civil, postes, mourões, chapas de fibras, laminados, compensados, MDF, carvão e lenha (VALVERDE et al., 2012).

Os dois gêneros florestais, *Eucalyptus* e *Pinus*, foram os que melhor responderam, em termos de produtividade, no que diz respeito às características edafoclimáticas do país. Este lugar de destaque foi conseguido graças aos avanços das pesquisas, principalmente na eucaliptocultura, multiplicando de forma expressiva as plantações, substituindo velhos plantios, inclusive do próprio pinus (VALVERDE et al., 2012).

De acordo com dados da Dirección de Producción Forestal (DPF) do Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) a Argentina possui cerca de 1,18 milhão de hectares de florestas cultivadas (plantadas) predominando as florestas de pinus (*Pinus sp.*), eucaliptos (*Eucalyptus sp.*), sauces (*salix sp.*) e álamos (*Populus sp.*) dos quais 79% se encontram na região da Mesopotâmia (províncias de Misiones, Corrientes e Entre Rios) (MAGyP, 2016). Segundo o MAGyP (2016) cerca de 65,7% dos plantios florestais correspondem às espécies coníferas, fundamentalmente, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* e em menor quantidade espécies como *Araucaria angustifolia* e *Pinus ponderosa*. A espécie eucalipto responde por 21,5% da área plantada, sendo preponderante o cultivo de *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus saligna*, em menor quantidade estão os cultivos de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus tereticornis*, *Eucalyptus viminalis* e o *Eucalyptus globulus*. As salicáceas e os álamos representam 8,3%

dos plantios florestais e os 4,5% restantes são cultivados por outras espécies latifoliadas como *Grevillea sp.*, *Paulownia sp.*, *Melia sp.*, *Robinia sp.*, *Prosopis sp.* e *Toona sp.*. Nas províncias de Corrientes e Entre Rios estão localizados 84% das áreas cultivadas por eucaliptos, somando 213 mil hectares. Em relação ao pinus as províncias de Misiones e Corrientes possuem, juntas, uma área cultivada de, aproximadamente, 619 mil hectares, representando 79,6% da área total.

Na Argentina, o governo tem incentivado projetos visando incrementar o setor florestal; conforme o relatório do Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2016), num período de vinte anos, de 1993 a 2012, a indústria florestal aumentou cerca de 150% as extrações de madeira em florestas cultivadas, passando de 4,5 para 11,4 milhões de toneladas/ano, visando, principalmente, atender a demanda das indústrias de Papel e Celulose locais.

De acordo com PUJATO (1998), na região da Mesopotâmia Argentina, nos cultivos realizados por pequenos e médios produtores florestais, a espécie predominante é o *Eucalyptus grandis* (entre 90 e 95 %) sendo cultivados, em menores proporções, outras espécies de Eucalipto e de Pinus (geralmente o *Pinus elliottii*); Também são utilizadas, na região, como cortinas florestais protetoras de plantação de citrus, as espécies *Pinus elliottii* e *P. taeda*; *Eucalyptus grandis* e *Casuarina cunninghamiana*.

Para se ter uma floresta de boa qualidade e que atenda às necessidades, sejam industriais e/ou ambientais, é preciso que se tenham mudas sadias e bem desenvolvidas. A qualidade das mudas garante a minimização dos custos do reflorestamento, enquanto que as mudas de baixa qualidade incrementam os custos devido à adoção de medidas adicionais de tratamento em função da baixa sobrevivência no campo (FREITAG, 2007).

4.3.2 Produção de mudas

Para a produção de mudas com um padrão de qualidade satisfatório, que garanta condições de estabelecimento no campo após o plantio, é necessária uma combinação dos elementos envolvidos na cadeia produtiva que visam alcançar tal resultado.

De acordo com FREITAS e KLEIN (1993) os problemas relacionados com a produção de mudas nos viveiros refletem diretamente no campo, ocasionando mortalidade nos primeiros anos da implantação, podendo acarretar perdas de até 15% nos dois primeiros anos e de 20% até aos sete anos.

A sofisticação das técnicas utilizadas visa à obtenção de um padrão de qualidade adequado das mudas a serem produzidas e conseqüentemente, aumento da produtividade do povoamento florestal. Assim pesquisadores têm procurado definir as melhores metodologias, recipientes, substratos e fertilizações para a produção de mudas florestais que apresentam altas taxas de sobrevivência e desempenho após o plantio (ELOY et al., 2013).

Na literatura são encontrados numerosos estudos, envolvendo os elementos da cadeia produtiva, que têm contribuído para o desenvolvimento do setor florestal, melhorando a qualidade e a quantidade de mudas produzidas. Estudos envolvendo sementes com maior poder de germinação e maior tolerância ao deficit hídrico (MARTINS et al., 2014); uso de recipientes que podem ser reutilizados, ou que são biodegradáveis, produzidos a partir de fibras naturais, permanecendo com a muda após o plantio (ARTHUR JÚNIOR, 2011); controles climáticos das áreas de produção, por meio de computadores, mantendo temperatura e umidade dentro das condições ideais para o crescimento das plantas; podem ser citados como exemplos destes estudos.

A redução de custos por meio da melhoria dos processos tem sido constantemente buscados nos ambientes de produção, exigindo incessantes pesquisas, objetivando superar os limites quantitativos e qualitativos já alcançados. Desta forma, novos desafios surgem à

medida que avanços são obtidos em determinadas áreas do conhecimento, não sendo diferente na cadeia produtiva de mudas florestais.

No caso dos substratos, onde as mudas são cultivadas, de acordo com WENDLING et al. (2002), o tipo e a qualidade do substrato são fatores que condicionam de forma limitante os padrões de qualidade das mudas no viveiro. Assim, a busca por materiais de baixo custo ao produtor, com qualidade que satisfaçam as exigências nutricionais e de crescimento das mudas, e com disponibilidade, é importante e se faz necessário.

4.3.3 Irrigação de mudas em viveiros

A necessidade de produzir mudas em áreas bem definidas com características específicas e controladas, segundo GOMES et al. (2002), deve-se ao fato de estas serem geralmente frágeis, necessitando de proteção inicial e de manejos especiais, obtendo maior uniformização de crescimento, tanto em altura quanto em sistema radicular. Quando as mudas atingem tamanho adequado, é suprimida a adubação ao mesmo tempo em que é reduzida a irrigação, conduzindo à rustificação. Esse procedimento permite que as mudas resistam, após o plantio, às condições adversas encontradas a campo, estimulando sobrevivência e crescimento satisfatórios.

Com intuito de atender as exigências qualitativas no crescimento das mudas, há a necessidade do emprego conjunto de técnicas e tecnologias, desenvolvidas para cada condição específica de produção. O viveiro de produção de mudas florestais é o setor base dentro do processo produtivo, pois é responsável pelo abastecimento de mudas para implantação de povoamentos florestais, recuperação de áreas degradadas, arborização urbana e parques, entre outros fins, sendo o local onde os conhecimentos serão aplicados (WALKER et al., 2011).

Dentre as diversas técnicas aplicadas na cadeia produtiva de mudas, a irrigação em viveiros florestais foi, segundo SILVA e SIMÕES (2011), por muito tempo, deixada em segundo plano e o excesso de água aplicada, resultado de manejos empíricos realizado pelos viveiristas, ocasionou desperdício do recurso e problemas na qualidade das mudas. Historicamente, a irrigação nos viveiros florestais sempre foi excessiva, pois perder mudas por déficit hídrico nunca foi tolerado pelos técnicos responsáveis pela produção. Se no passado esta atitude pode ter sido considerada compreensível, nos dias atuais não se justifica mais este manejo inapropriado, devendo, portanto, avançar nas pesquisas em irrigação de mudas florestais.

4.3.3.1 Fatores que influenciam a irrigação de mudas

A quantidade de água necessária para produzir espécies florestais em recipiente segundo LANDIS (2000), depende de muitos fatores, como o clima, o tipo de estrutura, o tipo de irrigação, o substrato e as características de cada planta. Para Ferrari (2003) apud RODRIGUES (2007), a quantidade de água a ser aplicada depende da época do ano, do tipo de substrato e da embalagem utilizada, sendo que, no caso de tubetes, no verão, os autores recomendam que a aplicação de água não deva ultrapassar 13 mm d⁻¹.

Para LOPES et al. (2007), irrigar com eficiência em recipientes pequenos, como os tubetes utilizados em viveiros, chega a ser um grande desafio, pois, os tubetes apresentam particularidades quando comparados com o cultivo em solos, devido ao baixo volume de substrato disponível para a planta, sendo que, para os autores, a frequência e o volume de água devem ser determinados conforme o substrato utilizado.

De acordo com FREITAG et al. (2012), para as sementeiras ou canteiros em germinação, as regas devem ser frequentes até as mudas atingirem uma altura aproximada de cinco centímetros (folhas formadas), sendo os melhores horários pela manhã ou no período

final da tarde. A irrigação no início das manhãs é recomendável em épocas e em locais frios, para desmanchar o gelo formado por geadas.

O estágio de desenvolvimento das mudas é outro fator determinante na forma e na quantidade de água à ser aplicada. Tendo em vista que, em cada etapa de desenvolvimento das mudas existem peculiaridades, segundo RODRIGUES (2007), diferentes sistemas de irrigação são utilizados em razão da etapa do processo de produção.

RODRIGUES (2007) cita que o processo de produção de mudas passa pelas seguintes instalações: Minijardim Clonal, onde as matrizes selecionadas são plantadas para a produção de mini-estacas; Galpão de Estaqueamento; Casas de Vegetação, onde permanecem em temperatura e umidade favoráveis ao enraizamento; Casas de Sombra, onde as mudas iniciam processo de aclimação; e Pátios de Crescimento e de Rustificação, onde ocorre o desenvolvimento da parte aérea das mudas sendo preparadas fisiologicamente para o plantio. De acordo com o autor, no Minijardim Clonal é utilizada a irrigação e a fertirrigação por gotejamento. No Galpão de Estaqueamento e nas Casas de Vegetação é realizada a nebulização, enquanto nas Casas de Sombra e nos Pátios de Crescimento e de Rustificação a irrigação é feita por aspersão convencional (aspersores de baixa vazão).

As formas de irrigação verificadas por SILVA et al. (2008) por meio de questionário às empresas associadas ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF) corroboram, de certa forma, com aqueles observados por RODRIGUES (2007). De acordo com as respostas obtidas, os autores constataram que as formas de irrigação mais utilizadas em Minijardins Clonais são sub-irrigação, gotejamento e sistemas por aspersão; nas Casas de Vegetação as formas utilizadas são: nebulização com “fogger” e barra e microaspersores. Nas Casas de Sombra as formas foram “mini-aspersão” e aspersão; e nos Pátios de Crescimento e de Rustificação, a aspersão, barra móvel e sub-irrigação.

De acordo com RODRIGUES (2007), nos Pátios de Crescimento e de Rustificação as perdas ocorrem basicamente por percolação e irrigação de áreas livres (corredor e cabeceiras). Durante avaliação o autor constatou que os corredores correspondem a 40% da área irrigada, e dos 60% que atingiam o canteiro, aproximadamente, 70% era perdido por percolação.

DUMROESE et al. (1995) citam que em um estudo feito em viveiro de reflorestamento com mudas de *Pinus ponderosa* e de *Pinus monticola* cerca de 12,5% do volume de água aspergido pela irrigação era aplicado diretamente sobre pisos, paredes; e aproximadamente, 49% e 72% da água efetivamente aplicada sobre as mudas foram perdidas, pelos *Pinus ponderosa* e pelo *Pinus monticola*, respectivamente. Os autores ressaltam que, em função da produção em viveiros e casas de vegetação, utilizar maiores taxas de fertilização que em outras culturas, a água perdida pode conter quantidade significativa de fertilizante não utilizado e este se transformar em uma fonte potencial de poluição da água subsuperficial e superficial.

Na estimativa do desempenho da irrigação em viveiros, SALVADOR (2010) cita que, pode-se utilizar três indicadores: a quantidade de água que se mantém retida no substrato imediatamente após a irrigação, a quantidade de água colocada dentro do recipiente de cultivo em relação à quantidade que cai entre os recipientes de cultivo e a uniformidade de distribuição da aplicação.

Apesar de essencial no processo de produção de mudas, o manejo de água, na maioria das vezes, é realizado de forma empírica, reduzindo o potencial de produtividade e favorecendo o surgimento de doenças, além do desperdício de água, energia e nutrientes (RODRIGUES, 2007). Entretanto, ainda hoje, na maioria dos viveiros florestais brasileiros o manejo hídrico (lâmina bruta de água e frequência da irrigação) é determinado apenas por meio do exame visual das mudas (SILVA, 2013).

Uma forma de reduzir a necessidade de altas frequências de irrigação, sem alterar o

volume dos recipientes, consiste em aumentar a capacidade de retenção de água dos substratos. Esse aumento pode ser conseguido por meio da substituição do substrato por outro que apresente maior capacidade de retenção de água ou pela adição de polímeros hidroabsorventes (hidrorretentores ou hidrogéis) (RODRIGUES, 2007).

Segundo FERNANDES (2011), as regas no viveiro devem ser abundantes e espaçadas para permitir que o substrato seque nos intervalos, até próximo do ponto de murchamento, principalmente na etapa de rustificação. Nessas condições, apresentará sistema radicular bem desenvolvido e conseqüentemente maior probabilidade de sobrevivência em campo.

4.3.4 Sistemas de irrigação em viveiros

Segundo AUGUSTO et al. (2007), a microaspersão é o sistema de irrigação mais usual em viveiros, sistema que gera grandes desperdícios em razão de fatores como vento, espaços vazios e má distribuição dos aspersores em relação às mudas, e a sub-irrigação apresenta-se como alternativa para a economia de água, sendo propício no aproveitamento da água residuária reduzindo riscos de contaminação humana e ambiental.

O governo brasileiro instituiu por meio da Lei 10.711 de 05 de agosto de 2003, o Registro Nacional de Sementes e Mudanças (RENASSEM), sob atribuição do Ministério da Agricultura a fiscalização da produção e comercialização de sementes e mudas, visando garantir a qualidade ao consumidor. A partir deste cadastro, diversos estados realizaram diagnósticos sobre os viveiros existentes em seus territórios. Alguns estados, nos levantamentos realizados, não restringiram as informações às quantidades e variedades produzidas pelos viveiros, obtendo outros dados relacionados à produção das mudas.

No estado de São Paulo, o diagnóstico dos produtores de mudas florestais, realizado pela Secretaria de Meio Ambiente, concluído em 2011, aponta que dos 211 viveiros identificados, 64% possuem sistema de irrigação automatizada. Embora o diagnóstico não descreva o tipo de irrigação utilizada pelos viveiros, o fato de que apenas 7 (3%) não possuem nenhum tipo de irrigação, demonstra que o uso desta ferramenta está bastante difundida no processo produtivo de mudas florestais (MARTINS, 2011)

No Rio de Janeiro, diagnóstico feito pela Secretaria de Estado do Ambiente no ano de 2010, indicou que dos 70 viveiros identificados 91% possuíam sistema de irrigação por aspersão, sendo 51% automatizado. As águas utilizadas por estes viveiros eram provenientes, principalmente, de nascentes existentes na propriedade (32%) e de poços construídos (27%) (SEA, 2010).

GONÇALVES et al. (2004) realizaram diagnóstico dos viveiros florestais (espécies nativas) para o estado de Minas Gerais, e identificaram que em torno de 60% possuíam sistemas de irrigação por aspersão, sendo que 24,5% das instalações utilizavam apenas aspersão, e os 35,5% restantes, utilizavam além da aspersão, mangueiras e/ou regadores.

De acordo com Almeida et al. (2007) apud TORRES (2012), estudos relatam que 8% dos viveiros florestais do Estado do Espírito Santo e da Bahia realizam a irrigação com uso de regadores, 20% utilizam mangueiras para realizar a irrigação das mudas, 58% são irrigados via sistema de aspersão com controle mecânico e 14% possuem sistema de irrigação por aspersão de controle eletrônico. Os números apresentados nos diagnósticos regionais corroboram com a afirmação de AUGUSTO et al. (2007), e ressaltam a importância de monitoramento da quantidade de água a ser aplicada, tendo em consideração as possibilidades de perdas existentes com esta forma de aplicação.

4.3.5 Evapotranspiração de mudas de pinus e de eucalipto

Estudando o crescimento de mudas de *Pinus oocarpa* Schiede, em diferentes

condições hídricas e de adubação, SILVA (2007) constatou que a evapotranspiração das mudas ao longo do experimento ocorreu em uma faixa de 0,9 mm a 5,2 mm d⁻¹, com média superior no mês de janeiro, por ser nesse período os maiores valores de temperatura máxima interna obtida na casa de vegetação. O autor observou em seu trabalho um dos principais problemas encontrados na produção de mudas de pinus que é a lâmina excessiva de água provocando a morte de raízes. O gênero pinus não tolera o excesso hídrico por possuir um sistema radicular deficiente e as mudas não transpirarem o suficiente para absorver o excesso de água e adubação.

Em experimento que estudou a otimização do uso da água na produção de mudas clonais de eucalipto, OLIVEIRA (2012) observou que os valores de evapotranspiração (ET) na fase de enraizamento variaram entre 0,11 e 4,53 mm d⁻¹. Comparando as lâminas de água aplicadas, pelo método convencional (empírico, baseado na observação) e pelo método otimizado (por meio do balanço de água com uso da ET), observou-se uma economia hídrica de 12%, aproximadamente, sendo consumidos em média, com o manejo convencional, 3,24 mm d⁻¹, e com o manejo otimizado, 2,86 mm d⁻¹. Já na fase de aclimatação, os resultados indicaram uma economia hídrica de 60,3%, sendo que no manejo convencional o consumo foi de 10,83 mm d⁻¹ e, no otimizado, o consumo foi de 4,30 mm d⁻¹. Na fase de crescimento, os resultados apontaram uma economia hídrica de 25,6%, sendo consumidas 14,4 mm d⁻¹ pelo método convencional e 10,74 mm d⁻¹ pelo método otimizado. Finalmente, na fase de rustificação, os resultados apontaram uma economia hídrica de 30,6%, com consumo pelo método convencional de 11,6 mm d⁻¹ e pelo método otimizado de 8,0 mm d⁻¹.

Estudando a formação de mudas de eucalipto, cultivados em substratos constituídos de lixo orgânico, e com a utilização de quatro diferentes níveis de irrigação (50%, 75%, 100% e 130% da evapotranspiração) calculados com auxílio de dois métodos (tanque classe A, TCA; e de pesagem, PS), GALBIALTTI et al. (2007) observaram que, ao nível de 100% da ET, as lâminas totais de água, aplicadas num período de 47 dias, pelo método PS, que mostrou ser melhor que o TCA, foi de 443,7 mm, equivalente a uma lâmina de irrigação diária de 9,4 mm.

Em trabalho visando determinar a água facilmente disponível para mudas de eucalipto em condições de viveiro, desenvolvido no estado do Espírito Santo, TORRES (2012) observou um valor médio diário da evapotranspiração de 3,21 mm, durante um período de 60 dias (de 42 à 102 dias após a germinação) entre junho e setembro.

RODRIGUES (2007) analisou o consumo de água em um minijardim clonal de eucalipto, onde eram realizadas, diariamente, cinco fertirrigações. De acordo com os dados, o autor constatou uma aplicação média, por canaletão, de 500 L d⁻¹; e considerando as medidas do canaletão, calculou consumo médio, entre evapotranspiração e percolação, de 12,5 mm d⁻¹, sendo verificado que, em média, 40% deste consumo foram perdidos pela drenagem, resultando em uma evapotranspiração média de 7,5 mm d⁻¹.

Em estudo realizado sobre o manejo hídrico em viveiros florestais no Uruguai, SILVA e SIMÕES (2011), observaram que na produção de mudas de *Eucalyptus* spp, aplicou-se, via gotejamento, uma lâmina média diária de 9,7 mm no minijardim clonal, sendo que o saldo médio, diferença do que foi utilizado na irrigação e o que foi coletado nos drenos, foi de 7,2 mm, valor próximo aos de evapotranspiração obtidos no minilímetro. Nas casas de enraizamento, onde o sistema era acionado pelo operador baseado em sua percepção das condições microclimáticas, houve grande variação (cerca de 47%) na lâmina aplicada nos diferentes ambientes, sendo a lâmina média observada de 2,3 mm. Segundo os autores os valores obtidos nas casas de enraizamento são condizentes com o sistema de irrigação (microaspersão), com o ambiente em questão e com a fase de desenvolvimento da planta. No entanto foi observada uma alta umidade dos substratos, nos quais continham em média 30,3 g de água por tubete. Em relação às casas de crescimento, também foi observado uma grande variação das lâminas de água aplicadas pela irrigação, com o uso de barras com

microaspersores. A lâmina média foi de 14,2 mm, variando de 8,1 a 22,9 mm, o que demonstra que o critério utilizado pelo operador não é coerente. A drenagem média observada nas casas de crescimento foi de 8,8 mm, resultando num saldo médio de 5,4 mm, considerando que a capacidade de retenção do substrato utilizado era de 5,8 mm, na média, houve desperdício de água pela aplicação de valores superiores a este.

O manejo da irrigação é um dos principais problemas relacionados aos desperdícios de água observados na produção de mudas. FERNANDES (2011) avaliou, em minijardins clonais de eucalipto, os efeitos da aplicação de diferentes níveis de irrigação (50%, 75%, 100%, 125% e 150% da ETo) em relação aos efeitos da aplicação de uma lâmina padrão (10,66 mm d⁻¹) utilizada pela empresa. As lâminas diárias foram calculadas por intermédio de um tanque classe A (instalado no interior da estrutura), e com o uso de coeficiente da cultura (Kc) igual a 1,0. O autor verificou que a aplicação da lâmina padrão resultou nos piores resultados de produção (miniestaca/minicepa/semana). As lâminas médias calculadas foram de 1,46 mm (50%), 2,19 mm (75%), 2,92 mm (100%), 3,65 mm (125%) e de 4,38 mm (150%), bem abaixo do valor padrão adotado pela empresa (10,66 mm). O autor ressalta que a aplicação da lâmina padrão gerou um gasto 5 vezes maior de nutrientes quando comparado à menor lâmina (1,46 mm) e, mesmo assim, teve uma produção 40% menor em relação à referida lâmina (50% da ETo). Outro dado observado se refere à umidade do substrato; mesmo com uma aplicação de água equivalente a somente 15% da lâmina padrão, o substrato que teve aplicação de uma lâmina menor, manteve umidade acima dos 15%, enquanto que a lâmina padrão manteve o substrato próximo aos 20% de umidade, sendo estes valores muito próximos e dentro da faixa considerada satisfatória pelo autor.

FERNANDES (2011) verificou também que, para as lâminas iguais a 3,65 mm d⁻¹, 4,38 mm d⁻¹ e 2,92 mm d⁻¹, a quantidade de nutrientes perdidos foi equivalente a, aproximadamente, 59%, 62% e 46%, respectivamente. Estes resultados demonstraram que quanto maior a lâmina aplicada, maior a lixiviação da solução e, conseqüentemente, maior a perda de nutrientes e água, maior gasto de energia elétrica, além dos riscos de danos ambientais, como contaminação do solo e do lençol freático.

Estudando a disponibilidade hídrica na produção de mudas clonais de eucalipto, RAMOS (2012) cita que as lâminas de irrigação operacionais utilizados nas unidades da FIBRIA Celulose S.A., nas unidades de Aracruz (ES) e Jacareí (SP), variam de acordo com as fases do processo de produção das mudas, em dias de sol e dias nublados. As médias diárias variam de 4 a 5 mm (sol) e 2 a 3 mm (nublado) na fase de enraizamento; de 5 a 6 mm (sol) e 2 a 4 mm (nublado) na fase de aclimação; de 6 a 7 mm (sol) e 4 a 5 mm (nublado) na fase de crescimento, e de 7 a 9 mm (sol) e 5 a 6 mm (nublado) na fase de rustificação.

Segundo RODRIGUES (2007), dependendo do manejo adotado, o consumo de água em um viveiro florestal pode variar de 35 a 49 mm d⁻¹ por milheiro de mudas, sendo que 70% do consumo total são destinados às áreas de crescimento e rustificação. Porém, em um estudo preliminar (dados não publicados) sobre o consumo de água, realizado em oito viveiros clonais de eucalipto do país, foi constatada uma maior variação entre 9 a 38 mm d⁻¹ por milheiros de mudas.

Em experimento realizado para avaliar a qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob cinco diferentes lâminas de irrigação diária (6, 8, 10, 12 e 14 mm) e dois tipos de substratos comerciais constituídos de casca de pinus e vermiculita, somente (CPV) e acrescidos de carvão e turfa (CATV), LOPES et al. (2007) concluíram que as lâminas de irrigação brutas de 12 e de 14 mm d⁻¹ foram as que mais contribuíram para o desenvolvimento das mudas de *E. grandis* com ótima qualidade aos 108 DAS. De acordo com os resultados obtidos pelo autor, e tendo como referência os valores de altura da parte aérea (HPA) e diâmetro do colo (DC), citados na literatura, o ciclo vegetativo da cultura poderia ter sido menor (90 DAS), representando importantes economias, com uma lâmina bruta de 10 mm d⁻¹.

O parâmetro relação altura da planta/diâmetro do coleto (RHDC), que exprime a qualidade das mudas em qualquer estágio do seu desenvolvimento, e que conforme a literatura deve ter valores entre 5,4 e 8,1 mm, foi obtido com lâminas de 8 mm, sendo que com lâminas de 12 e 14 mm, os valores foram semelhantes aos observados por TRIGUEIRO e GUERRINI (2003).

LOPES et al. (2009) conduzindo experimento com mudas de clones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla*) cultivadas em dois tipos de substratos, comercial Plantmax (PLX) e casca de arroz carbonizada com vermiculita (CAC), irrigadas por subsuperfície (sub-irrigação) até atingir a condição de capacidade de campo, testaram cinco frequências de irrigação, sendo: uma vez ao dia (F1), duas vezes ao dia (F2), três vezes ao dia (F3), quatro vezes ao dia (F4), e de forma contínua (FD), observou os que o substrato PLX teve uma lâmina média bruta de água de 3,90; 5,00; 6,30; 7,40 e 5,40 mm, respectivamente, para as frequências F1, F2, F3, F4 e FD, enquanto que o substrato CAC consumiu para as mesmas frequências 3,50; 5,50; 7,40; 8,50 e 6,30 mm de água, respectivamente.

BAZZO (2009), avaliando a aplicação de diferentes lâminas de água, calculadas de acordo com a capacidade de campo de cada substrato, variando de 8 a 12 mm, em substratos compostos por lodo de esgoto e casca de arroz, concluiu que nesta condição o desenvolvimento das mudas não foi influenciado pelas lâminas aplicadas, evidenciado o fato que a lâmina necessária para uma cultura esta fortemente associada ao tipo de substrato utilizado.

Além disso, outros fatores devem ser relevados: a água utilizada em viveiros comerciais geralmente é limpa e, muitas vezes, potável; o desperdício causado pelo sistema de aspersão se tornará inaceitável em função da escassez deste recurso prevista para o futuro.

4.3.6 Efeito do excesso de água no crescimento de plantas

De acordo com CAMPOS (1970) o processo de crescimento de plantas pode ser afetado por fatores classificados em quatro grupos: climáticos (radiação, água, temperatura, etc.), edáficos (solo- material de origem e suas propriedades físicas e químicas), fisiográficos (geografia local) e bióticos (ação de animais e plantas). Em relação a água, o autor ressalta que o crescimento não é diretamente controlado pela umidade do solo, mas sim pelo balanço de água na planta, sendo esta influenciada pela razão relativa da absorção e transpiração. Porém estes dois processos são afetados pela umidade do solo e pelas condições atmosféricas.

Embora o estresse hídrico causado pela baixa umidade do solo seja, normalmente, mais observado do que o estresse devido a alta umidade (excesso de água), ambos podem afetar a fotossíntese, a respiração e a transpiração simultaneamente (BRADFORD e HSIAO, 1982; GHOLZ et al., 1990).

O principal problema relacionado ao excesso de água é a deficiência de oxigênio (AKHTAR e NAZIR, 2013; BRADFORD e HSIAO, 1982; CAMPOS, 1970; FARIFR e ABOGLILA, 2015; GHOLZ et al., 1990; e KANWAR et al.; 1988,). A maioria das culturas, na respiração, realiza trocas gasosas na zona radicular, sendo que as raízes das plantas absorvem oxigênio presente nos poros do solo e liberam dióxido de carbono.

A redução de oxigênio devido ao excesso de água, segundo AKHTAR e NAZIR (2013), levam as plantas a apresentarem murchamento, mesmo estando em ambientes com excesso de água, afetando a absorção de nutriente e de água. O excesso de água gera uma condição de hipoxia (baixas concentrações de oxigênio) nos solos, devido à baixa solubilidade do oxigênio na água, ou de Anoxia (falta total de oxigênio). De acordo com os autores, plantas submetidas ao estresse hídrico, devido a falta ou excesso de água, apresentam crescimento reduzido, baixa área foliar específica, fotossíntese reduzida, fechamento estomático, diminuição da respiração e redução na produção de biomassa.

O fechamento estomático bloqueia o influxo de CO₂ para as folhas, afetando o

acúmulo de fotoassimilados, podendo levar a paralisação de crescimento das plantas e perda de produtividade (FARIFR e ABOGLILA, 2015; GHOLZ et al., 1990).

BRADFORD e HSIAO (1982) sugerem três possibilidades que podem motivar o fechamento dos estômatos: (a) que as raízes encharcadas exportam algum fator inibidor da abertura estomática; (b) que as raízes encharcadas de água não conseguem exportar quantidades suficientes de algum fator normalmente presente na seiva do xilema que promove a abertura estomática; e (c) que uma redução no transporte de floema para as raízes anaeróbicas leva a uma acumulação de assimilados ou reguladores de crescimento nas folhas que causam o fechamento estomático.

A redução na condutividade hidráulica em toda a planta, sob condições de inundação do solo, está provavelmente ligado à inibição do transporte de água pelas aquaporinas, embora ainda faltem estudos em profundidade sobre o efeito da aquaporina sobre a regulação da água da planta inteira durante a inundação do solo. A redução do movimento radial da água pode, em parte, ser explicada pela presença de gradientes de oxigênio na seção transversal no tecido radicular, existindo evidências claras de que, em solos inundados, existe um gradiente de O₂ entre o estelo, que pode estar em condições anóxicas, e as células corticais que podem estar apenas sob condições hipóxicas. Assim, essas diferenças no microambiente de tecido também podem contribuir para diferenças transversais nos níveis de energia celular e subsequentes diminuições na condutividade hidráulica da raiz (PARENT et al., 2008).

De acordo com FARIFR e ABOGLILA (2015) a tolerância ao excesso de água varia muito conforme as espécies de plantas e genótipo, porta-enxertos, idade das plantas, tempo e duração da exposição ao excesso de água (alagamento) e condição do alagamento. Os autores citam que em mudas com seis semanas de idade (42 dias) e com 22 meses, submetidas a solos saturados, foram observados fechamentos estomáticos por períodos de 30 e 62 dias respectivamente. Segundo CAMPOS (1970) árvores em locais com excesso de água podem absorver menos água que em solo seco, diminuindo o crescimento.

Nos solos com excesso de água, a deficiência de oxigênio restringe severamente a respiração das plantas, o que afeta diretamente o crescimento das raízes e sua capacidade de absorver nutrientes (KANWAR et al., 1988). Analisando o comportamento estomático de plantas de tomates submetidas a condições de alagamento, BRADFORD e HSIAO (1982) verificaram que o peso das raízes aumentou de forma constante nas plantas de controle, mas diminuiu nas plantas inundadas devido à deterioração e perda da maioria das raízes menores.

De acordo com Durbin (1971) apud SILVA et al. (2006) as maiores tendências nas raízes formadas sob condições de excesso de água são: aumentar o diâmetro; reduzir os pelos de absorção; ramificar e encurtar as raízes; aumentar o número e a dimensão dos espaços intercelulares; diminuir o tamanho da célula com o aumento da suberização e da lignificação da parede e reduzir o peso da raiz, o que contribui para a diminuição da razão raiz /copa.

4.3.7 Parâmetros de avaliação da qualidade das mudas

De acordo com GOMES et al. (2002), embora o êxito das plantações florestais dependam, em grande parte, das mudas utilizadas, a escolha dos parâmetros que avaliam a sua qualidade ainda não está definida e, quase sempre, a sua mensuração não é operacional na maioria dos viveiros.

Segundo NOVAES (1998), os parâmetros estudados para conceituar a qualidade de mudas são de duas naturezas: os morfológicos, que se baseiam nas características fenotípicas, e os fisiológicos, que possuem como base os aspectos “internos” das mudas. Como exemplo de parâmetros morfológicos o autor cita: altura e peso (fresco e seco) da parte aérea, diâmetro de colo, a relação entre a altura da parte aérea e o diâmetro de colo (entre outras relações que podem ser feitas), peso (fresco e seco) e comprimento das raízes, porcentagem de raízes,

ramificação, formação de folhas, quantidade de brotos, comprimento das folhas, entre outros. O autor cita que parâmetros fisiológicos estão relacionados com o funcionamento do organismo da planta, e podem ser avaliados por meio de nutrientes (quantidade necessária para cada planta, por exemplo), balanço hídrico (quantidade de água retirada do solo pela planta e perdida pela mesma) e capacidade de regeneração de raízes (através do seu potencial de crescimento), como exemplo.

Os parâmetros fisiológicos são de difícil mensuração e análise, principalmente nos viveiros florestais comerciais. Muitas vezes não permitem avaliar eficientemente a real capacidade de sobrevivência e crescimento inicial das mudas após plantio, contrariando as expectativas de qualquer empreendimento florestal (GOMES, 2001).

Os parâmetros morfológicos mais utilizados na determinação do padrão de qualidade de mudas de espécies arbóreas têm sido a altura da parte aérea (H), o diâmetro do coleto (DC), a biomassa seca total (MST), a biomassa seca da parte aérea (MSPA) e a biomassa seca das raízes (MSR). Algumas relações entre estes parâmetros têm sido usadas para avaliar a qualidade de mudas. Dentre estas, estão a relação da altura da parte aérea com o diâmetro do coleto (RHDC), a relação da altura da parte aérea com a biomassa seca da parte aérea (H:MSPA), a relação da biomassa seca da parte aérea com a biomassa seca das raízes (MSPA:MSR) e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), que leva em consideração a produção de matéria seca da parte aérea, das raízes e total, bem como a altura e o diâmetro do coleto das mudas (GOMES, 2001; CHAVES e PAIVA, 2004).

Autores como PAIVA e GOMES (1993) citam outros parâmetros como a rigidez da parte aérea e os aspectos nutricionais. Muitos destes parâmetros têm sido testados por meio de avaliação de sobrevivência e crescimento das mudas nas condições de campo, com resultados variados, mesmo em condições utilizando mudas de alto padrão de qualidade morfológica e plantada em locais extremamente favoráveis.

Segundo WENDLING et al. (2006) a classificação das mudas em termos de qualidade é de fundamental importância devido a melhor adaptação e crescimento daquelas com melhor padrão de qualidade no plantio definitivo. Os principais parâmetros considerados são: uniformidade de altura do lote de mudas; diâmetro do colo, rigidez da haste principal (diâmetro do colo), aspecto visual vigoroso (sintomas de deficiência, tonalidade das folhas,...), ausência de estiolamento, ausência de pragas e doenças, ausência de invasoras no substrato, sistema radicular e parte aérea bem desenvolvidas, e relação parte aérea/sistema radicular.

De acordo com BENINCASA (2003) o crescimento de uma planta pode ser estudado por meio de medidas de diferentes tipos, classificadas pela autora como lineares (altura da planta, comprimento das raízes, diâmetro do caule, etc.), superficiais (área foliar), volumétricas (volume de frutos), peso (matéria seca) e número de unidades estruturais (ramos, folhas, flores, número e distribuição de estômatos, etc.), sendo que os tipos de medidas a serem realizadas dependem de aspectos como: objetivo do experimentador, disponibilidade de material a ser estudado, disponibilidade de mão-de-obra, disponibilidade de tempo do experimentador ou da equipe e a disponibilidade de equipamentos específicos para executarem as medidas.

Segundo PEIXOTO (1995), basicamente, os parâmetros utilizados para medir o crescimento vegetal abordam a área foliar e matéria seca acumulada pela planta por representarem esses fatores a “fabrica” e o “produto final”, respectivamente. Na prática, as principais medidas são a biomassa seca total (MST) e a área foliar total (AF) da planta.

4.3.7.1 Altura da parte aérea

A altura da parte aérea (H), de acordo com PARVIAINEN (1981) é considerada como um dos parâmetros mais antigos na classificação e seleção de mudas, e continua apresentando

uma contribuição relativa importante, podendo ser indicada como um parâmetro para essa avaliação. Para REIS et al. (2008) a altura das mudas na ocasião do transplante exerce importante papel na sobrevivência e desenvolvimento nos primeiros anos após essa operação. No entanto, para MEXAL e LANDIS (1990) a altura da parte aérea é o maior critério de seleção na produção de mudas em viveiros, não sendo, no entanto, um bom prognóstico de sobrevivência delas no campo.

Há limites no crescimento em altura das mudas no viveiro, acima e abaixo dos quais o desempenho não é satisfatório. STURION et al. (2000) recomendam a retirada de mudas de eucalipto da casa de vegetação quando estas atingirem em torno de 15 a 25 cm de altura; estes valores estão dentro da faixa recomendada por GOMES et al. (1996), segundo os autores as características nas quais as empresas florestais se fundamentam para a classificação das mudas de eucaliptos são baseadas na altura média entre 15 e 30 cm.

No caso de mudas de pinus, CARNEIRO (1995) cita que *Pinus taeda* produzidas em raiz nua devem ser levadas a campo com altura entre 20 e 30 cm, valores semelhantes aos recomendados por ROSE et al. (1990), que estão na faixa de 20 a 25 cm. Estudando o crescimento e qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. submetidos à poda química, ROSSI et al. (2008) a altura, aos 240 dias após a semeadura, oscilou de 26,37 a 31,81 cm, de acordo com a dosagem de sulfato de cobre, e de 30,90 a 32,55 cm conforme a dosagem de oxicloreto de cobre.

CARNEIRO et al. (2007) estudando o efeito de cinco diferentes espaçamentos (2x2, 4x4, 6x6, 8x8 e 10x10 – cm x cm) no viveiro sob o crescimento de mudas em raiz nua de *Pinus taeda* L. aos sete meses após a semeadura não verificaram diferença significativa entre as alturas nos diferentes espaçamentos, variando as alturas 14,33 a 18,43 cm. Analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua cultivada em dois tipos de recipientes (tubete e bloco prensado), NOVAES et al. (2001) verificaram que, aos seis meses de idade, o uso de tubetes com diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) apresentou diferença significativa em relação à altura das mudas; as bandejas com 96 mudas apresentaram altura média de 11,51 cm enquanto que as bandejas com 48 mudas obtiveram altura média de 10,60 cm.

Estudando o efeito da densidade nas bandejas sobre o crescimento de mudas de eucalipto, com 55 dias após o estaqueamento, ATAÍDE et al. (2010), verificaram que o espaçamento contendo 88 mudas por bandeja (com capacidade para 156 unidades) apresentou médias superiores de H, variando de acordo com os clones de 20,68 a 22,11 cm. Os espaçamentos que continham 48 e 64 mudas por bandeja, apresentaram valores médios variando de 15,83 a 18,67 cm e de 18,47 a 19,80 cm, respectivamente.

Analisando o desenvolvimento biométrico de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus uroglobulus*) sob diferentes lâminas de irrigação (5, 9, 11, 14 e 15 mm), na fase de crescimento, SILVA et al. (2015) verificaram que ao final do ciclo, as duas menores lâminas aplicadas promoveram menor desenvolvimento em altura dos clones; sob a lâmina bruta de 11 mm d⁻¹, ambos os clones apresentaram altura entre 25 e 30 cm considerada como indicador para o plantio comercial, sendo 30,27 cm para o clone *urograndis* e 26,70 cm para o clone *uroglobulus*; nas demais lâminas somente o clone *urograndis* apresentou altura dentro do recomendado (27,40 cm e 29,13 cm, para as lâminas de 14 e 15 mm d⁻¹, respectivamente).

Em estudo sobre o efeito do tamanho do tubete associado a diferentes doses de fertilizantes (NPK) no crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis*, aos 60, 90 e 120 dias após a semeadura, GOMES et al. (2003) observaram diferença significativa na altura das mudas, em todas as idades e nos quatro volumes de tubetes utilizados (50, 110, 200 e 280 cm³). As alturas observadas variaram de 8,00 a 19,63 cm, aos 60 dias, de 16,43 a 43,66 cm, aos 90 dias e, de 21,62 a 55,01 cm aos 120 dias de idades.

De acordo com MEXAL e LANDIS (1990) a altura correlaciona-se claramente com o diâmetro das mudas, porém oferece pouca relação com os outros parâmetros como biomassa seca total, relação raiz/parte aérea ou a morfologia da raiz. Para os autores a altura é um atributo de crescimento enquanto que o diâmetro é um atributo de sobrevivência. Contraditoriamente, GOMES et al. (2002) verificaram que adoção da relação altura/biomassa seca da parte aérea deve ser considerada, pelo fato de terem sido parâmetros que apresentaram boa contribuição relativa ao padrão de qualidade das mudas de *Eucalyptus grandis* produzidas em diferentes tamanhos de tubetes.

4.3.7.2 Diâmetro do coleto

Para ROSE et al. (1990) o diâmetro do coleto (DC) está intimamente relacionado ao vigor das mudas, em partes devido à relação que este parâmetro tem com o tamanho do sistema radicular; além de que os caules com maiores diâmetros tendem a ter maiores gemas, que se desenvolverão para ser os primeiros brotos de crescimento após o plantio.

Para MEXAL e LANDIS (1990) o diâmetro do caule fornece uma previsão de sobrevivência do plantio, especialmente quando está associado à massa de raiz, e está correlacionada com o aumento de volume da árvore no longo prazo. De acordo com os autores o uso do diâmetro do coleto, junto à altura da parte aérea, a biomassa seca da raiz e da parte aérea, permite um bom prognóstico de sobrevivência no campo.

O diâmetro do colo como parâmetro mínimo de qualidade de mudas de *Pinus* sp. produzidas em recipientes, foi definido por PEZUTTI e CALDATO (2011) entre 2,5 e 3 mm. Diâmetros de colo acima de 3,7 mm são recomendados para o pinus conforme CARNEIRO (1995) e acima de 4,0 mm, para o *Pinus taeda* de acordo com ROSE et al. (1990).

Conforme Maclaren (1993) apud PEZUTTI e CALDATO (2011), para a produção de mudas de qualidade de raiz nua de *Pinus radiata*, o diâmetro do colo deve ter valores entre 6 e 12 mm. Para *Pinus palustris* RODRIGUEZ-TREJO e DURYEY (2003) destacam que um indicador de qualidade para mudas produzidas em recipientes é um diâmetro do colo da raiz maior ou igual a 4,4 mm e, para raiz nua, de pelo menos 10 mm.

Estudando o crescimento e qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. submetidos à poda química com sulfato de cobre e com oxiclreto de cobre, ROSSI et al. (2008) verificaram que o diâmetro oscilou de 3,28 a 3,75 mm, de acordo com a dosagem de sulfato de cobre e de 3,73 a 3,99 mm conforme a dosagem de oxiclreto de cobre.

Estudando o efeito de cinco diferentes espaçamentos no viveiro sob o crescimento de mudas em raiz nua de *Pinus taeda* L. aos sete meses após a semeadura CARNEIRO et al. (2007) verificaram diferença significativa entre os diâmetros nos diferentes espaçamentos estudados, sendo que os maiores espaçamentos (6x6, 8x8 e 10x10) apresentaram os maiores DC, sendo 3,63; 4,03 e 3,93 mm, respectivamente.

Analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua cultivada em dois tipos de recipientes (tubete e bloco prensado), NOVAES et al. (2001) verificaram que, aos seis meses de idade, o uso de tubetes com diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) não apresentaram diferença significativa em relação ao diâmetro do coleto; as bandejas com 96 mudas apresentaram DC médio de 1,66 mm enquanto que as bandejas com 48 mudas obtiveram DC médio de 1,61 mm.

STURION et al. (2000) recomendam que o diâmetro de colo de mudas de eucalipto seja de 2,5 mm, valor superior aos 2 mm utilizado pelas empresas florestais segundo GOMES et al. (1996). Em estudos para verificar o efeito da densidade nas bandejas sobre o crescimento de mudas de eucalipto, ATAÍDE et al. (2010) observaram que o espaçamento contendo 88 mudas por bandeja apresentou médias superiores de DC, variando de acordo com os clones de 2,04 a 2,43 mm. Os espaçamentos que continham 48 e 64 mudas por bandeja,

apresentaram médias variando de 1,93 a 2,20 mm e de 1,91 a 2,41 mm, respectivamente.

Analisando o desenvolvimento biométrico de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus uroglobulus*) sob diferentes lâminas de irrigação (5, 9, 11, 14 e 15 mm) SILVA et al. (2015) verificaram que, ao final do período de avaliação, não houve diferença significativa no DC dos clones *uroglobulus* sob as diferentes lâminas aplicadas, variando de 2,73 a 3,13 mm, enquanto que para o clone *urograndis* as lâminas de 11 e 14 mm d⁻¹, resultaram em DC de 4,20 e 4,38 mm, respectivamente.

GOMES et al. (2003) observaram diferença significativa no DC das mudas de *Eucalyptus grandis* cultivadas em quatro diferentes volumes de tubetes (50, 110, 200 e 280 cm³). Os diâmetros do coleto observados variaram de 4,0 a 12,5 mm, aos 60 dias, de 6,4 a 17,9 mm, aos 90 dias e, de 7,9 a 41,6 mm aos 120 dias de idades.

