



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Botucatu



**JÉSSICA DE LIMA**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO EM MUDAS DE EUCALIPTOS E SUA  
RELAÇÃO COM A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA HÍDRICA**

**Botucatu**

**2017**



**JÉSSICA DE LIMA**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO EM MUDAS DE EUCALIPTOS E SUA  
RELAÇÃO COM A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA HÍDRICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Fernando Broetto

**Botucatu**

**2017**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

L732a Lima, Jéssica de, 1991-  
Aplicação foliar de silício em mudas de eucaliptos e sua relação com a tolerância à deficiência hídrica / Jéssica de Lima. - Botucatu: [s.n.], 2017  
70 p.: fots. color., grafs. color., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017  
Orientador: Fernando Broetto  
Inclui bibliografia

1. Eucalipto - Mudas. 2. Adubação foliar. 3. Silício na agricultura. 4. Irrigação com déficit hídrico.  
I. Broetto, Fernando. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** APLICAÇÃO FOLIAR DE SILÍCIO EM MUDAS DE EUCALIPTOS E SUA  
RELAÇÃO COM A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA HÍDRICA

**AUTORA: JÉSSICA DE LIMA**

**ORIENTADOR: FERNANDO BROETTO**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA  
(IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. FERNANDO BROETTO  
Depto de Química e Bioquímica / Instituto de Biociencias de Botucatu



Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA  
Depto de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. MARCELO LEONARDO  
Casa da Agricultura / Coordenadoria de Assistência Técnica Integral

Botucatu, 27 de setembro de 2017.



**Dedico aos meus pais**



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e determinação para lutar e enfrentar os obstáculos encontrados durante essa caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Broetto, pelos ensinamentos, pela oportunidade, apoio, dedicação e os momentos de descontração, tenho enorme admiração pelo grande profissional que és.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), pela oportunidade e suporte durante a realização do mestrado.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem e à Seção de Pós-Graduação, pela atenção e suporte durante o mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão da bolsa.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Irrigação e Drenagem, pelos ensinamentos, dedicação e atenção em todos os momentos que foram solicitados.

À Profa. Dra. Magali Ribeiro da Sila e o funcionário Claudio Roberto do departamento de Ciência Florestal, pela atenção, ajuda e colaboração para meu projeto.

Aos funcionários, Gilberto Winckler, José Carlos Coelho e Adriana Ramos, pela atenção, competência e eficiência quando solicitados.

Aos meus pais, Valdinar Inácio da Silva e Maria das Graças de Lima, por todo o apoio, compreensão, incentivo e amor. Amo vocês, e sou muito grata por tudo que fizeram por mim!

Aos meus irmãos, João Marcelo, João Victor e, em especial, Valdinar Júnior, pelo apoio, amor e carinho.

À minha cunhada Carla e minha sobrinha Ana Clarice, pelo amor e carinho.

À toda minha família, Lima e Silva, em especial minha avó Maria Lima de Andrade (*in memoriam*), pelo apoio, motivação, compreensão, amor incondicional e carinho. Meu muito obrigada! Vocês representam muito para mim. Amo vocês!

Aos amigos e colegas de laboratório do Departamento de Química e Bioquímica, Edilson Ramos, o qual me deu um suporte muito grande, Dayanne, Diogo Capelin, Érica, Renata Coscolin, Enrique, Luz Maria, Ricardo Favan, pelos momentos de descontração, ajuda, amizade e apoio.

Aos amigos da vida, Nathânia Rodrigues, Kássia Campos, Dávilla Alessandra, Victor Rocha, Nayana Alves, Glenda Fernandes, Mayara Trombini, Francisco Nunes, pelo carinho