4.3.7.3 Relação altura:diâmetro do coleto

Segundo STURION e ANTUNES (2000) a relação altura:diâmetro do colo (RHDC) constitui um dos parâmetros usados para avaliar a qualidade de mudas florestais, pois, além de refletir o acúmulo de reservas, assegura maior resistência e melhor fixação no solo. De acordo com os autores o baixo diâmetro do colo pode dificultar as mudas de se manterem eretas após o plantio, e o conseqüente tombamento pode resultar em morte. As mudas com maior diâmetro do colo e menor altura são consideradas de qualidade superior às que apresentam diâmetro do colo pequeno e alturas elevadas.

De acordo com CARNEIRO (1995) a altura da parte aérea combinada com o diâmetro do coleto constitui um dos mais importantes parâmetros morfológicos para estimar o crescimento das mudas após o plantio definitivo no campo, exprimindo o equilíbrio de crescimento em apenas um índice.

Segundo NOVAES (1998) a relação HDC, deve-se situar entre os limites de 5,4 e 8,1 em qualquer fase de produção das mudas de pinus, representando um equilibrado desenvolvimento da parte aérea, evidenciando os valores ótimos de diâmetro conforme a altura da muda. CARNEIRO et al. (2007) estudando o efeito de cinco diferentes espaçamentos no viveiro sob o crescimento de mudas em raiz nua de *Pinus taeda* L. aos sete meses após a semeadura verificaram diferenças significativas entre as relações HDC, nos diferentes espaçamentos estudados. Os valores da relação diminuíram conforme aumentou o espaçamento, sendo que estes oscilaram de 8,74 (para 2x2) a 3,71 (para 10x10).

Analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda*, NOVAES et al. (2001) verificaram que, aos seis meses de idade, o uso de tubetes com diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) apresentou diferença significativa na relação altura:diâmetro do coleto; as bandejas com 96 mudas apresentaram RHDC média de 7,25 enquanto que as bandejas com 48 mudas obtiveram RHDC média de 6,11.

ROSSI et al. (2008) citam que valores da relação altura de parte aérea e diâmetro do coleto entre 5,4 e 8,1 são ideais para expressar a capacidade das mudas de sobreviverem após o transplântio. ATAÍDE et al. (2010), analisando o efeito da densidade nas bandejas sobre o crescimento de mudas de eucalipto, verificaram que o espaçamento contendo 88 mudas por bandeja apresentou médias superiores de RHDC, variando de acordo com os clones de 8,80 a 10,10. Os espaçamentos que continham 48 e 64 mudas por bandeja, apresentaram médias variando de 7,50 a 9,30 e de 8,20 a 9,90, respectivamente.

Em estudo sobre o crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes tamanhos de tubetes, GOMES et al. (2003) verificaram que, aos 90 dias após a semeadura, as mudas apresentaram valores médios de RHDC iguais a 25,6, 18,9, 18,7 e 24,8, para os tubetes de 50, 110, 200 e 280 cm³, respectivamente. Aos 120 dias após a semeadura os valores de RHDC

verificados foram de 27,9, 11,6, 12,0 e 13,3 para os mesmos tamanhos de tubetes.

4.3.7.4 Biomassa seca total

A produção de matéria seca, segundo ELOY et al. (2013), tem sido considerado um dos melhores parâmetros para caracterizar a qualidade de mudas, apresentando, porém, o inconveniente de não ser viável a sua determinação em muitos viveiros, principalmente por envolver a destruição completa da muda e a utilização de estufas.

De acordo com LUCCHESI (1984) a biomassa seca total (MST) é mais utilizada e é significativa, pois determina o aumento de material acumulado na formação de um órgão, ou da planta toda, sem levar em consideração o conteúdo em água.

A produção de biomassa na planta é resultante da fotossíntese. De acordo com GHOLZ et al. (1990), a água pode afetar a fotossíntese de duas maneiras: por meio da umidade do solo e por meio da umidade relativa do ar.

NOVAES et al. (2001), analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua cultivada em dois tipos de recipientes (tubete e bloco prensado), verificaram que, aos seis meses de idade, o uso de tubetes com diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) não apresentaram diferença significativa na biomassa seca total (MST); as bandejas com 96 e 48 mudas apresentaram MST médio de 0,41 e 0,40 g planta⁻¹, respectivamente.

Estudando a influência de vermicomposto na produção de *Pinus elliottii* Engelm, CALDEIRA et al. (2003) verificaram aos 100 dias após a semeadura, valores de MST variando de 0,492 a 1,481 g planta⁻¹.

Em experimento para avaliar o crescimento de mudas em raiz nua de *Pinus taeda* L., cultivadas sob cinco espaçamentos no viveiro e seu posterior desempenho no campo, CARNEIRO et al. (2007) observaram aumento da MST conforme aumentou o espaçamento entre as mudas, oscilando de 0,50 g planta⁻¹ (para mudas produzidas no espaço de 2 cm x 2 cm) a 2,09 g planta⁻¹, (para mudas produzidas no espaço de 10 cm x 10 cm). No entanto, CARNEIRO (1995) ressalta que o padrão de qualidade como referência para a classificação das mudas de *Pinus taeda*, baseado apenas no seu peso, apresenta inerentes deficiências.

Estudando o efeito associado do tamanho do tubete e diferentes doses de fertilizantes (NPK) no crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis*, GOMES et al. (2003) observaram que independentemente das idades e dos fertilizantes, as médias da produção de matéria seca total (MST) das mudas foram significativamente superiores, na medida em que se aumentou o volume dos tubetes utilizados (50, 110, 200 e 280 cm³). As MST observadas variaram de 0,313 a 0,931 g planta⁻¹, aos 60 dias, de 0,576 a 2,938 g planta⁻¹, aos 90 dias e, de 0,865 a 5,621 g planta⁻¹, aos 120 dias após a semeadura. ELOY et al. (2013) avaliando o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* cultivadas em dois tamanhos de tubetes (50 e 90 cm³) e em duas densidades (alta, todas as células da bandeja ocupadas e, média, metade das células) observaram valores de MST variando de 3,04 a 4,28 g planta⁻¹, aos 95 dias após a emergência (DAE), variando de 3,62 a 6,05 g planta⁻¹ aos 110 DAE, de 4,69 a 8,30 g planta⁻¹ aos 125 DAE, e de 5,39 a 10,15 g planta⁻¹ aos 140 DAE.

Em estudo avaliando o crescimento de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) cultivados em tubetes de 55, 100 e 200 cm³, STORCK et al. (2016) observaram MST variando: de 0,20 a 0,37 g planta⁻¹, aos 90 dias após semeadura; de 0,40 a 0,92 g planta⁻¹, aos 120 dias; de 0,59 a 1,48 g planta⁻¹, aos 150 dias; de 0,43 a 2,03 g planta⁻¹, aos 180 dias; 0,32 a 2,96 g planta⁻¹ aos 210 dias após semeadura.

4.3.7.5 Biomassa seca da parte aérea

De acordo com GOMES e PAIVA (2011) a biomassa seca da parte aérea (MSPA) é

muito utilizado para avaliar a qualidade de mudas florestais, indicando rusticidade, correlacionando-se diretamente com a sobrevivência e o desempenho inicial das mudas após o plantio no campo.

A biomassa seca da parte aérea, apesar de ser um método destrutivo, deve ser considerada, pois é uma boa indicação de resistência das mudas de *Pinus taeda* (CARNEIRO, 1976). NOVAES et al. (2001), verificaram que, aos seis meses de idade, mudas de *Pinus taeda* cultivadas em tubetes sob diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) não apresentaram diferença significativa, sendo que as bandejas com 96 e 48 mudas apresentaram valores médios de biomassa seca da parte aérea de 0,25 e 0,24 g, respectivamente. CALDEIRA et al. (2003), observaram em mudas de *Pinus elliottii* cultivadas em substratos com diferentes doses de vermicomposto, aos 100 dias após a germinação, MSPA variando de 0,300 a 0,585 g planta⁻¹.

Estudando o efeito do espaçamento no crescimento de mudas de *Pinus taeda* L., CARNEIRO et al. (2007) verificaram, aos sete meses (210 dias) após a semeadura, MSPA variando de 0,34 g planta⁻¹ no espaçamento 2x2 cm, a 1,74 g planta⁻¹ no espaçamento 8x8 cm. Em experimento conduzido com mudas de *Pinus taeda* L. submetidas à poda química da raiz com sulfato de cobre e oxiclureto de cobre, ROSSI et al. (2008) observaram, aos 240 dias após a semeadura, valores de MSPA variando de 1,18 a 2,06 g planta⁻¹ conforme a dosagem dos produtos.

Analisando o crescimento e nutrição de *Pinus taeda* L., no Rio Grande do Sul, THOMAS (2007) verificou, aos 180 dias após a semeadura, peso médio igual a 1,763 g planta⁻¹.

No trabalho desenvolvido por GOMES et al. (2003) os autores verificaram que, quanto maior o volume da embalagem maior foi a biomassa seca da parte aérea (MSPA) das mudas de *Eucalyptus grandis*, de forma semelhante ao observado na produção de matéria seca total. As MSPA observadas variaram de 0,15 a 0,67 g, aos 60 dias, de 0,41 a 2,20 g, aos 90 dias e, de 0,60 a 4,22 g, aos 120 dias após a semeadura. STORCK et al. (2016) observaram, em mudas de *Eucalyptus urograndis*, aos 150, 180 e 210 dias após a semeadura, valores de MSPA iguais a 0,86, 1,26 e 1,91 g planta⁻¹, respectivamente, quando cultivadas em tubetes de 200 cm³, e valores de 0,29, 0,45 e 0,44 g planta⁻¹, respectivamente, em tubetes de 100 cm³ enfatizando a importância do tamanho da embalagem no crescimento das mudas.

4.3.7.6 Biomassa seca das raízes

O crescimento adequado das plantas depende de um equilíbrio no crescimento e na função entre raízes e na parte aérea, de forma que não haja limitações na contribuição de substâncias essenciais (RENA e GUIMARÃES, 2000).

Para BENINCASA (2003), medidas de sistema radicular passam a ser de maior importância, principalmente quando se trabalha com estresses (hídricos e de nutrição mineral). De acordo com FERREIRA et al. (1999), o déficit hídrico afeta primeiro as raízes, a partir da qual é desencadeada uma série de efeitos em toda a planta.

NOVAES et al. (2001), analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua cultivada em dois tipos de recipientes (tubete e bloco prensado), verificaram que, aos seis meses de idade, o uso de tubetes com diferentes densidades (96 e 48 plantas por bandeja) não apresentaram diferença significativa da biomassa seca das raízes (MSR), tanto as bandejas com 96 mudas quanto as bandejas com 48 mudas apresentaram valores médios iguais a 0,15 g.

Em mudas de *Pinus taeda* L., CARNEIRO et al. (2007) verificaram, aos 7 meses (210 dias) após a semeadura, MSR variando de 0,16 a 0,55 g planta⁻¹, conforme o espaçamento entre mudas. ROSSI et al. (2008) observaram, aos 240 dias após a semeadura, valores de

MSR em *Pinus taeda* L. variando de 0,29 a 0,63 g planta⁻¹ conforme a dosagem dos produtos a base de cobre utilizado nas podas das raízes. Em *Pinus taeda* L. cultivados no Rio Grande do Sul, THOMAS (2007) observou peso médio das raízes, por planta, igual a 0,559 g.

Em experimento avaliando o crescimento de mudas de *Pinus elliottii* cultivados em substratos contendo diferentes doses de vermicomposto, CALDERA et al. (2003), observaram aos 100 dias após a germinação, valores da biomassa seca das raízes variando de 0,192 a 0,793 g planta⁻¹, sendo o menor valor obtido no substrato sem adição de vermicomposto e o maior valor com a adição de 30%, em volume.

Em mudas de *Eucalyptus urograndis*, com idades de 150, 180 e 210 dias após a semeadura, STORCK et al. (2016) observaram valores de MSR iguais a 0,61, 0,77 e 1,04 g planta⁻¹, respectivamente, quando cultivadas em tubetes de 200 cm³. Em tubetes menores, que limitam o crescimento das raízes, os autores verificaram valores inferiores, obtendo aos 150, 180 e 210 dias, valores de 0,39, 0,45 e 0,32 g planta⁻¹, respectivamente, quando cultivadas em tubetes de 100 cm³ e de 0,16, 0,20 e 0,11 g planta⁻¹, respectivamente, quando cultivadas em tubetes de 55 cm³, salientando o efeito do tamanho da embalagem no crescimento das mudas.

Analisando as médias das biomassas secas das raízes (MSR), GOMES et al. (2003) observaram que, em mudas de *Eucalyptus grandis* apresentaram diferença significativa conforme o tamanho do tubete, sendo que os maiores MSR foram verificados no tubete de 200 cm³, aos 60 dias após a semeadura; aos 90 e 120 dias os maiores MSR foram verificados no tubete de maior volume (280 cm³). Os valores variaram de 0,162 a 0,312 g, aos 60 dias, de 0,205 a 0,734 g, aos 90 dias, e de 0,265 a 1,397 g, aos 120 dias após a semeadura.

4.3.7.7 Relação da biomassa seca da parte aérea:biomassa seca das raízes

A quantificação da biomassa da parte aérea e do sistema radicular é imprescindível para a compreensão do processo de crescimento e alocação de carbono e de nutrientes nos diferentes componentes das árvores, conforme as condições de estresse ambiental (MELLO e GONÇALVES, 2008).

A relação entre a biomassa do sistema radicular e a parte aérea descreve o equilíbrio da partição da matéria seca e fotoassimilados entre a parte aérea e a parte subterrânea, permitindo a caracterização das propriedades físico-mecânicas dos colmos e raízes indicando a ocorrência do acamamento em plantas.

De acordo com LUCCHESI (1984) por meio deste índice, é possível analisar o crescimento da parte aérea, em relação ao crescimento do sistema radicular do vegetal, e conhecido que existe uma relação direta entre o sistema radicular com a parte aérea, da mesma forma, pode-se analisar se existe uma influência direta da parte aérea no sistema radicular dos vegetais.

Em estudos para verificar o efeito de água residuária de suinocultura no crescimento de mudas de *Eucalyptus urophylla* aos 75 e 90 dias após a semeadura, BATISTA et al. (2014) observaram valores médios da relação MSPAPMR de 2,95 e 3,69, respectivamente. GOMES (2001) analisando o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* em diferentes tamanhos de tubetes e diferentes dosagens de NPK, observou valores médios da relação MSPAMSR, nos tubetes de 50, 110, 200 e 280 cm³, aos 60 dias após semeadura, iguais a 0,96, 1,67, 1,99 e 2,66, respectivamente; aos 90 dias após a semeadura, iguais a 2,13, 2,67, 2,79 e 3,07, respectivamente, e aos 120 dias após a semeadura, iguais a 2,30, 2,72, 2,48 e 3,08, respectivamente. Ao analisar o crescimento de diferentes clones de eucalipto aos 90 dias após a semeadura, MUNGUANBE (2012) observou valores médios da relação MSPAMSR variando de 2,06 a 3,66; segundo o autor este índice se mostrou eficiente e seguro para avaliar a qualidade de mudas em viveiros.

Pesquisando a biomassa seca de mudas de *Pinus taeda*, *P. elliottii*, *P. echinata* e *P.*

palustris, WAKELEY(1954) verificou que mudas com relação entre a parte aérea e a radicial, na faixa correspondente de 1,0 a 3,0, apresentam desempenho satisfatório após o plantio. Trabalhando com mudas de *Pinus taeda*, Carneiro (1985) apud NOVAES (1998), verificou valores dessa relação compreendidos entre 2,12 e 2,87 cuja oscilação esteve relacionado a densidade de cultivo das mudas. ROSSI et al. (2008) observaram em mudas de *Pinus taeda* L. médias da relação MSPAMSR variando de 3,1 a 5,6 conforme a dosagem de sulfato de cobre no tratamento das raízes e variando de 3,1 a 5,9 conforme a dosagem de oxicleto de cobre.

4.3.7.8 Índice de qualidade de Dickson

Para FONSECA (2000) o índice de qualidade de Dickson, que considera em seu cálculo a biomassa seca total (MST), a biomassa seca da parte aérea (MSPA), a biomassa seca do sistema radicular (MSR) a altura da parte aérea (H) e o diâmetro do coleto (DC),. é um bom indicador da qualidade das mudas, pois considera no cálculo a robustez e o equilíbrio da distribuição da biomassa, sendo ponderados vários parâmetros considerados importantes.

Esse índice de qualidade foi desenvolvido estudando o crescimento de mudas de *Picea glauca* e *Pinus monficola*, (DICKSON et al., 1960). Os valores de IQD variam de acordo com a espécie, manejo adotado no viveiro, tipo e proporções do substrato, volume do recipiente e idade da muda. Quanto maior for o valor desse índice, melhor será o padrão de qualidade das mudas.

Estudando os diferentes parâmetros de crescimento, BINOTTO (2007) concluiu que o IQD se mostrou eficiente na indicação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, por apresentar alta correlação com as demais variáveis estudadas: diâmetro do coleto, altura, número de folhas e massas secas. Em mudas de *Eucalyptus urophylla*, aos 75 e 90 dias após semeadura, BATISTA et al. (2014) verificaram valores de IQD médio variando de 0,057 a 0,080. Os valores observados pelos autores estão dentro da faixa dos IQD verificados por MAEDA et al. (2006), estudando mudas de *Eucalyptus badjensis*, que apresentaram valores no intervalo de 0,02 a 0,09.

GOMES (2001) analisando os valores de IQD na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* cultivada em diferentes tamanhos de tubetes (50, 110, 200 e 280 cm³) observou valores médios de IQD variando de 0,015 a 0,054 aos 60 dias após a emergência, de 0,023 a 0,109 aos 90 dias após emergência, e de 0,030 a 0,347 aos 120 dias após a emergência, sendo que os menores valores foram observados no menor volume (50 cm³) em todas as idades, enquanto que os maiores valores foram observados nos maiores volumes, 200 cm³ aos 30 dias e 280 cm³ aos 60 e 90 dias.

Analisando o comportamento de *Eucalyptus grandis* aos 60, 75, 90, 105 e 120 dias após a emergência, BINOTTO (2007) observou valores médios de IQD iguais a 0,01, 0,02, 0,03, 0,04 e 0,05, respectivamente.

Na análise de mudas clonais de eucalipto na fase de expedição (90 dias após estaqueamento) em viveiros comerciais MUNGUABE (2012) verificou que os valores médios de IQD, para todos os clones estudados, variaram de 0,72 a 1,17, considerando que as mudas estavam com bom padrão de qualidade para plantio.

Em trabalho realizado por PICHLER (2011) avaliando o crescimento de mudas de *Eucalyptus dunnii* submetidas a quatro tratamentos (três diferentes dosagens de biofertilizante Supermagro® e adubação química à base de fosfato monoamônico), o autor notou que os valores de IQD obtidos foram superiores a 0,05 em todos os tratamentos avaliados, e o tratamento com adubo químico foi de 0,14. Para intervalos de aplicação de 7, 14 e 28 dias, os valores médios de IQD foram de 0,07, 0,09 e 0,10, respectivamente; e para as concentrações de 10, 20 e 30% de biofertilizantes os valores médios de IQD foram de 0,10, 0,09 e 0,08, respectivamente.

OLIVEIRA JÚNIOR (2009) analisando a qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em diferentes substratos verificou valores médios de IQD variando de 0,06 (mistura com 70% de substrato comercial + 30% de esterco bovino) a 0,11 (100% substrato comercial).

SILVA et al. (2015) analisando o desenvolvimento biométrico de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus uroglobulus*) sob diferentes lâminas de irrigação (5, 9, 11, 14 e 15 mm) verificaram que, ao final do período de avaliação, as lâminas brutas diárias de 11 e 14 mm proporcionaram mudas do clone *urograndis* com melhor qualidade, com IQD igual a 0,24 para ambas as lâminas; para as mudas do clone de *uroglobulus* a lâmina de 15 mm d⁻¹ apresentou melhores valores de IQD (=0,19).

ELOY et al. (2014) utilizando parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* cultivadas em dois diferentes tamanhos de recipientes e duas diferentes densidades observaram que os valores de médios de IQD variaram de 0,06 a 0,12 aos 50 dias após emergência (DAE); de 0,11 a 0,20 aos 65 DAE; de 0,15 a 0,26 aos 80 DAE; de 0,20 a 0,36 aos 95 DAE; de 0,23 a 0,37 aos 110 DAE; de 0,25 a 0,49 aos 125 DAE e de 0,30 a 0,56 aos 140 DAE.

Na análise do comportamento do *Pinus elliottii* aos 25, 50, 75, 100, 125, 150 e 175 dias após a emergência, BINOTTO (2007) observou valores médios de IQD iguais a 0,01, 0,02, 0,07, 0,11, 0,16, 0,22 e 0,25 respectivamente.

Mudas de *Pinus taeda* L., aos 240 dias de idade, foram submetidas à poda química das raízes com sulfato de cobre e oxiclreto de cobre em estudo realizado por ROSSI et al. (2008). Segundo os autores, o incremento nas doses de sulfato de cobre ocasionou redução os valores médios de IQD observando para as concentrações de 0, 60, 120, 180, 240 g L⁻¹ valores de 0,146, 0,104, 0,100, 0,107 e 0,096, respectivamente; enquanto que no uso de oxiclreto de cobre não afetou o IQD observando nas concentrações de 0, 30, 60, 90 e 120 g L⁻¹ valores de 0,146, 0,161, 0,134, 0,181 e 0,146, respectivamente.

Em estudo realizado por MAÑAS et al. (2009) analisando o crescimento de *Pinus pinaster* Ait. cultivado em diferentes substratos, os autores verificaram valores de IQD variando de 0,07 (mistura de turfa + fertilizante) a 0,17 (mistura lodo de esgoto ativado + turfa). LUIS et al. (2004) estudando o crescimento de mudas de *Pinus canariensis* cultivado em dois diferentes tipos de recipientes, combinados com quatro diferentes tipos de substrato e duas dosagens de fertilização, observaram valores médios de IQD variando de 0,22 a 0,81. Na análise de crescimento de *Pinus tropicalis* Morelet em diferentes tamanhos de recipientes VICHOT et al. (2014) observaram valores médios de IQD iguais a 0,041, 0,034 e 0,047 para as mudas cultivadas até os 90 dias após emergência em recipientes de 123 cm³, 205 cm³ e 305 cm³, respectivamente.

De acordo com que é observado na literatura, pode-se concluir que o IQD pode variar em função da espécie, do manejo das mudas no viveiro, do tipo e proporção do substrato, do volume do recipiente e, principalmente, de acordo com a idade em que a muda foi avaliada (GOMES et al., 2013).

4.3.7 Eficiência no uso da água

Segundo ALI e TALUKDER (2008) o conceito de eficiência de uso da água (EUA) pode ter diferentes significados conforme os grupos de usuários, podendo ser definida, de acordo com os setores produtivos que a consomem, como a relação entre a quantidade produzida por unidade de água envolvida na produção. Para exemplificar os autores citam que: para um hidrologista pode significar a relação entre o volume de água usado produtivamente (transpirada e/ou evaporada) pela área de estudo; para piscicultores, a relação entre a quantidade de peixes produzidos pelo volume de água utilizada; para economistas, a

relação entre os valores monetários produzidos e os valores gastos com a água; para o engenheiro de irrigação é a relação entre a quantidade produzida e a água consumida. Mesmo em trabalhos envolvendo o estudo de plantas a EUA pode ter diferentes contextos: eficiência das folhas (taxa fotossintética da folha pela taxa de transpiração), eficiência das plantas (a relação entre a biomassa da parte aérea, ou massa seca pela água consumida) e eficiência da cultura (relação de grãos produzidos em determinada área pela transpiração). Ainda segundo os autores fatores como tipo de cultura, água aplicada, solo, tratos culturais e econômicos podem influenciar a EUA.

De acordo com FERNÁNDEZ (2017) pesquisadores de diferentes disciplinas geralmente discordam sobre o significado de Eficiência no Uso da Água (tradução do termo em inglês “*Water Use Efficiency*”- WUE), sendo que, parte da confusão ao abordar o efeito do manejo de irrigação sobre a eficiência do uso da água (EUA) vem da falta de consenso sobre a terminologia. O autor cita que alguns pesquisadores consideram sinônimos Eficiência no Uso da Água (EUA) e Produtividade da Água (tradução do termo “*Water Productivity*”- WP), sendo iguais a relação entre o rendimento comercializável em massa pelo volume de água utilizada na safra (ET). No entanto o autor ressalta que outros pesquisadores sugerem o uso de Eficiência do Uso da Água (EUA) quando se tratar do desempenho da água na produção de assimilados, biomassa ou rendimento da colheita de plantas e culturas, reservando Produtividade da Água (PA) para expressar a quantidade de produto ou serviço produzido por uma determinada quantidade de água, assim a PA não inclui o significado fisiológico que a EUA tem.

KATERJI et al. (2008) relatam que duas abordagens podem ser consideradas para determinar a EUA: uma ecofisiológica e outra agrônômica. A primeira baseia-se na análise da relação, em um determinado momento, entre a fotossíntese e transpiração pela área foliar, nas escalas: foliar, do dossel e territorial. O segundo é baseado na água consumida e no conceito de produção da parte comercial

Alguns autores, no entanto, definem de forma inversa a Eficiência no Uso da Água. SILVA et al. (2004), avaliando a eficiência do uso da água em mudas de *Eucalyptus citriodora* e *E. grandis*, cultivadas em solo com três teores de água, associadas ou não com *Brachiaria brizantha*, definiram a EUA como a relação entre a água consumida e a biomassa seca produzida (massa final menos a massa inicial). A quantidade de água consumida foi obtida pela diferença entre a água evapotranspirada e a evaporação potencial. Os resultados mostraram valores de EUA variando de 270,9 a 302,2 gramas de água por gramas de biomassa produzida, no cultivo de mudas de *Eucalyptus citriodora* e variando de 279,7 a 284,7 gramas de água por gramas de biomassa produzida, no cultivo de mudas de *Eucalyptus grandis*.

De forma semelhante a SILVA et al. (2004), ABREU (2014) define a EUA como a quantidade de água necessária para a produção de 1 kg de massa seca; sendo que depende indiretamente de fatores fisiológicos da espécie, das condições edafoclimáticas e diretamente das condições hídricas. O conhecimento acerca da EUA para as espécies de interesse pode auxiliar na seleção de genótipos mais eficientes a determinadas condições hídricas, a fim de adquirir uma produtividade desejada.

Avaliando a resposta da transpiração e outros parâmetros de crescimento (área foliar, altura e diâmetro) e desenvolvimento (número de folhas), em mudas de *E. urophylla* e *E. cloeziana* submetidas a deficiência hídrica do solo, durante dois períodos (primavera/verão e outono/inverno) ABREU (2014) observou valores médios de EUA no período de primavera/verão iguais a 210,4 L de água kg⁻¹ de matéria seca, para o *E. cloeziana*, e 164,2 L de água.kg⁻¹ de matéria seca para o *Eucalyptus urophylla*, e para o período de outono/inverno os valores observados foram de 1.033,2 e 314,4 L de água kg⁻¹ de matéria seca, para *E. urophylla* e *E. cloeziana*, respectivamente. De acordo com o autor os valores foram

compatíveis aos verificados por Martins et al. (2008) para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* cujos valores variaram de 228 à 282 L de água kg⁻¹ de matéria seca, ressaltando que em geral, a relação entre água transpirada e biomassa formada varia entre 250 a 350 g de H₂O g⁻¹(C) em plantas C4, em plantas CAM a relação entre a água transpirada e a biomassa produzida geralmente é mínima (18 a 125 g de H₂O g⁻¹(C)), enquanto é máxima em plantas C3, onde varia de 450 a 950 g de H₂O g⁻¹(C). Plantas do gênero *Eucalyptus* são classificadas como plantas C3, ou seja, são plantas que não utilizam a água eficientemente (ABREU, 2014).

TATAGIBA et al. (2015) avaliando o crescimento de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus grandis* e *E. urophylla*) em condições de déficit hídrico observaram valores de EUA variando de 3,5 a 4,5 kg de matéria seca por m³ de água consumida, conforme o nível de umidade do solo.

Em relação ao pinus CALDATO e SCHUMACHER (2013) citam resultados da eficiência no uso de água, publicados na Europa por Schrelzenmayr et al. (1981), mostrando que para a produção de 1 grama de biomassa de *Pinus silvestre* usa-se 344 g de água. No Brasil, Lima et al. (1990) e Lima (1993) descrevem que a eficiência do uso de água em plantações de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em gramas de madeira por quilo de água consumida foi igual a 2,1.

4.3.8 Objetivos

Considerando a importância das culturas florestais do pinus e do eucalipto, para os países do Mercosul, principalmente, Brasil e Argentina, e o aumento no interesse da sociedade pelas questões ambientais, como o consumo de água e o reaproveitamento de resíduos, este trabalho teve como objetivos:

- a) avaliar o crescimento de mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), cultivadas em substrato contendo lodo de esgoto, submetidas a diferentes níveis de irrigação;
- b) avaliar o crescimento de mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), cultivadas em substrato contendo lodo de esgoto, submetidas a diferentes níveis de irrigação; e
- c) avaliar a eficiência do uso da água, pelas mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), submetidas a diferentes níveis de irrigação.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado em casa de vegetação instalada no Horto Florestal do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (Latitude 22° 58' 05" Sul, Longitude 43° 14' 20" Oeste, altitude de 92 metros) situado no Bairro do Jardim Botânico, na cidade do Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

O clima local é do tipo Aw conforme a classificação de Köppen, caracterizado por estação chuvosa com índices pluviométricos elevados no verão e uma estação seca no inverno, com precipitação média anual em torno de 2.000 mm, temperatura média anual de 23,8°C, com máxima de 30,3°C registrada em fevereiro e mínima de 16°C em julho. (INMET, 2014).

4.4.2 Espécies cultivadas

As espécies florestais utilizadas no experimento foram o eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e o pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**), ambas adquiridas no Instituto Refloresta localizado na cidade de São Paulo-SP. Em relação ao eucalipto, foram utilizadas mudas do clone A211 (Suzano Papel e Celulose), híbrido das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, transplantadas no viveiro de produção, localizado na cidade de Pilar do Sul-SP, no dia 28 de novembro de 2014, sendo acondicionadas em tubetes plásticos de 55 cm³ contendo substrato comercial da marca Carolina Soil (composto por 70% de Sphagnum, 20% de palha de arroz torrefada e 10% de perlita). Em relação ao pinus, foram utilizadas mudas semeadas no viveiro localizado em Capão Bonito-SP, no dia 21 de agosto de 2014, produzidos em tubetes plásticos de 55 cm³ contendo substrato comercial da marca Tropstrato Florestal (composto por casca de pinus e vermiculita expendida).

Ambas as espécies foram adquiridas no dia 27 de fevereiro de 2015, e transplantadas para os tubetes contendo o substrato definitivo que seria utilizado no experimento, nas duas semanas subsequentes. No período de 16 a 31 de março de 2015 as mudas foram mantidas sob as mesmas condições de rega a fim de promover o pleno estabelecimento. No dia 31/03 as mudas foram consideradas aptas para o início da aplicação dos diferentes níveis de irrigação, sendo esse tempo zero (T0).

4.4.3 Substrato

O substrato utilizado no experimento foi composto por lodo de esgoto (LE) e vermiculita (VE), na proporção, em volume, de 70:30 (LE:VE). A proporção foi estabelecida para que, após o envasamento das mudas (pinus e eucalipto), as quais possuíam outros substratos aderidos às raízes, a relação de lodo de esgoto contida nos tubetes fosse de aproximadamente 60% do volume, proporção esta considerada ideal, conforme verificado por BARONY (2011), GOMES et al. (2013) e ROCHA et al. (2013). O envasamento foi feito de forma manual, realizando-se batidas na bancada de concreto para a acomodação do substrato.

Na Tabela 11 são apresentados os resultados das análises químicas do substrato, realizadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/Solos), seguindo as recomendações descritas na resolução nº 375/2006 do CONAMA, e utilizando os procedimentos adotados pela *U.S.EPA SW-846*.

Tabela 11. Resultado da análise do potencial agrônômico realizada em três amostras do substrato inicial utilizado nos cultivos das mudas de pinus e de eucalipto.

Componente	Unidade	Valor
Carbono Orgânico	g Kg ⁻¹	93,60
Fósforo Total	g Kg ⁻¹	5,94
Nitrogênio Kjeldahl	g Kg ⁻¹	15,68
Relação C:N	-	8,02
pH em água	-	4,50
Umidade	%	41,60
Potássio Total	g Kg ⁻¹	1,35
Enxofre Total	g Kg ⁻¹	7,68
Cálcio Total	mg Kg ⁻¹	11,10
Magnésio Total	mg Kg ⁻¹	2,30

4.4.4 Bandejas e tubetes

Os tubetes e as bandejas utilizados no experimento foram fabricados em polietileno. As bandejas utilizadas no cultivo das duas espécies (pinus e eucalipto) possuíam capacidade para 54 tubetes, sendo do tipo “com pés” e possuíam as seguintes dimensões: 0,6 m de comprimento, 0,4 m de largura e 0,16 m de altura, o peso médio, verificado em amostra contendo 12 bandejas, foi de 1.270 g.

Os tubetes utilizados nas duas culturas possuíam capacidade volumétrica de 280 cm³. Os mesmos possuíam altura de 0,190 m, diâmetro de abertura superior de 0,063 m; diâmetro de abertura inferior de 0,013 m. O peso médio, observado em amostra contendo 50 tubetes, foi de 35,2 g.

No experimento foi utilizado um total de 48 bandejas e 2.592 tubetes, sendo metade desses utilizados com eucalipto e os demais com pinus. Os conjuntos foram dispostos em seis bancadas, três para cada uma das espécies (pinus e eucalipto).

4.4.5 Irrigação

No período de estabelecimento das mudas, de 16/03 a 01/04/2015, o suprimento de água foi feito, várias vezes ao dia, por meio de barras de pulverização, com intuito de manter o substrato levemente úmido, e evitar possíveis lixiviações do material. Neste período também foram realizados os ajustes nos volumes de água aplicados em cada bancada, por meio de registros e substituição de microaspersores, para homogeneizar as vazões.

Após sorteio foram definidos o posicionamento de cada um dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%, da evapotranspiração), dentro de cada uma das bancadas (bloco). As bancadas possuíam, aproximadamente, 1,0m de altura, contendo oito bandejas cada, orientadas de forma transversal na casa de vegetação (Figura 31).

Posteriormente, quando foram efetivamente aplicados os tratamentos, a irrigação foi realizada por meio de linhas de irrigação, contendo microaspersores de baixo volume da marca Rain Bird, modelo X360 Mister (Figura 32a), com jato cônico, instaladas sobre as bancadas. Os microaspersores foram inseridos na linha de irrigação, posicionados de forma centralizada acima das bandejas, sendo instalados 1 (um), 2 (dois), 3 (três) e 4 (quatro) microaspersores para os tratamentos equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400%, respectivamente (Figura 32b).

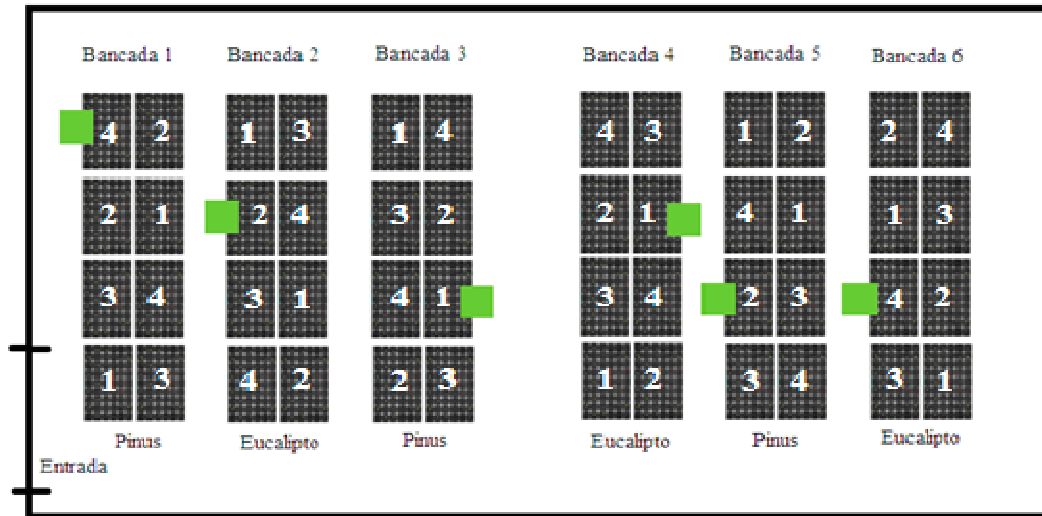


Figura 31. Orientação das bancadas na casa de vegetação, posicionamento dos minilísímetros (em verde) e localização dos tratamentos referentes a aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, definidas como 1, 2, 3 e 4, respectivamente

A altura de instalação das linhas de irrigação (0,55m), formadas por tubos de polietileno de baixa densidade (PEBD) com diâmetro de 0,0125 m (1/2”), foi definida após a realização de testes em área cimentada de forma que o diâmetro molhado fosse igual à largura das bandejas utilizadas no estudo (0,4m).



Figura 32. Embalagem com informações sobre o modelo de microaspersor da Rain Bird utilizado (a) e forma de inserção na linha lateral correspondente ao tratamento equivalente a 400% da evapotranspiração da cultura (4 microaspersores) (b).

4.4.5.1 Calibração dos aspersores

Para uniformizar a vazão entre as três bancadas cultivadas, tanto com pinus quanto com eucalipto, foram instalados registros de esfera, com 0,0125m (1/2”) de diâmetro, que permitiam regulagens em cada uma das bancadas.

Nas bancadas foram realizados testes visando o equilíbrio entre vazões dos emissores pertencentes a um mesmo tratamento. A água foi captada diretamente dos microaspersores, com auxílio de coletores (Figura 33a), sendo armazenadas em garrafas plásticas. Em seguida, os volumes coletados foram medidos com proveta (Figura 33b). Quando eram verificadas diferenças entre as vazões de um mesmo tratamento superiores a 10%, se fazia a substituição do(s) microaspersor(es) que apresentava(m) vazão diferenciada dos demais.

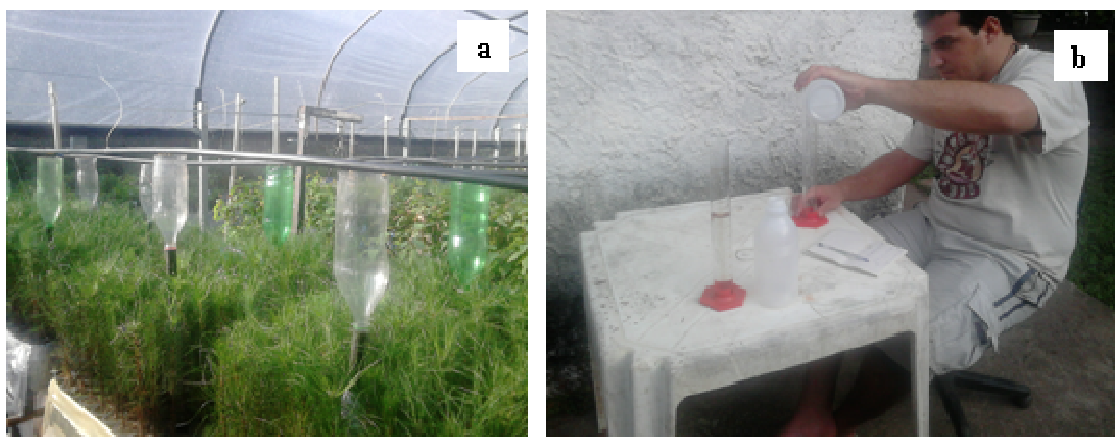


Figura 33. Coleta de água junto aos microaspersores (a) e determinação das vazões com auxílio de proveta graduada (b).

Tendo em vista a singularidade da condição em que os emissores foram distribuídos ao longo da linha de irrigação, buscou-se, como alternativa, adotar outros parâmetros para auxiliar na avaliação da eficiência de aplicação de água, visando a manutenção da homogeneidade dentro de cada bancada. Embora não estivesse numa condição considerada adequada para adoção dos métodos, o Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e a Uniformidade de Distribuição (UD), descritos por MANTOVANI et al. (2007) obtidos pelas equações 25 e 26, respectivamente; foram utilizados visando avaliar a uniformidade de emissão de água entre os tratamentos, sendo considerados aceitáveis quando os valores fossem superiores a 90%. A distribuição de água do sistema de irrigação foi feito com tubos de policloreto de vinil (PVC) do tipo soldável, com diâmetro de 0,025 m.

$$CUE = [1 - (\frac{Sq}{Xm})]x100 \quad (25)$$

$$UD = (\frac{X_{25}}{Xm})x100 \quad (26)$$

Em que: CUE é o Coeficiente de Uniformidade Estatístico, em %; Sq é o desvio padrão da vazão dos microaspersores, em L.h⁻¹; Xm é a vazão média de todos os microaspersores, em L.h⁻¹; UD é a uniformidade de Distribuição, em %; X₂₅ é vazão a média de 25% do total dos microaspersores com as menores lâminas, em L.h⁻¹.

4.4.5.2 Manejo da irrigação

Na Figura 34 é apresentada a ilustração do esquema elétrico de ligação entre o sistema de irrigação, composto pelo quadro controlador e a válvula de controle, e o minilímetro, composto pela célula de carga e o módulo de aquisição de dados (“datalogger”).

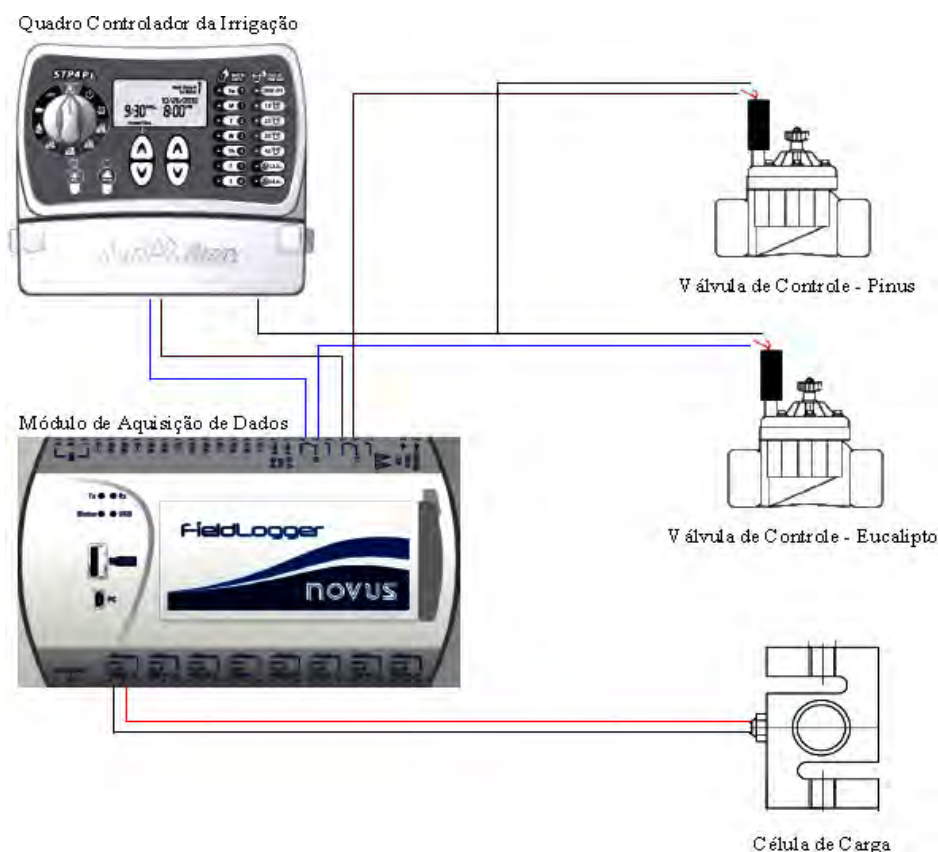


Figura 34. Ilustração do esquema de ligação elétrica entre o quadro controlador do sistema de irrigação e o módulo de aquisição de dados (“datalogger”) integrante do minilímetro.

O sistema de irrigação funcionava diariamente e era acionado por meio de um quadro controlador Rain Bird modelo STP6L (alimentado em 110V). Ao circuito elétrico do quadro controlador estavam conectadas duas válvulas, modelo DVF-75 do mesmo fabricante; cada válvula liberava o abastecimento de água nas bancadas contendo as mudas de eucalipto e de pinus. Porém a alimentação das válvulas passava por dois terminais do módulo de aquisição de dados (“datalogger”) fabricado pela Novus, modelo Fieldlogger, denominados “relé de alarme”, sendo um destinado ao pinus e outro ao eucalipto. Estes relés possuem terminais normalmente fechados (NC) que permitiam a passagem da corrente elétrica para o acionamento das válvulas nos horários preestabelecidos.

Nos terminais analógicos do módulo de aquisição de dados estavam conectadas as células de carga, utilizadas para monitorar a variação de massa das bandejas contendo as mudas de pinus e de eucalipto (minilímetro). Por meio de configuração realizada com auxílio do software Fieldloggerconfig, foram definidos os parâmetros de acionamento dos alarmes, onde, foram definidas as massas referentes aos tratamentos equivalentes a 100% da evapotranspiração das mudas de pinus e de eucalipto que seriam lidas pelo datalogger e que acionariam o relé de alarme. Estas massas foram obtidas após o processo de imersão das bandejas em água, por 12 horas, para saturação do substrato e posterior escoamento (drenagem natural) do excesso, durante 6-8 horas na sombra, com intuito de manter uma ótima condição de umidade do substrato.

Quando o datalogger identificava que as massas predefinidas na configuração eram alcançadas, acionava o relé de alarme, que passava a funcionar de forma normalmente aberta (NO) impedindo a passagem da corrente elétrica de alimentação das válvulas, forçando o fechamento.

4.4.6 Dados morfofisiológicos

Visando avaliar o efeito dos níveis de irrigação sobre o crescimento inicial das mudas de pinus e de eucalipto foram obtidos o diâmetro do coleto (DC); a altura da planta (H); e as massas de matéria fresca (MF) e de matéria seca (MS), da parte aérea (PA), das raízes (R) e total (T).

Os dados obtidos de forma não destrutiva (diâmetro e altura) foram obtidos nos dias 02/04, 06/05, 09/06, 03/07, 03/08 e 04/09/2015, sendo denominados T0, T30, T60, T90, T120 e T150, respectivamente, considerando o início da aplicação dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) no dia 01/04/2015. Os dados obtidos de forma destrutiva (massas fresca e seca) foram obtidos nos dias 06/05, 03/07 e 04/09/2015, iniciando quando as mudas já estavam submetidas 30 dias aos diferentes níveis de irrigação (T0 destrutivo = T30 não destrutivo).

Com base nos trabalhos desenvolvidos por ZANON et al. (1997), utilizando mudas de eucalipto, e por SILVEIRA et al. (2009) utilizando mudas de pinus, foram coletadas 4 (quatro) amostras de cada bandeja, totalizando 24 amostras, por tratamento, para a obtenção dos dados morfofisiológicos.

Na determinação dos valores de diâmetro do coleto foi utilizado um paquímetro digital (Figura 35a); a determinação da altura máxima foi obtida com auxílio de régua graduada, considerando a altura a partir do substrato até a gema apical. Para a obtenção da massa fresca as mudas sofreram intensa lavagem das raízes, visando a separação de todos os resíduos de substrato aderido. Após este processo as mudas foram sobrepostas em folhas de jornal, por um período de 12 horas (Figura 35b). Procedeu-se a separação entre a haste e o sistema radicular. Na determinação da relação altura:diâmetro do coleto (HD) optou-se por efetuar a divisão entre estes dois parâmetros, muda por muda em cada tratamento. O mesmo critério foi adotado para as determinações das biomassas frescas e seca da parte aérea, das raízes e total.



Figura 35. Detalhe da medição do diâmetro do coleto com auxílio de paquímetro digital (a) e preparação das mudas para secagem na estufa (b).

Foram preparadas para a secagem das mudas de pinus, duas embalagens de papel, uma contendo a parte aérea e outra as raízes, e para as mudas de eucalipto, foram utilizadas três embalagens, uma para as folhas, e outras duas para o caule e para as raízes, devidamente identificadas. As embalagens, contendo as partes das mudas, foram colocadas em estufa de circulação forçada à 65°C por um período de 72 horas, sendo mantidas abertas para facilitar a perda de umidade.

Posteriormente, foram feitas as pesagens utilizando-se balança digital de precisão (0,1

g) da marca BIOPRECISA, modelo FA 2104N.

A análise da qualidade das mudas foi realizada com base no Índice de Qualidade de Dickson (IQD), proposto por DICKSON et al. (1960), conforme a equação 27:

$$IQD = \frac{MST}{\left(\frac{H}{DC}\right) + \left(\frac{MSPA}{MSR}\right)} \quad (27)$$

Em que: MST, é a biomassa seca total, em gramas; H é a altura, em centímetros, DC é o diâmetro do coleto, em milímetros; MSPA é a biomassa seca da parte aérea, em gramas; e MSR é a biomassa seca das raízes, também em gramas.

4.4.7 Determinação da eficiência no uso da água

A Eficiência no uso da água (EUA) foi calculada com base no incremento de biomassa seca total, observada entre duas medições consecutivas, e o volume de água utilizado no mesmo período (equação 28). O volume de água aplicado foi definido como sendo o produto entre o tempo de funcionamento diário e a vazão média dos aspersores.

$$EUA = \frac{MST}{\text{Água Consumida}} \quad (28)$$

Em que: EUA é a eficiência no uso da água, em kg m^{-3} , a produção indicada pela biomassa seca total (MST) expressa em kg e a água consumida expressa em m^3 .

4.4.8 Análises estatísticas

Para avaliar o efeito dos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) sobre o crescimento das mudas de eucalipto e de pinus foram avaliados os seguintes parâmetros: altura, H; diâmetro do coleto, DC; relação altura:diâmetro do coleto, RHDC; biomassa seca total, MST; e relação biomassa seca da parte aérea: biomassa seca das raízes (MSPA:MSR) além dos Índices de Qualidade de Dickson (IQD) e da Eficiência do Uso da Água (EUA).

Os quatro tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) se distribuíram em um desenho experimental em blocos casualizados, com repetições, sendo os três blocos formados pelas bancadas contendo duas repetições por bloco. As unidades experimentais foram compostas por bandejas possuindo 54 plantas, sendo que somente as 36 centrais fizeram parte da amostra avaliada, as demais foram mantidas para minimizar o efeito bordadura. Para realizar as avaliações do crescimento foram selecionadas de forma aleatória quatro indivíduos por unidade experimental.

Embora muitos trabalhos utilizem o formato de parcelas subdivididas para analisar o efeito de determinados tratamentos (parcelas) ao longo do tempo (subparcelas), alguns autores (FERNANDEZ, 1991; FREITAS, 2007; FREITAS et al., 2011; GUMPERTZ e BROWNIE, 1993; MALHEIROS, 2004) salientam que a abordagem de experimentos com medidas repetidas sob o enfoque de parcela subdividida viola duas pressuposições básicas da análise de variância: a falta de casualização entre os tratamentos e as épocas de observação (tempo) e dependência de erros, pois como as medidas são tomadas na mesma unidade experimental ao longo do tempo, existe uma correlação dos dados, como consequência há a possibilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira (erro tipo I).

Embora haja a pressuposição nos experimentos de medidas repetidas de que todas as medidas repetidas tenham variações iguais e todos os pares de medidas devem ter a mesma correlação (Snedecor e Cochran, 1980), condição esta chamada de simetria composta, ela é mais forte do que o necessário (Littel, 1989). Um requisito mais realista é a condição H-F (Huynh e Feldt, 1970), que permite variâncias e covariâncias desiguais, mas não exige que a variância e a covariância tenham certa dependência matemática em outro conjunto de parâmetros (FERNANDEZ, 1991).

Nas análises de variâncias com medidas repetidas (ANOVA-RM) os fatores intra-indivíduos (tempo) são particularmente suscetíveis à violação do pressuposto de esfericidade (que é a condição em que as variâncias das diferenças entre todas as combinações de grupos relacionados (níveis) sejam iguais). Segundo PARK et al. (2009) os testes que envolvem apenas os efeitos entre-indivíduos, tanto a abordagem univariada quanto a multivariada dão origem aos mesmos testes (teste F). Para os efeitos intra-indivíduos (tempo) e suas interações abordagens univariadas e multivariadas, no entanto, produzem diferentes testes (teste F).

Desta forma a quantificação do efeito dos tratamentos sobre os parâmetros analisados foi feito através da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM) utilizando-se a metodologia sugerida por FERNANDEZ (1991), ou seja, quando atendida a condição de esfericidade pelo critério de Huynh e Feldt (H-F), utilizou-se as estatísticas de testes univariados; quando violada a condição de H-F, tendo o teste de esfericidade (Teste de Mauchly) resultados significativos, com probabilidade (p) variando entre 0,01 e 0,05, foram realizados os testes univariados com ajustes do grau de liberdade, utilizando-se fatores de ajustamento (ϵ – Epsilon) de Greenhouse-Geisser (G-G), quando $\epsilon < 0,75$, ou de Huynh-Feldt (H-F), quando $\epsilon > 0,75$; e quando a condição H-F foi rejeitada a níveis menores que 0,01 ($p < 0,01$), foram utilizados testes multivariados (Lambda de Wilks e Traço de Pillai), por não requererem a condição H-F, pois são baseados em uma matriz de covariância sem estrutura.

Quando significativos ao nível de 5% de probabilidade, empregou-se para avaliar o desempenho de cada fator de variação o teste de média de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), com correção do nível de significância estatística, por meio do cálculo de Bonferroni. A análise estatística foi realizada com o auxílio do software STATISTICA, versão 13.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Calibração dos aspersores

Após a realização dos ajustes e/ou substituições dos microaspersores com intuito de manter a uniformidade entre as vazões de um mesmo tratamento (100%, 200%, 300% e 400%) e considerando como critério os coeficientes de uniformidade de estatístico (CUE) e uniformidade de distribuição (UD) acima dos 90%, foram ao final dos testes, observados os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de vazão média, em mililitros por minuto, uniformidade de distribuição (UD), em percentagem, coeficiente de uniformidade estatístico (CUE), em percentagem, e a relação final entre as vazões, com base no tratamento equivalente a 100% da evapotranspiração, observados nos tratamentos contendo mudas de eucalipto e de pinus.

Parâmetros	TRATAMENTOS			
	100%	200%	300%	400%
	Eucalipto			
Vazão Média (ml min ⁻¹)	187	327	528	677
UD (%)	93,0	92,2	90,9	91,3
CUE (%)	94,5	93,3	93,9	93,7
Relação Final (%)	100	175	283	362
	Pinus			
Vazão Média (ml min ⁻¹)	172	337	540	688
UD (%)	92,3	94,8	90,6	92,4
CUE (%)	94,4	96,4	92,7	94,9
Relação Final (%)	100	196	313	399

De acordo com os resultados da UD e do CUE, e com base na parametrização adotada por BERNARDO et al. (2006) a uniformidade de aplicação de água do sistema de irrigação pode ser considerada como excelente, refletindo numa homogenização dos volumes recebidos pelas mudas, de um mesmo tratamento, evitando assim qualquer influência nos resultados, entre as bancadas, devido à diferenças nas quantidades de água aplicada.

Com base nos resultados, verificou-se também que, embora os tratamentos recebessem as denominações referentes às aplicações de 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração de referência, o sistema não aplicava a mesma proporcionalidade desejada. Considerando como referência a vazão observada nos tratamentos de 100%, os demais tratamentos receberam 175%, 283% e 362%, no caso das mudas de eucalipto e de 196%, 313% e 399%, no caso das mudas de pinus.

Estas variações nas vazões estão relacionadas, basicamente, às características dos próprios emissores (fabricação), forma de inserção na linha de irrigação, posicionamento na linha e a pressão de serviço.

4.5.2 Análises preliminares

Para a verificação das pressuposições exigidas na análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), foram realizados os testes de normalidade de Shapiro-Wilks (SW), devido ao número de amostra ser inferior a 50 ($n < 50$), conforme RAZALI e WAH (2011), de todas as variáveis estudadas. Os resultados utilizando o teste de SW, foram realizados em cada período de observação, e apresentou normalidade em quase todos os parâmetros, com exceções para DC, do pinus e do eucalipto, RHDC, do eucalipto e MSPAMSR, do pinus. As utilizações de transformações logarítmicas das variáveis DC, RHDC e MSPAMSR, apresentaram grau de significância do teste (Valor-p) superior a 0,05 (intervalo de confiança), rejeitando a hipótese nula, passando a ter distribuição normal.

Conforme a metodologia proposta por FERNANDEZ (1991), procedeu-se a análise do teste de Mauchly (1940), sendo constatado que o teste aceitou a hipótese de esfericidade, implica que a matriz de covariâncias do erro experimental atende à condição proposta por Huynh e Feldt (1970) de forma a permitir a análise univariada, para as mudas de pinus, dos parâmetros Índice de Qualidade de Dickson (IQD) e relação entre a biomassa seca da parte aérea e das raízes (MSPAMSR), somente para as mudas de pinus; relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), somente para as mudas de eucalipto.

O teste de Mauchly rejeitou a hipótese de esfericidade, em níveis de probabilidade entre 1 e 5%, dos parâmetros: altura (H), biomassa seca total (MST) e relação entre a biomassa seca da parte aérea e das raízes (MSPAMSR), observados nas mudas de eucalipto; e da relação entre a altura e o diâmetro do coleto (RHDC), das mudas de pinus. No entanto, na análise destes parâmetros, foram aplicadas as correções nos graus de liberdade, para que os testes pudessem ser usados de forma aproximada conforme sugerido por Geisser e Greenhouse (1958) e Huynh e Feldt (1976), ressaltando que tais correções não afetam a estatística F calculada, mas alteram o valor F crítico necessário para rejeitar a hipótese nula.

Os parâmetros altura (H) e biomassa seca total (MST) do pinus, diâmetro do coleto (DC), do pinus e do eucalipto, e o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) do eucalipto, tiveram a hipótese de esfericidade rejeitada pelo teste de Mauchly em níveis inferiores a 1% de probabilidade, justificando o uso da metodologia da análise multivariada, conforme a metodologia proposta por FERNANDEZ (1991).

4.5.3 Análise das variáveis não destrutivas

4.5.3.1 Altura da parte aérea das mudas de eucalipto

De acordo com os valores apresentados na Tabela 13, observou-se que não foram atendidas as condições de esfericidade pelo teste de Mauchly. De acordo com FERREIRA (2012) é comum, em ciências agrárias, que o teste de Mauchly rejeite a hipótese nula de esfericidade da matriz de covariância.

Tanto FERREIRA (2012) quanto FREITAS (2007), em experimento com genótipos de cana-de-açúcar, verificaram a rejeição da condição de esfericidade da matriz de covariância.

Tabela 13. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	14	0,07847	25,70481	0,0282*

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 14 é apresentada a análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum tipo de ajuste, da variável altura da parte aérea (H), obtidas para as mudas de eucalipto, com os resultados entre indivíduos (tratamentos) e intra-indivíduos (tempo).

Tabela 14: Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	45,1	1,83	0,1945
Bloco	2	82,0	3,33	0,0707
Nível x Bloco	6	8,7	0,36	0,8934
Tempo	5	3349,5	299,55	0,0000**
Tempo x Nível	15	11,3	1,01	0,4546
Tempo x Bloco	10	13,5	1,21	0,3036
Tempo x Nível x Bloco	30	16,3	1,46	0,1069
Média			49,62	
CV(%)			7,49	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL = Graus de Liberdade . F = teste F, P=Probabilidade.

De acordo com os resultados não houve diferença significativa entre as médias de altura entre os níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%) e entre os blocos (bancada I, bancada II e bancada III). No entanto a análise intra-indivíduos (Tempo) apresentou diferença significativa. Tendo em vista que o teste de esfericidade apresentou valor ($P=0,0282$) entre 1 e 5% realizou-se a correção dos graus de liberdade conforme recomendação de FERNANDEZ (1991) para análise subsequente.

A Tabela 15 apresenta o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade adotando os critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para os dados da variável altura das mudas de eucalipto, avaliados em seis tempos distintos, indicando que a fonte de variação Tempo apresentou diferença significativa ($P<0,01$), ou seja, a altura apresentou variação das médias ao longo do tempo.

Tabela 15. Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F	G-G	H-F
Tempo	5	16747,6	3349,5	299,55	0,0000	0,0000	0,0000
Tempo x Nível	15	169,9	11,3	1,0132	0,4546	0,4492	0,4546
Tempo x Bloco	10	135,2	13,5	1,2092	0,3037	0,3216	0,3037
Tempo x Nível x Bloco	30	489,1	16,3	1,4580	0,1069	0,1551	1,4580
Erro	60	670,9	11,2				
G-G = Greenhouse-Geisser $\epsilon = 0,6508$							
H-F = Hyunh-Feldt $\epsilon = 1,0000$							
GL=Graus de liberdade; SQ=Soma de quadrado; QM= Quadrado médio; F= Teste F							

Na Figura 36 estão plotadas as médias da altura das mudas de eucalipto, observadas nos seis diferentes tempos (T0, T30, T60, T90, T120 e T150), com as respectivas médias e as diferenças verificadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As mudas, no momento inicial de aplicação dos tratamentos (0 DT), mas com idade aproximada de 120 dias, possuíam altura média superior a 32 cm, valor este dentro da faixa citada por GOMES et al. (2003) cujas alturas observadas em mudas de eucalipto foram de 21,6 a 55,0 cm para esta idade. Os valores médios de altura verificados por FREITAS et al. (2013), para mudas de diferentes espécies de eucalipto, aos 120 dias de idade, produzidas em tubetes de 55 e 180 cm³ foi de 24,8 e 54,2 cm, respectivamente.

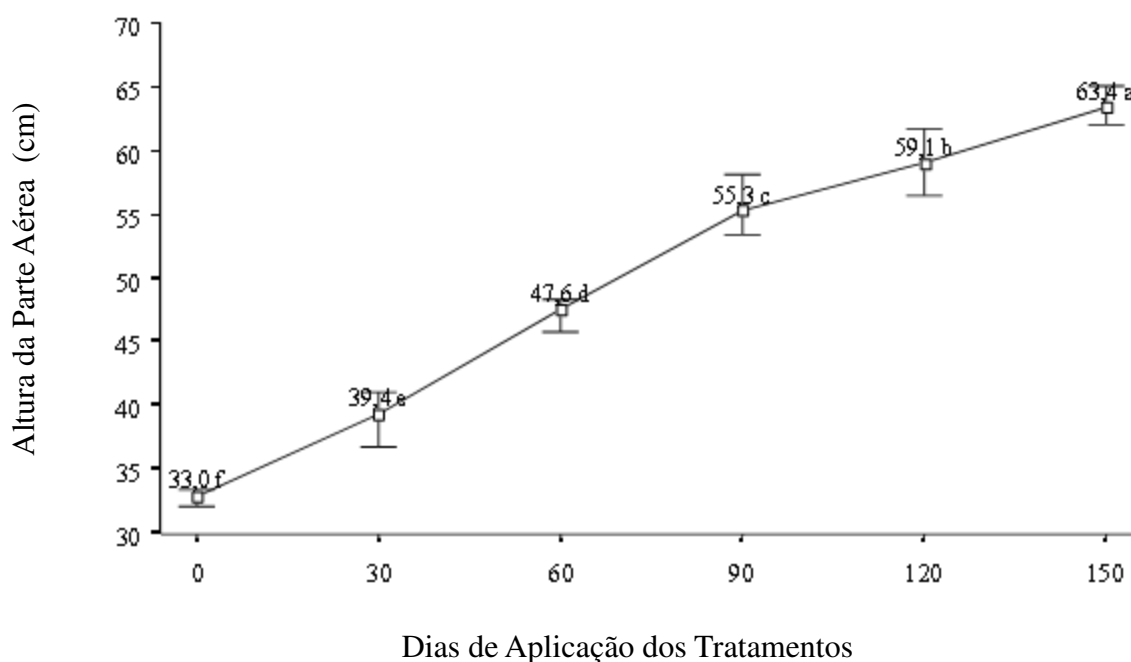


Figura 36. Valores médios de altura da parte aérea das mudas de *Eucalyptus urograndis*, observados em diferentes períodos.

Os valores médios de 33,0; 39,4; 47,6 e 55,3 cm observados aos 0, 30, 60 e 90 dias de aplicação dos tratamentos (equivalentes à 120, 150, 180 e 210 dias após semeadura) estiveram próximos aos observados por STORCK et al. (2016), que verificaram valores de 26,1, 37,4, 48,5 e 58,0 cm, respectivamente, para estas mesmas idades, em tubetes de 200 cm³, contendo esterco bovino, terra de subsolo e casca de arroz carbonizada.

A taxa de crescimento, dada pela relação entre o incremento em altura e um intervalo de tempo, observados no presente estudo oscilou em torno de 0,20 cm d⁻¹, valores dentro da faixa verificada por OMARI (2010) que estudando o efeito do tamanho dos vasos no crescimento de diferentes espécies de eucalipto, constatou taxas de 0,12 a 0,24 cm d⁻¹, conforme a espécie.

4.5.3.2 Altura da parte aérea das mudas de pinus

Na Tabela 16 é apresentada a análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da variável altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de eucalipto, com os resultados entre e intra-indivíduos.

Tabela 16. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a altura da parte aérea (H) observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	1,9	0,45	0,7217
Bloco	2	5,5	1,28	0,3136
Nível x Bloco	6	2,2	0,52	0,7845
Tempo	5	95,0	46,11	0,0000**
Tempo x Nível	15	1,8	0,86	0,6092
Tempo x Bloco	10	0,8	0,38	0,9505
Tempo x Nível x Bloco	30	0,8	0,37	0,9980
Média			29,66	
CV(%)			4,60	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL = Graus de Liberdade . F = teste F, P=Probabilidade.

De acordo com os resultados da análise de variâncias verificou-se que não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação: 100%, 200%, 300% e 400%) e entre os blocos (bancadas: I, II e III) durante todo o período de avaliação. No entanto, a análise de variância indicou a existência de diferença entre as médias de altura das mudas de pinus ao longo do tempo.

Conforme os valores apresentados na Tabela 17, observou-se que não foram atendidas as condições de esfericidade pelo teste de Mauchly.

Tabela 17. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	14	0,03404	34,1407	0,00196**

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Quando o valor do teste de esfericidade de Mauchly apresenta nível de probabilidade abaixo de 1%, segundo as recomendações de FERNANDEZ (1991), é necessário a aplicação de testes multivariados.

Os resultados dos testes multivariados, pelos critérios de lambda de Wilks e traço de Pillai são apresentados na Tabela 18, sendo ambos significativos, rejeitando-se a hipótese de perfis horizontais, ou seja, o perfil indica que existem diferenças, entre as médias de altura das mudas de pinus, ao longo do tempo.

Tabela 18. Resultado da análise multivariada do fator Tempo, para o parâmetro altura da parte aérea (H) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fator	Teste	Valor	F	GL fator	GL Erro	p
Tempo	Wilks	0,0347	44,5142	5	8	0,00001**
	Pillai	0,9653	44,5142	5	8	0,00001**

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Na Figura 37 é apresentado o gráfico com as médias de altura da parte aérea (H), verificado nas mudas de pinus, nos diferentes períodos analisados (0, 30, 60, 90, 120 e 150

dias de aplicação dos tratamentos – DT), e as respectivas diferenças verificadas pelo teste de Tukey a 0,8% de probabilidade ($\alpha= 5\% / 6$ tempos).

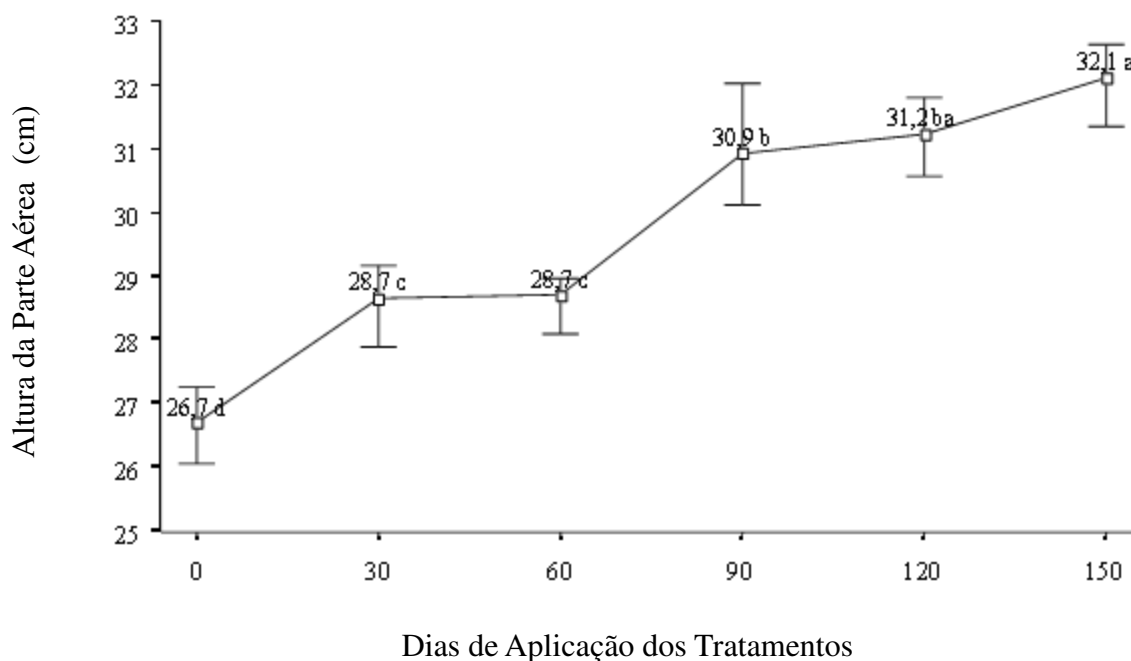


Figura 37. Valores médios de altura da parte aérea das mudas de *Pinus elliottii* E., observados em diferentes períodos.

Com diferenças estatisticamente significativas observadas, principalmente, entre 0 e 30 DT e entre 60 e 90 DT, os resultados apresentados no gráfico sugerem um crescimento mais lento das mudas de pinus, em relação ao observado no eucalipto. Embora os valores da altura variando de 26,7 cm, aos 120 dias após a sementeira (0 DT) até 32,1 cm, aos 270 dias (150 DT) estivessem acima daqueles considerados como ideais para serem levadas ao campo por ROSE et al. (1990), que sugerem a faixa de 20-25 cm, verificou-se que, já no início do experimento, ou seja, quando as mudas estavam com 120 dias após a sementeira (0 DT), o valor médio de 26,7 cm já era bem superior ao valor médio 15,5 cm observado por CALDERA et al. (2003) em mudas com apenas 20 dias a menos (100 dias após a germinação), indicando que as mudas já se apresentavam bem desenvolvidas, e que possivelmente fatores como clima e/ou tamanho de embalagem, podem ter atuado como fatores limitantes.

NOVAES et al. (2001) verificaram em mudas de *Pinus taeda*, com aproximadamente 180 dias, alturas médias variando de 10,6 a 11,5 cm conforme a densidade na bandeja, e CARNEIRO et al. (2007) verificaram alturas variando de 14,3 a 18,4 cm, em mudas da mesma espécie, com aproximadamente 210 dias. Estes valores estão bem abaixo dos 28,7 cm, observados aos 60 DT, e dos 30,9 cm, observados aos 90 DT, idades estas, próximas aos dos citados autores. Estes resultados reforçam a hipótese de que as mudas utilizadas já apresentam, inicialmente, um maior desenvolvimento.

Aos 240 dias após a sementeira (120 DT), as mudas apresentavam altura média de 31,2 cm, valores compatíveis com os observados por ROSSI et al. (2008) em mudas de *Pinus taeda* L. que verificou valores oscilando de 26,37 a 31,81 cm, e de 30,90 a 32,55 cm, de acordo com as dosagens de sulfato de cobre e de oxicloreto de cobre, respectivamente, utilizados na poda química das raízes.

4.5.3.3 Diâmetro do coleto das mudas de eucalipto

Na Tabela 19 são apresentados os resultados da análise de variância para medidas repetidas do diâmetro do coleto (DC) das mudas de eucalipto. A análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), para variável DC, sem nenhum ajuste, apresentou diferenças significativas entre os valores médios dos níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%) e entre os valores médios dos diferentes tempos de observação e suas interações com os níveis de irrigação, com os blocos (bancadas I, II e II), além dos níveis e blocos, simultaneamente.

Tabela 19. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o diâmetro do coleto (DC) observados nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,809	9,24	0,0019**
Bloco	2	0,303	3,46	0,0649
Nível x Bloco	6	0,215	2,46	0,0872
Tempo	5	16,251	298,04	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,127	2,33	0,0108*
Tempo x Bloco	10	0,266	4,84	0,0000**
Tempo x Nível x Bloco	30	0,118	2,16	0,0057**
Média			3,72	
CV(%)			8,24	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.*Significativo ao nível de 5% de probabilidade. GL = Graus de Liberdade. F = teste F, P=Probabilidade.

Em relação a análise entre-indivíduos o fator de variação níveis de irrigação apresentou diferença significativa ao nível de 1% de probabilidade ($P < 0,01$).

Na Figura 38 estão plotados os diâmetros médios observados nos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com os dados verifica-se que os maiores níveis de irrigação (correspondentes a 300% e 400% da evapotranspiração) apresentaram médias dos diâmetros dos coletos (DC), entre 5 e 8% superiores àquelas observadas nas menores lâminas (correspondentes a 100% e 200%)

A produção de etileno pode ser uma possível explicação para os maiores diâmetros observados nas mudas que receberam maiores lâminas de irrigação (300% e 400%), embora não tenham sido notados sinais de saturação do substrato por períodos prolongados. O maior diâmetro do colo apresentado pelos tratamentos com maior lâmina, pode ter sido causado por uma reação das plantas à menor disponibilidade de oxigênio no solo, fazendo com que ACC (ácido 1-aminociclopropano carboxílico) e posteriormente o etileno fossem produzidos mais rapidamente. O etileno leva à morte e desintegração de células no córtex da raiz, formando espaços, que facilitam o movimento de oxigênio, também chamados de aerênquima, aumentando, conseqüentemente, o diâmetro do colo das plantas (TAIZ e ZEIGER, 2006).

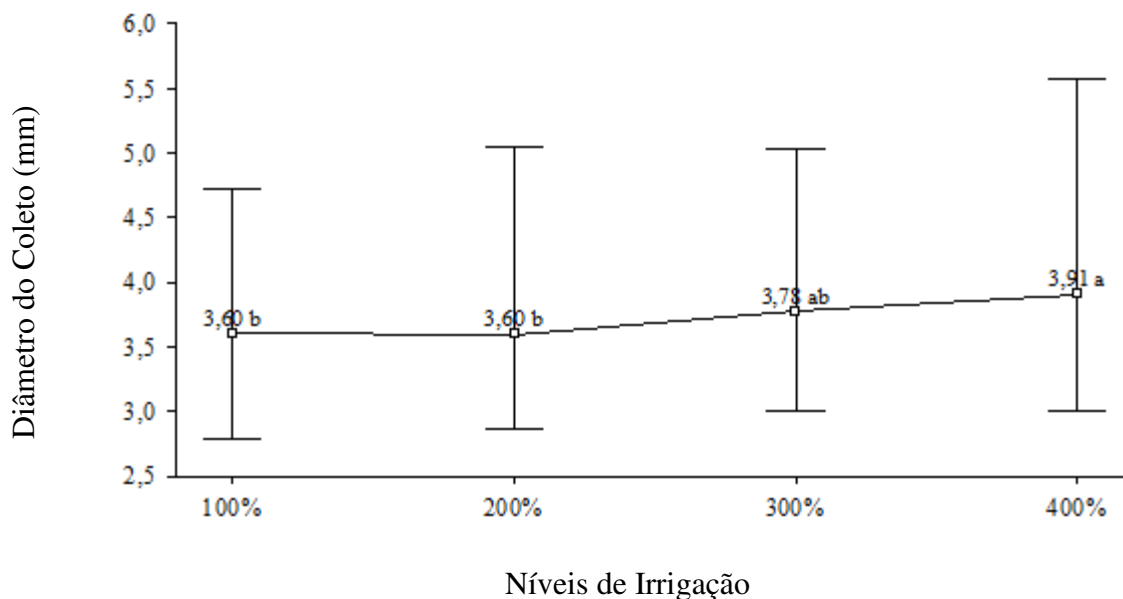


Figura 38. Valores médios de diâmetro do coleto observados nas mudas de *Eucalyptus urograndis* submetidas a diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura).

Na Tabela 20 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para a variável diâmetro do coleto (DC) das mudas de eucalipto. Os resultados indicam a rejeição da condição de esfericidade da matriz de covariância.

Tabela 20. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	14	0,01001	46,49592	0,000023

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Considerando que o valor de p ficou bem abaixo de 0,01, adotou-se a análise multivariada dos perfis, de acordo com o recomendado por FERNANDEZ (1991), tendo como critério de aceitação da hipótese de nulidade que, tanto os valores dos testes de lambda de Wilks quanto os do traço de Pillai, fossem significativos ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$).

Na Tabela 21 são apresentados os resultados dos testes para os fatores intra-indivíduos (tempo) e suas interações. Com base nos resultados dos testes multivariados, observou-se que tanto o fator tempo quanto sua interação com os níveis de irrigação (tempo x nível) foram significativos.

Tabela 21. Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo) e suas interações, obtidos para o diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

FV	Teste	Valor	F	GL Efeito	GL Res	p
Tempo	Wilks	0,0068	233,415	5	8	0,000**
	Pillai	0,9932	233,415	5	8	0,000**
Tempo x Nível	Wilks	0,0431	3,1828	15	22,48	0,006**
	Pillai	1,8608	3,2669	15	30,00	0,002**
Tempo x Bloco	Wilks	0,1767	2,2063	10	16	0,076
	Pillai	1,1389	2,3806	10	18	0,052
Tempo x Nível x Bloco	Wilks	0,0227	1,7857	30	34	0,051
	Pillai	2,1098	1,4600	30	60	0,106

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade. F=Teste F, GL=Graus de liberdade, Res=Resíduo, p=probabilidade.

No gráfico da Figura 39 estão plotados os diâmetros médios observados nos diferentes períodos de observação e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey 0,8% de probabilidade ($\alpha=0,05/6$). Os valores médios do diâmetro do coleto observados no início do estudo (0 DT), acima dos 2,5 mm, indicam que as mudas estavam em acordo com o diâmetro sugerido por STURION et al. (2000) para ter condições de ir a campo.

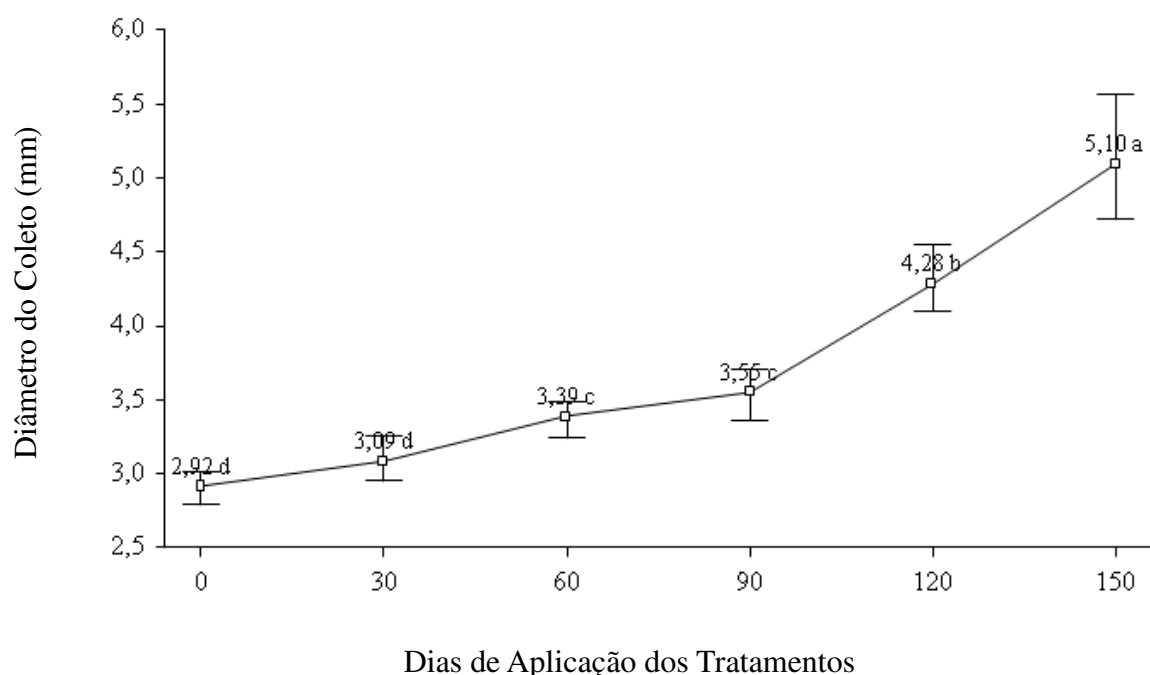


Figura 39. Valores médios de diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Eucalyptus urograndis* observados em diferentes períodos.

Os valores de diâmetro estiveram sempre acima dos valores observados por STORCK et al. (2016), que constataram diâmetros de 1,8; 2,3; 2,7 e 3,0 mm em mudas de eucalipto aos 30, 60, 90 e 90 DT, respectivamente, cultivadas em tubetes de 200 cm³.

Aos 60 DT, e idade aproximada de 180 dias após a semeadura, os valores de diâmetro,

variando de 3,24 a 3,49 mm (média de 3,39 mm) (Tabela 22), são levemente superiores aos resultados obtidos por FIGUEIREDO et al. (2011) que verificaram diâmetros variando de 1,96 a 3,30 mm, estudando o comportamento de mudas clonais de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, em três diferentes localidades nos estados da Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais.

Verificou-se que após 90 DT ocorreu um maior incremento do diâmetro. Este ganho pode estar associado a melhoria das condições climáticas, principalmente, no que diz respeito a temperatura, considerando-se o gradual aumento registrado, e que pode ter favorecido uma maior atividade fotossintetizante com consequências no ganho de biomassa.

Esta suposição ganha força quando são analisados os dados apresentados na Tabela 21. Pode-se observar que todos os tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) apresentaram diferenças significativas entre as médias dos diâmetros do coleto (DC) entre 90-120 dias e entre 120-150 dias, reduzindo a possibilidade destes incrementos no diâmetro terem sido consequências de uma baixa disponibilidade de oxigênio no substrato (hipoxia).

Tabela 22. Diâmetro do coleto (DC) médio das mudas de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), observado em cada tratamento (níveis de irrigação), nos diferentes períodos de observação (0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de tratamento).

Tratamentos	Dias de Aplicação do Tratamento					
	0	30	60	90	120	150
100%	2,79 aD	2,95 aD	3,49 aC	3,56 aC	4,10 aB	4,72 bA
200%	2,87 aC	2,95 aC	3,24 aC	3,36 aC	4,12 aB	5,05 abA
300%	3,00 aD	3,18 aD	3,37 aD	3,70 aC	4,36 aB	5,04 abA
400%	3,01 aD	3,26 aD	3,47 aD	3,58 aC	4,55 aB	5,57 aA

OBS: letras minúsculas na mesma coluna, e maiúsculas na mesma linha, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. DT: Dias de Tratamento.

Os dados apresentados na Tabela 22 mostram que entre 0-60 dias, em cada nível de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%) não houve diferenças significativas entre os diâmetros médios (com exceção do tratamento com aplicação de lâmina equivalente a 100% da evapotranspiração, aos 60 dias).

Em relação aos níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%) observou-se que as médias de diâmetros de coleto (DC) não apresentaram diferença significativa (ao nível de 5% de probabilidade), até os 120 dias de aplicação dos tratamentos, sendo que somente aos 150 dias, os diâmetros médios dos tratamentos equivalentes a 100% e 400% diferiram entre si.

4.5.3.4 Diâmetro do coleto das mudas de pinus

Na Tabela 23 é apresentado o resumo da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, obtidos para o parâmetro diâmetro do coleto das mudas de pinus.

De acordo com os resultados não foram observadas diferenças significativas entre níveis de irrigação, blocos (bancadas), e suas interações. Somente o fator tempo apresentou diferença significativa, indicando uma variação do diâmetro do coleto ao longo do tempo.

Tabela 23. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, para o diâmetro do coleto (DC) observados nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,254	0,951	0,4471
Bloco	2	0,158	0,594	0,5678
Nível x Bloco	6	0,089	0,333	0,9065
Tempo	5	10,209	129,129	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,110	1,387	0,1835
Tempo x Bloco	10	0,128	1,619	0,1230
Tempo x Nível x Bloco	30	0,048	0,601	0,9352
Média			4,03	
CV(%)			7,68	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade.

Na Tabela 24 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para a variável diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Pinus elliottii* E. Os resultados indicam a rejeição da condição de esfericidade da matriz de covariância.

Tabela 24. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly do fator Tempo, para o parâmetro diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	14	0,02943	35,6108	0,0012**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Considerando que o valor de p ficou bem abaixo de 0,01, adotou-se a análise multivariada dos perfis, conforme recomendado por FERNANDÉZ (1991), tendo como critério de aceitação da hipótese de nulidade que tanto os valores dos testes de lambda de Wilks quanto os do traço de Pillai fossem significativos ao nível de 5% ($P < 0,05$).

Na Tabela 25 são apresentados os resultados dos testes para os fatores intra-indivíduos (tempo) e suas interações.

Tabela 25. Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo), obtido para o diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Pinus elliottii* E .

Fonte de Variação	Teste	Valor	F	GL Efeito	GL Res	p
Tempo	Wilks	0,02495	62,533	5	8	0,000**
	Pillai	0,97505	62,533	5	8	0,000**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade. F=Teste F, GL=Graus de liberdade, Res=Resíduo, p=probabilidade.

Com base nos resultados dos testes multivariados, pelos critérios de Wilks e Pillai, observou-se que o fator tempo foi significativo.

Na Figura 40 estão plotados os diâmetros médios observados nos diferentes períodos de observação e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey 0,8% de probabilidade ($\alpha=0,05/6$).

De acordo com os resultados observou-se que no início do experimento (0 DT) o

diâmetro do colo já estava acima do recomendado para o plantio, conforme PEZUTTI e CALDATO (2011), que definiram diâmetros entre 2,5 e 3 mm. No entanto, de acordo com as recomendações de CARNEIRO (1995) e de ROSE et al. (1990), que definem diâmetros acima de 3,7 mm e 4,0 mm, respectivamente, estes valores só foram atingidos após os 30 e 60 dias.

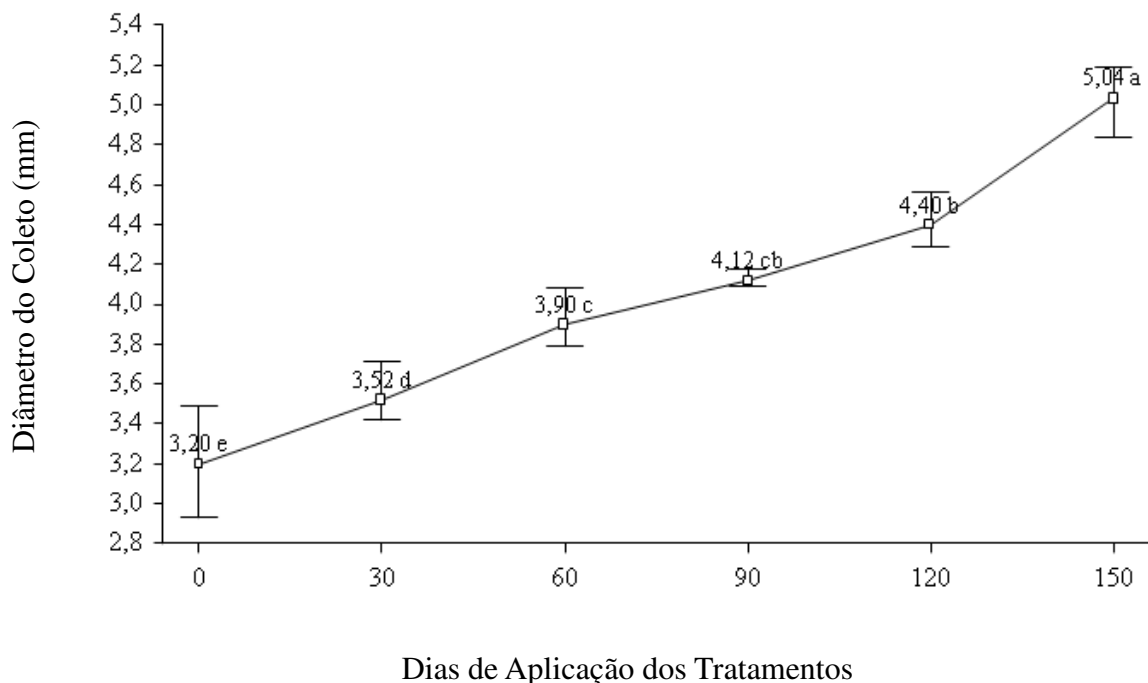


Figura 40. Valores médios de diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Pinus elliottii* E., observados em diferentes períodos.

Os valores do diâmetro do coleto oscilando de 3,2 a 5,0 mm estão compatíveis com os observados em outras variedades de pinus. ROSSI et al. (2008) verificaram valores variando de 3,28 a 3,99 mm e CARNEIRO et al. (2007) que observaram diâmetros oscilando de 3,63 a 4,03 mm, em mudas de *Pinus taeda* L., em idades compatíveis aos do presente trabalho.

4.5.3.5 Relação altura:diâmetro do coleto das mudas de eucalipto

Na Tabela 26 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para a variável Relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Tabela 26. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Crítério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	14	0,15473	18,84679	0,17088

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Os resultados indicaram aceitação da condição de esfericidade da matriz de covariância, isto é, a condição de esfericidade não foi violada. Considerando que o valor de p acima de 0,05 (não significativo), adotou-se os testes univariados, conforme recomendado por FERNANDÉZ (1991).

Na Tabela 27 é apresentado o resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM) sem a necessidade de ajustes, conforme resultado do teste de esfericidade.

Tabela 27. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), de mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	1,34	0,82	0,5083
Bloco	2	10,03	6,13	0,0146*
Nível x Bloco	6	1,37	0,84	0,5641
Tempo	5	57,70	33,97	0,0000**
Tempo x Nível	15	1,15	0,68	0,7959
Tempo x Bloco	10	1,26	0,74	0,6825
Tempo x Nível x Bloco	30	1,39	0,82	0,7217
Média			10,84	
CV(%)			11,66	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. *Significativo ao nível de 5% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

A análise dos fatores entre indivíduos (Tabela 27), para a relação altura:diâmetro (RHDC), não indicaram diferença significativa entre os valores médios entre tratamentos (níveis de irrigação) e da interação entre os tratamentos e os blocos (bancadas). No entanto, foi identificada a existência de diferença significativa ($P < 0,05$) entre as médias observadas nas bancadas (blocos). Na análise dos fatores intra-indivíduos somente a variável tempo apresentou diferença significativa.

Na Figura 41 estão plotadas as médias da RHDC das mudas de eucalipto, observadas nos três blocos (Bancada I, Bancada II e Bancada III), com as respectivas médias e as diferenças verificadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

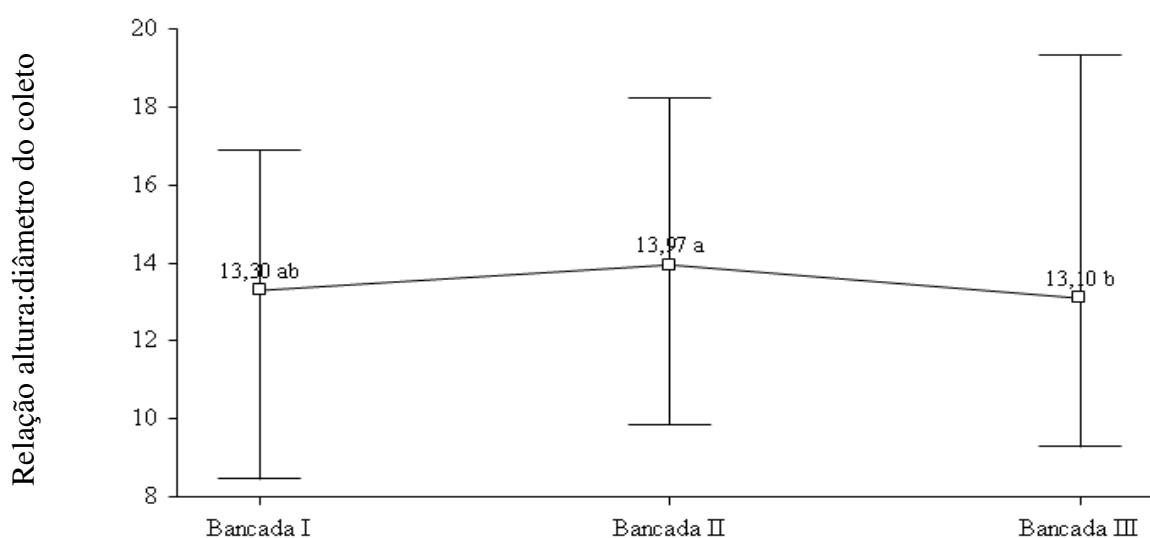


Figura 41. Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) observados nas mudas de eucalipto, nas bancadas I, II e III.

De acordo com resultados, observou-se que a Bancada II foi significativamente

diferente da Bancada III, apresentou maior valor médio (RHDC = 13,97). Embora não tenha sido detectada diferença destes parâmetros (H e DC) na análise do efeito bloco, este resultado foi consequência da combinação dos valores médios observados, individualmente, nos parâmetros altura (H) e diâmetro do coleto (DC) dentro de cada bloco (bancada).

A Bancada II apresentou altura levemente superior às demais (50,4 cm, na bancada II, enquanto que nas bancadas I e III, foram de 50,3 cm e de 48,1 cm, respectivamente) e diâmetro levemente inferior (3,64 mm, na bancada II, enquanto que nas bancadas I e III foram de 3,79 e 3,75 mm, respectivamente), de tal forma que a combinação destes valores influenciou no resultado da RHDC observado na bancada II ocasionando tal diferença ($P < 0,05$).

Na Figura 42 estão plotados os valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) observados nos diferentes períodos de observação e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 0,8% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 6$ tempos)

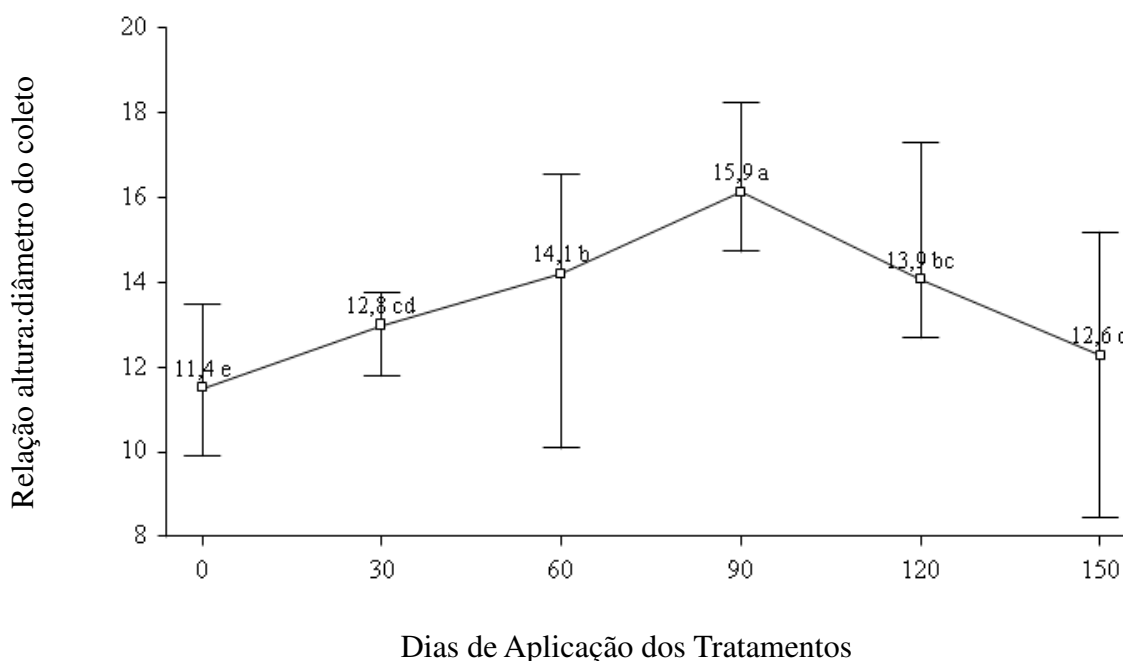


Figura 42. Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de *Eucalyptus urograndis*, observadas em diferentes períodos.

Observou-se que ao completar 90 dias de aplicação dos tratamentos ocorreu uma queda dos valores médios da RHDC. Esta queda nos valores observados está associada ao menor incremento, em altura, do caule, e ao maior desenvolvimento do diâmetro do coleto após os 90 dias.

Os valores observados no experimento estiveram acima dos observados por ATAÍDE et al. (2010), que em bandejas contendo mudas de eucalipto verificaram valores de RHDC variando de 7,5 a 10,1; conforme o número de mudas presentes na bandeja (48, 64 e 88 unidades). No entanto, ficaram abaixo dos valores observados por GOMES et al. (2003) que verificaram valores variando de 18,7 a 25,6, em mudas de *Eucalyptus grandis* aos 90 dias após a semeadura cultivados em tubetes de 50, 110, 200 e 280 cm³. Porém, os valores ficaram dentro da faixa, quando as mudas estavam com 120 dias após a semeadura, sendo que os valores observados pelos autores, variaram de 11,6 a 27,9.

4.5.3.6 Relação altura:diâmetro do coleto das mudas de pinus

Na Tabela 28 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), observadas nas mudas de pinus.

Tabela 28. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	1,704	1,979	0,1709
Bloco	2	1,442	1,675	0,2283
Nível x Bloco	6	0,341	0,396	0,8679
Tempo	5	11,444	37,776	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,932	3,077	0,0010**
Tempo x Bloco	10	0,685	2,260	0,0256*
Tempo x Nível x Bloco	30	0,219	0,723	0,8329
Média			10,84	
CV(%)			11,66	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. *Significativo ao nível de 5% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade.

A análise dos fatores entre-indivíduos, para a relação altura:diâmetro (RHDC), não indicaram diferença significativa entre os valores médios dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e da interação entre tratamentos e blocos. No entanto, na análise dos fatores intra-indivíduos foram identificadas existências de diferenças significativas ($P < 0,05$) entre as médias observadas ao longo do tempo, e de suas interações com os níveis de irrigação e com os blocos.

Na Tabela 29 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para a variável Relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de pinus. Os resultados indicam a rejeição da condição de esfericidade da matriz de covariância, isto é, a condição foi violada (significativa).

Tabela 29. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Crítério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	14	0,0903	24,2882	0,0423*

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Considerando que o valor de p está entre 0,01 e 0,05, adotou-se a correção dos graus de liberdade, conforme recomendado por FERNANDEZ (1991).

Na Tabela 30 é apresentado o resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM) sem os ajustes e com os ajustes (correção dos números de graus de liberdade adotando os critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC), observados nas mudas de pinus. Verifica-se que após a aplicação da correção dos graus de liberdade pelo critério de Greenhouse-Geisser (G-G), a interação entre tempo e bloco deixou de ser significativa. A hipótese de nulidade havia sido

rejeitada quando ela era verdadeira (erro tipo I).

Tabela 30. Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação altura:diâmetro do coleto (RHDC) observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E. submetidos a 4 níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) e avaliados em 6 diferentes tempos (T0, T30, T60, T90, T120 e T150).

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F	G-G	H-F
Tempo	5	57,219	11,444	37,776	0,0000	0,0000	0,0000
Tempo x Nível	15	13,984	0,932	3,077	0,0010	0,009	0,0010
Tempo x Bloco	10	6,847	0,685	2,260	0,0256	0,0643	0,0256
Tempo x Nível x Bloco	30	6,568	0,219	0,723	0,8329	0,7584	0,8329
Erro	60						
G-G = Greenhouse-Geisser $\epsilon = 0,5634$							
H-F = Hyunh-Feldt $\epsilon = 1,0000$							
GL=Graus de liberdade; SQ=Soma de quadrado; QM= Quadrado médio; F= Teste F							

Tanto o fator tempo quanto a interação entre tempo e nível mantiveram-se significativo ($P < 0,01$), a análise da interação entre os fatores (tempo x nível) é apresentada na Tabela 31. As diferenças entre tratamentos foram verificadas pelo teste de Tukey a 0,8% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 6$ tempos).

Tabela 31. Valores médios da relação altura:diâmetro do coleto das mudas de *Pinus elliottii* E., observados nos diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) aos 0, 30, 60, 90, 120 e 150 dias de aplicação dos tratamentos (DT)

Tratamento	Idade					
	0 DT	30 DT	60 DT	90 DT	120 DT	150 DT
100%	8,43 abA	8,08 abAB	7,24 aAB	7,85 aAB	7,45 aAB	6,65 aB
200%	7,46 bA	7,37 bA	7,64 aA	7,69 aA	6,71 aA	6,07 aA
300%	9,32 aA	8,17 aAB	7,12 aBC	7,22 aBC	7,24 aBC	6,35 aC
400%	8,53 abA	8,22 aAB	7,61 aAB	7,36 aAB	7,12 aAB	6,62 aB

OBS: letras minúsculas na mesma coluna e maiúsculas na mesma linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. DT: Dias de tratamento.

A análise entre tratamentos (níveis de irrigação) em cada período de observação (tempo), apresenta diferenças até os 30 primeiros dias, após este período os tratamentos apresentaram médias estatisticamente iguais. Os menores valores de altura associados aos maiores valores do diâmetro do coleto, verificados no tratamento equivalente a 200% da evapotranspiração, durante os 30 primeiros dias, resultaram em valores médios da RHDC inferiores aos demais, sendo esta diferença estatisticamente significativa.

Analisando o comportamento de cada tratamento (nível de irrigação) ao longo do tempo, constata-se existir diferenças entre as medições iniciais (0 DT) e finais (150 DT) em todos os tratamentos com exceção do correspondente a 200%. Diferentemente do observado no cultivo de eucalipto, que apresentou valores crescentes da RHDC até os 90 DT com

posterior redução, os valores da RHDC no cultivo de pinus apresentaram tendência de quedas ao longo do experimento, demonstrando que os incrementos em altura (H) foram proporcionalmente menores que aqueles observados no diâmetro do coleto (DC).

Com exceção das RHDC observadas em 0 DT, pode-se dizer que, durante quase todo o período experimental, os valores médios estiveram dentro dos limites tidos como satisfatórios conforme NOVAES (1998), ou seja, variando entre 5,4 a 8,1 (aos 30 DT os valores ficaram próximos do limite superior), indicando certo equilíbrio de crescimento destes dois parâmetros (altura e diâmetro do caule). CARNEIRO et al. (2007) observaram valores médios variando de 3,71 a 8,74 para as RHDC de mudas de *Pinus taeda* L., aos 210 dias após a semeadura e; variando de 3,46 a 3,87 aos 510 dias após a semeadura.

Aos 240 dias após a semeadura (equivalente a 0 DT, aproximadamente), ROSSI (2005) observou valores médios variando de 7,9 a 8,6 e de 8,1 a 8,6, para mudas de *Pinus taeda* L., submetidas à poda química das raízes com sulfato de cobre e com oxicloreto de cobre, respectivamente, conforme a dosagem.

4.5.4 Análise das variáveis destrutivas

4.5.4.1 Biomassa seca total das mudas de eucalipto

Na Tabela 32 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de eucalipto.

Tabela 32. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,193	0,325	0,8077
Bloco	2	0,700	1,178	0,3411
Nível x Bloco	6	1,388	2,336	0,0995
Tempo	5	115,387	192,116	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,104	0,174	0,9814
Tempo x Bloco	10	1,001	1,667	0,1903
Tempo x Nível x Bloco	30	0,805	1,340	0,2605
Média			3,06	
CV(%)			20,21	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

A análise dos fatores entre-indivíduos, para a variável biomassa seca total (MST), não indicaram diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações. Na análise dos fatores intra-indivíduos somente a variável tempo apresentou diferença significativa.

Na Tabela 33 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para o peso matéria seca total (MST) das mudas de eucalipto. Considerando que o teste foi significativo, ou seja a condição de esfericidade foi violada adotou-se os testes multivariados, conforme recomendado por FERNANDÉZ (1991).

Tabela 33. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a biomassa

seca total (MST) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	2	0,1410	21,5461	0,00002**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Na Tabela 34 os resultados dos testes multivariados, pelos critérios de lambda de Wilks e traço de Pillai, concordam com o obtido na ANOVA-RM univariada, indicando diferenças nas médias de peso da massa seca total (MST) observadas ao longo do tempo; não foram detectadas diferenças nas interações.

Tabela 34. Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, para o fator intra-indivíduos (tempo), obtido para a biomassa seca total (MST) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Teste	Valor	F	GL Efeito	GL Res	p
Tempo	Wilks	0,00992	548,810	2	11	0,000**
	Pillai	0,99008	548,810	2	11	0,000**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade. F=Teste F, GL=Graus de liberdade, Res=Resíduo, p=probabilidade.

Na Figura 43 estão plotados os valores médios da biomassa seca total (MST) observados nos diferentes períodos de observação (30, 90 e 150 DT) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

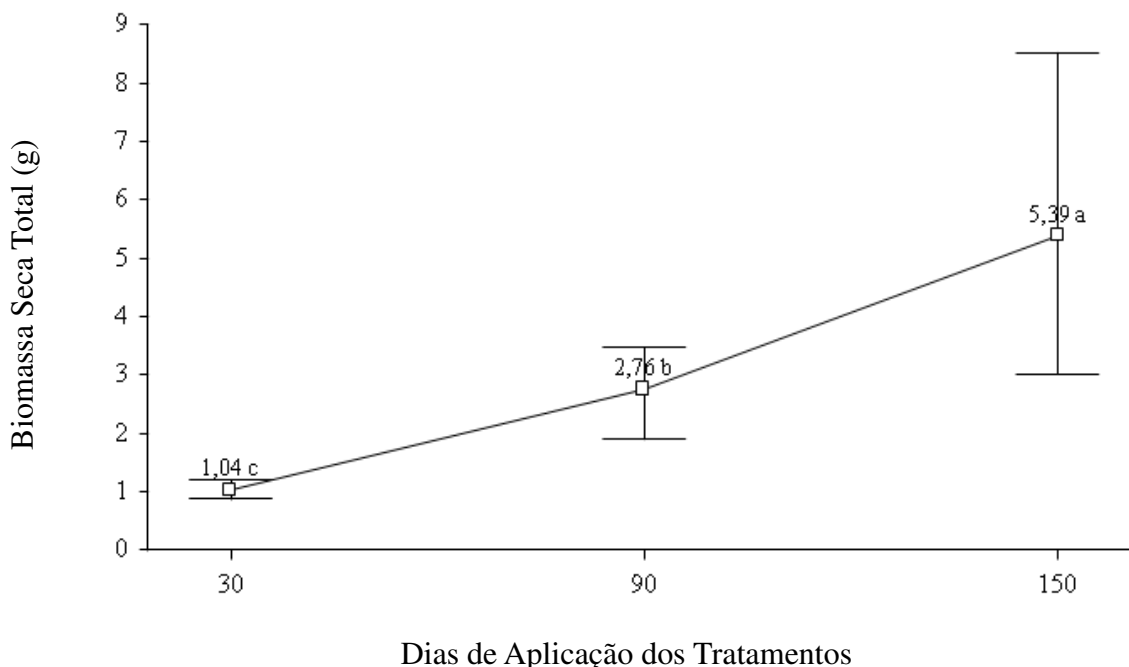


Figura 43. Variação da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de eucalipto, durante o período do experimento.

Observou-se que os valores estão compatíveis com aqueles verificados na literatura. Em estudo avaliando o crescimento de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), mesma espécie utilizada no presente trabalho, STORCK et al. (2016)

observaram MST variando de 0,59 a 1,48 g planta⁻¹, aos 150 dias (equivalente a 30 DT) e de 0,32 a 2,96 g planta⁻¹ aos 210 dias após semeadura (equivalente a 90 DT).

Este aumento do MST está dentro do esperado e reflete o crescimento das partes aérea (folhas e caules) e radicular das mudas, indicando que tanto o substrato quanto os diferentes níveis de irrigação não comprometeram o desenvolvimento das plantas.

4.5.4.2 Biomassa seca total das mudas de pinus

Na Tabela 35 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de *Pinus elliottii* var. *elliottii* -Engelm.

Tabela 35. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,299	0,659	0,593
Bloco	2	0,354	0,780	0,480
Nível x Bloco	6	0,438	0,965	0,488
Tempo	5	16,897	51,744	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,611	1,871	0,127
Tempo x Bloco	10	0,115	0,353	0,839
Tempo x Nível x Bloco	30	0,341	1,043	0,445
Média			3,14	
CV(%)			18,98	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

Para a variável biomassa seca total (MST), das mudas de pinus, não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações. No entanto, a análise dos fatores intra-indivíduos indicaram que a variável tempo apresentou diferença significativa.

Na Tabela 36 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para o peso matéria seca total (MST) das mudas de *Pinus elliottii* E.. Considerando que o teste foi significativo, ou seja a condição de esfericidade foi violada, e o valor p apresentou valores entre 0,01 e 0,05, adotou-se as correções dos graus de liberdade, conforme recomendado por FERNANDÉZ (1991).

Tabela 36. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para o parâmetro biomassa seca total (MST) das mudas de *Pinus elliottii* E..

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	2	0,4723	8,2527	0,0161*

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 37 é apresentado o resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM) sem os ajustes e com os ajustes (correção dos números de graus de liberdade adotando os critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de pinus submetidas a quatro níveis de irrigação

(100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) e avaliados em seis diferentes tempos (T0, T30, T60, T90, T120 e T150).

Tabela 37. Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a biomassa seca total (MST) observados nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F	G-G	H-F
Tempo	5	33,794	16,897	51,744	0,000	0,000	0,000
Tempo x Nível	15	3,667	0,611	1,871	0,127	0,166	0,127
Tempo x Bloco	10	0,460	0,115	0,353	0,839	0,762	0,839
Tempo x Nível x Bloco	30	4,087	0,341	1,043	0,445	0,446	0,445
Erro	60						

G-G = Greenhouse-Geisser $\epsilon = 0,6545$

H-F = Hyunh-Feldt $\epsilon = 1,0000$

GL=Graus de liberdade; SQ=Soma de quadrado; QM= Quadrado médio; F= Teste F

Verificou-se que após a aplicação da correção dos graus de liberdade por ambos os critérios (G-G e H-F), o fator tempo permaneceu significativo.

Na Figura 44 estão plotados os valores médios da biomassa seca total (MST) observados nos diferentes períodos de observação (30, 90 e 150 DT) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

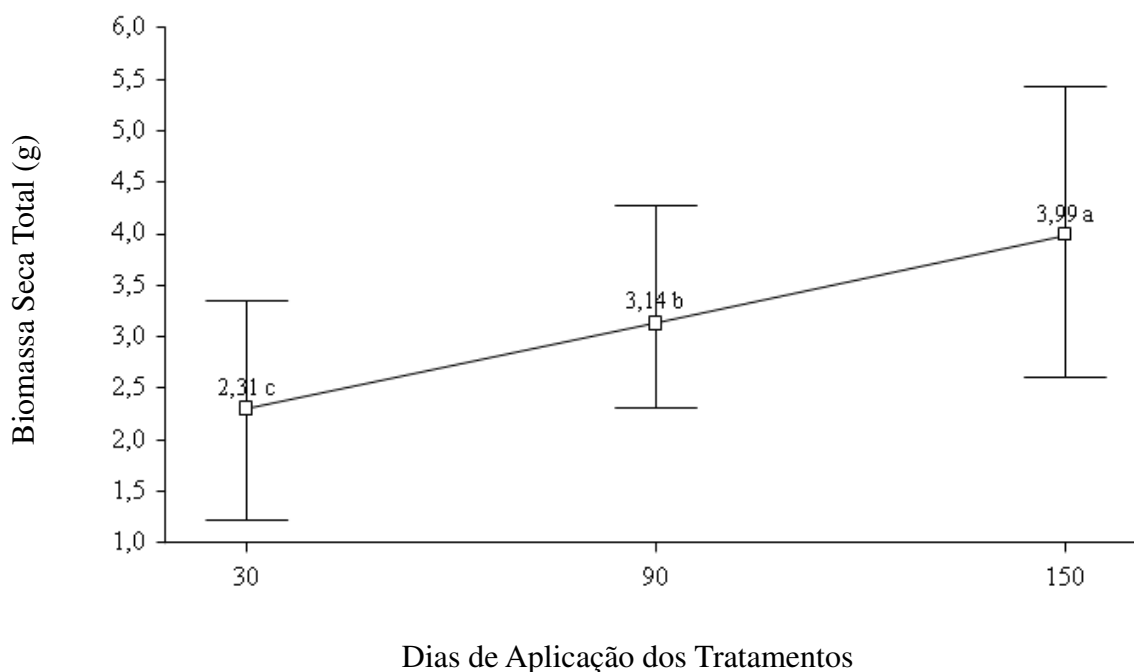


Figura 44. Valores médios da biomassa seca total (MST), observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E. durante o período do experimento.

Os valores obtidos foram acima daqueles descritos na literatura, porém, existem

diferenças de idade e de cultivares. NOVAES et al. (2001), analisando o desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua cultivada em dois tipos de recipientes, verificaram que as mudas apresentaram MST médio de 0,41 g planta⁻¹, aos seis meses de idade, enquanto que CARNEIRO et al. (2007), para a mesma espécie de pinus, observaram valores oscilando de 0,50 a 2,09 g planta⁻¹, conforme o espaçamento delas na bandeja.

CALDEIRA et al. (2003) verificaram aos 100 dias após a semeadura, valores de MST variando de 0,49 a 1,48 g planta⁻¹, para o *Pinus elliottii* E. Assim como ocorrido com as mudas de eucalipto, o aumento do MST, observado nas mudas de pinus reflete o desenvolvimento das mudas, indicando que tanto o substrato quanto os diferentes níveis de irrigação não alteraram o comportamento esperado.

4.5.4.3 Relação entre a biomassa seca da parte aérea e das raízes das mudas de eucalipto

Na Tabela 38 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de eucalipto.

Tabela 38. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,458	0,885	0,476
Bloco	2	0,578	1,117	0,359
Nível x Bloco	6	0,161	0,312	0,918
Tempo	5	21,416	43,292	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,766	1,549	0,205
Tempo x Bloco	10	0,082	0,165	0,954
Tempo x Nível x Bloco	30	0,112	0,226	0,995
Média			2,59	
CV(%)			21,59	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

Os resultados da análise dos fatores entre indivíduos, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de eucalipto, não indicaram diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações, contudo apresentou, na análise dos fatores intra-indivíduos, diferença significativa do fator tempo.

Na Tabela 39 é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly para a relação MSPAMSR das mudas de eucalipto. De acordo com o resultado do teste de Mauchly, a condição de esfericidade foi violada, porém o valor p apresentou valores entre 0,01 e 0,05, sendo adotada as correções dos graus de liberdade, de acordo com as recomendações de FERNANDÉZ (1991).

Tabela 39. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor-p
Tempo	2	0,4773	8,1362	0,0171*

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 40 é apresentado o resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM) sem os ajustes e com os ajustes (correção dos números de graus de liberdade adotando os critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de eucalipto submetidas a quatro níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) e avaliados em seis diferentes tempos (T0, T30, T60, T90, T120 e T150).

Tabela 40. Resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes e com ajustes (correção dos números de graus de liberdade pelos critérios de Greenhouse-Geisser (G-G) e de Hyunh-Feldt (H-F)) para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de *Eucalyptus urograndis*

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F	G-G	H-F
Tempo	5	42,832	21,416	43,292	0,000	0,000	0,000
Tempo x Nível	15	4,597	0,766	1,549	0,205	0,237	0,205
Tempo x Bloco	10	0,3276	0,082	0,165	0,954	0,897	0,954
Tempo x Nível x Bloco	30	1,3405	0,112	0,226	0,995	0,979	0,995
Erro	60						
G-G = Greenhouse-Geisser $\epsilon = 0,6567$							
H-F = Hyunh-Feldt $\epsilon = 1,0000$							
GL=Graus de liberdade; SQ=Soma de quadrado; QM= Quadrado médio; F= Teste F							

Mesmo após a aplicação da correção dos graus de liberdade por ambos os critérios (G-G e H-F), o fator tempo permaneceu significativo.

Na Figura 45 estão plotados os valores médios da relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR), obtidos nos diferentes períodos de observação (30, 90 e 150 DT) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

Com exceção da média verificada aos 30 DT (igual a 1,53), as demais médias da relação MSPAMSR estão dentro da faixa observada por BATISTA et al. (2014), cujos valores estavam entre 2,95 e 3,69, em mudas de *Eucalyptus urophylla* e por MUNGUANBE (2012), cujos valores variaram entre 2,06 e 3,66, em mudas de *Eucalyptus urophylla* e de *urograndis*.

No entanto, este comportamento, apresentando menores relações entre a biomassa seca da parte aérea e das raízes no período inicial e maiores valores nos períodos posteriores, também foi observado por GOMES (2001), em mudas de *Eucalyptus grandis* cujos valores da relação MPSAMSR oscilaram de 0,96 a 2,66, aos 60 dias após a germinação; de 2,13 a 3,07, aos 90 dias após a germinação; e de 2,30 a 3,08, aos 120 dias após a germinação.

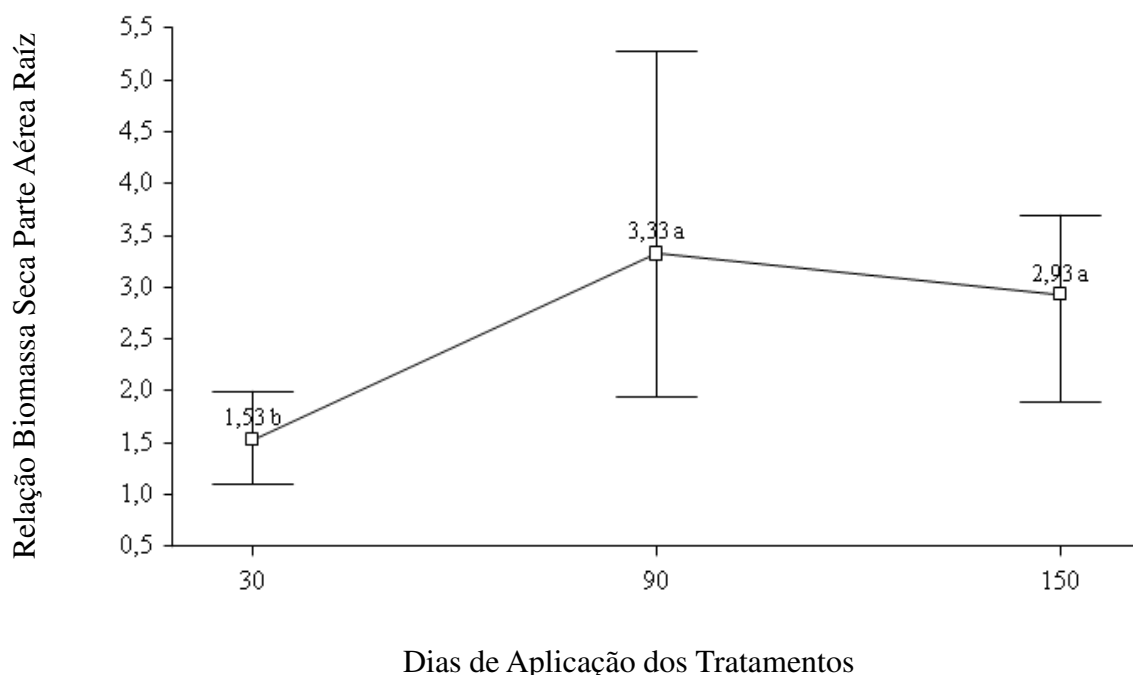


Figura 45. Valores médios da relação biomassa seca da parte aérea:biomassa seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de eucalipto, durante o período do experimento.

Estas variações, com maiores acúmulos de assimilados, ora na parte radicular ora na parte aérea, influenciando nos valores da relação MSPAMSR, podem ser repostas das plantas às condições existentes naqueles momentos. No período inicial, o transplante das mudas associada a restrição hídrica, pois somente uma pequena lâmina de água foi aplicada para evitar lixiviações; podem ter induzindo o acúmulo de massa nas raízes em detrimento do acúmulo de assimilados na parte aérea. Posteriormente, quando as condições de fornecimento de água foram restabelecidas, estimulou o acúmulo de assimilados na parte aérea, aumentando os valores da relação MSPAMSR.

4.5.4.4 Relação entre a biomassa seca da parte aérea e das raízes das mudas de pinus

Tabela 41. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para a relação biomassa seca da parte aérea:peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,7733	2,165	0,145
Bloco	2	0,3451	0,966	0,408
Nível x Bloco	6	0,2128	0,596	0,728
Tempo	5	3,3686	10,217	0,000**
Tempo x Nível	15	0,2486	0,754	0,612
Tempo x Bloco	10	0,2018	0,612	0,658
Tempo x Nível x Bloco	30	0,2496	0,757	0,685
Média			2,74	
CV(%)			19,84	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

Na Tabela 41 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, da relação biomassa seca da parte aérea: biomassa seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de eucalipto, sendo que os mesmos não indicaram diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações, porém apresentou, na análise dos fatores intra-indivíduos, diferença significativa do fator tempo.

Na Tabela 42, é apresentado o resultado do teste de esfericidade de Mauchly, onde verificou-se que a condição de H-F não foi violada, com o valor p apresentando valores superiores a 0,05. Por este motivo não há a necessidade de nenhum tipo de ajuste na análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), conforme FERNANDEZ (1991).

Tabela 42. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a relação biomassa seca da parte aérea: peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	2	0,6326	5,0359	0,081 ^{ns}

Na Figura 46 estão plotados os valores médios da relação biomassa seca da parte aérea: peso de matéria seca das raízes (MSPAMSR), obtidos para as mudas de pinus, nos diferentes períodos de observação (30, 90 e 150 DT) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

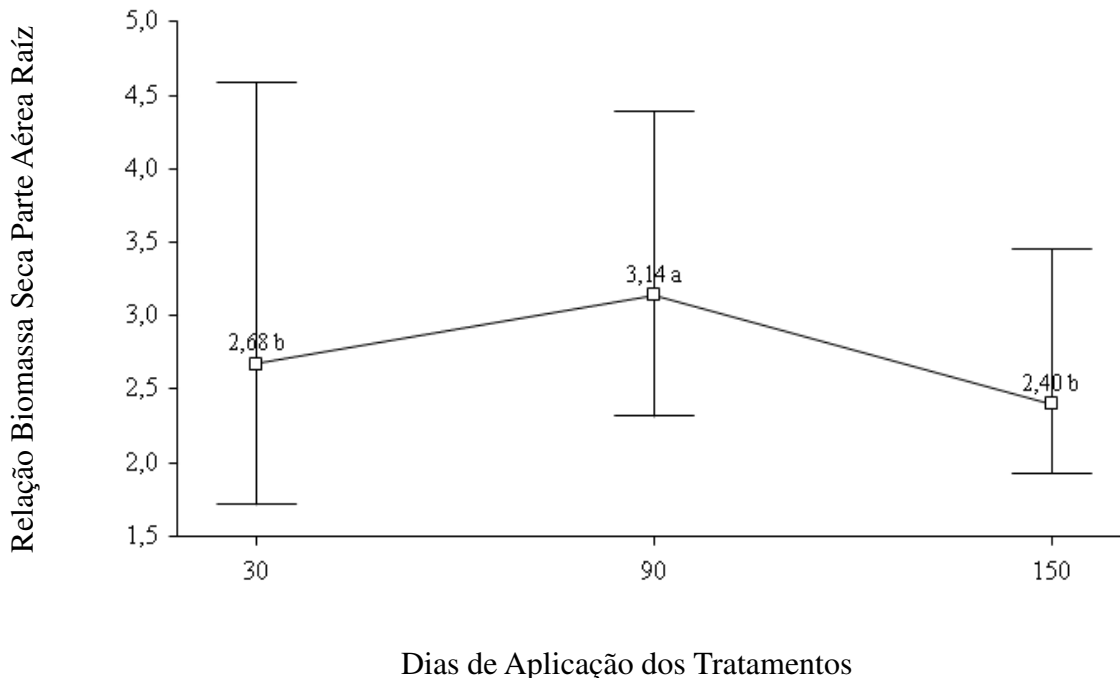


Figura 46. Variação da relação biomassa seca da parte aérea: biomassa seca das raízes (MSPAMSR), observadas nas mudas de pinus, durante o período do experimento.

Os valores médios observados aos 30 DT (em torno de 230 DAS) estiveram abaixo das médias verificadas por ROSSI (2005); que em mudas de *Pinus taeda* L., com 240 dias de idade, obtiveram valores oscilando de 3,1 a 5,6 e de 3,1 a 5,9, conforme a dosagem de sulfato de cobre e de oxiclreto de cobre, utilizados na poda química das raízes. No entanto,

verificou-se que, os valores médios aos 30 e 150 DT estiveram dentro da faixa de 1,0 a 3,0, recomendada por WAKELEY (1954), e cujo desempenho após o plantio é considerado satisfatório pelo autor para esta mesma espécie (*P. elliotii*), enquanto que, aos 90 DT, o valor esteve levemente acima da referida faixa.

Quando analisado o comportamento da relação MSPAMSR para as mudas de pinus, foi observado um aumento significativo entre 30 e 90 DT, com posterior redução, também significativa, entre 90 e 150 DT. Ao analisarmos os componentes separadamente, MSPA e MSR, verificou-se que houve um baixo desenvolvimento das raízes neste período inicial (30 a 90 DT) com um incremento de apenas 10% em seu peso (de 0,70g para 0,77g), no entanto, neste mesmo período o incremento em massa da parte aérea foi de, aproximadamente 47%, aumentando de 1,61g para 2,36g. No período final (90 a 150 DT), ocorreu o inverso, maior incremento na massa das raízes (57%, aproximadamente), e menor ganho de massa da parte aérea (apenas 17%). Esta análise evidencia duas etapas do desenvolvimento das mudas, na primeira, um maior crescimento do diâmetro do coleto, e na segunda, o crescimento do sistema radicular.

4.5.4.5 Índice de qualidade de Dickson das mudas de eucalipto

Na Tabela 43 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) do eucalipto.

Tabela 43. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) observados nas mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,773	2,165	0,145
Bloco	2	0,345	0,966	0,408
Nível x Bloco	6	0,213	0,596	0,729
Tempo	5	3,369	10,217	0,0000**
Tempo x Nível	15	0,249	0,754	0,613
Tempo x Bloco	10	0,202	0,612	0,658
Tempo x Nível x Bloco	30	0,249	0,757	0,686
Média			0,33	
CV(%)			24,83	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

A análise dos fatores entre-indivíduos, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), não indicaram diferenças significativas entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações. No entanto, na análise dos fatores intra-indivíduos a variável tempo apresentou diferença significativa.

Na Tabela 44 são apresentados os resultados para verificar a condição de esfericidade dos fatores intra-indivíduos, pelo teste de Mauchly.

Verificou-se que o IQD das mudas de eucalipto não satisfaz a condição de H-F, apresentando resultado significativo com $P < 0,01$, adotando-se, nestes casos, os testes multivariados, conforme recomendação de FERNANDEZ (1991).

Tabela 44. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para a biomassa seca total (MST) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	2	0,2290	16,2126	0,0003**

**Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados dos testes multivariados, pelos critérios de lambda de Wilks e traço de Pillai.

Tabela 45. Resultado dos testes de lambda de Wilks e de traço de Pillai, do fator intra-indivíduos (tempo), para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de *Eucalyptus urograndis*.

Fonte de Variação	Teste	Valor	F	GL Efeito	GL Res	p
Tempo	Wilks	0,01601	337,979	2	11	0,000**
	Pillai	0,98399	337,979	2	11	0,000**

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade. F=Teste F, GL=Graus de liberdade, Res=Resíduo, p=probabilidade.

Os resultados concordam com o obtido na ANOVA-RM univariada, ou seja, existem diferenças nas médias de IQD observadas ao longo do tempo. Embora a interação tempo x nível x bloco tenha sido significativa ($P < 0,05$) pelo critério de lambda de Wilks, foi não significativa pelo critério traço de Pillai, motivo pelo qual não teve seu desdobramento analisado. As demais interações não apresentaram diferenças significativas.

Na Figura 47 estão plotados os valores médios do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) obtidos nos diferentes períodos de observação (30, 90 e 150 DT) e as diferenças entre tratamentos verificadas pelo teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

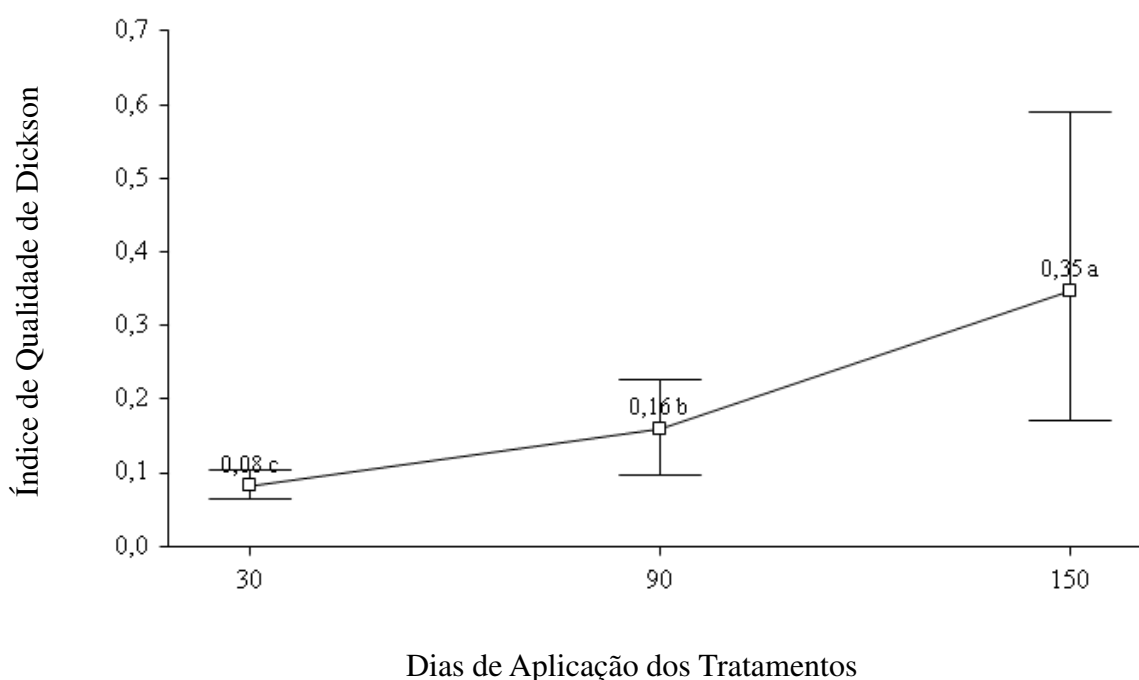


Figura 47. Valores médios do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), observadas nas mudas de eucalipto, durante o período do experimento.

Os valores de IQD apresentaram-se coerentes com aqueles observados por outros autores. Os valores médios gerais do IQD, aos 30 DT (aproximadamente 150 dias após a semeadura) igual a 0,08; e aos 90 DT (aproximadamente 210 dias após a semeadura) igual a 0,16 ficaram próximos aos verificados por STORCK et al. (2016), que analisando o crescimento de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), observaram médias de IQD aos 120 DAS (próximo a 0 DT) iguais a 0,06 e, aos 180 e 210 DAS (equivalentes a 60 e 90 DT), variando em torno de 0,10 e de 0,14, respectivamente.

4.5.4.6 Índice de qualidade de Dickson das mudas de pinus

Na Tabela 46 é apresentado o resultado da análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM), sem nenhum ajuste, do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), observadas nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Tabela 46. Resumo da análise de variância para medidas repetidas (ANOVA-RM), sem ajustes, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) observados nas mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	F	P
Nível Irrigação	3	0,0121	1,453	0,276
Bloco	2	0,0065	0,784	0,478
Nível x Bloco	6	0,0057	0,685	0,665
Tempo	5	0,3615	45,700	0,000**
Tempo x Nível	15	0,0134	1,696	0,165
Tempo x Bloco	10	0,0035	0,441	0,777
Tempo x Nível x Bloco	30	0,0048	0,604	0,817
Média			0,33	
CV(%)			24,83	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade. GL=Graus de liberdade, F=Teste F, P= probabilidade

Os resultados da análise dos fatores entre-indivíduos, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de pinus, não indicaram diferença significativa entre as médias dos tratamentos (níveis de irrigação), dos blocos (bancadas) e das suas interações, apresentando, no entanto, diferença significativa do fator tempo, na análise dos fatores intra-indivíduos.

De acordo com o resultado do teste de esfericidade de Mauchly, apresentado na Tabela 47, a condição de H-F não foi violada, com o valor p sendo superior a 0,05. Assim, de acordo com as recomendações de FERNANDEZ (1991), não houve necessidade ajustes para a análise de variância de medidas repetidas (ANOVA-RM).

Tabela 47. Resultado do teste de esfericidade de Mauchly, do fator Tempo, para o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de *Pinus elliottii* E.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Critério de Mauchly	Estatística de Qui-quadrado χ^2	Valor - p
Tempo	2	0,7996	2,4599	0,2923 ^{ns}

Na Figura 48 estão plotados os valores médios do Índice de Qualidade de Dickson, obtidos para as mudas de pinus, nos três diferentes períodos de observação (30, 90 e 120 DT)

e as diferenças entre tratamentos conforme teste de Tukey a 1,7% de probabilidade ($\alpha = 5\% / 3$ tempos).

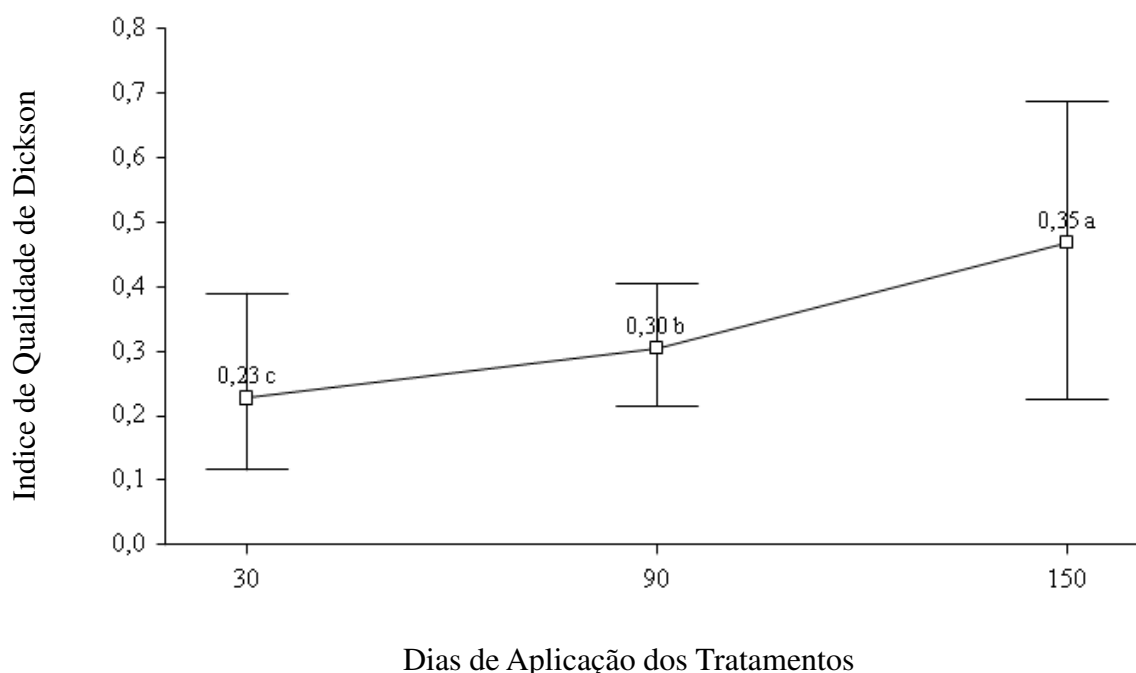


Figura 48. Valores médios do Índice de Qualidade de Dickson (IQD), observados nas mudas de pinus, durante o período do experimento.

Os valores obtidos são similares aos observados por outros autores. ROSSI (2005) observou aos 240 dias após a semeadura (DAS), valores de IQD próximos a 0,1, inferiores ao índice mínimo de 0,2, preconizado por Dickson. No entanto, a média aos 30 DT (aproximadamente 240 DAS), igual a 0,23, está muito próximo ao valor de 0,25 observado por BINOTTO (2007), porém em mudas com 175 dias após a semeadura, e de 0,17 observados aos 180 dias após a semeadura, por THOMAS (2007).

4.5.5 Eficiência no uso da água

Os testes de normalidade (Shapiro-Wilks) indicaram que os valores de eficiência de uso da água (EUA), tanto do eucalipto quanto do pinus, não possuíam distribuição normal. Tendo em vista esta condição, foram realizados os ajustes dos dados, por meio de transformação logarítmica, e somente após normalização e homogeneização da distribuição dos dados, procedeu-se a análise estatística paramétrica da EUA, no eucalipto e no pinus.

Os resultados da análise de variância realizados nos períodos: inicial (compreendendo as observações realizados no período de 30 a 90 DT), final (de 90 a 150 DT) e total (considerando as observações obtidas de 30 a 150 DT), indicaram a existência de diferença significativa ($P < 0,05$) entre tratamentos, em cada um dos períodos estudados, tanto no cultivo de eucalipto quanto no de pinus. Em seguida foi aplicado o teste de Tukey ($\alpha = 5\%$) para a comparação das médias.

Na Tabela 48 são apresentados os valores médios da Eficiência no Uso da Água (EUA), para as mudas de eucalipto e de pinus, observados nos quatro níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%), durante os períodos inicial (30-90 DT), final (90-150DT) e total (30-150DT).

Tabela 48. Valores médios da eficiência no uso da água (EUA), no cultivo de mudas de eucalipto e de pinus, observados nos níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%), durante os períodos inicial (30-90 DT), final (90-150DT) e total (30-150DT).

Tratamento	EUA no Eucalipto (g de biomassa.m ⁻³ de água)			EUA no Pinus (g de biomassa.m ⁻³ de água)		
	Período Inicial	Período Final	Período Total	Período Inicial	Período Final	Período Total
100%	441,3 a	1236,8 a	711,9 a	254,5 a	419,5 ab	224,0 a
200%	259,1 b	792,2 ab	440,4 a	98,4 b	516,7 a	227,6 a
300%	138,4 c	488,5 ab	257,5 b	73,9 b	105,3 b	84,2 b
400%	142,7 c	366,4 b	218,8 b	57,1 b	95,4 b	80,6 b

OBS: letras minúsculas na mesma coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

4.5.5.1 Eficiência no uso da água pelas mudas de eucalipto

Em todos os períodos analisados (inicial, final e global) o tratamento equivalente a 100% da evapotranspiração da cultura mostrou ser mais eficiente, caracterizado por uma maior relação entre a biomassa produzida e o volume de água utilizado, sendo seguido pelos tratamentos relativos a 200%, 300% e 400%, respectivamente, em todos os períodos analisados.

Na Figura 49 estão as representações gráficas da eficiência de uso da água (EUA), expressa em g de biomassa seca/m³ de água, de cada um dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%), obtidos nos períodos inicial, final e total, para as mudas de eucalipto.

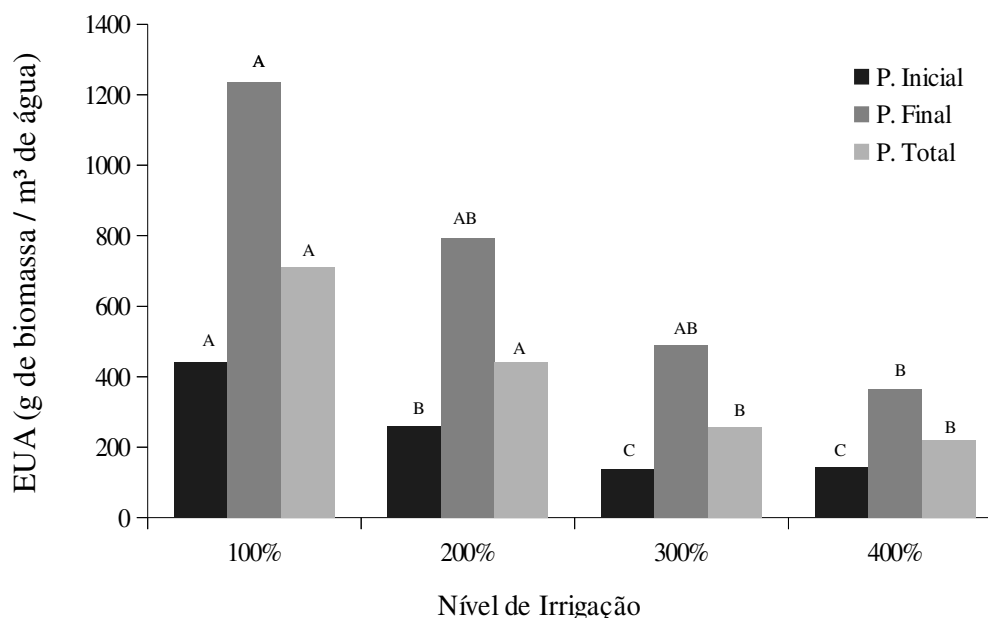


Figura 49. Eficiência no Uso da Água (EUA) por muda de eucalipto, expressa em gramas de biomassa seca por metro cúbico de água utilizada, observada nos tratamentos com aplicação de níveis de irrigação correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura, nos períodos: inicial (T0-T60), final (T60-T120) e global (T0-T120).

A redução da EUA com o aumento da lâmina aplicada, no cultivo de mudas de eucalipto, demonstra que a quantidade de água aplicada nem sempre será convertida proporcionalmente em biomassa, representando um desperdício de água não somente por evaporação mas, principalmente, por percolação, tendo em vista a limitação volumétrica dos recipientes (tubetes) onde são cultivadas. Esta condição, de maiores valores de EUA em menores lâminas, também foi observada por COSTA et al. (2012) testando a aplicação de água em bananeiras, com irrigações correspondentes a 55%, 75,5%, 100%, 122,5% e 150% da evapotranspiração de referência.

A maior redução da EUA observada nos tratamentos equivalentes a 300% e 400%, em torno de 25% e 31%, respectivamente, em comparação aos valores observados no tratamento equivalente a 100% e a 200% (cujas reduções variaram de 3% a 16%) pode estar associada ao excesso de água na zona radicular e/ou a lixiviação de nutrientes. SILVEIRA (2011) estudando os efeitos fisiológico e anatômico provocados pelo excesso de água em mudas de *Coffea arabica* L. verificou reduções nas taxas fotossintéticas e transpiratórias, nas mudas cultivadas sob encharcamento, uma vez que o excesso de água na zona radicular reduz a absorção pelas raízes. A diminuição da condutividade hidráulica da raiz pode aumentar a tensão interna de água, reduzindo o turgor das folhas e, conseqüentemente, a condutância estomática. De acordo com FREITAG (2007) o fechamento estomático não reduz apenas a saída de água da planta, mas também, a entrada de dióxido de carbono, fazendo com que haja uma redução da taxa de fotossíntese e conseqüent redução do desenvolvimento da planta.

Segundo FOCESATO et al. (2008) a perda de nutrientes pela lixiviação é um sério problema no sistema de produção de mudas, em ambiente protegido, pois representa uma perda de capital, na forma de nutrientes e de água, além do risco de contaminação ambiental. Os autores, avaliando o comportamento de três substratos comerciais submetidos a irrigações diárias por gotejamento, observaram após 17 meses, perdas de fósforo e potássio acima de 85,5% e 89,5%, respectivamente, ressaltando a importância do controle da quantidade e da frequência da irrigação, para se reduzir a lixiviação de forma a não comprometer o crescimento das mudas, e sugerindo a utilização de sistemas que possibilitem o reaproveitamento da água percolada, para minimizar o potencial de contaminação de corpos d'água com nutrientes.

O desperdício de água contribui diretamente nos resultados da EUA; analisando-se o tempo de funcionamento dos sistemas de irrigação nos dois períodos (inicial e final) fica evidenciado este impacto. A maior EUA observada no período final (T60-T120) em relação ao período inicial (T0-T60), representando aumento de, aproximadamente, 290% nos valores de biomassa produzidos por m³ de água é inversamente proporcional ao tempo total de funcionamento da irrigação, sendo observados 1106 minutos, no período inicial e de apenas 570 minutos no período final.

Fatores como condições climáticas e o desenvolvimento da parte aérea (dossel) das mudas de eucalipto podem ter contribuído para este aumento observado na EUA. As condições climáticas, no período inicial (06/maio a 03/julho), apresentaram graduais reduções da radiação solar, da temperatura do ar e do fotoperíodo; influenciando a fotossíntese, com conseqüências, no ganho de biomassa. No período final (04/julho a 01/setembro), embora a radiação solar e a temperatura média voltassem a subir, aumentando o deficit de pressão de vapor, as mudas de eucalipto já possuíam um dossel mais desenvolvido, propiciando maior sombreamento, que conseqüentemente, reduziu a demanda evaporativa do ar, mantendo a umidade do substrato. Segundo Lindroth e Cienciala (1993) apud. SILVA et al. (2006) a eficiência de uso da água (EUA) é inversamente proporcional ao deficit de pressão de vapor d'água; corrobora com esta afirmação o trabalho desenvolvido por COELHO et al. (2013), que associaram à redução da temperatura do solo os maiores valores de EUA observados na produção de pimentão nos sistemas de plantio convencional e direto. De acordo com os

autores, os resultados mostraram que a redução das temperaturas promovidas pela cobertura do solo, mantém a umidade do solo, melhorando a produção e a eficiência no uso da água.

No entanto, a contribuição do sombreamento nos resultados da EUA do eucalipto é minimizada quando são analisados os dados de EUA das mudas de pinus, que possuem arquitetura da copa completamente distinta, ou seja, sem a formação do dossel observado nas mudas de eucalipto. O tempo de funcionamento da irrigação das mudas de pinus foi muito próximo aos observados no eucalipto, sendo de 1072 minutos, no período inicial, e de 557 minutos no período final, indicando que as condições de deficit de pressão de vapor foram praticamente iguais.

4.5.5.2 Eficiência no uso da água pelas mudas de pinus

Na Figura 50 estão as representações gráficas da eficiência de uso da água (EUA), expressa em g de biomassa seca/m³ de água, de cada um dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%), obtidos nos períodos inicial, final e total, para as mudas de pinus.

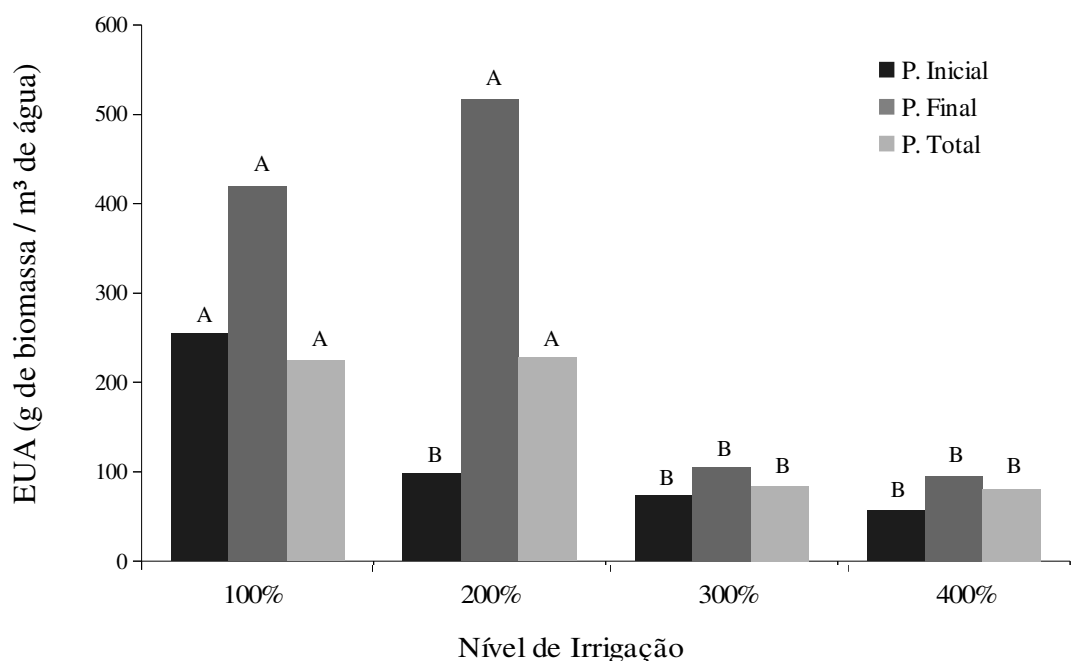


Figura 50. Eficiência no Uso da Água (EUA), expressa em gramas de biomassa seca por metro cúbico de água utilizada por muda de pinus, observada nos tratamentos com aplicação de lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura, nos períodos: inicial (T0-T60), final (T60-T120) e global (T0-T120).

Em todos os períodos analisados (inicial, final e global) o tratamento equivalente a 100% da evapotranspiração da cultura mostrou ser mais eficiente, seguido pelo tratamento relativo a 200% da evapotranspiração da cultura. Os tratamentos equivalentes a 300% e 400%, foram respectivamente inferiores ao de 200%, nos períodos final e total, e praticamente estável no período inicial.

Este comportamento, semelhante ao que ocorreu com o eucalipto, reforça a premissa de que as perdas de água devido a percolação, contribuem fortemente para a redução da EUA. No período inicial (T0-T60) ocorreram reduções de, aproximadamente, 46%, 59% e 70% na EUA conforme a lâmina de irrigação aumentou para 200%, 300% e 400% da

evapotranspiração da cultura, respectivamente; já no período final (T60-T120) as reduções foram de, aproximadamente, 39,5%, 72,1% e 71,9%, respectivamente. Analisando o período global (T0-T120) as reduções foram de 42%, 66% e 71% conforme as lâminas de irrigação foram aumentadas, respectivamente, para 200%, 300% e 400% da evapotranspiração da cultura.

O excesso de água na zona radicular e a lixiviação de nutrientes podem ter contribuído para estes resultados de EUA. De acordo com FLORIANO (2004) o *Pinus elliottii* é uma espécie que cresce a pleno solo ou à meia sombra, ocorrendo em solos argilosos e arenosos, bem drenados e ocasionalmente úmidos, sendo que solos úmidos com pH alto são danosos para a espécie. Embora o substrato apresentasse uma boa drenagem, o maior volume de água aplicado nos tratamentos equivalentes a 300% e 400% da evapotranspiração mantiveram, por um período de tempo mais prolongado, a umidade em níveis mais elevados, condição esta que pode ter afetado o crescimento das mudas de pinus submetidas aos referidos tratamentos.

Os resultados observados, tanto no pinus quanto no eucalipto, corroboram com aqueles verificados por COSTA et al. (2012), ou seja, as aplicações de lâminas de irrigação em níveis acima daqueles necessários para as plantas, acarretam desperdícios que reduzem a eficiência no uso da água.

4.6 CONCLUSÕES

Considerando os resultados encontrados, para as condições em que o trabalho foi realizado, pode-se concluir que:

- a) Na produção de mudas de eucalipto, na fase de viveiro, a aplicação de lâminas de irrigação superiores a 100% da evapotranspiração não resultaram em benefícios na qualidade das mudas com base nas variáveis altura, relação altura:diâmetro do coleto, biomassa seca total, relação entre as biomassas da parte área e radicular e o Índice de Qualidade de Dickson.
- b) Em relação a produção de mudas pinus, na fase de viveiro, as variáveis de crescimento altura, biomassa seca total, relação entre as biomassas da parte área e radicular e Índice de Qualidade de Dickson mostraram que a aplicação de lâminas superiores a 100% da evapotranspiração não resultaram em benefícios. As variáveis diâmetro do coleto e relação altura:diâmetro do coleto foram influenciados pelos tratamentos equivalentes a 200% e 300%, no período inicial (T0).
- c) Verifica-se, pela eficiência do uso da água (EUA), que o excesso de água aplicado pelos tratamentos superiores a 100% da evapotranspiração, não resultou em benefícios efetivos (ganho de massa) para as mudas de pinus e de eucalipto, representando desperdício de água e ressaltando a importância do correto manejo da irrigação.
- d) A utilização de lodo de esgoto, na composição do substrato, mostrou-se viável, mantendo os parâmetros de crescimento estudados (altura, diâmetro do coleto, relação altura:diâmetro do coleto, biomassa seca total, relação entre as biomassas da parte área e radicular e Índice de Qualidade de Dickson) em conformidade com os observados na literatura, sendo uma alternativa para a produção de mudas desde que respeitadas as normas vigentes

5. CAPÍTULO IV

EFEITOS DA APLICAÇÃO DE DIFERENTES LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO SOBRE A LIXIVIAÇÃO DE METAIS PESADOS PRESENTES EM SUBSTRATO CONTENDO LODO DE ESGOTO

5.1. RESUMO

A utilização de biossólidos na agricultura é uma alternativa interessante sendo uma destinação final que apresenta benefícios como a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, porém, os riscos associados a contaminação por microorganismos patogênicos e por metais pesados presentes no lodo de esgoto devem ser avaliados. Como forma de reduzir a contaminação do solo pela aplicação direta do lodo de esgoto, sua utilização na composição de substratos para a produção de mudas florestais tem se mostrado viável, sendo comprovada por diversos estudos que envolveram a produção de espécies nativas e exóticas, em diferentes proporções do biossólido. No entanto, um dos riscos relacionados ao uso do lodo de esgoto como componente de substrato é a possibilidade de lixiviação de metais pesados ocasionada pelo excesso de irrigação. Considerando essa possibilidade, o presente trabalho teve como objetivos: verificar o efeito, ao longo do tempo, de diferentes lâminas de irrigação, correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, sobre as concentrações de metais pesados (zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo) presentes em substratos contendo lodo de esgoto, cultivados com mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*); quantificar o volume de lixiviados gerado pelas lâminas de irrigação e as concentrações desses metais presentes no efluente, ao longo do tempo; além dos riscos potenciais de contaminação do meio com vistas a legislação ambiental vigente (resoluções nº 375/2006 e nº 430/2011 do CONAMA). O estudo desenvolvido no Jardim Botânico do Rio de Janeiro utilizou biossólido oriundo da ETE-Alegria (RJ), em mistura com vermiculita na proporção 60:40 (BIO:VER). O material foi submetido aos quatro níveis de irrigação, diariamente, sendo o lixiviado contabilizado após a aplicação das lâminas. O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, sendo os teores de metais no substrato submetido a ANOVA, e quando detectada a diferença foram aplicados o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, na comparação das médias. Em relação ao lixiviado, somente a análise quantitativa foi realizada de forma semelhante ao substrato, a análise química não foi submetida a ANOVA por ser amostra única. Os resultados indicam que, inicialmente, o teor de zinco, no substrato, esteve 27% acima do limite estabelecido pela resolução nº 375/2006 do CONAMA; no período final não houve diferença, no pinus e no eucalipto, ficando os teores abaixo dos limites da norma. As lâminas correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% geraram, aproximadamente 0,225 L, 0,465 L, 0,740 L e 1,025 L de lixiviados, por bandeja. O teor de zinco presente no efluente esteve nas lâminas equivalentes a 200% e 300% da evapotranspiração acima 39,4% e 15,6%, respectivamente, dos limites da norma, enquanto os tratamentos de 100% e 400% estiveram 34,6% e 23,2%, respectivamente, abaixo. No início (30DT) as concentrações de zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo ficaram abaixo de 4,97; 0,003; 0,014; 0,043; 0,05 e 0,046 mg L⁻¹, respectivamente. Nos demais momentos (90 e 150 DT), as concentrações estiveram abaixo de 0,4; 0,002; 0,012; 0,031; 0,02 e 0,04 mg L⁻¹, respectivamente, para os mesmos elementos.

Palavras-Chave: Biossólido. Contaminação do Solo. Efluente

5.2. ABSTRACT

A use of biosolid in agriculture is an interesting alternative being a final destination that presents benefits as an improvement of the physical and chemical properties of the soil, however, the risks associated with contamination by pathogenic microorganisms and by heavy metals present in the sewage sludge. As a way to reduce soil contamination by direct application of sewage sludge, its use in the composition of substrates for the production of forest seedlings has become visible, being proven by several studies that involve a production of native and exotic species, in different proportions of the biosolid. However, one of the risks related to the use of sewage sludge as a substrate component is a possibility of leaching of heavy metals caused by excessive irrigation. Considering this possibility, the present work had as objectives: to verify the effect, over time, of different irrigation slides, corresponding to 100%, 200%, 300% and 400% of the evapotranspiration, on the concentrations of heavy metals pinea (*Pinus elliottii* var. *elliottii* - **Engelm**) and eucalyptus (*Eucalyptus urograndis*) were grown on substrates containing sewage sludge; to quantify the volume of leachate generated by the irrigation depths and the concentrations of these metals present in the effluent, over time; as well as the potential risks of contamination of the environment in compliance with current environmental legislation (resolutions 375/2006 and 430/2011 of CONAMA). The study developed in the Botanic Garden of Rio de Janeiro used biosolids from the ETE-Alegria (RJ), in mixture with vermiculite in the ratio 60:40 (BIO: VER). The material was submitted to the four levels of irrigation, daily, and the leachate was counted after the application of the depths. The design was completely randomized, with the contents of metals without substrate submitted to ANOVA, and when a difference of the applications with Tukey test was detected, at the 5% probability level, in the comparison of the means. In relation to the leachate, a quantitative analysis was performed in a similar way to the substrate, a chemical analysis was not submitted to ANOVA because it is a single sample. The results indicate that, initially, the zinc content, no substrate, was 27% above the limit established by resolution 375/2006 of CONAMA; In the final period there is no difference, in the pinus and in the eucalyptus, being the levels below the limits of the norm. As corresponding depths, 100%, 200%, 300% and 400% generated approximately 0.225 L, 0.465 L, 0.740 L and 1.025 L leach per tray. The zinc content was present in depths equivalent to 200% and 300% of evapotranspiration above 39.4% and 15.6%, respectively, of the limits of the norm, while treatments of 100% and 400% were 34.6 % and 23.2%, respectively, below. At the beginning (30DT) concentrations of Zinc, Cadmium, Lead, Copper, Nickel and Chromium were below 4.97; 0.003; 0.014; 0.043; 0.05 and 0.046 mg L⁻¹, respectively. At the other moments (90 and 150 DT), the concentrations were below 0.4; 0.002; 0.012; 0.031; 0.02 and 0.04 mg L⁻¹, respectively, for the same elements.

Key Words: Biosolids. Heavy metals. Leaching

5.3 INTRODUÇÃO

5.3.1 Saneamento no Brasil

De acordo com a Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (PNSB), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2008, dos municípios que possuem rede coletora, 1.586 estão localizados na região Sudeste, representando 95,1% do total da região; seguidos por 819 na região Nordeste (45,7%), 472 na região Sul (39,7%), 132 na região Centro-Oeste (28,3%) e 60 da região Norte (13,4%) (IBGE, 2008).

Embora tenha havido um incremento em relação ao ano de 2000, quando 52,2% dos municípios possuíam rede coletora, os números demonstram que há uma enorme demanda por investimentos visando atender considerável parcela da população brasileira que, ainda, não dispõe de acesso a este recurso básico de saúde. A existência de rede coletora, em algumas cidades, não significa que todas as residências daquela localidade sejam atendidas com esta estrutura. Em relação aos domicílios atendidos, denominados pelo IBGE como economias residenciais esgotadas, os dados da PNSB 2008 indicam que houve um aumento significativo, passando de 33,5% em 2000 para 44% em 2008. A região Sudeste foi a única que apresentou mais da metade dos domicílios com acesso à rede geral (69,8%), seguida pelas regiões Centro-Oeste (33,7%), Sul (30,2%), Nordeste (22,4%) e Norte (3,8%).

Em relação às unidades da federação apenas cinco apresentaram números de domicílios com acesso à rede geral de esgoto acima da média nacional (44%). O Distrito Federal possuindo 86,3% dos domicílios com acesso à rede é seguido por São Paulo (82,1%), Minas Gerais (68,9%), Rio de Janeiro (49,2%) e Paraná (46,3%). Considerando que a região Sudeste é a que possui maior número de habitações no país, tais números dão uma dimensão da necessidade de expansão da rede coletora de esgoto domiciliar com intuito de garantir condições satisfatórias de saúde à população (IBGE, 2008)

Em relação ao tratamento dado ao esgoto, de acordo com a pesquisa realizada pelo IBGE (2008), apenas 1.513 (28,5%) dos municípios brasileiros o fazem. Mesmo em regiões que apresentam melhores números como a do Sudeste, com 95,1% de seus municípios possuindo rede coletora, apenas 782 municípios (48,4%) realizavam o tratamento. O volume de esgoto gerado diariamente no Brasil é na ordem de, aproximadamente, 12,3 bilhões de litros, sendo que, cerca de 8,5 bilhões são tratados em Estações de Tratamento de Esgotos, o que representa algo em torno de 69% do que é coletado. De acordo com a Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (PNSB 2008) dos 1.513 municípios que realizam tratamento em estações, 1.091 dão destinação aos lodos gerados no tratamento.

Embora possa existir mais de uma destinação a este material, os resultados da pesquisa indicaram que as principais disposições finais de tais resíduos são: em aterros sanitários (452 municípios); reaproveitamento (169 municípios); rios (163 municípios); terrenos baldios (97 municípios), incineração (19 municípios) e no mar (um município). Os resultados informam que 316 municípios dão, ainda, outras destinações ao lodo (disposição em baías, lagos, dentre outros) (IBGE, 2008).

A disposição em aterros sanitários é uma das alternativas de destinação do lodo, sendo que o grande volume depositado nestes locais reduz a possibilidade de uso do espaço com outros tipos de resíduos, acarretando uma redução da vida útil do aterro. Neste sentido a reciclagem agrícola torna-se mais promissora tanto sob o aspecto ambiental quanto econômico, pois transforma um rejeito em um importante insumo agrícola. De acordo com WANG et al. (2008) mais de 30% do lodo de esgoto é utilizado como fertilizante agrícola pela comunidade européia, sendo que na Bélgica este valor alcança 57% e na França 60%.

5.3.2 Biossólido como substrato

Atualmente, com o objetivo de melhorar a produtividade dos plantios florestais e reduzir os custos de produção, têm-se realizado diversos estudos no sentido de definir quais são os melhores recipientes, substratos, tipos de fertilizantes e dosagens, cultivares com maior resistência à doenças e ao déficit hídrico, métodos e frequências de irrigação, dentre outros fatores, utilizados na produção de mudas que visam uma melhor qualidade do material levado ao campo.

De acordo com MORAIS et al. (1996), a utilização de um substrato que promova um rápido crescimento inicial das mudas é fundamental para melhorar a tecnologia de produção na fase de viveiro, com uma expectativa de atender a demanda de mudas para um mercado em franca expansão. Neste contexto, vários autores (ASSENHEIMER, 2009; BAZZO, 2009; CALDEIRA et al., 2012; CUNHA et al., 2006; FAUSTINO et al., 2005; GUERRINI e TRIGUEIRO, 2004; PAIVA et al. 2009, NÓBREGA et al., 2007 e TRIGUEIRO e GUERRINI, 2003) têm estudado a viabilidade da utilização de biossólidos como substrato, para a produção de mudas, de forma simples ou misturadas a outros componentes.

Segundo SINGH e AGRAWAL (2008) o biossólido, subproduto resultante do tratamento de esgoto, é composto por matéria orgânica, macro e micronutrientes, elementos traços incluindo metais pesados, microorganismos e micropoluentes; apresenta pH levemente alcalino e altos teores de matéria orgânica. Embora apresente altas concentrações de Nitrogênio (N), Fósforo (P), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), é deficiente em Potássio (K).

GOMES et al. (2013) ressaltaram que, além dos estudos realizados com o lodo de esgoto (biossólidos), como componentes de substratos destinados ao cultivo de mudas, uma vez que esses produtos, a maior parte não são destinados à alimentação humana ou animal, destaca-se, também, o uso como fertilizante orgânico de áreas degradadas em plantações florestais.

De acordo com MALTA (2001), a Water Environment Federation (WEF) sugere o termo biossólido para designar o lodo produzido pelos sistemas de tratamento biológicos de esgotos, desde que seu destino tenha uma finalidade útil. O termo biossólido é reservado para um produto estabilizado, caso contrário é empregado o termo torta, lodo ou sólidos. O lodo cru que não tenha recebido tratamento adequado para controle de poluentes e patógenos não é considerado biossólido. No entanto muitos autores utilizam o termo “lodo de esgoto” em referência ao que seria o biossólido, resíduo já estabilizado.

SINGH e AGRAWAL (2008) confirmam esta tendência ao definir que o resíduo sólido insolúvel resultante do tratamento de esgoto é denominado biossólido, dejetos domésticos residual, ou lodo de esgoto.

A Instrução Normativa nº 23, de 31 de agosto de 2005, editado pela Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA-MAPA) define o lodo de esgoto como um fertilizante orgânico composto, proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, que resulte em produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos limites estabelecidos para os contaminantes (MAPA, 2005).

O biossólido, constitui a parte sólida do esgoto (cerca de 0,1 %), sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos como proteínas, carboidratos e gorduras, e 30% inorgânicos (areia, sais, metais etc.). Segundo MALTA (2001) a estabilização do lodo de esgoto está, principalmente, ligada a necessidade de eliminação de duas características negativas do lodo fresco: o potencial de produzir odores e o conteúdo de microorganismos patogênicos, sendo que na prática, um lodo pode ser “estabilizado” por outros métodos, além dos processos de biodegradação. É um resíduo que pode ser utilizado como condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, considerando seu teor de matéria orgânica e de

nutrientes. Uma das aplicações deste material compreende o fornecimento de matéria orgânica na composição de substratos para a formação de mudas frutíferas e florestais, dentre outras (GUERRINI e TRIGUEIRO, 2004).

A utilização de biossólido na formação de mudas florestais pode apresentar uma série de vantagens. Primeiramente, a riqueza de nutrientes encontrados no lodo de esgoto, reduz a necessidade de uso adicional de fertilizantes, diminuindo os custos de produção e melhorando as condições de crescimento das mudas; os produtos das culturas florestais normalmente não são comestíveis, reduzindo os possíveis riscos ao homem pela ingestão de contaminantes (ASSENHEIMER, 2009); o plantio das mudas com substratos (biossólido) é realizado de forma espaçada, diminuindo a concentração deste material no solo e seus possíveis riscos de contaminação, visto que a quantidade de substrato contida nos recipientes é insignificante perto do volume de solo em que essas mudas são plantadas; as culturas florestais são de ciclo longo, com isso a frequência de plantio é bem reduzida, minimizando ainda mais os problemas de contaminação (POGGIANI et al., 2000).

Nesse contexto, o uso de biossólidos, como componente do substrato para produção de mudas, torna-se alternativa viável para a reciclagem do material, assim como melhor destino para tal do que a disposição em aterros sanitários ou a sua incineração.

Em estudo realizado por TRIGUEIRO (2002), comparando-se as quantidades de adubo utilizadas nos tratamentos com biossólidos e com substrato comercial (Multiplant) para a produção das mudas, obteve-se uma economia de fertilizantes da ordem de 64% para o eucalipto e de 12,5% para o pinus quando as mudas foram produzidas com biossólidos. Do ponto de vista financeiro Biscaia e Miranda (1996) apud ANDREOLI et al. (1998) relatam que o retorno financeiro por R\$ (real) gasto com o lodo de esgoto pode chegar a ser quatro vezes maior do que o dinheiro gasto com adubo químico.

No entanto, Silva et al. (2002) apud QUINTANA et al. (2011), ao estudarem a relação benefício/custo da aplicação de biossólido na produção de milho, concluíram que embora a produção física tenha aumentado com o acréscimo da dose de 54 até 216 t ha⁻¹, a análise da relação benefício/custo mostrou que doses muito elevada podem não ser economicamente vantajosas. Da mesma forma, GOBBI (2003), analisando a potencialidade do lodo de esgoto como fonte de macronutrientes no cultivo do milho, constatou que a utilização deste material proporcionou maior receita bruta do que o tratamento com adubação química. No entanto, o mesmo autor inferiu que, embora a maior dose de lodo de esgoto tenha alcançado a maior produção física, produziu a menor renda líquida.

5.3.3 Influência do biossólido nos atributos físicos do solo

Um dos principais efeitos da matéria orgânica, encontrada no biossólido, sobre os atributos físicos do solo, está associado ao grau de agregação, que conseqüentemente, afeta a densidade, porosidade, aeração e a capacidade de retenção e infiltração de água (BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006; SINGH e AGRAWAL, 2008). O aumento do teor de matéria orgânica, com a aplicação de biossólido, favorece a redução do estresse das plantas pela falta de água durante o período de crescimento e a redução das perdas de sedimento por escoamento superficial, prevenindo a erosão (STERRITT e LESTER, 1980). No entanto, MELO et al. (2004) afirmam que os efeitos do biossólido nos atributos físicos do solo dependem do tipo de solo e da quantidade aplicada.

Exceto em solos muito arenosos, que são praticamente isentos de argila, o processo de agregação se inicia com a floculação das partículas de argila em agregados microscópicos. Como as partículas de argila possuem carga negativa, os cátions presentes na solução do solo são atraídos pelas mesmas (BRADY e WEIL, 2013). Estes cátions podem formar “pontes” atraindo duas partículas de argila, mantendo-as unidas. Este processo é repetido até que um

pequeno conjunto de partículas paralelas de argila seja formado. Outros agrupamentos de argila são formados por partículas orientadas ao acaso. Estes tipos são formados quando as cargas positivas nas bordas das partículas de argila atraem as cargas negativas nas superfícies planas destas partículas (KOCHEM, 2014).

A influência da aplicação do lodo sobre a densidade do solo ocorre porque a matéria orgânica e os cátions presentes, Ca^{2+} e Al^{3+} dentre outros, promovem a agregação de partículas e determinam aumento no volume do solo, causando redução na sua densidade (BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006). As partículas de argila interagindo com os colóides orgânicos, húmus, eletricamente carregados formam pontes que os unem às partículas de silte, principalmente quartzo, criando o menor grupo na escala hierárquica de agregação do solo. O poder floculante de cátions polivalentes e do húmus são responsáveis pela estabilidade em longo prazo dos microagregados menores, $<0,03$ mm (KOCHEM, 2014).

5.3.3.1 Efeitos na densidade

BEZERRA et al. (2004) analisando as alterações das propriedades físico-hídricas do solo pelo uso do lodo de esgoto na recuperação de área degradada do entorno do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro observaram que, para a variável densidade do solo, não foram detectadas diferenças significativas entre as doses aplicadas (0,00; 2,85; 5,70; 11,40; 22,80 t ha^{-1}) em dois períodos de amostragem. No entanto, verificou-se médias mais baixas, obtidas no segundo período de aplicação, sugerindo que o lodo, de certa forma, tenha contribuído para redução da densidade. Os autores citam o estudo realizado por Wisniewski et al. (1996), sobre a aplicação de lodo na recuperação de uma área degradada, utilizando doses de 40, 80 e 120 t ha^{-1} de lodo, em base úmida, indicando tendência na redução da densidade do solo devido ao aumento da porosidade total. Os autores ressaltam ainda que, para fins de adubação, o lodo apresenta maior importância pelas matérias húmicas do que pela adição de elementos nutritivos.

Ao longo de três anos consecutivos, ANGIN e YAGONOGLU (2011) observaram queda nas densidades de solos tratados com lodo de esgoto. Com a utilização deste material, no primeiro ano observou-se uma redução de 8,89%, no segundo ano de 7,91% e, finalmente, 6,02% no terceiro ano, quando comparados ao solo testemunha.

Embora não tenha encontrado diferença significativa nos valores de densidade do solo em experimento conduzido no Canadá, utilizando biossólido na adubação de pastagens, WALLACE (2007) observou redução dos valores, nas duas dosagens testadas, 20 e 60 t ha^{-1} . Na menor dosagem, a densidade diminuiu de 1,27 g cm^{-3} , no ano de 2005, para 1,18 g cm^{-3} , no ano de 2006, enquanto que para a maior dosagem o valor diminuiu de 1,21 g cm^{-3} para 1,19 g cm^{-3} , no ano seguinte.

Estudando a aplicação de lodo de esgoto, em diferentes dosagens (39, 78, e 156 t ha^{-1}), em solos classificados como muito argiloso e franco-argiloso, AGGELIDES e LONDRA (2000) observaram efeito significativo sobre a densidade dos mesmos. As maiores reduções foram obtidas com a aplicação da maior dosagem (156 t ha^{-1}) em ambos os solos; reduzindo 19,7% no solo franco-argiloso, e 16,7% no solo muito argiloso.

DE MARIA et al. (2010) observaram que a aplicação de lodo de esgoto reduziu a densidade do solo, aumentou a macroporosidade e reduziu a microporosidade, mas não afetou significativamente a permeabilidade do solo

No entanto, GUERRINI e TRIGUEIRO (2004) observaram que, à medida que se elevou a dose de biossólido no substrato (misturado com casca de arroz carbonizada), ocorreu um aumento da densidade e, conseqüentemente, redução da proporção de macroporos; fato este que dificulta a aeração dos substratos, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular. Porém, o aumento do teor de biossólidos elevou a microporosidade do substrato, o

que proporcionou maior capacidade em reter água. Segundo os autores este aumento da densidade foi devido ao uso de um polieletrólito catiônico adicionado à massa do biossólido no processo de desidratação do mesmo. O biossólido, tratado com polieletrólitos, apresentou alta capacidade de perder água e de manter-se nesta condição, tornando-se bastante coeso quando seco. Com o umedecimento, o substrato se expandiu ao absorver água, aumentando o volume e ocupando espaços livres dentro do recipiente.

Em estudo realizado por RICCI et al. (2010), os atributos físicos do solo no local não apresentaram alterações significativas com as aplicações de lodo de esgoto compostado. Os autores não observaram efeito significativo na densidade do solo com a aplicação de doses do composto de lodo de esgoto nas duas profundidades (0,0-0,2 e 0,2-0,4 m), durante o período de duração do experimento, em comparação com o solo utilizado como testemunha (Latosolo Vermelho-Amarelo). Segundo os autores, aumentos observados nas camadas superficiais (0-0,20m) provavelmente deveram-se ao preparo do solo com subsolagem e às operações com grades realizadas durante as incorporações do composto, as quais promoveram revolvimento do solo e rearranjo das partículas; o solo tendeu a voltar para a condição inicial com o decorrer do tempo.

5.3.3.2 Efeitos na porosidade

Testando a influência do teor de biossólidos, no substrato, na germinação de pepinos (*Cucumis sativus* L.), espécie bastante exigente quanto ao substrato para germinação, TRIGUEIRO (2002) verificou que à medida que se aumentou muito o teor de biossólido, houve uma redução da qualidade e também na sobrevivência de mudas. Nos tratamentos envolvendo substratos compostos por 90 e 100% de biossólidos, observou-se impedimento físico ao desenvolvimento de raízes, fato este associado à relação de poros.

Embora ANGIN e YAGONOGLU (2011) não tenham observado efeito significativo da aplicação de lodo de esgoto na porosidade do solo, os autores observaram um aumento da porosidade total de 3,27%, 4,75% e de 5,53% quando foram aplicadas taxas de 40, 80 e 120 t ha⁻¹, respectivamente.

Em relação à porosidade, AGGELIDES e LONDRA (1999), observaram aumento dos valores na medida em que foram aplicados maiores quantidades de lodo de esgoto sobre o solo. De acordo com os autores, no solo franco-argiloso os aumentos nos valores de porosidade total foram de 11%, 27% e 33%, aproximadamente, para as aplicações de 39, 78 e 156 t ha⁻¹, respectivamente; e para o solo muito argiloso os aumentos foram de 5,5%, 8,5% e 10%, aproximadamente, para as mesmas aplicações.

De acordo com RICCI et al. (2010) logo após o parcelamento das aplicações do composto de lodo de esgoto e o plantio das mudas, apesar de o teste estatístico não ter indicado diferenças, notou-se uma tendência de aumento da macroporosidade e diminuição da microporosidade com o aumento crescente das doses de aplicação do composto de lodo de esgoto. Uma hipótese para explicar o ocorrido é que o efeito máximo da matéria orgânica no solo ocorreu logo após as aplicações; com o passar do tempo cessou-se o efeito condicionador da matéria orgânica devido à quase total mineralização da fração orgânica, levando novamente esses parâmetros físicos próximos à condição inicial do experimento.

5.3.3.3 Efeitos na aeração

CALDEIRA et al. (2012) observaram que mudas de timbó (*Ateleia glazioviana* Baill) cultivadas em substrato contendo 90% de biossólidos e 10% terra de subsolo, caracterizado pela maior proporção de biossólido no substrato utilizada no experimento, obtiveram o menor crescimento em altura dentre todos os tratamentos. Segundo o autor, possivelmente, o fato

pode ser justificado pela ausência de material que promova aeração no substrato.

BAZZO (2009) avaliando substratos compostos por diferentes proporções (100:0, 80:20, 60:40, 50:50, 40:60, 20:80, 0:100) de lodo de esgoto (LE) e casca de arroz (CA), na produção de eucalipto, verificou, em relação às características físicas dos substratos, que com o aumento da porcentagem de composto houve um aumento da densidade, da quantidade de água remanescente, do tamanho de partículas consideradas de textura média a fina, resultando melhoria na drenagem e aeração.

De acordo com o conjunto de características físicas observadas por TRIGUEIRO (2002), em estudo realizado sobre os diferentes teores de biossólidos na composição de substratos utilizados no crescimento de mudas de pinus e eucalipto, e comparando com valores obtidos para o substrato testemunha (Multiplant Florestal), considerou mais adequado para o desenvolvimento de mudas, substratos com doses de biossólido variando de 30 a 60%.

5.3.3.4 Efeitos na capacidade de retenção de água

A melhoria na capacidade de retenção de água através da aplicação de lodo de esgoto foi observada, também por AGGELIDES e LONDRA (1999). As curvas de retenção de água dos solos utilizados em seus estudos, muito argiloso e franco-argiloso, apresentaram comportamento semelhante, possuindo maior capacidade de reter água, solos com maiores dosagens de lodo.

GUERRINI e TRIGUEIRO (2004) observaram que a capacidade de retenção de água foi tanto maior quanto maior foi a dose de biossólido no substrato, porém, em substratos com altas doses de biossólidos, tratados com polieletrólitos catiônicos, observou-se alta densidade e, conseqüentemente, redução da proporção de macroporos, fato este que dificultou a aeração dos substratos, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular.

5.3.4 Riscos associados ao uso do biossólido

De acordo com ANDREOLI et al. (1997) os principais entraves relacionados ao uso agrícola do lodo de esgoto (biossólido) são: a contaminação por metais pesados; a contaminação por patógenos, a atração de insetos vetores e emissão de odores além de impactos estéticos e sociais. Segundo BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006 é uma característica do tratamento de esgoto a decantação de organismos patogênicos, compostos orgânicos complexos e moléculas ligadas a metais pesados.

WANG et al. (2008) ressaltam que as características e as composições dos lodos de esgoto são muito variáveis assim como os tipos de solo, as condições locais, e as espécies vegetais, exigindo, portanto, estudos dos fatores limitantes, caso a caso, como pré-requisito para a aplicação do lodo de esgoto na agricultura e a efetiva reutilização deste recurso.

5.3.4.1 Contaminação por metais pesados

A aplicação de lodo de esgoto (biossólido) na agricultura é preocupante devido a possibilidade de movimentação de nitratos e metais pesados, e conseqüentemente, os riscos de contaminação das águas subterrâneas (ANJOS e MATTIAZZO, 2000; TSUTIYA, 1999), camadas subsuperficiais do solo (BERTONCINI e MATTIAZZO, 1999) e organismos vivos (CAMPOS, 2011), sendo a absorção inadequada de oligoelementos e de metais pesados pelo solo e pelas plantas o maior problema associado à prática de reciclagem agrícola de lodos (ANDREOLI et al., 1997).

O acúmulo de metais pesados no solo e, o posterior escoamento de águas e de sedimentos contendo tais materiais, pode ocasionar a contaminação das águas superficiais de

lagos, rios, e córregos, segundo GALDOS et al. (2009). Os autores concluíram que a carga de metais pesados era mais influenciada pelo volume escoado do que pela concentração, representando um importante ponto a ser considerado em termos de contaminação de corpos d'água. Segundo Hue (1995) apud ANJOS e MATTIAZZO (2000), o movimento de metais pesados é limitado sendo observado somente em solos arenosos e ácidos, com baixo teor de matéria orgânica e que receberam elevadas aplicações de biossólido associadas à elevada precipitação ou irrigação.

BERTONCINI e MATTIAZZO (1999) citam que estudos sobre a movimentação de metais em solos tratados com lodo de esgoto sugerem que a quantidade de metais lixiviados, embora sejam inferiores a 1% do total adicionado, pode elevar-se em solos arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e sujeitos as chuvas intensas, ainda segundo os autores, a mobilidade de metais no solo pode ser acelerada em condições de campo pelo fluxo preferencial da solução do solo no perfil, assim como pela formação de complexos facilmente transportáveis de metais e ligantes orgânicos; CAMPOS (2011) ressalta que a movimentação de metais no solo pode ocorrer tanto no sentido vertical como no horizontal.

Diversos fatores contribuem para a solubilidade e mobilidade dos metais, de acordo com os atributos do solo, tais como: pH, teor de matéria orgânica, textura e composição das argilas, potencial redox, (BERTONCINI e MATTIAZZO, 1999; BORGES e COUTINHO, 2004) competição entre metais pelos sítios de adsorção, reações de complexação, temperatura e atividade microbiana são responsáveis pelo controle dos processos de degradação do conteúdo orgânico do resíduo (Lindsay (1979) apud BERTONCINI e MATTIAZZO (1999)).

CAMPOS (2011) ressalta que os metais pesados (“elementos traços” ou “metal tóxico”), ou elementos que apresentam massa específica maior que 6 g cm^{-3} ou possuem número atômico maior que 20, como cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), molibdênio (Mo), níquel (Ni), chumbo (Pb), zinco (Zn), alguns semimetais e outros ametais como Arsênio (As) e o Selênio (Se), estão, normalmente, associados à poluição, contaminação e à toxidez aos seres vivos, incluindo alguns elementos essenciais aos seres como Ni, Zn e Cu quando em concentrações adequadas.

Segundo TSUTIYA (1999) os principais metais pesados contidos nos biossólidos são: Cu, Ni, Cd, Zn, Pb e Cr; sendo que as concentrações dependem das participações de esgotos industriais. Além de exercerem efeitos negativos sobre o crescimento das plantas, os metais pesados afetam os processos bioquímicos que ocorrem no solo, podendo inibir a decomposição de material orgânico, a mineralização do nitrogênio e a nitrificação. Conforme o autor, as concentrações de Mo, Co, As, Se e Hg em biossólidos são geralmente pequenas e raramente limitam o uso em solos agrícolas, já as concentrações de Zn, Cu, Ni, Pb e Cr oferecem menor risco, enquanto o Cd, sendo mais perigoso devido suas implicações com a saúde humana, é severamente limitado pela maioria das normas adotadas por outros países.

Em relação a mobilidade dos metais pesados presentes no biossólido TSUTIYA (1999) e ANDREOLI et al. (1998) citam que em pesquisas efetuadas para avaliar o deslocamento de metais pesados no solo, após um ano, houve ligeiro aumento de Zn até a camada de 5 a 10 cm. Os demais metais (Cu, Cr, Co, Ni e Pb) não foram lixiviados.

A absorção dos metais pesados pelas plantas, TSUTIYA (1999) ressalta que existem muitas variações conforme as partes das plantas, espécies e idade fisiológica, pois cada metal é absorvido de modo diferente para cada cultura, salientando que o consumo de plantas com elevados teores de metais é uma fonte de contaminação para o homem.

A Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e produtos derivados, e dá outras providências, determina as concentrações limite de metais, as cargas cumulativas máximas permitidas para a aplicação em solos agrícolas, presença de patógenos e as espécies para as quais o uso é recomendado

(CONAMA, 2006).

A Tabela 49 apresenta as concentrações máximas de substâncias inorgânicas toleradas pela resolução nº 357/2006 do CONAMA.

Tabela 49. Concentrações máximas de substâncias inorgânicas (em mg kg⁻¹) permitidas no lodo de esgoto ou produto derivado conforme a Resolução nº 357/2006 do CONAMA.

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg kg ⁻¹ , base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromo	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

5.3.4.2 Contaminação por microorganismos patogênicos

A existência de microorganismos patogênicos no lodo de esgoto, segundo ANDREOLI et al. (1998) é um reflexo direto do perfil de saúde da população contribuinte do sistema, podendo o esgoto conter bactérias, vírus, fungos, protozoários e helmintos, sendo este último o patógeno mais resistente ao tratamento, em especial a *Taenia solium*, cujos ovos, se ingeridos por meio de águas poluídas ou junto a verduras, pode causar a neurocisticercose. No entanto, o tratamento do lodo com cal, na proporção de 50% do peso seco, durante 60 dias mostrou-se altamente eficiente no controle dos ovos de helminto.

As condições de estabilização, desidratação e desinfecção do lodo para fins agrícola são atingidas, basicamente, através dos processos de compostagem e de calagem. A compostagem é um processo de tratamento biológico onde ocorre a ação de vários grupos de microorganismos, sendo o lodo misturado a um resíduo estruturante rico em carbono como palha, restos de poda de árvores, serragem e outros.

Na etapa de compostagem FERNANDES et al. (1996) verificaram reduções médias de 85,5% para ovos de helmintos, 83,25% para larvas de helmintos, 72,3% para coliformes totais, 99,74% para coliformes fecais e 83,31% para estreptococos fecais. Já a calagem é um método de estabilização e desinfecção química e térmica pela adição de cal, elevando de forma brusca o pH a níveis ligeiramente superiores a 12, inativando ou destruindo a maior parte dos patógenos presentes no lodo.

Na calagem FERNANDES et al. (1996) verificaram reduções de 100% para coliformes fecais, salmonela, estreptococos, cistos de protozoários e larvas de helmintos, redução de 99,5% de coliformes totais e 77,3% para ovos de helmintos.

A Resolução nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto estabelece a

concentração máxima de patógenos (Tabela 50).

Tabela 50. Concentrações máximas de patógenos permitidas no lodo de esgoto ou produto derivado de acordo com a Resolução nº375/2006 do CONAMA.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 NMP. g ⁻¹ de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo.g ⁻¹ de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF .g ⁻¹ ST
B	Coliformes Termotolerantes <10 NMP .g ⁻¹ de ST

ST: Sólidos Totais; NMP: Número Mais Provável; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa

5.3.4.3 Contaminação por nitratos

De acordo com BARBOSA e TAVARES FILHO (2006) outro problema apresentado pelo lodo é a presença de nitratos na composição, pois devido à falta de sincronismo entre a mineralização do nitrogênio e a absorção do nutriente pelas plantas, existe o risco de perda por lixiviação deste material levando à contaminação do lençol freático.

No entanto, RESENDE (2002) ressalta que o efeito do lodo de esgoto no solo, e os riscos de contaminação da água por nitratos são similares aos que se verificam em relação aos esterco. O nitrato é uma das formas inorgânicas do N no solo e, juntamente, com o amônio, constitui produto final da mineralização do N orgânico, contido nos resíduos orgânicos após a adição ao solo (DYNIA et al., 2006). Tendo em vista que as partículas do solo apresentam, geralmente, carga elétrica líquida negativa, esse ânion permanece livre na solução. Aplicações continuadas e em doses elevadas podem liberar nitrato em quantidade superior àquela exigida pela cultura e, existindo excesso, a lixiviação é facilitada.

Segundo HERNÁNDEZ-APAOLAZA e GUERRERO (2008) é esperado que o lodo de esgoto na forma de composto reduza a lixiviação de nitrato, pois compostos maduros contêm quantidades relativamente baixas de nitrogênio mineral, e são altamente estabilizado e resistem a uma maior mineralização em aplicação ao solo.

Em estudo envolvendo a aplicação de diferentes doses de lodo de esgoto em plantações de eucalipto, ANDRADE e MATTIAZZO (2000) não observaram efeitos significativos das doses de biossólido sobre os teores de nitrato no solo, nas diferentes profundidades amostradas, após 360 dias da aplicação, mesmo nas camadas mais superficiais. No entanto, ANJOS e MATTIAZZO (2000) citam que, Campbell e Beckett (1998) verificaram a movimentação de íons nitrato, decorridos sete anos de aplicação de biossólidos, com possibilidade de atingir o lençol freático. Estes resultados coincidem com o dos autores, demonstrando que, com as repetidas aplicações, o processo de mineralização do N orgânico, adicionado via biossólido, elevou significativamente o nível de nitrato no lixiviado, embora a quantidade total perdida por lixiviação represente apenas uma pequena parcela do adicionado.

De acordo com Haynes et al. (2009) apud PAULA et al. (2011), a taxa de mineralização do N orgânico no solo em que o resíduo foi incorporado e a necessidade de N pela cultura, pelo menos, devem ser consideradas no cálculo da dosagem de aplicação de lodo de esgoto, a fim de se evitar a contaminação de águas subterrâneas por nitrato.

5.3.5 Produção de mudas com biossólidos

Considerando o potencial de uso do lodo de esgoto como substrato, diversos autores realizaram estudos, no Brasil, objetivando conhecer os efeitos de diferentes dosagens de biossólido no crescimento inicial de diferentes espécies florestais, exóticas ou nativas, tais como: Timburi (*Enterolobium contortisiliquun* (Vell.) Morong) (MAAS, 2010), *Chamaecrista desvauxii* (CALDEIRA et al., 2012), Eucalipto (*Eucalyptus grandis*) (CALDEIRA et al., 2013), *Eucalyptus urograndis* (*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*) (ROCHA et al., 2013), *Acacia mangium* (CALDEIRA et al., 2014), *Sesbania virgata* (DELARMELINA et al., 2014), *Senna siamea* Lam (FAUSTINO et al., 2005), *Tectona grandis* L. (GOMES et al., 2013), Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) (NÓBREGA et al., 2007), Aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi) (PAIVA et al., 2007), Cabreúva-vermelha (*Myroxylon peruiferum* L. f.), Pau-de-viola (*Cytarexylum myrianthum* Cham) e Unha-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link) (PAIVA et al., 2007), Pessegueiro-bravo (*Prunus brasiliensis*) (SCHEER et al., 2012) e *Pinus elliottii* Engelm (SCHIRMER, 2010).

Em trabalho desenvolvido por GUERRINI e TRIGUEIRO (2004), que comparou os atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos misturados à casca de arroz carbonizada, em diferentes proporções, os autores verificaram que foram mais adequados para o desenvolvimento de mudas de espécies florestais os substratos com 30 a 60 % de biossólido no volume total.

NÓBREGA et al. (2007), estudando a mistura de solo (Neossolo Quartzarênico e de Latossolo Vermelho-Amarelo) com biossólido no crescimento inicial de Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em proporções que variaram de 100:0 até 20:80 (solo:biossólido), concluiu ser mais adequado, com base nos resultados obtidos em termos de diâmetro do colo, altura, massa seca da raiz e a relação massa seca da parte aérea:massa seca da raiz, para o preparo de substrato a utilização de 37% de biossólido na mistura.

O estudo realizado por CUNHA et al. (2006) avaliando o efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de *Acácia* sp., verificaram que o uso de um substrato contendo 100% lodo de esgoto apresentou resultados superiores, em termos de Altura, Diâmetro do Colo, Massa Seca da Parte Aérea e a relação Massa Seca da Parte Aérea:Massa Seca da Raiz, somente quando as sementes foram inoculadas. Nas sementes que não foram inoculadas os resultados obtidos em substratos com lodo de esgoto foram inferiores àqueles obtidos em substratos com horizonte b latossólico, areia lavada e esterco bovino.

Conduzindo experimento visando estudar o crescimento de espécies arbóreas nativas como: Aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi), Cabreúva-vermelha (*Myroxylon peruiferum* L.), Pau-de-viola (*Cytarexylum myrianthum* Cham), Unha-de-vaca (*Bauhinia forficata* Link), cultivadas em potes de 4,0 dm³ com aplicação de diferentes dosagens de lodo de esgoto (1,25; 2,5; 5; 10; e 20 g dm⁻³), PAIVA et al. (2009) concluíram que a aplicação das diferentes doses de lodo de esgoto ao solo estimulou o crescimento das mudas das quatro espécies nativas em altura e na produção de biomassa, sendo que a maior dose (20 g.dm⁻³) propiciou respostas em crescimento equivalentes à promovida pela fertilização mineral.

CALDEIRA et al. (2012b) conduziram experimento visando avaliar os efeitos da utilização de biossólido como um dos componentes de substrato no crescimento de mudas para a produção de mudas de cedro-australiano (*Toona ciliata*). No trabalho foi utilizado o biossólido com terra de subsolo, classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo, nas proporções de 100%, 85%, 70%, 55%, 40% e 25% de biossólido, além de um substrato comercial (100%) e outro contendo terra de subsolo (70%) e esterco bovino (30%). De acordo com os resultados o autor concluiu que é viável a utilização de 100 a 70% de biossólido, junto a, no máximo, 30% de terra de subsolo.

Em trabalho realizado por MAAS (2010) que teve como objetivo avaliar o uso de biofossólido na produção da espécie florestal Timburi (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), onde foram analisados cinco tratamentos, 100% substrato comercial e os demais compostos por 15%, 30%, 45% e 60% de biofossólido, a autora concluiu que os tratamentos com 45% de biofossólido + 55% substrato comercial e com 60% de biofossólido + 40% substrato comercial proporcionaram as melhores médias do índice de qualidade de desenvolvimento (Índice de Qualidade de Dickson) que leva em consideração a Massa Seca Total, Altura, Diâmetro de Colo, e os Pesos de Matéria Seca da Parte Aérea e da Raiz.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de lodo de esgoto como componente do substrato para produção de mudas de *Senna siamea* Lam., FAUSTINO et al. (2005) testaram as proporções de lodo com solo, Latossolo Amarelo Distrófico, nas proporções: 0%, 25%, 50%, 75% e uma mistura de 25% de lodo com 25% de pó de coco. Os resultados demonstraram que o melhor crescimento das mudas de *Senna siamea* Lam. foi obtido no substrato contendo 75% de lodo, seguido pelo composto contendo 25% de lodo + 25% de pó de coco.

Em trabalho realizado por TRAZZI et al. (2012) que teve como objetivo avaliar a influência da utilização de lodo de esgoto e dejetos bovinos como componente de substrato na qualidade de mudas de Murta-de-cheiro (*Murraya paniculata* (L.) Jack), observou-se que a utilização de substratos que contenham quantidades maiores que 60% de lodo de esgoto em mistura com terra de subsolo pode ser recomendada para a produção de mudas de *M. paniculata*, com base nos resultados de Altura, Diâmetro do colo, Massa Seca da Parte Aérea e da Massa Seca da Raiz.

CALDEIRA et al. (2012c) testaram o desempenho de cinco composições com substrato comercial, nas proporções de 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, e 100% de biofossólido, em estudo que teve por objetivo avaliar o efeito do biofossólido como componente do substrato para produção de mudas de Teca (*Tectona grandis* Linn. F.). As avaliações dos autores foram baseadas nas variáveis morfológicas: Diâmetro do coleto, Altura, Massa Seca das partes Aérea, do Sistema Radicular e Total, e o Índice de Qualidade de Dickson. O máximo crescimento das mudas foi verificado quando se utilizou 60% a 100% de biofossólido associado ao substrato comercial, o qual proporcionou melhores crescimentos dos parâmetros Altura da parte aérea, Diâmetro do coleto, Massa Seca Total e Índice de Qualidade de Dickson.

5.3.5.1 Lodo de esgoto na produção de mudas de eucalipto

Na literatura científica são encontrados numerosos trabalhos sobre a aplicação do lodo de esgoto em plantios florestais, principalmente, no cultivo de eucalipto. Os estudos apresentaram os impactos da aplicação de diferentes dosagens, em $t\ ha^{-1}$, de lodo de esgoto, na forma pura ou em compostos, sobre o crescimento da cultura, sobre as propriedades físicas e químicas do solo e movimentação de metais. No entanto, há certa limitação do número de estudos avaliando o crescimento de mudas de eucalipto utilizando-se o lodo como substrato.

Em trabalho desenvolvido por BARONY (2011), onde foram estudados o crescimento de mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em tubetes contendo biofossólido e Plantmax® (substrato comercial) em diferentes proporções (0, 25, 50, 75 e 100% de biofossólido), o autor observou que o uso de biofossólido nas proporções de 50 e 75% propiciaram melhores desenvolvimentos das mudas de eucalipto, tanto no cultivo com sementes quanto no cultivo de clones, expressos por maior Altura, Diâmetro do Colo, produção de Massa da Parte Aérea. Segundo o autor, o tratamento com 100% de biofossólido apresentou resultados inferiores, possivelmente, devido ao biofossólido promover pouca porosidade, dificultando a aeração; e no caso do tratamento com 25% de biofossólido os resultados podem estar associados à carência de nutrientes.

Analisando a utilização de lodo de esgoto associado a vermiculita na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*, CALDEIRA et al. (2013) observaram que o aumento na percentagem de lodo de esgoto e redução na de vermiculita promoveram aumento na densidade aparente, aumentando a microporosidade dos substratos e, conseqüentemente, a água disponível. Além do aumento da quantidade de nutrientes com o uso do lodo de esgoto, exceto para K e Mg, sendo que a proporção que apresentou melhores resultados morfológicos na produção das mudas foi de 20% de lodo de esgoto associado a 80% de vermiculita.

ROCHA et al (2013) estudando o crescimento de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *E. grandis*) cultivadas em substratos compostos por lodo de esgoto e casca de arroz carbonizada, em comparação ao substrato comercial comumente utilizado em viveiros, concluíram, com base nos resultados de crescimento e nutrição, que a utilização de compostos de lodo de esgoto em níveis acima de 40% é favorável ao desenvolvimento das mudas. Este resultado está próximo daquele obtido por TRIGUEIRO e GUERRINI (2003) que recomendaram proporções de 40 a 50% de bio sólido (lodo de esgoto) adicionado à casca de arroz carbonizada, sendo que a combinação 50/50, seguido por 40/60 (bio sólido/casca de arroz), promoveram desenvolvimento satisfatórios das mudas, com altura da planta, diâmetro do colo e massa de matéria seca da parte aérea semelhante ao substrato comercial Multiplan®, usado como testemunha.

Em estudo realizado por KRATZ et al. (2013) onde foram realizados testes com diferentes substratos renováveis na produção de *Eucalyptus benthamii* verificou-se que substratos formulados com 40 e 50% de bio sólido (BIO) associado a casca de arroz carbonizado (CAC) e fibra de coco (FC) apresentaram maior crescimento em altura quando comparados com menores proporções desse elemento. Os substratos a base de FC e BIO apresentaram maior microporosidade e teor de água facilmente disponível para planta.

Em estudos com *Eucalyptus globulus*, RIGUEIRO e MOSQUERA (2007) concluíram que a utilização de substrato contendo 37,5% de lodo de esgoto (acrescido de perlita e casca de pinus), se mostrou o mais adequado, com base no crescimento das mudas. Os compostos contendo 25 e 50% de lodo de esgoto mostraram ter baixa quantidade de nutrientes e baixa capacidade de aeração das raízes, respectivamente.

5.3.5.2 Lodo de esgoto na produção de mudas de pinus

Testando substratos com diferentes proporções de lodo de esgoto associados a turfa (25, 50, 75 e 100% de lodo de esgoto), no cultivo de *Pinus pinea* L. RIBEIRO et al. (2009) verificaram que a utilização de substratos contendo níveis de lodo de esgoto iguais ou superiores a 75% tendem a reduzir o crescimento das plantas, de acordo com os autores este fato pode estar associado a solução salina e/ou ao estresse hídrico. Enquanto que os níveis iguais ou menores do que 25% de lodo de esgoto tendem a fornecer apenas uma pequena quantidade de nutrientes necessários às plantas, sendo mais recomendado valores próximos à 50% de lodo de esgoto na composição do substrato. Ainda segundo os autores, a utilização de lodo de esgoto no composto reduz pela metade o volume de turfa utilizado no substrato final, exige a metade da taxa de aplicação de fertilizantes de macronutrientes típica durante a fertilização basal e suprime a necessidade de adubação com micronutrientes, reduzindo importantes custos na produção de mudas mantendo a qualidade comercial.

RIGUEIRO-RODRIGUEZ et al. (2001) testaram o crescimento de mudas de *Pinus pinaster* Aiton cultivados em substratos contendo perlita, lodo de esgoto e casca de pinus, e concluíram que as mudas cultivadas em substratos contendo doses entorno de 25% de lodo de esgoto propiciaram maior crescimento em altura e diâmetro do coleto, além de maior biomassa das raízes e maior concentração de fósforo na planta. Porém, os autores verificaram que a proporção de 37,5% de lodo de esgoto propiciaram maiores biomassas aéreas (folha +

caule) e totais (folha + caule + raízes). Segundo os autores a baixa porosidade do lodo poderia explicar, em partes, o baixo desenvolvimento das plantas no tratamento contendo 50% de lodo de esgoto, em comparação ao tratamento contendo 50% de casca de pinus. Os autores também observaram um aumento das concentrações de metais conforme aumento dos teores de lodo de esgoto nos substratos.

Em experimento desenvolvido por MAÑAS et al. (2009) com substratos para a produção de mudas de *Pinus pinaster* Ait. cultivados em substratos contendo 25% de lodos da indústria de papel associados à casca de pinus, turfa, lodo de esgoto e lodo de esgoto ativado, observou-se maiores taxas de germinação nos tratamentos contendo 75% de casca de pinus com fertilizantes adicionados e nos tratamentos contendo lodo de esgoto; foi observado que os tratamentos contendo 25% de lodo de esgoto ativado apresentaram os maiores valores dos parâmetros físicos altura, diâmetro do coleto e pesos das matérias secas das raízes, da parte aérea, e total e do Índice de Qualidade de Dickson.

MAÑAS et al (2010) estudaram diferentes substratos para a produção de mudas de *Pinus halepensis*, contendo turfa ou casca de pinus associados à lodo de esgoto, lodo de esgoto ativado e lodos da indústria de papel. Segundo os autores os lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto propiciaram melhores condições de crescimento quando comparadas ao lodo da indústria de papel. Embora a turfa tenha apresentado resultados ligeiramente melhores que a casca de pinus, há a possibilidade de substituição deste material (turfa) tendo em vista os aspectos financeiros e ambientais. Os autores concluíram que na maioria dos casos, um substrato contendo 25% de resíduos, associado a turfa, propiciaram os melhores resultados.

No entanto, MORENO et al. (2014) estudando o crescimento de *Pinus halepensis* cultivados em diferentes substratos (mineral, lodo de esgoto e farinha de carne) verificaram que não houve influência significativa na biomassa total ou no incremento em altura das mudas, no uso de substratos contendo fertilizantes orgânicos ou minerais, concluindo ser mais interessante a utilização de compostos orgânicos tendo em vista os custos dos compostos minerais.

A amplitude dos resultados do uso de lodo de esgoto na composição de substratos depende das dosagens utilizadas, das espécies cultivadas e, principalmente, dos diferentes materiais estruturantes utilizados na mistura com o lodo. Visando estudar as características de diferentes composições de substratos contendo lodo de esgoto, SANTOS et al. (2014), testou a combinação, nas proporções de 20%, 40%, 60% e 80%, com fibra de coco, vermiculita, palha de café *in natura*, composto orgânico, casca de arroz carbonizada e casca de arroz *in natura*, tendo um substrato comercial como testemunha. Na análise de seis atributos físicos – Densidade Global, Porosidade Total, Macroporosidade, Água Disponível, Água Facilmente Disponível e Microporosidade, a composição contendo 60% de lodo de esgoto e 40% de casca de arroz carbonizada foi a que melhor se destacou entre as demais apresentando condições tidas como ideais em cinco destes atributos.

A utilização de lodo de esgoto estabilizado (biossólido) é uma alternativa atraente na utilização de substratos para a produção de mudas, por apresentar macro e micronutrientes importantes para o desenvolvimento das plantas.

Pode-se considerar que os benefícios observados no substrato com o uso de biossólidos são devidos, principalmente, à agregação das partículas, fato este que influencia na densidade e na porosidade do solo e, conseqüentemente, em outras características importantes ao desenvolvimento das plantas, como a capacidade de retenção de água no solo e a aeração. Outros trabalhos também indicam alterações na resistência do solo à penetração e na taxa de infiltração de água no solo (BARBOSA e TAVARES FILHO, 2006).

5.3.6 Excesso de água aplicada na irrigação

O excesso de água aplicado em relação à necessidade de irrigação pode contribuir com o escoamento superficial e/ou com a percolação profunda. De acordo com BASSO (1995), parte da água aplicada pela irrigação se perde na atmosfera enquanto que o restante alcança o terreno cultivado, percolando ou escoando pelo solo. A água que escoar, devido ao tempo reduzido de contato com a superfície do solo, mantém praticamente os mesmos níveis de salinidade e composição iônica das águas de irrigação, porém a água que percola, devido ao maior tempo de contato com o sistema solo-planta, podem: incrementar a sua concentração salina; aumentar a sua carga de sais e provocar contaminação devido à lixiviação de nutrientes aplicados como fertilizantes.

Em viveiros florestais, o excesso de água aplicado podem ser coletados e reaproveitados em irrigações futuras ou, simplesmente, atingem o solo, percolando ou escoando sobre a sua superfície. De acordo com OLIVEIRA (2012), geralmente é observado alto consumo de água em viveiros destinados a produção de mudas florestais pelo fato da aplicação de água via irrigação não corresponder apenas à necessidade hídrica das mudas. Em seu trabalho o autor evidenciou a aplicação excessiva de água na produção de mudas clonais de eucalipto, empregando-se o manejo convencional adotado pela empresa. A otimização do uso da água adotando-se manejo mais criterioso da irrigação permitiu economizar, aproximadamente, 12% de água na fase de enraizamento, 60% na fase de aclimatação, 26% na fase de crescimento e 31% na fase de rustificação, mantendo-se a qualidade das mudas produzidas.

Analisando a gestão ambiental em um centro de experimentação florestal, na região de Itú (São Paulo) GRIGOL et al. (2013) constataram que o viveiro era o setor que mais consumia recursos naturais e aquele que provocava os principais impactos, sendo citados o consumo de água e a adubação química. A adubação química se torna mais problemática quando associada a irrigação excessiva, levando a perda de nutrientes. Os autores constataram: aumento dos teores de nitrogênio total, na ordem de 60%, no solo e na água dos reservatórios próximos ao viveiro, quando aplicado adubo nas mudas, excedendo os limites permitidos pelo CONAMA; e o consumo excessivo de água, utilizando-se grandes volumes diariamente; ressaltando a importância do correto manejo da irrigação e do uso de sistemas mais eficientes.

Um dos problemas do excesso de irrigação associado ao uso de lodo de esgoto como substrato é a lixiviação de metais pesados. Esses metais poderão ser acumulados nas camadas superficiais, absorvidos pelas plantas, lixiviados para camadas inferiores e/ou arrastados pela erosão laminar. No entanto, em muitos locais de produção, o lixiviado contendo metais pesados pode exceder a capacidade de suporte dos solos pelo uso contínuo das mesmas áreas como local de descarte. Embora haja uma capacidade de retenção dos metais pesados pelo solo essa capacidade pode diminuir ao longo dos anos em função da dose e de sucessivas aplicações.

5.3.8 Objetivos

Considerando os benefícios no uso do lodo de esgoto como substrato, tanto no aspecto nutricional para as plantas quanto no aspecto ambiental, através do reaproveitamento deste resíduo, e tendo em vista o potencial risco de contaminação, do solo e das águas, pela lixiviação dos metais pesados presentes no lodo, devido ao excesso de irrigação, o presente trabalho teve como objetivos:

- a) verificar o efeito de diferentes lâminas de irrigação, sobre as concentrações de metais pesados presentes no substrato composto por lodo de esgoto e cultivado com mudas de

- pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*);
- b) verificar a variação, ao longo do tempo, das concentrações de metais pesados presentes no substrato composto por lodo de esgoto, cultivado com mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), submetidos a diferentes lâminas de irrigação;
 - c) quantificar o volume de efluentes gerado por quatro lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração aplicadas em cultivos de mudas de pinus e de eucalipto;
 - d) determinar a concentração de metais pesados (zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo) presentes nos efluentes gerados pela irrigação, em diferentes períodos, provenientes do lodo de esgoto contidos em substratos;
 - e) verificar os riscos potenciais de contaminação do meio, por metais pesados (zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo), provenientes do lodo de esgoto, com vistas a legislação ambiental vigente.

5.4. MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Descrição do local

O experimento foi realizado em casa de vegetação instalada no Horto Florestal do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (Latitude 22° 58' 05" Sul, Longitude 43° 14' 20" Oeste, altitude de 92 metros) situado no Bairro do Jardim Botânico, na cidade do Rio de Janeiro.

O clima local é do tipo Aw de Köppen, caracterizado por estação chuvosa com índices pluviométricos elevados no verão e uma estação seca no inverno, com precipitação média anual em torno de 2.000 mm, temperatura média anual de 23,8°C, com máxima de 30,3°C registrada em fevereiro e mínima de 16°C em julho. (INMET, 2014).

5.4.2 Substrato contendo lodo de esgoto

O lodo de esgoto (LE) utilizado no experimento era proveniente da estação de tratamento da Alegria (ETE-Alegria), pertencente a Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE). O material devidamente estabilizado foi fornecido em embalagens com, aproximadamente, 20 kg, sendo posteriormente misturado, manualmente, a vermiculita (VE), de granulometria média, na proporção, em volume, de 70:30 (LE:VE). Em seguida o material foi peneirado manualmente (malha de 4 mm) sendo levemente umedecido antes de ser colocado nos tubetes.

O substrato foi acondicionado em tubetes de 280 cm³ seguindo a metodologia adotada no Horto Florestal do JBRJ, por meio do preenchimento parcial (aproximadamente, 1/3 do volume do tubete) seguido de três batidas na mesa de concreto, para acomodação do material. Esta operação era repetida até que o nível do substrato alcançasse a borda do tubete.

Uma amostra foi retirada do material utilizado no preenchimento dos tubetes, comum a todos os tratamentos, em 16/03/2015, sendo destinada para a caracterização do potencial agrônomo, cujas análises foram feitas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/Solos), sendo os resultados apresentados na Tabela 51.

Tabela 51. Resultado da análise do potencial agrônomo realizada em três amostras do substrato inicial utilizado nos cultivos de mudas de pinus e de eucalipto.

Componente	Unidade	Valor
Carbono Orgânico	g kg ⁻¹	93,6
Fósforo Total	g kg ⁻¹	5,94
Nitrogênio Kjeldahl	g kg ⁻¹	15,68
Relação C:N		8,02
pH em água	-	4,5
Umidade	%	41,6
Potássio Total	g kg ⁻¹	1,35
Enxofre Total	g kg ⁻¹	7,68
Cálcio Total	mg kg ⁻¹	11,1
Magnésio Total	mg kg ⁻¹	2,3

Nos dias 06/05/2017 (30 DT), 03/07/2015, (60 DT) e 04/09/2015 (150 DT), quando

ocorreram as coletas para a realização das análises destrutivas das plantas, os substratos presentes nos tubetes, do mesmo tratamento, foram unificados em baldes, sendo, posteriormente, retiradas amostras para análises e acondicionadas em sacos plásticos, resistentes e devidamente identificados.

5.4.2.1 Análise química do substrato

O substrato contendo metais pesados (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) oriundos do lodo de esgoto, após homogeneização, foi encaminhado para análise em três momentos distintos: inicial, 30 dias após a aplicação efetiva dos tratamentos (30 DAT); médio, após, aproximadamente, 90 dias de aplicação dos tratamentos (90 DAT) e; final, após 150 dias de aplicação dos tratamentos (150 DAT).

A análise química do substrato foi realizada pelo Laboratório de Química e Poluição do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, utilizando-se três repetições. Para determinação das concentrações de metais pesados os extratos foram analisados por aparelho de espectrometria de emissão óptica com plasma induzido (ICP/OES). Na determinação dos teores de metais estudados (Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn) foram adotadas as recomendações expressas na resolução do CONAMA nº 375 de 2006, empregando-se o método SW 846 3051A da *Environmental Protection Agency* (U.S.EPA SW 846).

5.4.3 Material drenado

Para caracterização quantitativa e qualitativa do material drenado foram construídas estruturas junto às bandejas para coleta e armazenamento do mesmo. O líquido proveniente da irrigação que percolava pelas bandejas era, em seguida, conduzido por meio de filmes plásticos até os vasilhames de água (galões), cada um com capacidade para 5 litros, posicionados abaixo das bandejas (Figura 51).

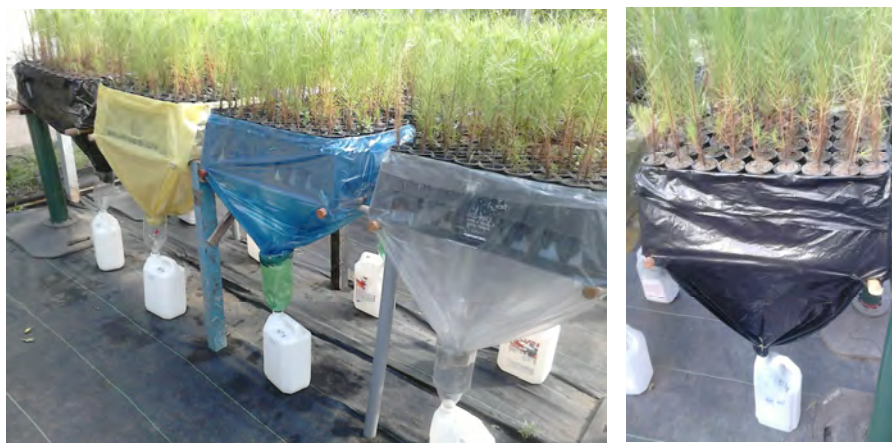


Figura 51. Estrutura de coleta e de contenção de água sobre as bandejas, os plásticos coloridos identificavam os tratamentos.

5.4.3.1 Determinação do volume drenado

Durante os 153 dias de desenvolvimento do experimento (de abril a setembro/2015), foram realizadas 48 determinações diárias do volume drenado, ocorrendo nos meses de abril (8 medições), maio (8 medições), junho (12 medições), julho (8 medições) e agosto (12 medições). Os volumes foram obtidos através da pesagem dos galões que coletavam o líquido

drenado, com auxílio de uma balança móvel com capacidade de 40 kg e com resolução de 0,010 kg. Posteriormente foram realizadas as conversões de massa para volume considerando-se a massa específica da água igual a 1 kg L⁻¹.

5.4.3.2 Determinação do volume aplicado pela irrigação

O volume de água aplicado diariamente foi determinado pela relação entre o tempo de funcionamento da irrigação, em minutos, obtido nos registros realizados pelo minilímetro, e a vazão média dos aspersores, medidas no início dos estudos. Na determinação dos volumes aplicados diariamente, foram considerados os mesmos 48 dias utilizados na determinação do volume percolado. O tempo total de funcionamento do sistema de irrigação, durante estes 48 dias foi de 507 minutos, para as mudas de eucalipto, e de 473 minutos, para as mudas de pinus. Na Tabela 52 são apresentadas as vazões médias dos microaspersores, obtidas em cada tratamento (100%, 200%, 300% e 400%).

Tabela 52. Vazão média dos microaspersores, em mL min⁻¹, determinados para cada um dos tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) nos cultivos de pinus e de eucalipto.

Tratamento	Eucalipto (mL min ⁻¹)	Pinus (mL min ⁻¹)
100%	187	172
200%	327	337
300%	528	540
400%	677	688

5.4.4 Análise química do lixiviado

Para verificar a influência dos diferentes níveis de irrigação na lixiviação dos metais pesados no lodo de esgoto foram feitas as análises químicas dos líquidos coletados. As coletas ocorreram nos dias 06/04/2015 (considerado T0), 08/06/2015 (considerado T60) e 10/08/2015 (considerado T120), de forma a verificar as concentrações dos metais no período inicial, médio e final do estudo.

Considerando a incipiência do experimento no momento da primeira coleta, as amostras oriundas das mudas de pinus e do eucalipto, do mesmo nível de irrigação, foram unificadas, com intuito de detectar diferenças na lixiviação de metais devido aos diferentes volumes de água aplicados. Posteriormente, já considerando a influência que cada cultura poderia ter na absorção dos metais, os líquidos provenientes de um mesmo tratamento, em cada cultura, foram unificadas em um vasilhame de 20 litros, de onde foram retiradas amostras e encaminhadas para análise. Na coleta e no acondicionamento das amostras, foram utilizadas garrafas de polietileno de 500 mL, estéreis, sendo enviadas, no mesmo dia, para o laboratório.

A análise foi realizada no laboratório do Departamento de Controle de Qualidade da Água (GCQ-4) da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE), sendo que as concentrações dos metais foram determinadas via espectrometria de emissão óptica com plasma induzido (ICP/OES). Nas etapas inicial (T0) e média (T60), os limites de quantificação para os metais cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco foram de 0,002, 0,004, 0,004, 0,04, 0,02, e 0,04 mg L⁻¹, respectivamente; já na etapa final (T120), os limites de quantificação adotados foram de 0,002, 0,008, 0,002, 0,002, 0,002 e 0,005 mg L⁻¹, respectivamente.

5.4.5 Análises estatísticas

5.4.5.1 Análise do substrato

Na avaliação dos teores de metais pesados (Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn) presentes nos substratos, cultivados com pinus e com eucalipto, o delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizados, compostos por quatro tratamentos (níveis de irrigação equivalente a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração) e três repetições. Antes da realização da análise de variância (ANOVA), foi feita a análise descritiva dos dados e a verificação da normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk). Os parâmetros que não apresentaram distribuição normal dos resíduos (cádmio, nos substratos cultivados com pinus e eucalipto) foram transformados (transformação inversa) para a obtenção da normalidade.

Devido ao problema ocorrido com as amostras iniciais (30 DT) de substrato, impossibilitando a identificação dos níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%), as análises de variâncias foram feitas para os dois períodos subsequentes, tanto no cultivo de pinus quanto no de eucalipto. Quando detectado diferença na ANOVA, o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, foi aplicado na comparação das médias. A análise foi complementada com os ajustes de modelos para descreverem as variações dos teores de metais pesados (Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn), no substrato, ao longo do tempo, sendo definidos os modelos que apresentaram o maior coeficiente de determinação. A análise estatística foi realizada com o auxílio do software STATISTICA, versão 7.

5.4.5.2 Análise do lixiviado

Os resultados obtidos das concentrações dos elementos químicos estudados (Zn, Cu, Pb, Ni, Cr e Cd) nos lixiviados (análise química) foram submetidos a simples interpretação das médias, tendo em vista as amostras serem únicas; e os resultados quantitativos dos efluentes foram submetidos análise de variância e quando significativo foram aplicados o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Análise química dos substratos

Os resumos das análises de variâncias das concentrações dos metais pesados: zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, encontrados nos substratos, cultivados com mudas de pinus e de eucalipto, observados no período final do experimento (90-150 DT) são apresentados nas Tabelas 53 e 54, respectivamente.

Tabela 53. Resumo da análise de variância dos dados de concentração dos metais zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, de mudas de *Pinus elliottii* E., observados no período final do trabalho (90-150 DT) e submetidas aos níveis de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio - PINUS					
		Zinco	Cádmio	Chumbo	Cobre	Níquel	Cromo
Nível Irrigação	3	130644	0,00778	9,89	49,8	402	1853
Tempo	1	6173	0,04167**	54,00	405,9	1460	1830
Nível x Tempo	3	52353	0,00278	25,00	144,7	774	2611
Média (mg.kg ⁻¹)		2722,50	0,499	52,00	151,78	221,62	437,70
CV(%) - parcela		15,23	16,32	12,62	12,94	17,04	15,26
CV(%) - subparcela		24,52	29,42	22,39	24,34	25,92	23,08

**Significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

Tabela 54. Resumo da análise de variância dos dados de concentração dos metais zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo, de mudas de *Eucalyptus urograndis*, submetidas aos níveis de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração.

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio - EUCALIPTO					
		Zinco	Cádmio	Chumbo	Cobre	Níquel	Cromo
Nível Irrigação	3	136137	0,1426	34,83	337,8	617,6	2531
Tempo	1	5992	1,1793*	73,50*	827,7*	20,0	89
Nível x Tempo	3	89467	0,1809	3,72	134,4	455,4	3050*
Média (mg.kg ⁻¹)		2604,6	0,458	54,55	162,28	190,78	412,72
CV(%) - parcela		9,99	28,82	15,94	14,60	22,66	18,95
CV(%) - subparcela		9,80	27,43	10,53	12,41	16,32	12,58

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

5.5.1.1 Influência dos níveis de irrigação na concentração de metais no substrato

Os resultados das análises de variâncias, para as concentrações de metais nos substratos, cultivados com pinus e com eucalipto, apresentaram condições semelhantes para os diferentes níveis de irrigação, observados no período final (90 – 150 DT), não existindo diferença significativa. Na Tabela 55 são apresentadas as concentrações médias dos metais estudados (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr), verificadas nos substratos submetidos aos diferentes níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%), cultivados com pinus e com eucalipto.

Tabela 55. Concentração dos metais pesados zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo,

em mg kg⁻¹, observados nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto, submetidos a diferentes níveis de irrigação.

Elemento	Concentração no Substrato de Pinus (mg kg ⁻¹)				Concentração no Substrato de Eucalipto (mg kg ⁻¹)			
	Tratamento (Níveis de Irrigação)				Tratamento (Níveis de Irrigação)			
	100%	200%	300%	400	100%	200%	300%	400%
Zinco	2751 a	2540 a	2699 a	2998 a	2499 a	2719 a	2748 a	2452 a
Cádmio	0,55 a	0,48 a	0,47 a	0,50 a	0,43 a	0,50 a	0,47 a	0,43 a
Chumbo	52,8 a	50,7 a	51,2 a	53,3 a	52,5 a	56,5 a	56,8 a	52,5 a
Cobre	148,6 a	150,5 a	155,2 a	152,9 a	156,7 a	164,8 a	171,8 a	155,8 a
Níquel	223,7 a	215,9 a	214,5 a	232,3 a	177,6 a	199,6 a	197,8 a	188,1 a
Cromo	448,5 a	427,6 a	418,5 a	466,2 a	387,8 a	420,2 a	436,2 a	406,7 a

Obs: letras iguais na mesma linha, para a mesma cultura, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esperava-se que, com a aplicação de maiores lâminas de irrigação, houvesse maior redução das concentrações dos metais, condição esta que pode ter ocorrido logo nos primeiros dias, porém não pode ser verificado tendo em vista os eventuais problemas já relatados, que impediram a análise do teor de metais, por tratamento. No entanto, verificou-se que após 90 dias de aplicação dos diferentes níveis de irrigação, as concentrações dos metais (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr) não diferiram entre si, indicando que as quantidades presentes encontravam-se numa condição de forte adsorção.

Os metais pesados comportam-se no solo dependendo dos seguintes atributos, pH, quantidade de matéria orgânica, potencial redox, tipologia e quantidade da argila (CAMPOS, 2011). Por outro lado, em ecossistemas tropicais, onde predominam solos altamente intemperizados, a movimentação dos metais pesados no perfil do solo é controlada principalmente pelo regime hídrico, capacidade de retenção do solo e posição do solo na paisagem. A formação de complexos metálicos com compostos orgânicos reduz a mobilidade de metais, devido à alta estabilidade dos complexos, diminuindo a disponibilidade, dentre os principais fatores que regulam a retenção de metais, a matéria orgânica e o aumento do pH são os principais, ambos providos pelo próprio lodo.

O lodo de esgoto exerce ao mesmo tempo o papel de fonte e de agente imobilizador dos metais pesados no solo. De acordo com Alloway (1995) a matéria orgânica afeta, significativamente, tanto a retenção quanto a disponibilidade de metais no solo; Canellas et al. (1999) reforçam que uma parte da matéria orgânica do lodo, resistente a decomposição, poderia formar quelatos com metais, impossibilitando a absorção desses elementos pelas plantas e a contaminação de cursos d'água (MELLIS, 2006).

5.5.1.2 Efeito do tempo nas concentrações de metais

Na análise do fator tempo, no período final (90-150 DT) houve diferenças significativas, nas concentrações médias de cádmio nos substratos cultivados com pinus (Tabela 53), e nas concentrações médias de cádmio, chumbo e cobre nos substratos cultivados com eucalipto, bem como na interação do tempo com os níveis de irrigação, nas concentrações de cromo, neste mesmo cultivo (Tabela 53).

Na Tabela 56 é apresentado o resumo das variações observadas nas concentrações dos metais entre os períodos médio (90 DT) e final (150 DT). Verificou-se que em todos os metais estudados ocorreu um pequeno decréscimo nas concentrações durante o período médio-final, com exceção do níquel e do cromo, no substrato cultivado com eucalipto, que apresentou aumento, sendo as reduções estatisticamente significativa apenas para o Cd, em ambas as culturas, e para Cu e Pb, no substrato cultivado com eucalipto.

Tabela 56. Concentrações médias de zinco, cádmio, cobre, chumbo, níquel e cromo, em mg

kg⁻¹, observadas nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto, nos períodos médio (P.Médio -90 DT) e final (P.Final-150 DT) do experimento.

Elemento	Concentração no Substrato de Pinus (mg kg ⁻¹)		Concentração no Substrato de Eucalipto (mg kg ⁻¹)	
	P. Médio -90 DT	P. Final -150 DT	P. Médio-90 DT	P. Final -150 DT
Zinco	2738,5 a	2706,4 a	2620,4 a	2588,8 a
Cádmio	0,54 a	0,46 b	0,50 a	0,42 b
Cobre	155,9 a	147,7 a	168,2 a	156,4 b
Chumbo	53,5 a	50,5 a	56,3 a	52,8 b
Níquel	229,4 a	213,8 a	189,9 a	191,7 a
Cromo	446,4 a	428,9 a	410,8 a	414,7 a

Obs: Médias seguidas pela mesma letra, na linha e na mesma cultura, não diferem entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados, de uma forma em geral, indicam uma tendência de estabilização, nas concentrações dos metais, após 90 dias de aplicação das lâminas de irrigação, sugerindo uma maior força de ligação dos metais às frações orgânicas e minerais contidas no substrato.

Nas Figuras 52 e 53 estão representados os comportamentos das concentrações médias dos metais pesados Zn, Cd, Cu, Pb, Cr e Ni, ao longo do experimento nos substratos cultivados com pinus e eucalipto, respectivamente, considerando-se como condição inicial os teores de metais observados em 30 DT sem a distinção dos níveis de irrigação.

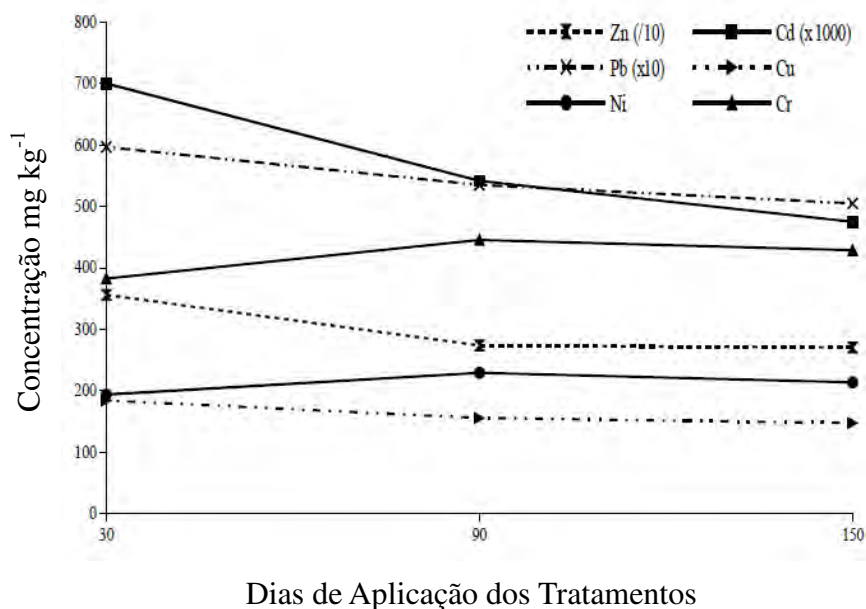


Figura 52. Concentrações médias dos metais zinco (valor dividido por 10), cádmio (valor multiplicado por 1000), chumbo (valor multiplicado por 10), cobre, níquel e cromo, observado aos 30, 90 e 150 dias de aplicação dos tratamentos no cultivo de mudas de pinus.

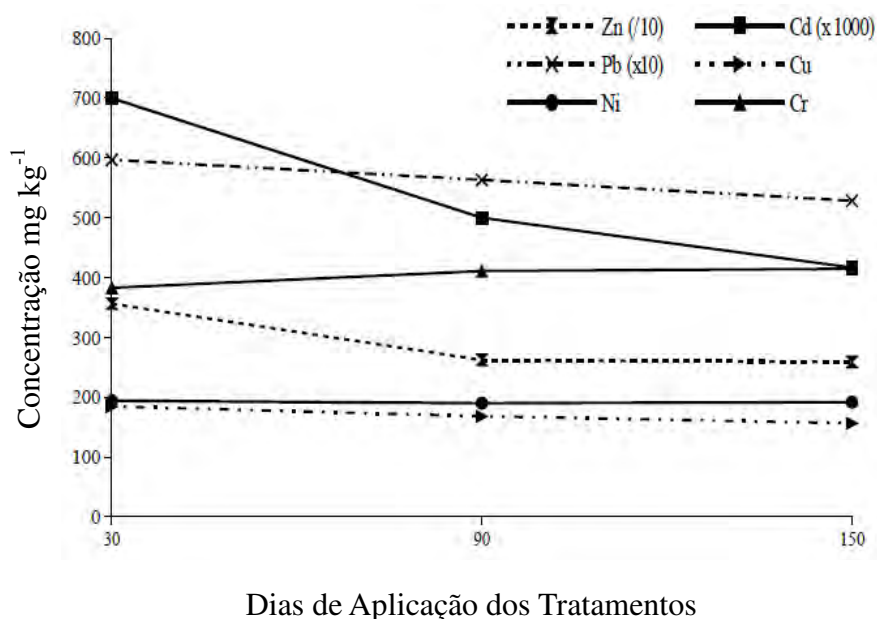


Figura 53. Concentrações médias dos metais zinco (valor dividido por 10), cádmio (valor multiplicado por 1000), chumbo (valor multiplicado por 10), cobre, níquel e cromo, observado aos 30, 90 e 150 dias de aplicação dos tratamentos no cultivo de mudas de eucalipto.

No período final (90-150 DT), houve um comportamento muito semelhante das concentrações observadas nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto. No pinus houve redução de 1,2%, 14,8%, 5,3%, 5,6%, 6,8% e 3,9% nas concentrações, dos elementos Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, respectivamente (Figura 52). No eucalipto, os elementos Zn, Cd, Pb e Cu, apresentaram reduções de 1,2%, 16%, 7,0% e 6,2%, respectivamente (Figura 53). Os elementos Cr e Ni apresentaram comportamento oposto aos observados no cultivo de pinus, ambos com ligeiro aumento de, aproximadamente, 0,9% em suas concentrações.

5.5.1.3 Efeito da interação entre os níveis de irrigação e o tempo sobre as concentrações de metais no substrato cultivado

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 53, verificou-se que não houve interação significativa entre os níveis de irrigação e os tempos de aplicação dos tratamentos, nas concentrações de metais pesados presentes no substrato cultivado com pinus.

Na análise dos resultados no cultivo de eucalipto (Tabela 54), verificou-se que somente o elemento cromo apresentou diferenças significativas nas interações entre os níveis de irrigação (100%, 200%, 300% e 400%) e os tempos de aplicação dos tratamentos (90 e 150 DT).

Os no cultivo de eucalipto resultados indicaram diferença significativa entre a lâmina de 100%, aos 90 DT (igual a 382,2 mg kg⁻¹) e a lâmina de 300%, aos 150 DT (igual a 467,5 mg kg⁻¹), não havendo diferença entre os níveis de irrigação, dentro do mesmo período, e entre os períodos de observação (90 DT e 150 DT), para um mesmo tratamento.

5.5.1.4 Concentrações de metais pesados no substrato com vistas à legislação

Tendo em vista a existência de alterações nas concentrações dos metais pesados presentes no substrato composto por lodo de esgoto, ao longo do tempo, a análise dos

elementos Zn, Cd, Cu, Cr, Ni e Pb com vistas a resolução n° 357/2006 do CONAMA, foi feita considerando-se as concentrações de cada período.

Nas Tabelas 57 e 58 são apresentados os valores médios das concentrações (em, mg kg⁻¹) dos metais Zn, Cd, Ni, Cr, Cu e Pb, considerados mais importantes devido aos altos teores encontrados no lodo de esgoto, observados nos substratos cultivados com pinus e eucalipto, respectivamente, nos períodos de observação (inicial, 30 DT; médio, 90 DT; final, 150 DT).

Tabela 57. Valores médios das concentrações de Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, em mg.kg⁻¹, observados nos substratos cultivados com *Pinus elliotti* E., nos períodos inicial (30 DT), médio (90 DT) e final (150 DT).

Elemento	Concentração (em mg.kg ⁻¹) – Pinus			CONAMA N°375/2006
	Inicial (30 DT)	Médio (90 DT)	Final (150 DT)	
Zinco	3561,1	2883,7	2638,2	2800
Cádmio	0,70	0,54	0,46	39
Chumbo	59,7	55,6	50,6	300
Cobre	184,5	168,1	150,4	1500
Níquel	137,3	253,3	220,2	420
Cromo	289,9	499,7	439,0	1000

Tabela 58. Valores médios das concentrações de Zn, Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, em mg.kg⁻¹, observados nos substratos cultivados com *Eucalyptus urograndis*, nos períodos inicial (30 DT), médio (90 DT) e final (150 DT).

Elemento	Concentração (em mg.kg ⁻¹) – Eucalipto			CONAMA N°375/2006
	Inicial (30 DT)	Médio (90 DT)	Final (150 DT)	
Zinco	3561,1	2611,9	2696,4	2800
Cádmio	0,70	0,49	0,44	39
Chumbo	59,7	59,0	53,8	300
Cobre	184,5	171,8	155,7	1500
Níquel	137,3	198,0	197,7	420
Cromo	289,9	426,7	412,7	1000

Observou-se nas Tabelas 57 e 58 que os valores médios de Cd, Pb, Cu, Ni e Cr ficaram abaixo dos limites máximos definidos pela resolução do CONAMA N° 375/2006, não apresentando nenhuma restrição ao uso do lodo de esgoto em relação a estes elementos. No entanto, quando observado os valores médios de zinco, verificou-se que, no período inicial as concentrações estiveram 27% acima do limite tolerável, mesmo apresentando reduções após 60 dias, o substrato cultivado com pinus ainda apresentou valores próximos de 3% superiores ao limite máximo determinado pela norma.

Quando considerados o período global (30 a 150 DT) as concentrações de zinco nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto estiveram acima do limite tolerável da norma, com média de 2956,5 mg kg⁻¹ no substrato cultivado com eucalipto enquanto que aqueles cultivados com pinus apresentaram média de 3027,6 mg kg⁻¹. Estes valores estão bem

acima daqueles observados por outros autores em estudos envolvendo o lodo de esgoto no Brasil (Tabela 59), porém, valores superiores já foram observados por PAIVA et al. (2009).

Tabela 59. Concentrações de zinco (em, mg.kg^{-1}) observadas por diversos autores, em lodo de esgoto provenientes de diferentes estações de tratamento de esgoto (ETE) e/ou em diferentes anos no Brasil.

Autores	Origem	Concentração Zn (mg kg^{-1})
Caldeira et al., 2012	ETE Cachoeiro de Itapemirim -ES	231
Santos, 2014	ETE Cachoeiro de Itapemirim -ES	316
Garcia et al., 2010	ETE Jerônimo Monteiro - ES	171,2
Fernandes et al., 1993	ETE Bom Retiro, Londrina - PR	705
Pérez et al., 2011	ETE Vila Shalon, Foz do Iguaçu - PR	130
Nóbrega et al., 2007	ETE Serrania - MG	327,7
Rocha et al., 2004	ETE Barueri - SP	1500
Guedes et al., 2006	ETE Barueri - SP	1632
Paiva et al., 2009	ETE Barueri - SP	3037
Higashikawa et al., 2010	ETE Jundiá - SP	1284,7
Rocha et al., 2013	ETE Jundiá - SP	1650
Velazco 2002	ETE Franca - SP	1590
Lã, 2010	ETE Alegria - RJ	1650,4
Abreu 2014	ETE Alegria - RJ	681
Faustino et al., 2005	ETE Mangueira, Recife - PE	166,6
Nascimento et al., 2004	ETE Mangueira, Recife - PE	548

Conforme Pires et al. (2006) apud MELLIS (2006), a concentração de zinco no lodo de esgoto pode ser alta quando o esgoto tem forte contribuição de efluentes de indústrias farmacêuticas, de cosméticos, tintas, pigmentos, borrachas, pilhas, galvanoplastia e de fabricação de ligas metálicas, podendo ser esta uma das motivações para os altos valores de Zn observados nas duas culturas. Outro fator que pode estar associado aos altos valores é a época do ano na qual foi feita a coleta do lodo de esgoto. MELO et al. (2001) verificaram grande variação nos teores de zinco conforme a época do ano oscilando de, aproximadamente, 2000 mg kg^{-1} nos meses de janeiro e fevereiro, até 3000 mg.kg^{-1} no mês de dezembro.

De acordo com ALAMINO (2010) a concentração de metais encontrados no lodo de esgoto é função da natureza do resíduo e do tipo de processo empregado no tratamento dos esgotos. MELO et al. (2001) ressalta que a composição química do lodo de esgoto varia em função do local de origem (residencial ou industrial), da época do ano e do nível social da comunidade.

Ressalta-se que mesmo contendo resquícios dos substratos iniciais nas raízes (Tropstrato Florestal, no pinus, e Carolina Soil, no eucalipto) os teores de zinco observados nestes materiais são extremamente baixos quando comparados aos provenientes do lodo de esgoto. As concentrações de Zn nos substratos Tropstrato Florestal e Carolina Soil observadas por FACHINI (2006) e por SANTOS (2015) foram de 212 mg kg^{-1} e de 134 mg kg^{-1} , respectivamente. Estudos desenvolvidos por LÃ (2010) e ABREU (2014) utilizando lodo de esgoto com a mesma procedência (ETE Alegria – RJ) indicam a variabilidade dos teores de zinco, com diferença de 242% entre os dois trabalhos, e de 435% em relação ao presente trabalho. Nos estudos realizados por FAUSTINO et al. (2005) e por NASCIMENTO et al. (2004) ocorreu uma variação de 329% nos teores de Zn no lodo de esgoto proveniente da ETE Mangueira, no Recife-PE; e nos estudos realizados por ROCHA et al. (2004) e por PAIVA et al. (2009), a variação foi de 202%, para os teores observados no lodo da ETE Barueri – SP.

5.5.2 Análises do efluente

5.5.2.1 Análise química do efluente

Na Tabela 60 são apresentadas as concentrações dos principais metais pesados encontrados no lodo de esgoto (Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn), verificados inicialmente no líquido lixiviado, sem considerar qualquer tipo de influência da cultura, tanto do pinus quanto do eucalipto, devido a incipiência do experimento, e os valores máximos estabelecidos pela resolução nº430/2011 do CONAMA.

Tabela 60. Concentração dos metais (em mg L⁻¹) verificados no líquido lixiviado, no período inicial (T0) do experimento, oriundo dos substratos cultivados com mudas de eucalipto, e submetidos a lâminas de irrigação equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração.

Elemento	Concentrações em T0 (em mg L ⁻¹)				Média (em mg L ⁻¹)	CONAMA Nº430 (em mg L ⁻¹)
	Tratamentos					
	100%	200%	300%	400%		
Cádmio	< 0,002	0,003	0,002	< 0,002	< 0,00225	0,2
Chumbo	0,014	0,014	0,013	0,013	0,01350	0,5
Cobre	0,043	0,038	0,041	0,023	0,03625	1,0
Cromo	< 0,040	0,050	0,040	< 0,040	< 0,0425	1,0
Níquel	0,029	0,046	0,044	0,027	0,0365	2,0
Zinco	3,27	6,97	5,78	3,84	4,965	5,0

De acordo com os resultados observou-se que, com exceção do zinco, as concentrações dos demais elementos estão consideravelmente abaixo dos limites estabelecidos pela resolução nº430/2011 do CONAMA, que dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluente. As concentrações médias observadas nos metais Cd, Pb, Cu, Cr, e Ni representavam, respectivamente, 1,1%, 2,7%, 3,6%, 4,3% e 1,8% dos limites estabelecidos na resolução nº430/2011, o que permite afirmar, com base nestes elementos, que não há restrições no lançamento destes efluentes em corpos receptores.

No entanto, ao analisar as concentrações do zinco verificou-se que a média esteve muito próxima aos valores estabelecidos pela resolução nº430/2011 do CONAMA, representando 99,3% da concentração limite, sendo que, nos materiais lixiviados dos tratamentos equivalentes a 200% e 300% da evapotranspiração, as concentrações apresentaram-se superiores ao limite estabelecido pela norma.

As altas concentrações associadas às altas vazões de efluentes, ocasionadas pelo excesso de irrigação, podem inviabilizar a utilização do lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas em viveiros florestais. A elevada concentração de Zn observada no substrato em associação às outras características deste elemento, contribuiu com a intensa lixiviação, a qual, também, pode ter sido favorecida pela acidez do substrato (pH = 4,5), que estimularia a ocorrência de Zn nas formas trocáveis e solúveis. Esta condição, alta concentração e pH ácido, é similar àquela observada por NASCIMENTO et al. (2010) que, em estudos sobre a lixiviação de chumbo e zinco em solo tratado com resíduos de siderurgia, constataram elevada mobilidade do zinco na coluna de solo, pois a acidez do solo estimularia a ocorrência deste metal nas formas trocáveis (predominantes) e solúveis; de acordo com os autores, a adsorção não específica, pela formação de complexos de esfera externa, de menor

estabilidade, exerce papel importante na retenção deste metal no solo. LANGE et al. (2011) avaliando a lixiviação de zinco presentes em cinza de carvão oriunda de termoeletrica, também verificou uma lixiviação significativa do zinco quando submetida a maiores precipitações pluviométricas.

A concentração de cobre observada no período inicial, variando de 0,023 a 0,043 mg L⁻¹, é semelhante à observada por GALDOS et al. (2009) que observaram valores variando de 0,031 a 0,033 mg L⁻¹, no líquido lixiviado de solos contendo diferentes doses de lodo de esgoto aplicadas. Os autores observaram ainda concentrações de níquel variando de 0,058 a 0,064 mg L⁻¹, e de zinco variando de 0,064 a 0,091 mg L⁻¹. Em relação ao Ni os valores observados pelos autores ficaram acima dos valores obtidos no presente estudo, que variaram de 0,027 a 0,046 mg L⁻¹, enquanto que, em relação ao Zn, os valores observados pelos autores estiveram bem abaixo do verificado no período inicial, variando de 3,27 a 6,97 mg L⁻¹.

Nas Tabelas 61 e 62 são apresentadas as concentrações de Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn, verificados no líquido lixiviado aos 90 e 180 dias do experimento, provenientes dos diferentes tratamentos de eucalipto e de pinus, respectivamente, e os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA n°430/2011.

Tabela 61. Concentração dos metais (em mg L⁻¹) verificados no material lixiviado, aos 60 e 120 dias do experimento, nos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) contendo mudas de eucalipto.

Elemento	Tempo: 60 dias				Tempo: 120 dias				CONAMA n° 430/2011 (mg L ⁻¹)
	Eucalipto - Tratamentos (mg L ⁻¹)				Eucalipto - Tratamentos (mg L ⁻¹)				
	100%	200%	300%	400%	100%	200%	300%	400%	
Cádmio	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,2
Chumbo	< 0,004	< 0,004	< 0,004	0,007	0,010	0,010	< 0,008	< 0,008	0,5
Cobre	0,026	0,021	0,026	0,020	0,018	0,009	0,008	0,020	1,0
Cromo	< 0,040	< 0,040	< 0,040	< 0,040	0,007	0,004	0,004	0,004	1,0
Níquel	< 0,020	< 0,020	< 0,020	< 0,020	0,009	< 0,002	< 0,002	0,002	2,0
Zinco	0,250	0,230	0,260	0,210	0,248	0,131	0,122	0,110	5,0

Tabela 62. Concentração dos metais (em mg L⁻¹) verificados no material lixiviado, aos 60 e 120 dias do experimento, nos diferentes tratamentos (100%, 200%, 300% e 400%) contendo mudas de pinus.

Elemento	Tempo: 60 dias				Tempo: 120 dias				CONAMA n° 430/2011 (mg L ⁻¹)
	Pinus - Tratamentos (mg L ⁻¹)				Pinus - Tratamentos (mg L ⁻¹)				
	100%	200%	300%	400%	100%	200%	300%	400%	
Cádmio	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,2
Chumbo	< 0,004	< 0,004	< 0,004	< 0,004	0,012	< 0,008	0,009	0,012	0,5
Cobre	0,031	0,028	0,024	0,019	0,020	0,013	0,010	0,007	1,0
Cromo	< 0,040	< 0,040	< 0,040	< 0,040	0,007	0,004	0,003	0,006	1,0
Níquel	< 0,020	< 0,020	< 0,020	< 0,020	0,008	0,012	0,013	< 0,002	2,0
Zinco	0,210	0,190	0,160	0,150	0,190	0,390	0,392	0,077	5,0

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 60, 61 e 62, verificou-se nos elementos chumbo, cobre, níquel e zinco, uma maior redução das concentrações entre o

período inicial (T0) e médio (T60), tanto no eucalipto (Tabelas 60 e 61) quanto no pinus (Tabelas 60 e 62); sendo que para os elementos cádmio e cromo as concentrações estiveram abaixo dos limites de quantificação, não permitindo nenhuma inferência sobre seus comportamentos durante o período (0-60 dias)

Verificou-se, pelas Tabelas 60, 61 e 62, que o metal pesado zinco apresentou a maior lixiviação em relação aos demais, a redução da concentração ficou acima dos 99%, passando de 4,965 mg L⁻¹, em média, no início do experimento, para as concentrações de 0,238 mg L⁻¹ e 0,178 mg L⁻¹, em média, nos cultivos de eucalipto e pinus, respectivamente, após 60 dias de aplicação das lâminas de irrigação (T60). De acordo com GIROTTO et al. (2010) esta condição pode estar associada à menor afinidade do Zn pelos grupos funcionais da matéria orgânica das partículas de tamanho coloidal presentes nos solos, de forma que a migração de Zn no perfil do solo passa a ser muito mais intensa.

Os metais chumbo, cobre e níquel, presentes no lixiviado apresentaram menores reduções nas concentrações durante o período de 0-60 dias. A concentração de chumbo reduziu aproximadamente 63%, passando de 0,0135 mg L⁻¹, em média, para valores inferiores a 0,005 mg L⁻¹, no eucalipto, e inferiores a 0,004 mg L⁻¹, no pinus; a concentração de cobre foi reduzida em 31%, sendo reduzida de 0,0363 mg L⁻¹, em média, no período inicial, para 0,023 mg L⁻¹ e 0,025 mg L⁻¹, nos tratamentos com eucalipto e com pinus, respectivamente, após 60 dias de aplicação das lâminas de irrigação; e a concentração de níquel reduziu 45%, passando de 0,0365 mg L⁻¹, em média, para valores inferiores a 0,02 mg L⁻¹ em ambas as culturas.

Nas Tabelas 63 e 64 são apresentadas as estimativas de tempo necessário para que a camada superficial do solo alcance a carga máxima de acúmulo dos elementos, conforme definido na a resolução nº 375/2006 do CONAMA. As aplicações, sucessivas e em excesso, de irrigação, podem lixiviar além dos nutrientes os metais pesados presentes no lodo de esgoto, ocasionando o acúmulo desses metais nas camadas superficiais do solo.

Tabela 63. Valores da concentração inicial dos metais presentes do lixiviado, da carga aplicada diariamente na área da bandeja, carga máxima de acúmulo, limitada pela resolução nº 375/2006 do CONAMA e estimativa de tempo para atingir valor limítrofe no cultivo de pinus.

Metal	Concentração de metal no lixiviado (mg L ⁻¹)	Carga Aplicada por Bandeja (mg d ⁻¹)		Carga Máxima de Acúmulo (CONAMA) (kg ha ⁻¹)	Estimativa de Tempo (Anos)	
		100%	400%		100%	400%
Zinco	4,965	5,064	22,343	445	100	23
Cádmio	0,0023	0,002	0,010	4	1964	441
Cromo	0,0425	0,043	0,191	154	4055	919
Níquel	0,0365	0,037	0,164	74	2269	514
Cobre	0,0362	0,037	0,163	137	4230	959
Chumbo	0,0135	0,014	0,060	41	3399	749

Tabela 64. Valores da concentração inicial dos metais presentes do lixiviado, da carga aplicada diariamente na área da bandeja, carga máxima de acúmulo, limitada pela resolução nº 375/2006 do CONAMA e estimativa de tempo para atingir valor limítrofe no cultivo de eucalipto.

Metal	Concentração de metal no lixiviado (mg L ⁻¹)	Carga Aplicada por Bandeja (mg d ⁻¹)		Carga Máxima de Acúmulo (CONAMA) (kg ha ⁻¹)	Estimativa de Tempo (Anos)	
		100%	400%		100%	400%
Zinco	4,965	5,263	23,832	445	97	21
Cádmio	0,0023	0,002	0,011	4	1873	414
Cromo	0,0425	0,045	0,204	154	3902	862
Níquel	0,0365	0,039	0,175	74	2183	482
Cobre	0,0362	0,038	0,174	137	4070	899
Chumbo	0,0135	0,014	0,065	41	3271	722

Considerando os níveis extremos de irrigação aplicados, isto é, 100% e 400% da evapotranspiração, que provocaram a lixiviação de 1,06 e 4,80 L d⁻¹, em média; respectivamente, no cultivo de mudas de eucalipto, e de 1,02 e 4,50 L d⁻¹, em média; respectivamente, no cultivo de mudas de pinus; além das concentrações de metais presentes inicialmente no lixiviado oriundo do lodo de esgoto, foi possível determinar a carga aplicada no solo, na área sob a bandeja, conforme a relação entre a concentração e a vazão, sugerida por VON SPERLING (1996).

Estimou-se, com base na área ocupada pela bandeja (igual a 0,24 m²) e a carga máxima de acúmulo pela aplicação de lodo de esgoto e seus derivados, definidos pela resolução nº 375/2006 do CONAMA, o tempo necessário para que o solo alcançasse os limites legais estabelecidos, verificando-se a necessidade de tratamentos adicionais visando reduzir as concentrações, principalmente, do elemento zinco, tanto no cultivo de pinus quanto no de eucalipto (Tabelas 63 e 64, respectivamente).

5.5.2.2 Análise quantitativa do efluente

Na Tabelas 65 e 66 são apresentados: os volumes totais aplicados, por tratamento, obtidos pelo produto entre a vazão dos tratamentos (Tabela 57) e o tempo de funcionamento da irrigação nos 48 dias que ocorreram as observações, os volumes totais lixiviados, por tratamento, medidos diretamente nos galões de coleta, durante os 48 dias de observação; e os volumes médios diários dos efluentes, obtidos pela relação entre o volume total lixiviado, por dia, e o número total de bandejas (6 unidades) de cada tratamento.

Os resultados apresentaram aumento nos volumes de efluentes em consequência do aumento da lâmina aplicada, tanto para o cultivo de eucalipto quanto para o cultivo de pinus, sendo a diferença significativa entre tratamentos. Tendo em vista que o sistema de desligamento da irrigação estava vinculado às bandejas submetidas à aplicação equivalente a 100% da evapotranspiração, enquanto esta não alcançava o parâmetro definido (massa relativa a “capacidade de campo”), as demais bandejas, com os outros tratamentos (200%, 300% e 400% da evapotranspiração) recebiam maiores quantidades de água favorecendo as perdas. Nota-se que os volumes aplicados no cultivo de eucalipto foram maiores do que aqueles aplicados no cultivo de pinus. A arquitetura das mudas de eucalipto, com ramos e folhas maiores, atuando como obstáculos na aspersão de água, exigia maior tempo de

funcionamento devido as perdas causadas pelos choques das gotículas, contra estes ramos e folhas, desviando-as para fora da área de captação das bandejas.

Tabela 65. Volumes totais aplicados e lixiviados (em litros) e o volume médio diário lixiviados por bandeja (em litros), com o percentual em relação ao aplicado (entre parênteses) nos diferentes tratamentos com mudas de eucalipto.

Parâmetros	Eucalipto			
	100%	200%	300%	400%
Volume Total Aplicado (L)	94,8	165,8	267,7	343,2
Volume Total Lixiviado (L)	64,2 (67,7%)	131,5 (79,3%)	219,0 (81,8%)	290,4 (84,6%)
Média diária Lixiviada (L.bandeja ⁻¹)	0,223 D	0,457 C	0,760 B	1,008 A

Obs: Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 66. Volumes totais aplicados e lixiviados (em litros) e o volume médio diário lixiviados por bandeja (em litros), com o percentual em relação ao aplicado (entre parênteses) nos diferentes tratamentos com mudas de pinus.

Parâmetros	Pinus			
	100%	200%	300%	400%
Volume Total Aplicado (em litros)	81,4	159,3	255,4	325,4
Volume Total Lixiviado (em litros)	65,2 (80,1%)	137,6 (86,4%)	225,1 (88,1%)	298,9 (91,2%)
Média diária Lixiviada (litros.bandeja ⁻¹)	0,226 D	0,478 C	0,781 B	1,038 A

Obs: Médias seguidas da mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Os volumes coletados nos galões oscilaram de 67,7 a 84,6% do volume de água que foram aplicados no cultivo de eucalipto, e de 80,1 a 91,2% do que foram aplicados no cultivo de pinus, sendo observados, nas duas culturas, aumento percentual do volume lixiviado conforme aumentou o nível de irrigação. No entanto estes números não consideram as perdas, ocasionadas pelas folhas como obstáculos, no cultivo de eucalipto, induzindo, falsamente, a ideia de que este cultivo seria mais eficiente na retenção da água aplicada. Outra importante informação que desfaz esta ideia está relacionada a evapotranspiração (ETc) observadas nas mudas de pinus e de eucalipto, enquanto a primeira apresentou média de 2,26 mm d⁻¹ a segunda apresentou média de 1,63 mm d⁻¹, indicando que o dossel formado pelas mudas de eucalipto reduziam as perdas de água, e que, conseqüentemente, exigiriam menos água (menor tempo de funcionamento) condição contraditória àquela observada.

Do total de água aplicado, o volume “não lixiviado” pelo substrato cultivado com eucalipto foi de 30,6; 34,3; 48,7 e 52,8 litros, para os tratamentos correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400%, respectivamente; embutindo as perdas ocasionadas pelas folhas; já para o substrato cultivado com pinus os volumes “não lixiviados” foram de 16,2; 21,7; 30,3 e 26,5 litros para os tratamentos correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400%, respectivamente.

Quando comparados os volumes de efluentes gerados nas culturas de pinus e de eucalipto, verificou-se que a cultura do pinus apresentou maiores valores em relação ao eucalipto. Devem ser considerados dois fatores na análise destes valores, o primeiro é que o volume de água que efetivamente chegava até as bandejas cultivadas com pinus deveria ser maior, pois eram menos afetadas pela arquitetura das plantas, de forma que a aplicação poderia ser considerada mais “eficiente”, com perdas menores. Outro fator a ser considerado esta relacionado com a própria evapotranspiração da cultura (ETc), que por ser maior no pinus

exigiam maiores volumes de água.

De forma geral, observou-se que a aplicação demasiada de água fomenta o desperdício. Os tratamentos com aplicação de água equivalente a 100% da evapotranspiração, geraram perdas em torno de 0,225 L por bandeja, enquanto que os tratamentos equivalentes a 400% estas perdas foram acima de 1 litro por bandeja. Mesmo com a utilização de mecanismos de monitoramento da umidade dos substratos e de controle da aplicação de lâminas de irrigação, a dinâmica de entrada e saída de água junto aos tubetes, no momento da rega, gera perdas, que deixam evidente a importância tanto do dimensionamento do sistema, com adequada uniformidade de distribuição da água, quanto do manejo da irrigação, aplicando-se a lâmina necessária, de forma a otimizar o uso da água.

5.6 CONCLUSÕES

Tendo em vista o potencial de utilização do lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas e considerando a importância do manejo adequado da irrigação no sentido de viabilizar esta utilização, não somente pelos desperdícios de água mas, também, pela redução de possíveis impactos ambientais, como a contaminação do solo e das águas, considerando-se a presença de metais pesados neste material, e de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho pode-se concluir que:

a) Não houve influência das diferentes lâminas de irrigação aplicadas nos substratos cultivados tanto com pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* – **Engelm**) quanto com eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) na concentração dos metais zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo presentes no composto;

b) Após 90 dias de aplicação das diferentes lâminas de irrigação não houve alteração das concentrações dos metais presentes no substrato, com exceção do Cd, Cu e Pb, nos substratos cultivados com eucalipto e do Cd no substrato cultivado com pinus.

c) No início do experimento, as concentrações dos metais Cd, Pb, Cu, Ni e Cr, contidos nos substratos cultivados, com pinus e com eucalipto, apresentaram valores abaixo dos limites máximos estabelecidos pela resolução nº 375/2006 do CONAMA. No entanto, as concentrações de Zn apresentaram valores 27% acima do limite estabelecido pela norma.

d) As perdas diárias devido a lixiviação foram, em média, de 0,223; 0,457; 0,760 e 1,008 L por bandeja cultivada com mudas de eucalipto, quando aplicadas lâminas de irrigação correspondentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração, respectivamente, enquanto que, no cultivo de mudas de pinus, as perdas foram de 0,226; 0,478; 0,718 e 1,038 L, respectivamente.

e) No período inicial, a concentração média de Zn ($4,97 \text{ mg L}^{-1}$) observada no lixiviado esteve muito próxima do limite ($5,0 \text{ mg L}^{-1}$) estabelecido pela resolução nº 430/2011 do CONAMA, sendo que os teores observados no lixiviado produzido pelas lâminas equivalentes a 200% e 300% da evapotranspiração estiveram acima 39,4% e 15,6%, respectivamente, dos limites da norma, enquanto os tratamentos de 100% e 400%, os teores estiveram abaixo, 34,6% e 23,2%, respectivamente, dos limites estabelecidos na resolução.

f) No momento inicial (30DT) as concentrações de: zinco, cádmio, chumbo, cobre, níquel e cromo; estiveram abaixo de 4,97; 0,003; 0,014; 0,043; 0,05 e 0,046 mg L^{-1} , respectivamente. Nos demais momentos (90 e 150 DT), as concentrações estiveram abaixo de 0,4; 0,002; 0,012; 0,031; 0,02 e 0,04 mg L^{-1} , respectivamente, para os mesmos elementos.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Para as condições em que o trabalho foi conduzido pode-se concluir que:

a) O minilímetro de pesagem eletrônica, com sistema de aquisição e registros de dados, apresentou baixo custo, obtendo em condições de campo desempenho considerado satisfatório para a medição da evapotranspiração em escalas inferiores a diária, apresentando índices de desempenho acima de 99% e erro padrão de estimativa inferior a 1 grama por tubete.

b) A evapotranspiração das mudas de pinus (*Pinus elliottii* var. *elliottii* –Engelm) e de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), obtidas por meio dos minilímetros, durante o período do experimento, apresentaram médias de 2,30 e 1,66 mm d⁻¹, com máximas de 4,12 e 3,53 mm d⁻¹, e mínimas de 0,74 e 0,16 mm d⁻¹, respectivamente. Os valores de Kc, calculados para as culturas do pinus e do eucalipto, obtiveram médias de 0,95 e 1,48, respectivamente.

c) A utilização de lodo de esgoto, na composição do substrato, mostrou-se viável, mantendo as variáveis de crescimento analisadas: altura, diâmetro do coleto, relação altura:diâmetro do coleto, biomassa seca total, relação das biomassa secas da parte aérea e radicular e o índice de qualidade de Dickson semelhantes àqueles observados na literatura, sendo uma boa alternativa para a produção de mudas desde que atendidas as normas vigentes.

d) Com base nas variáveis de crescimento analisadas, verificou-se que os diferentes níveis de irrigação (equivalentes a 100%, 200%, 300% e 400% da evapotranspiração), não influenciaram no crescimento das mudas de pinus e de eucalipto, com exceção do diâmetro do coleto, no cultivo de eucalipto e de pinus, e na relação altura diâmetro do coleto, no cultivo de pinus, somente no período inicial (T0).

e) Os resultados de eficiência do uso da água (EUA) indicaram que o excesso de água aplicado pelos tratamentos superiores a 100% da evapotranspiração, não resultou em benefícios efetivos (ganho de massa) para as mudas de pinus e de eucalipto, representando desperdício de água e, ressaltando a importância do correto manejo da irrigação.

f) Em relação ao teor de metais presentes no substrato os resultados indicam que, inicialmente, o teor de zinco esteve acima (27%) do limite estabelecido pela resolução n° 375/2006 do CONAMA; no período final não houve diferença entre os teores de metais pesados presentes nos substratos cultivados com pinus e com eucalipto, ficando abaixo dos limites da resolução.

g) O teor de zinco presente no efluente esteve nos tratamentos equivalentes a 200% e 300% da evapotranspiração acima 39,4% e 15,6%, respectivamente, dos limites da resolução n° 430/2011 do CONAMA, enquanto os tratamentos de 100% e 400%, estiveram, 34,6% e 23,2%, respectivamente, abaixo.

h) A utilização de lodo de esgoto na produção de mudas exige manejo criterioso da irrigação, pois mesmo que o substrato atenda os limites máximos estabelecidos na resolução n° 375/2006 do CONAMA, a lixiviação de metais pesados devido ao excesso de irrigação pode gerar efluentes com teores acima dos estabelecidos na resolução n° 430/2011 do CONAMA.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. H. M. Biossólido na produção de mudas florestais da mata atlântica. 2014. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2014.

ABREU, M. C. Transpiração e parâmetros de crescimento e desenvolvimento em mudas de espécies florestais submetidas a deficiência hídrica no solo. 2014. 80 f. Dissertação de Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2014.

AGGELIDES, S. M.; LONDRA, P. A. Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of loamy and clay soil. *Bioresource Technology*, v.71, n.3. p.253-259, 2000.

AKHTAR, I., NAZIR, N. Effect of waterlogging and drought stress in plants. *International Journal of Water Resources and Environmental Sciences*, v.2, n.2, p.34-40, 2013.

ALAMINO, R. C. J. A utilização de lodo de esgoto como alternativa sustentável na recuperação de solos degradados: viabilidade, avaliação e biodisponibilidade de metais. 2010. p.89. Tese (Doutorado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

AL-DARIR, A. N.; ALDOUBIAT, M. The optimizing model of potential evapotranspiration in north Syria. In: Ninth International Water Technology Conference, IWTC9, 2005, Sharm El-Sheikh, Egypt p.41-50.

ALI, M. H., TALUKDER, M. S. U. Increasing water productivity in crop production- A synthesis. *Agricultural Water Management*. Amsterdam. v.95, p. 1201-1213. 2008.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, Amsterdam. v.98 p.899–920, 2011.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. In: United Nations Food And Agriculture Organization FAO-Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy. 1998.

ALVES, M. E. B.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Estimate of the crop coefficient for Eucalyptus cultivated under irrigation during initial growth. *Revista Cerne*. Lavras, MG. v. 19, n. 2, p. 247-253, 2013.

ANDRADE, C. A., MATTIAZZO, M. E. Nitratos e metais pesados no solo e nas árvores após aplicação de biossólido (lodo de esgoto) em plantações florestais de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, n.58, 59-72. 2000

ANDREOLI, C. V.; FERNANDES, F.; DOMASZAK, S. C. Proposta preliminar de

regulamentação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto no Paraná. Sanare, Curitiba, PR v.7, n.7, p. 53-60, 1997.

ANDREOLI, C. V.; DE LARA, A. I.; FERREIRA, A. C.; BONNET, B. R. P.; PEGORINI, R. G. K. I. A gestão dos biossólidos gerados em estação de tratamento de esgoto doméstico. Li. Engenharia e Construção, Setembro, n. 24. Curitiba, PR. 1998

ANGIN, I.; YAGANOGLU, A. V. Effects of sewage sludge application on some physical and chemical properties of a soil affected by wind erosion. Journal of Agriculture Science Technology, v.13, p.757-768. 2011.

ANJOS, A. R. M. DOS; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolos repetidamente tratados com biossólido. Scientia Agricola, v.57, n.4, p.769-776, out/dez. 2000.

ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F; MOREIRA, G. R. Correlação entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. Fortaleza, CE, v.5, n.2, p. 96-104, 2011.

ARTHUR JÚNIOR, J. C. Uso de tubete e minitubete de compósito de polihidróxido xibutirato mais pó de madeira na produção e no plantio de mudas seminais e clonais de eucalipto. 2011. 128p. Tese de Doutorado (Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, SP. 2011.

ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substrato na produção de mudas de espécies florestais. Revista Ambiência. Guarapuava, PR. v5, n.2, p.321-330, 2009.

ATAÍDE, G. M., CASTRO, R. V. O., SANTANA, R. C., DIAS, B. A. S., CORREIA, A. C. G, MENDES, A. F. N. Efeito da densidade na bandeja sobre o crescimento de mudas de eucalipto. Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas. v.4, n.2, p.21, 2010.

AUGUSTO, D. C. C.; GUERRINI, I. A.; ENGEL, V. L.; ROUSSEAU, G. X. Utilização de águas residuárias provenientes do tratamento biológico de esgotos domésticos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden. Revista Árvore. Viçosa, MG, v.31, n.4, p.745-751, 2007.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. Semina: Ciências Agrárias. Londrina, PR. v.27, n.4, p.565-580, out./dez. 2006.

BARONY, F. J. A. Biossólidos: produção, efeitos no crescimento de mudas de eucalipto e avaliação de riscos à saúde humana. 2011. 176 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2011.

BASSO, L. A. Irrigação: salinização das águas e solos. Boletim Gaúcho de Geografia. Porto Alegre, RS. n. 20, p.111-113. 1995

BATISTA, R. O., MARTINEZ, M. A., PAIVA, H. N., CECON, P. R.. O efeito da água

residuária da suinocultura no desenvolvimento e qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla*. *Ciência Florestal*, v. 24, n. 1, p. 127-135, 2014.

BAZZO, J. F. Utilização de composto orgânico de lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de eucalipto. 2009. 62 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. 2009.

BENINCASA, M. M. P. Análise de crescimento de plantas: noções básicas. Jaboticabal, SP: FUNEP, 2003. 42 p

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. Viçosa, MG. Editora UFV, 2006. 625 p.

BERTONCINI, E. I.; MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 23, p.737-744, 1999.

BINOTTO A. F. Relação entre as variáveis de crescimento e o índice de qualidade de Dickson em mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid e *Pinus elliottii* var. *elliottii* – Engelm. 2007. 56p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Evaluation of evaporation-measuring equipments of estimating evapotranspiration within a greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB. v.8 n. 2-3: p. 184-188, 2004.

BONO, D.; ALETÀ, N. Cone yield evaluation of a grafted *Pinus pinea* L. trial. In: MUTKE S , PIQUÉ M., CALAMA R. Mediterranean stone pine for agroforestry. Zaragoza: CIHEAM/FAO/INIA/IRTA/CESEFOR/CTFC, 2013. P.35-41 (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéennes; n.105)

BORGES, M. R.; COUTINHO, E. L. M. Metais pesados do solo após aplicação de biossólidos I – fracionamento. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n. 23, p. 543-555, 2004.

BOULARD, T. Evapotranspiration: Greenhouses. In *Encyclopedia of Water Science*, Second Edition. Taylor and Francis: New York, Published online: 02 Apr 2011; 337-342.

BRADFORD, K. J, HSIAO T. C. Physiological responses to moderate water stress. In LANGE, O. L.; NOBEL, P. S. OSMOND, C.B.; ZIEGLER, H. *Encyclopedia of Plant Physiology*, New Series, v. 12b. Springer Verlag, New York, p 263-324, 1982.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. Ed. Porto Alegre. Ed. Bookman Editora, 2013. 704p.

BRAGA, M. B.; KLAR, A. E. Evaporação e evapotranspiração de referência em campo e estufa orientadas nos sentidos norte-sul e leste-oeste. *Revista Irriga*, Botucatu, SP. v. 5, n. 3, p. 222-228, 2000.

BURIOL, G. A; SCHNEIDER, F. M.; ESTEFANEL, V.; ANDRIOLO, J. L.; MEDEIROS, S. L. P. Modificação na temperatura mínima do ar causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, RS, v. 1, n. 1, p.

43-49, 1993.

BURMAN, R. D. Evapotranspiration formulas. In Encyclopedia of Water Science. Taylor and Francis: New York, Published online: 12 Dec 2007; p.253-257.

CALDATO, S. L., SCHUMACHER, M. V. O uso de águas pelas plantações florestais – Uma revisão. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, RS, v. 23, n.3, p.507-516, 2013.

CALDEIRA, M. V. W., DELARMELINA, W. M.; LÜBE, S. G.; GOMES, D. R.; GONÇALVES, E. O.; ALVES, A. F. Biossólido na composição de substrato para a produção de mudas de *Tectona grandis*. Revista Floresta, Curitiba, PR, v. 42, n. 1, p. 77 - 84, jan./mar. 2012. (c)

CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; PERONI, L.; GONÇALVES, E. O.; SILVA, A. G. Lodo de esgoto e vermiculita na produção de mudas de eucalipto. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 43, n. 2, p. 155-163, 2013.

CALDEIRA, M. V. W., FAVALESSA, M., GONÇALVES, E. O., DELARMELINA, W. M., SANTOS, F. E. V., VIERA, M. Lodo de esgoto como componente de substrato para produção de mudas de *Acacia mangium* Wild. Comunicata Scientiae. Bom Jesus, PI. v.5, n.1, p.34-43, 2014.

CALDEIRA, M. V. W., GOMES, D. R.; GONÇALVES, E. O.; DELARMELINA, W. M.; SPERANDIO, H. V.; TRAZZI, P. A. Biossólido como substrato para produção de mudas de *Toona ciliata* var. *australis*. Revista Árvore. Viçosa, MG. v.36, n.6, p.1009-1017, 2012 (b).

CALDEIRA, M. V. W.; PERONI, L.; GOMES, D. R.; DELARMELINA, W. M.; TRAZZI, P. A. Diferentes proporções de biossólido na composição de substratos para a produção de mudas de timbó (*Ateleia glazioviana* Baill). Scientia Forestalis, v.40, n.93, p.15-22, março, 2012.

CALDEIRA, M. V. W., SCHUMACHER, M. V., OLIVEIRA, E. R. V., LUCIANO, E. L. P., WATZLAWICK, F. Influência de vermicomposto na produção de mudas de *Pinus elliottii* Engelm. Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais. v.1, n.3, p. 47-53. 2003.

CAMACHO, M. J.; ASSIS, F. N.; MARTINS, S. R.; MENDEZ, M. E. G. Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS. v.3, p. 19-24, 1995.

CAMARGO, A. P. Desenvolvimento de um controlador de irrigação para áreas experimentais. 2012. 110p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2012.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. Bragantia, Campinas, SP. v. 2, n.59, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPECHE, L. F. S. M. Construção, calibração e análise de desenvolvimento de lisímetro

de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida “Tahiti” (*Citrus latifolia* Tam.). 2002. 64p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2002.

CAMPECHE, L. F. S. M.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB. v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CAMPOS, J.C.C. Principais fatores do meio que afetam o crescimento das árvores. Revista Floresta. Curitiba, v.2, n.3, p.45-52, 1970.

CAMPOS, M.C.C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. Ambiência, v.6, n.3, p.547-565, 2011.

CANALES, A. R.; RUIZ-PEÑALVER, L.; CASADO, G. C.; RUIZ, A. J.; MOLINA, H. P.; MOLINA, D. I.; MARTINEZ, J. M. M. Monitorización del riego por goteo em viña (*Vitis Vinifera* L. cv. Bobal) em maceta mediante lisímetro de pesada. Algunos datos experimentales. An. VII Congresso Ibérico de Agroingeniería y ciências hortícolas. Madrid, 26-29 Agosto, 2013.

CARNEIRO, J. G. de A. Determinação do padrão de qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. para plantio definitivo. 1976. 70f. Dissertação de Mestrado (Silvicultura). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 1976.

CARNEIRO, J. G. de A. Produção e controle de qualidade de mudas florestais. Curitiba: UFPR. Universidade Federal do Paraná. FUPEF- Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná. 1995. 451 p

CARNEIRO, J. G. de A., BARROSO, D. G., SOARES, L. M. S. Crescimento de mudas em raiz nua de *Pinus taeda*, L., sob cinco espaçamentos no viveiro e seu desempenho no campo. Revista Brasileira de Agrociência, Pelotas, RS, v.13, n.3, p. 305-310, 2007.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. Planejamento e manejo da água na agricultura irrigada. Viçosa. MG. Editora UFV, 2012. 240p.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. Rev. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP. v.27, n.2, p.363-372, 2007.

CARVALHO, H. P.; MELO, B.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R.; SILVA, C. R.; MORAES, M. R. B. Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café. Bioscience Journal, Uberlândia, MG. v.29, n.6, p.1750-1760, 2013.

CARVALHO L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. Revista Pesquisa Agropecuária Tropical. Goiânia, GO. v.41, n.3, p.456-465, 2011.

CASANOVA, M. P.; MESSING, I.; ABRAHAM, J.; CAÑETE, A. Methods to estimate lettuce

evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, v.1, n.69, p.60-70, 2009.

CHAVES, A. S., PAIVA, H. N. Influência de diferentes períodos de sombreamento sobre a qualidade de mudas de fedegoso (*Senna macranthera* (Collad.) Irwin et Barn.). *Scientia Forestalis*, n.65, p. 22-29, 2004.

CHUEIRI, W. A.; SERRAT, B. M.; BIELE, J.; FAVARETTO, N. Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB. v.11, n.5, p. 502-508, 2007.

COELHO, M. E. H., FREITAS, F. C. L., CUNHA, J. L. X. L., MEDEIROS, J. F., SILVA, M. G. O. Production and efficiency of water usage in Capsicum crops under no-tillage and conventional planting systems. *Revista Ciência Agronômica*, v.44, n.4, p.741-749, 2013.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. *Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 ago. 2006. 32p.*

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio. 2011.*

CONCEIÇÃO, E da. Apostila Instrumentação Industrial. Universidade do Sul de Santa Catarina, UNISUL, Fevereiro/2005. 125p.

CORREA, R. S.; FONSECA, Y. M.; CORRÊA, A.S. Produção de biossólido agrícola por meio de compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB. v.11, n.4, p. 420-426, 2007.

CORREIA, J. E. Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto Contorno.- Feira de Santana, BA. 2009. 56 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, BA. 2009.

COSTA, F. S., SUASSUNA, J. F., MELO, A. S., BRITO, M. E. R. B., MESQUITA, E. F. Crescimento, produtividade e eficiência no uso da água em bananeira irrigada no semiárido paraibano. *Revista Caatinga*. Mossoró, RN, v. 25, n.4, p.26-33, 2012.

CRUZ, F. A. Instalação e calibração de lisímetro de pesagem e determinação da evapotranspiração de referência para a região de Seropédica-RJ. 2005. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2005.

CUNHA, A. M.; CUNHA, G. M.; SARMENTO, R. A.; CUNHA, G. M.; AMARAL, J. F. T. Efeito de diferentes substratos sobre o desenvolvimento de mudas de *Acacia* sp.. *Revista Árvore*, Viçosa, MG. v.30, n.2, p.207-214, 2006.

CUNHA, A.R. Coeficiente do tanque Classe A obtido por diferentes métodos em ambiente

protegido e no campo. Revista Semina: Ciências Agrárias. Londrina, PR. v. 32, n.2, p. 451-464. 2011.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul, MS. Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG. v.21 n.2, p.159-172. 2013

DELARMELINA W. M., CALDEIRA, M. V. W., FARIA, J. C. T.; GONÇALVES, E. O., ROCHA, R. L. F. Diferentes substratos para a produção de mudas de *Sesbania virgata*. Floresta e Ambiente, v.21, n.2, p.224-233, 2014.

DE MARIA, I. C.; CHIBA, M. K.; COSTA, A.; BERTON, R. S. Sewage sludge application to agricultural land as soil physical conditioner. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n.34, p.967-974, 2010.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. Forest Chronicle, v. 36, n. 1, p. 10-13, 1960.

DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper n.24, FAO, Rome, 1975. 168 p.

DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. Guidelines to Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24 (revised), FAO, Rome, 1977. 144. p.

DUMROESE R. K., WENNY D. L., PAGE-DUMROESE D. S. Nursery waste water. The problem and possible remedies. In: LANDIS, T. D., CREGG, B., technical coordinators. National proceedings, forest and conservation nursery associations. Fort Collins (CO): USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station General Technical Report. n. 365. p 89-97. 1995.

DYNIA, J. F.; SOUZA, M. D.; BOEIRA, R. C. Lixiviação de nitrato em Latossolo cultivado com milho após aplicações sucessivas de lodo de esgoto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF. v.41, n. 5, p. 855-862, maio, 2006.

ELOY, E.; CARON. B. O.; SCHMIDT, D.; BEHLING, A.; SCHWERS, L.; ELI, E. F. Avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* utilizando parâmetros morfológicos. Rev. Floresta, Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 373-384, 2013.

ELOY, E.; CARON, B. O.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; SOUZA, V. Q. Determinação do período de permanência de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden em casa de vegetação. Comunicata Scientiae, Bom Jesus, PI, v.5, n.1, p.44-50, Jan./Mar. 2014.

EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, G. M. Efeito da Cobertura plástica de casa de vegetação sobre os elementos meteorológicos em Lavras, MG. Revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras, MG. v.25, n.4, p.952-957, 2001.

FACHINI, E. Manejo da irrigação em diferentes substratos na produção de mudas de laranja.

2006. 103p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP. 2006.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB. v.10, n.1, p.237-242, 2006.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. B. Evapotranspiração no interior de Estufas Plásticas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, RS. v.2, p.17-22, 1994.

FARIFR, E., ABOGLILAL, S. Seedling tolerance of three eucalyptus species to a short-term flooding event: Tolerance and Physiological Response. *British Journal of Applied Science & Technology*, v.6, n. 6, p.644-651, 2015.

FAUSTINO, R.; KATO, M. T.; FLORÊNCIO, L.; GAVAZZA, S. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Senna siamea* Lam.. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB. v.9 (Suplemento) p.278-282, 2005.

FELTRIN, R. F., de PAIVA, J. B. D., de PAIVA, E. M. C. D., BELING, F. A. Lysimeter soil water balance evaluation for an experiment developed in Southern Brazilian Atlantic Forest region. *Hydrological Process*. v.25, n.15, p.2321-2328, 2011.

FERNANDES, A. L. T.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R. Avaliação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura do crisântemo (*Chrysanthemum spp.*) cultivada em estufa plástica. *Revista Irriga*, Botucatu, SP. v.11, n.2, p. 139-149, abril-junho, 2006.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; ARAÚJO, J. A. C. Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses. *Scientia Agrícola*, v.60, n.3, p.591-594, 2003.

FERNANDES, F., PIERRO, A. C., YAMAMOTO, R. Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estação de tratamento de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, n. 28, p.567-574, 1993.

FERNANDES, F.; ANDRAUS, S.; ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P.; BORGES, J. C.; MEDEIROS, M. L. B. Eficiência dos processos de desinfecção do lodo da ETE-Belém com vistas ao seu uso agrícola. *Sanare*, Curitiba, PR. v.5, n.5, p.68-75, 1996.

FERNANDES, S. J. O. Influência de lâminas de irrigação no minijardim clonal na produção de mudas de eucalipto. 2011. 68p. Dissertação de Mestrado em Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. MG, Fevereiro, 2011.

FERNANDEZ, G. C. J. Repeated measure analysis of line-source sprinkler experiments. *Hortscience*, v.26, n. 4, p. 339-342, 1991.

FERNÁNDEZ, J. E. Plant-based methods for irrigation scheduling of woody Crops. *Horticulturae*. v.35, n.3, p.1-37. 2017.

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V. Produção e características dos biossólidos. In: LARA,

A. I. de ; FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E. S.; IHLENFELD, R. G. K. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Curitiba, PR. 1999. 98 p.

FERREIRA, C. A. G.; DAVIDE, A. C.; CARVALHO, L. R. de. Relações hídricas em mudas de *Eucalyptus citriodora* Hook., em Tubetes, aclimatadas por tratamentos hídricos. Revista Cerne, Lavras, MG, v. 5, n. 2, p. 95-104, 1999.

FERREIRA, W. L. Análises de dados com medidas repetidas em experimentos com gestão de café. 2012. 108p. Dissertação de Mestrado (Estatística e Experimentação Agropecuária). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2012.

FIGUEIREDO, F. A. M. M. A., CARNEIRO, J. G. A., PENCHEL, R. M., BARROSO, D. G., DAHER, R. F. Efeito das variações biométricas de mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.35, n.1, p.01-11, 2011.

FLORIANO, E. P. Efeito da desrama sobre o crescimento e a forma de *Pinus elliottii* Engelm. 2004. 93f. Dissertação de Mestrado. Engenharia Florestal. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2004,

FOCHESATO, M. L., SOUZA, P. V. D., SCHÄFER, G, MACIEL, H. S. Alteração das características químicas de três substratos comerciais na produção de mudas cítricas. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, MG. v.32, n.4, p.1040-1046, jul/ago, 2008.

FOLEGATTI, M. V.; SCATOLINI, M. E.; PAZ, V. P. S.; PEREIRA, A. R.; FRIZZONE, J. A. Efeitos da cobertura plástica sobre os elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura do crisântemo em estufa. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.2, p.155-163, 1997.

FONSECA, E. P. Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume., *Cedrela fissilis* Vell. e *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. 2000. 113 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP. 2000.

FREITAG, Â, S. Frequências de Irrigação para *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* em viveiro. 2007. 60f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2007.

FREITAG, A. S.; MORAIS, W. W. C.; NISHIJIMA.T. Otimização da irrigação para a formação de mudas *Pinus elliottii*. Revista Nucleus, Ituverava, SP, v.9, n.2, p.33-42 outubro, 2012.

FREITAS, A. J. P.; KLEIN, J. E. M. Aspectos técnicos e econômicos da mortalidade de mudas no campo. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 11.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, Curitiba, PR. Anais: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1993. p.736.

FREITAS, A. R., FERREIRA, P. R., MOREIRA, A. Análises de dados de medidas repetidas por meio do modelo linear geral e do modelo misto. Revista de Ciências Agrárias, v.54, n.3, p.214-224, 2011.

FREITAS, E. J. Análise de dados longitudinais em experimentos com cana-de-açúcar. 2007.

74p. Dissertação de Mestrado (Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Piracicaba, SP. 2007.

FREITAS, T. A. S., FONSECA, M. D. S., SOUZA, S. S. M., LIMA, T. M., MENDONÇA, A. V. R., SANTOS, A. P. Crescimento e ciclo de produção de mudas de *Eucalyptus* em recipientes. *Pesquisa Florestal Brasileira*. Colombo, PR, v. 33, n. 76, p. 419-428, 2013.

FUCHS, M. Evapotranspiration, reference and potencial. In *Encyclopedia of Water Science*. Taylor and Francis: New York, Published online: 12 Dec 2007; p.264-266.

GALBIATTI, J. A.; LUI, J. J.; SABONARO, D. Z.; BUENO, L. F.; SILVA, V. L. Formação de mudas de eucalipto com utilização de lixo orgânico e níveis de irrigação calculados por dois métodos. *Revista da Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v.27, n.2, p.445-455, maio/ago. 2007

GALDOS, M. V., DE MARIA, I. C., CAMARGO, O. A., DECHEN, S. C. F. Sewage sludge application on cultivated soils: effects on runoff and trace metal load. *Scientia Agrícola*. Piracicaba, SP. v.66, n.3, p.368-376, 2009.

GALVANI, E.; DANTAS, R. T.; ESCOBEDO, J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Parâmetros meteorológicos em cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) cultivada em casas de vegetação com orientações leste-oeste, norte-sul e condições externas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, RS. v.6, n.2, p.157-63, 1998.

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

GERVÁSIO, E. S.; MELO JÚNIOR, J. C. F. Utilização da técnica de lisimetria de pesagem na automação de um sistema de irrigação localizada para uso no manejo da irrigação de cultivos em recipientes. *Revista Irriga*, Botucatu, SP. v.19, n.4, p. 626-640, 2014.

GHOLZ, H. L.; EWEL, K. C.; TESKEY, R. O. Water and forest productivity. *Forest Ecological Management*, Amsterdam, v.30, p.1-18, 1990.

GIROTTO E., CERETTA, C. A., BRUNETTO, G., SANTOS, D. R., SILVA, L. S., LORENZI F., LORENSINI F., VIERA R. C. B., SCHMATZ, R. Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, n.33. p.955-965.2010

GOBBI, M. A. Potencialidade do uso do lodo de esgoto como fonte de macronutrientes no cultivo do milho (*Zea mays* L.) no município de Maringá – PR. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP. 2003

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.71 p.158–162. 2010.

GOMES, D. R., CALDEIRA, M. V. W., DELARMELINA, W. M., GONÇALVES, E. O., TRAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para a produção de mudas de *Tectona grandis* L. *Revista Cerne*, Lavras, MG, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.

- GOMES, J. M. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis* produzidas em diferentes tamanhos de tubetes e de dosagens de N-P-K. 2001. 166p. Tese de Doutorado (Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2001.
- GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. L. XAVIER, A., GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore, v. 26, n. 6, p. 655-664, 2002.
- GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. L.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* em diferentes tamanhos de tubetes e fertilização N-P-K. Revista Árvore, v.27, n.2, p.113-127, 2003.
- GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. Viveiros Florestais: propagação sexuada. Viçosa: UFV, 2011. 116 p
- GOMES, J. M., PAIVA, H. N.; COUTO, L. Produção de mudas de eucalipto. Informe Agropecuário, v.18, n.185, p.15-23, 1996.
- GOMIDE, R. L.; OLIVEIRA, C. S. G.; FACCIOLI, G. G. Protótipo de um lisímetro de pesagem automático para estudos em casa de vegetação. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS. v.4, n.1, p.61-68, 1996.
- GONÇALVES, E. O.; PAIVA, H. N.; GONÇALVES, W.; JACOVINE, L. A. G. Diagnóstico dos viveiros municipais no estado de Minas Gerais. Revista Ciência Florestal, Santa Maria, RS, v.14, n.2, p.1-12, 2004.
- GRIGOL, A. A. A. S., MEDEIROS, G. A., RIBEIRO, A. I., LOURENÇO, R. W., TOMAZ, I. S. F., MARIN, A. M. O. Gestão ambiental em centro de experimentos florestais na região de Itú – SP: Diagnóstico dos aspectos e impactos ambientais e potencialidade do reuso da água. Rev. Engenharia Ambiental. Espírito Santo do Pinhal, SP. v.10, n.3, p.039-055, 2013
- GRIMMOND, C. S. B.; ISARD, S. A.; BELDING, M. J. Development and evaluation of continuously weighing mini-lysimeters. Agricultural and Forest Meteorology, v.62, p.205-218, 1992.
- GUEDES, M. C., ANDRADE, C. A., POGGIANI, F., MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n.30, p.267-280, 2006
- GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n.28, p.1069-1076, 2004
- GUMPERTZ, M. L., BROWNIE, C. Repeated measures in randomized block and split plot experiments. Canadian Journal of Forest Research, v.23. p.625-639, 1993.
- GURSKI, B. C.; SOUZA J. L. M.; JERSZURKI D.; PACHECHENIK, P.; EVANGELISTA, A. D. Coeficiente de cultivo em floresta de *Pinus taeda*. Anais. CONVIBRA, 2016. 10p. (Evento Online: www.convibra.org)

HERNÁNDEZ-APAOLAZA L., GUERRERO F. Comparison between pine bark and coconut husk sorption capacity of metals and nitrate in mixtures with sewage sludge. *Bioresource Technology*, n. 99. p. 1544-1548. 2008.

HIGASHIKAWA, F. S., SILVA, C. A., BETTIOL, W. Chemical and physical properties of organic residues. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n.34, p.1743-1752, 2010.

HOSSOKAWA, T. Estudo dos elementos meteorológicos na estimativa da evapotranspiração potencial em casa de vegetação. 2007. 123p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2007.

HOWELL, T. A.; SCHNEIDER A. D.; JENSEN, M. E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. *Proceedings of the International Symposium on Lysimetry*. Honolulu, July 23-25, 1991, p.1-9.

IBÁ: Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBÁ 2016. 100p. Disponível em:[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016 .pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016.pdf) acessado em 14/03/2016.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PNSB 2008. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pnsb/default.asp>>. Acesso em 31 ago. 2015.

ILAH, W. F. F. Evapotranspiration models in greenhouse. 2009. 53p. (thesis of Master of Science Agricultural and Bioreserch Engineering). Wageningen University, Netherland, 2009.

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia. Normais climatologicas 1961-1990. Brasília. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php r=clima/normaisclimatologicas>>. Acessado em 12 ago. 2014.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332 p.

KANWAR, R. S., BAKER, J. L., MUKHTAR, S. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. *Agricultural and Biosystems Engineers*. v.31, n.1, p. 133-141, 1988.

KATERJI, N., MASTRORILLI, M., RANA, G. Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal Agronomy*, v.28, p. 493–507, 2008.

KLAR, A. E. A água no sistema solo-planta-atmosfera. São Paulo. Ed. Nobel, 2ª edição; 1988. 408p.

KOCHEM, M. L. Características granulométricas, Carbono, Nitrogênio e frações de Fósforo em sedimentos durante eventos chuva-vazão em bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul, Brasil. 2014. 120p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2014.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Utilização de resíduos urbanos e agroflorestais para produção de mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Mimosa scabrella*. Floresta e Ambiente, Seropédica, RJ. v. 20, n. 4, p. 530-537, 2013.

LÃ, O. R. Efeito do período de estocagem, tempo de incubação e da temperatura de secagem na avaliação de parâmetros químicos e biológicos e na disponibilidade de metais de lodo de esgoto. 2010. 113 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ. 2010.

LANDIS, T. D. Manual de viveiros para la producción de espécies forestales em contenedor. Capítulo 2. Riego y Manejo del Água, v.04, p.72-127, 2000.

LANGE, C. N., SILVA, J. C., BOCCI, C. S., DE CAMARGO, I. M. C. Avaliação da lixiviação de Mo, Cd, Zn, As e Pb de cinza de carvão oriunda da termelétrica de Figueira, Paraná. In. 3rd International Workshop Advances in Clear Production. São Paulo, Brasil, 18-20 de maio, 2011.

LOBO, T. F.; FILHO, H. G.; CARDOSO, E. J. B. N.; ALMEIDA, L. S.; JUNIOR, N. N. Crescimento e fixação biológica do nitrogênio em soja cultivada com doses de lodo de esgoto compostado. Semina; Ciências Agrárias. Londrina, PR. v.33, n.4, p.1333-1342, jul/ago. 2012.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C. Qualidade de mudas de eucalipto produzidas sob diferentes lâminas de irrigação e dois tipos de substratos. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.31, n.5, p.835-843, 2007.

LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SAAD, J. C. C.; LOPES, C. F. Influência dos fatores bióticos e abióticos na sobrevivência de eucalipto em função do solo e do manejo de viveiro. Revista Biotemas, Florianópolis, SC. v.2, n.22, p29-38, junho, 2009.

LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, v. 41, n. 1, 1984.

LUIS, V. C.; PETERS, J.; GONZALEZ-RODRIGUEZ, A. M.; JIMENEZ, M. S., MORALES, D. Testing nursery plant quality of Canary Island Pine seedlings grown under different cultivation methods. Phytion, v. 44, Fasc. 2, p.231-244, 2004.

LYRA G. B. Estimativa da evapotranspiração e análise de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico em condições de casa-de-vegetação. 2002. 91P. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2002.

MAAS, K. D. B. Biossólido como substrato na produção de mudas de Timburi. 2010. 46 p Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Florestal. Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, 2010.

MAEDA, S.; ANDRADAE, G. de C.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da; AGOSTINI, R. B. Substratos alternativos para produção de mudas de *Eucalyptus badijensis*, obtidos a partir de resíduos das indústrias madeireira e cervejeira e da caprinocultura. Comunicado técnico N°. 157 Embrapa Florestas, Colombo, PR. 2006. 5p.

MAGyP- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) 2016.

<http://areasigeinventarioforestal.blogspot.com.br/p/atividades.html>. Acessado em 28/10/2016.

MAIA, L. R. Alterações químicas em um Latossolo Vermelho-amarelo em função de altas doses de lodo de esgoto em diferentes intervalos de irrigação. 2008. 61 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Alegre, ES. 2008.

MALHEIROS, E. B. Precisão de Testes F univariados usados em experimentos com medidas repetidas no tempo, quando a condição de esfericidade da matriz de covariâncias não é verificada. Revista de Matemática e Estatística, São Paulo, v.22, n.2, p.23-29, 2004.

MALTA, T. S. Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: Estudo do caso do Município de Rio das Ostras –RJ. 2001. 67p. Dissertação de Mestrado. Escola Nacional de Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro, RJ. 2001.

MAÑAS P.; CASTRO E.; DE LAS HERAS, J. Quality of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) seedlings using waste materials as nursery growing media. New Forest, n.37. p. 295–311, 2009.

MAÑAS, P.; CASTRO, E.; VILA, P.; HERAS, J. Use of waste materials as nursery growing media for *Pinus halepensis* production. European Journal of Forest Research, Berlin, v. 129, n. 4, p. 521-530, 2010.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. Viçosa: Editora UFV, 2007. 318p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA-MAPA) - Instrução Normativa No. 23, de 31 de agosto de 2005. Diário Oficial da União, 08/09/2005.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano para expansão, aprimoramento, e desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada. Em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/agricultura-sustentavel-e-irrigacao/ano/plano-de-irrigacao-mapa-28.pdf> acessado em 18/12/2016.

MARTINS, C. C.; PEREIRA, M. R. R.; LOPES, M. T. G. Germinação de sementes de eucalipto sob estresse hídrico e salino. Biosci. Journal, Uberlândia, MG. v. 30, supplement 1, p. 318-329, June, 2014.

MARTINS, R. B. Diagnóstico de produtores de mudas florestais nativas do Estado de São Paulo: Relatório Analítico. Mata Ciliar, São Paulo, n.2, julho 2011.

MELLIS, E. V. Adsorção e dessorção de Cd, Cu, Ni e Zn, em solo tratado com lodo de esgoto. 2006. 174 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Estadual Paulista. Piracicaba, SP. 2006.

MELLO, S. L. M.; GONCALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

MELO, V. P.; BEUTLER, A. N.; SOUZA, Z. M.; CENTURION, J. F.; MELO, J. M. Atributos físicos de Latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v.39, n.1, p.67-72, janeiro. 2004.

MELO, W. J., MARQUES, M. O., MELO, V. P. O uso agrícola do lodo de esgoto e as propriedades do solo. In. TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; SOBRINHO, P. A.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M.O.. Biossólidos na agricultura. São Paulo, SABESP, 2001. p. 289-363.

MEXAL, J. G.; LANDIS, T. D. Target seedling concepts: height and diameter. In: Target Seedling Symposium Meeting of the Western Forest Nursery Associations, Roseburg, 1990. Proceedings. Fort Collins: USDA, 1990. p. 17-37.

MISRA, R. K.; PADHI, J.; PAYERO, J. O. A calibration procedure for load cells to improve accuracy of mini-lysimeters in monitoring evapotranspiration. Journal of Hydrology, v. 406, n.1-2, p. 113-118, 2011.

MOAZED, H.; GHAEMI, A. A.; RAFIEE, M. R. Evaluation of several reference evapotranspiration methods: A comparative study of greenhouse and outdoor conditions. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, v.38, n.2, p. 421-437, 2014.

MORAIS, S. M. J., ATAIDES, P. R. V., GARCIA, D. C., KURTZ F. C., OLIVEIRA O. S., WATZLAWICK, L. F. Uso do lodo de esgoto da Corsan. Santa Maria (RS), comparado com outros substratos orgânicos. Sanare. v.6, n.6. p. 44-49. 1996.

MORENO, R.; CANET, R.; ALBIACH, R.; POMARES, F.; PÉREZ-PIQUERES, A. Aplicaciones potenciales de los residuos orgánicos en viveros de especies forestales mediterráneas. Actas de Horticultura, Valencia, Espanha. n. 68, p 97-104, 2014.

MPUSIA, P. T. O. Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. 2006. 75p. Thesis of Master of Science in geo-Information Science and Earth Observation, ITC, Netherland, 2006.

MUNGUAMBE, J. F. Qualidade morfológica de mudas clonais de eucalipto na fase de expedição em viveiros comerciais. 2012. 73 p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, MG. 2012.

NASCIMENTO, C. W. A., BARROS, D. A. S., MELO, E. E. C., OLIVEIRA, A. B. Alterações Químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. Revista Brasileira de Ciências do Solo, n.28, p.385-392, 2004.

NASCIMENTO, R. S. M. P., CARVALHO, G. S., PASSOS, L. P.; MARQUES, J. J. Lixiviação de chumbo e zinco em solo tratado com resíduos de siderurgia. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 40, n. 4, p. 497-504, out./dez. 2010.

NÓBREGA, R. S. A.; VILAS BOAS, R. C.; NÓBREGA, J. C. A.; PAULA, A. M.; MOREIRA, F. M. S. Utilização de biossólidos no crescimento inicial de mudas de Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi). Revista Árvore, Viçosa, MG. V.31, n.2, p.239-246, 2007.

NOVAES, A. B. Avaliação morfofisiológica da qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. produzidas em raiz nua e em diferentes tipos de recipientes. 1998. 133p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 1998.

NOVAES, A. B.; CARNEIRO, J. G. de A., BARROSO, D. G., LELES, P. S. S. Desempenho de mudas de *Pinus taeda* produzidas em raiz nua e em dois tipos de recipientes, 24 meses após o plantio. Revista Floresta, Curitiba, PR, v.31, n.1 e 2, p. 62-70, 2001.

OLIVEIRA, A. S. Otimização do uso da água na produção de mudas clonais de *Eucalyptus* 2012. 98p. Dissertação (Meteorologia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

OLIVEIRA, C. Avaliação do potencial de contaminação de dois solos agrícolas com lodo de esgoto enriquecido com Cádmio, Chumbo e Zinco. 1998. 201 p. Tese (Philosophiae Doctor em Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ. 1998

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em Latossolo tratado com lodo de esgoto e em plantas de cana-de-açúcar. Scientia Agrícola. v.58, n.3, p.581-593. Jul/Set. 2001.

OLIVEIRA, J. P. B.; LOPES, J. C.; ALEXANDRE, R. S.; JASPER, A. P. S.; SANTOS, L. N. S.; OLIVEIRA, L. B. Concentração de metais pesados em plantas de maracujá doce cultivadas em dois solos tratados com lodo de esgoto. Rev. Engenharia Ambiental. Espírito Santo do Pinhal, SP. v.6, n.2, p. 217-223, mai/ago. 2009.

OLIVEIRA JÚNIOR, O. A. de. Qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* produzidas em diferentes substratos. 2009. 68p Dissertação de Mestrado (Agronomia). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA, 2009.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F.; ROMÃO, P. A.; CORTÊS, F. C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.31, n.2, p.121-126, 2001.

OMARI, M. A. Impact of pot sizes on seedlings growth for some forest trees propagated in forest nursery. Jordan Journal of Agricultural Sciences, v.6, n.4, p.534-546, 2010.

PACHECO, E. D.; NETO, P. F. Mobilidade da Prata, Cobre, Cromo, Chumbo e Zinco em solo tratado com lodo de esgoto. In. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis, SC. 2004. p. 1828-1837. 2004

PAIVA, A. V.; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. M.; FERRAZ, A. V. Crescimento de mudas de espécies arbóreas nativas, adubadas com diferentes doses de lodo de esgoto e com fertilizante mineral. Scientia Forestalis, Piracicaba, SP. v.37, n.84, p.499-511, dezembro, 2009.

PAIVA, H. N.; GOMES, J. M. Viveiros Florestais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG. 1993. 56 p.

PAMOLINO MONTES, D. R. Evapotranspiração da cultura da alface dentro e fora de ambiente protegido. 2008. 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. MG. 2008.

PARENT C.; CAPELLI, N.; BERGER, A.; CRÈVECOEUR, M.; DAT, J. F. An overview of plant responses to soil waterlogging. *Plant Stress*, v.2, n.1, p.20-27. 2008.

PARK, E.; CHO, M., KI, C. S. Correct use of repeated measures analysis of variance. *Korean Journal Laboratory Medicine*, v.29, p.1-9. 2009.

PAULA, R. A.; CORRÊA, R. S; COTTA, T. P. Lixiviação de nitrato de um substrato minerado tratado com lodo de esgoto doméstico. *Bragantia*, v. 70, n. 1, p. 104-112. 2011.

PEIXOTO, C. P. Comparação de cinco métodos de estimativa da área foliar do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Anais do V Congresso Brasileiro de Fisiologia Vegetal. Lavras, MG. 1995. p.92.

PEREIRA, A.R., ANGELOCCI, L.R., SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia – Fundamentos e aplicações práticas. Guaíba, SP. Ed. Agropecuária, 2001. 480p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, L. S.; PERRIER, A.; ALLEN, R. G.; ALVES, I. Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.2, n.125, p.45-51, 1999.

PEREIRA, L. S.; VALERO, J. A. de J.; BUENDÍA, M. R. P.; MARTÍN-BENITO, J. M. T. El riego y sus tecnologías. Albacete: CREA-UCLM, 2010. 296p.

PÉREZ, P. V.; MALAVASI, U. C., MALAVASI, M. M., LANG, A., ZACHOW, K. Efeito do bio-sólido no crescimento inicial de *Corymbia citriodora*. *Ambiência*, Guarapuava, PR, v.7, n.1, p.13-23, jan/abr., 2011.

PEZZUTTI, R. V., CALDATO, S. L. Sobrevivência e crescimento inicial de mudas de *Pinus taeda* L. com diferentes diâmetros do colo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, RS. v. 21, n. 2, p. 355-362, 2011.

PICHLER, M. E. B. Avaliação do biofertilizante supermagro na produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. 2011. 83 f. Dissertação de Mestrado (Ciências Florestais). Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, Irati, PR. 2011.

PIRES, A. M. M., MATTIAZZO, M. E. Cinética de solubilização de metais pesados por ácidos orgânicos em solos tratados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n.31, p.143-151, 2007.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENNEDETTI, V. Aplicabilidade do bio-sólido em plantações florestais I. Reflexo do ciclo dos nutrientes. In: BETIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Ed.). Impactos Ambientais do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente cap. 8, p 162-178. 2000.

PONTONI, D.R. Nutrição e crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função de lodo de esgoto e calcário para solos subtropicais. 2011. 39p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2011.

POSSE, R. P. Determinação dos coeficientes da cultura (kc), de produtividade (ky), da área foliar e feito da lâmina de irrigação, do turno de rega e da adubação potássica na produtividade do mamoeiro nas regiões Norte e Noroeste Fluminense. 2008. 197 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. 2008.

PUJATO, J. Plantaciones de pinos y eucaliptos en la Mesopotamia Argentina – Forestaciones Pequeñas y medianas – XIII Jornadas Forestales de Entre Rios e I Encuentro Forestal Cedefor del Mercosur – Concordia – Argentina- Octubre de 1998. Volume IV. Págs 1 – 4.

QUINTANA, N. R. G.; CARMO, M. S. do; MELO, W. J. de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. Nucleus, Ituverava SP. v.8, n.1, p.183 -192, abr. 2011.

RAMOS, K. A. Disponibilidade hídrica e hidrorretentores na produção de mudas clonais de eucalipto. 2012. 67p. Dissertação de Mestrado (Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.

RAZALI, N. M., WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilks, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. Journal of statistical modeling and analytics. v.2, n.1, p.21-33, 2011.

REBOUÇAS, P. M.; DIAS, I. F.; ALVES, M. A.; BARBOSA FILHO, J. A. D. Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, v.7, n.2, p.115-125, 2015.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. Campinas. Fundação Cargill. 1985. 486p.

REIS, E. R.; LÚCIO, A. D. C.; FORTES, F. O., LOPES, S. J.; SILVEIRA, B. D. Período de permanência de mudas de *Eucalyptus grandis* em viveiro baseado em parâmetros morfológicos. Revista Árvore, Viçosa, MG, v.32, n.5, p.809-814, 2008.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Série Documentos, 37).

RESENDE, A.V. Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato. Planaltina. DF. Embrapa - Cerrados. 2002, 29p.

RIBEIRO, H. M., VASCONCELOS, E., CABRAL, F.; RIBEIRO D. Fertilization of *Pinus pinea* L. with a sewage sludge-based compost. Waste Management & Research, n.27: p. 112-118. 2009.

RIBEIRO, M. C. F.; ROCHA, F. A.; SANTOS, A. C.; SILVA, J. O.; PEIXOTO, M. F. S. P.; PAZ, V. P. S. Crescimento e produtividade da mamoneira irrigada com diferentes diluições de esgoto doméstico tratado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina

Grande, PB. v.16, n.6, p.639–646, 2012.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; JÚNIOR, D. R. P. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado. I. Atributos físicos e revegetação. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n.34, p.535-542, 2010.

RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A; MOSQUERA-LOSADA, M. R. Utilización de lodo de depuradora urbana como componente de substrato para la obtención de planta forestal de *Eucalyptus globulus* Labil. *Boletín del CIDEU*, n. 3, p. 145-154, Huelva, Espanha. 2007.

RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A; MOSQUERA-LOSADA, M. R; VILA-ROMAY, T. Efecto de la proporción de distintos componentes del sustrato en el crecimiento en envase de *Pinus pinaster* Aiton en vivero. III Congreso Forestal Español. Granada. 2001.

ROCHA, J. H. T.; BACKES, C.; DIOGO, F. A.; PASCOTTO, C. B.; BORELLI, K. Composto de lodo de esgoto como substrato para mudas de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.33, p. 27-35, 2013.

ROCHA, G. N., GONÇALVES, J. L. M., MOURA, I. M. Mudança da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com bio-sólido. *Rev. Brasileira de Ciência do Solo*, n. 28, p.623-639, 2004.

RODRIGUES, S. B. S. Análise de uso de água em unidades de produção de mudas de eucalipto. 2007. 93p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

RODRÍGUEZ-TREJO, D. A.; DURYEY, M. L. Seedling quality indicators in *Pinus palustris* Mill. *Agrociencia*, México, v. 37, p. 299-307, mai./jun., 2003.

ROSE, R.; CARLSON, W.; MORGAN, P. The target seedling concept. In: Target Seedling Symposium Meeting of the Western Forest Nursery Associations, Roseburg, 1990. Proceedings. Fort Collins: USDA, 1990. p.1-8.

ROSSI, V. L. Crescimento e qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. submetidas à poda química das raízes com cobre e ethefon. 2005. 40p Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal). Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, SC, 2005.

ROSSI, V. L.; AMARANTE, C. V. T.; FLEIG, F. D. Crescimento e qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. submetidas à poda química de raízes. *Ciência Florestal*, v. 18, n. 4, p. 435-442, 2008.

RUIZ-PEÑALVER, L. R.; MOLINA-MARTINEZ, J. M., ARRONIZ, D.G.; CANALES, A.R. Design, implementation and evaluation of a lysimeter for plotted plants . In. 17th International Congress on Project Management and Engineering. Logroño, p. 1608-1620, 2013.

RUIZ-PEÑALVER, L.; VERA-REPULLO, J. A.; JIMENEZ-BUENDIA, M.; GUZMÁN, I.; MOLINA-MARTINEZ, J. M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. *Agricultural Water Management*, n.151, p.103-113, 2015.

SALVADOR, C. A. Sistema de irrigação por capilaridade na produção de porta-enxerto de mudas cítricas na fase de sementeira. 2010. 123p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.

SANTOS, E. R. Caracterização química, microbiológica e toxicidade do lodo de esgoto da estação Mangueira, Pernambuco, Brasil. 2009. 68 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais). Universidade Católica de Pernambuco. Recife. PE. 2009.

SANTOS, F. E. V., KUNZ, S. H., CALDEIRA, M. V. W., AZEVEDO, C. H. S., RANGEL, O. J. P. Chemical characteristics of substrates formulated with sewage sludge for production of seedlings of forest species. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.18, n. 9. Campina Grande, PB. 2014.

SANTOS, F. X.; RODRIGUES, J. J. V.; MONTENEGRO, A. A.de A. MOURA, R. F. Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. *Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, SP*. v.28, n.1, p. 115-124, 2008.

SANTOS, K. G. Efeito da adubação foliar e condicionadores de solo no enraizamento, crescimento e rustificação de mudas clonais de *Pinus* sp. 2015. 126p. Dissertação de Mestrado em Ciências. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP. 2015.

SATO, F. A., SILVA, A. M., COELHO, G., SILVA, A. C., CARVALHO, L. G. Coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras, MG. *Rev. Engenharia Agrícola*, v.27, n.2, p.383-391. 2007.

SCATOLINI, M. E. Estimativa da evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa a partir de elementos meteorológicos. 1996. 71f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP. 1996.

SCHEER, M. B.; CARNEIRO, C.; SANTOS, K. G. Crescimento de mudas de *Prunus brasiliensis* (Cham. & Schltdl.) D. Dietr. em substratos à base de lodo de esgoto compostado e fertilizante mineral. *Revista Ciência Florestal, Santa Maria*, 2012.

SCHIRMER, G. K. Utilização do lodo de esgoto na vermicompostagem e como substrato para a produção de mudas de *Pinus elliottii* Engelm. 2010. 93f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (SEA). Diagnóstico da produção de mudas de espécies nativas do estado do Rio de Janeiro. Relatório técnico, SEA, Rio de Janeiro, 63 p., 2010.

SEDYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS*. v.4, n.1, p.i-xii, 1996.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. In. *Irrigação - Série Engenharia Agrícola*. Piracicaba, SP. Ed. FUNEP, p.63-120. 2001.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A. Efeito de diferentes tipos de cobertura, em mini-estufas, na atenuação da radiação solar e da luminosidade. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p.479-481

SHAHIDIAN, S.; SERRALHEIRO, R.; SERRANO, J.; TEIXEIRA, J. ; HAIE, N.; SANTOS, F. Hargreaves and Other Reduced-Set Methods for Calculating Evapotranspiration, Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling, Dr. Ayse Irmak (Ed.), InTech 2011. 526 p. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and-modeling/hargreaves-and-other-reduced-set-methods-for-calculating-evapotranspiration>

SHAHIDIAN, S.; SERRALHEIRO, R. P.; TEIXEIRA, J. L.; SERRANO, J.; SANTOS, F. L.; GUIMARÃES, R. C. Utilização da equação de Hargreaves Samani para o cálculo da ETo em estufas. IV Congresso Ibérico de Agrolngeniería, Universidade de Évora, Portugal, Setembro, 2011. 11p.

SILVA, C. R. A.; RIBEIRO, A.; OLIVEIRA, A. S.; KLIPPEL, V. H.; BARBOSA, R. L. P. Desenvolvimento biométrico de clones de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação na fase de crescimento. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, PR. v. 35, n. 34, p. 381-390, 2015.

SILVA, F. C.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. Uso de dispositivo lisimétrico para medida de evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, RS. v.6, n.1, p.19-23, 1999.

SILVA, J. M. S. Crescimento de mudas de *Pinus oocarpa* **Schiede** em diferentes condições hídricas e de adubação. 2007. 53p. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP. 2007.

SILVA, M. R.; SIMÕES, D. Caracterização do manejo hídrico em um viveiro florestal no Uruguai. In. Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió-AL. 27/Nov-01/Dez. 2011.

SILVA, M. S.; SOUZA, S. N.; LENZI, E.; LUCHESE, E. B. Comportamento do chumbo (Pb) em Latossolo vermelho escuro textura média tratado com lodo contaminado e sua absorção pelas plantas. Acta Scientiarum, v. 20, n. 4, p. 427-432, 1998.

SILVA, P. H. M.; WICHERT, M. C. P.; GONÇALVES, J. L. M. Indicadores estatísticos sobre viveiros florestais no Brasil. Atualizado em 07/02/2008. Disponível em: <http://www.ipef.br/silvicultura/indicadores.asp>,

SILVA, R. B. C.; SILVA, R. M., COSTA, J. M. N., COSTA, A. C. L. Eficiência de uso da água e da radiação em um ecossistema de manguezal no estado do Pará. Revista Brasileira de Meteorologia, v.21, n.3^a, p. 104-116, 2006.

SILVA, R. B. G. Manejo hídrico sobre o desenvolvimento e a qualidade de mudas florestais nativas em ambiente protegido. 2013. 119p. Dissertação de Mestrado (Ciência Florestal). Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP, 2013.

SILVA, W., SEDIYAMA, T., SILVA, A. A., CARDOSO, A. A. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com

Braquiária. Revista Floresta, Curitiba, PR, v.34, n.3, p. 325-335, 2004.

SILVEIRA, B. D., LUCIO, A. D., LOPES, S. J., OLIVEIRA, F. Aleatoriedade e tamanho da amostra em mudas de *Pinus taeda* L. Revista Ceres, Viçosa, MG, v.56, n.6, p.730-735, nov/dez, 2009.

SILVEIRA, H. R. O. Excesso de água em mudas de café (*Coffea arabica* L.): efeitos fisiológicos e anatômicos. 2011. 77p. Dissertação de Mestrado (Fisiologia Vegetal). Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. C.; ANDRADE, C. A.; TEIXEIRA, C. F. A. Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília, DF. v.38, n.10, p.1187-1195, out., 2003.

SINGH, R. P., AGRAWAL, M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. Waste Management. n.28: p. 347-358, 2008.

SOUSA, I. F.; SILVA, V. P. R.; SABINO, F. G.; NETTO, A. O. A.; SILVA, B. K. N.; AZEVEDO, P. V. Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do Estado de Sergipe. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.6, p.633-644, 2010.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. M.; MELO, V. P.; MELO, W. J. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em Latossolos adubados por cinco anos com biossólidos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 29, p. 117-123, 2005.

STEIDLE NETO, A. J.; ZOLNIER, S.; MAROUELLI, W. A.; CARRIJO, O. A. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB, n.6, v.12, p.626-631, 2008.

STERRITT, R. M., LESTER, J. N. The values of sewage sludge to agriculture and effects of the agricultural use of sludges contaminated with toxic elements: A review. Science fo the Total Environment. n.16, p. 55-90, 1980.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1995. 49p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 55).

STORCK, E. B., SCHORN, L. A.; FENILLI, T. A. B. Crescimento e qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* em diferentes recipientes. Revista Floresta, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 39-46, jan. / mar. 2016.

STURION, J. A.; GRAÇÃ, L. R.; ANTUNES, J. B. M. Produção de mudas de espécies de rápido crescimento por pequenos produtores. Circular Técnica No. 37 Embrapa Florestas, Colombo, PR. 2000. 20p.

TAIZ, L., ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 3ª Ed. Porto Alegre. Editora Artmed. 2006. 722p.

TATAGIBA, S. D., TOLEDO, J. V., PEZZOPANNE, J. E. M., ZANETTI, S. S., CECÍLIO, R. A. Crescimento de mudas clonais de eucalipto em condições de deficit hídrico. Revista

Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, Garça, SP, v.25, n.1, 2015.

TATAGIBA, S. D.; XAVIER, T. M. T.; TORRES, H.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Determinação da máxima capacidade de retenção de água no substrato para produção de mudas de eucalipto em viveiro. *Revista Floresta*, Curitiba, PR, v.45, n.4, p.745-754, 2015.

THOMAS, R. Crescimento e nutrição de mudas de *Pinus taeda* L. no Estado do Rio Grande do Sul. 2007. 64 f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

TORRES, H. Determinação da água facilmente disponível para mudas de eucalipto em condições de viveiro. 2012. 54p. Dissertação de Mestrado (Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Espírito Santo, 2012.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R.; GONÇALVES, E. O. Qualidade de mudas de *Murraya paniculata* produzidas em diferentes substratos. *Revista Floresta*, Curitiba, PR, v.42, n.3, p.621-630, jul./set. 2012

TRIGUEIRO, R. M. Uso de biossólidos como substrato para produção de mudas de pinus e eucalipto. 2002, 94p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. 2002.

TRIGUEIRO, R. M.; GUERRINI, I. A. Uso de biossólido para produção de mudas de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, SP. n.64, p.150-162, dezembro, 2003.

TSUTIYA, M. T. Metais pesados: O principal fator limitante para o uso agrícola de biossólidos nas estações de tratamento de esgotos. In. 20o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, p. 753-761, maio, 1999.

VALVERDE S. R.; MAFRA, J. W. A.; MIRANDA, M. A.; SOUZA, C. S.; VASCONCELOS, D. C. Silvicultura Brasileira: Oportunidades e Desafios na Economia Verde. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FDBS), 2012. 40p.

VÁSQUEZ, M. A. N.; FOLEGATTI, M. V.; DIAS, N. S.; DA SILVA, C. R. Efeito do ambiente protegido cultivado com melão sobre os elementos meteorológicos e sua relação com as condições externas. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.1, p.137-143, 2005.

VEGA, E. C.; JARA, J. C. Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (costa y región andina) del Ecuador. *Revista Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 29, n.3, p.390-403, 2009.

VELAZCO, C. L. Indução de supressividade a *Phytophthora nicotiana* em mudas de limão cravo com lodo de esgoto. 2002. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2002.

VICHOT, M. B., PALÁ, J. O., HERNÁNDEZ, Y. S., IZQUIERDO, E. G. Características morfológicas de *Pinus tropicalis* Morelet en vivero con diferentes tamaño de envases. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*. v.2, n.1, p.11-20, 2014.

VILELA, M. S.; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; AMARAL, A. M.; VELLAME, L. M.; SOARES, F. A. L. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. Revista Irriga, v.1, ed.esp., p.158-167, Botucatu, SP. 2015

VON SPERLING, M. Princípios básicos do tratamento de esgotos - Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, UFMG. v.2. 1996.

WAKELEY, P. C. Planting the southern pines. Washington, Forest service., p. 169-172 (Agriculture monograph, 18). 1954.

WALKER, C.; ARAÚJO, M. M.; MACIEL, C. G.; MARCUZZO, S. B. Viveiro florestal: Evolução Tecnológica e Legalização. Revista Verde, Mossoró, RN. v.6, n.5, p. 08-14, 2011.

WALLACE, B. M. The effects of a single biosolids application on soil physical properties in three forage production systems in the southern interior of british Columbia. Thesis of Master Science, University of British Columbia. June, 2007. 101p.

WANG, X.; CHEN, T.; GE, Y.; JIA, Y. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. Journal of Hazardous Materials. n. 160. p.554-558. 2008.

WENDLING, I; DUTRA, L.F.; GROSSI, F. Produção de mudas e espécies lenhosas. Documento No. 130. Embrapa Florestas. Colombo, PR, 2006. 54p.

WENDLING, I; FERRARI, M. P.; GROSSI, F. Curso intensivo de viveiros e produção de mudas. Documentos No. 79. Embrapa Florestas. Colombo, PR, 2002. 48p.

WHERLEY, B.; SINCLAIR, T.; DUKES, M.; MILLER, G. Design, construction and field evaluation of a lysimeter system for determining turfgrass water use. In. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. v. 122, p.373-377, 2009.

WHITE R. W.; FISHER J. T. Seasonal evapotranspiration, growth and water use efficiency by plantation grown *Pinus eldarica* Medw. derived from field and weighing lysimeter studies. WRRRI report, 193. New Mexico Water Resources Research Institute, 54 p, 1985.

ZANON, M. L. B., STORCK, L., FINGER, C. A. G.; HOPPE, J. M. Tamanho de amostra para experimentos de *Eucalyptus saligna* Smith em viveiro. Rev. Ciência Florestal, Santa Maria, RS, v.7, n.1, p.133-138. 1997.

ZAPPAROLI, I. D.; FERNANDES, F.; SILVA, S. C.; TINO, J. K.; CASTRO, F. B. Biossólido: Reciclagem do lodo de esgoto em Londrina e região. In. XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Londrina, PR. 22 a 25 de julho de 2007.16 p.

ZHANG, L.; LEMEURE, B. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. Agricultural and Forest Meteorology, n.58 p.209-228, 1992.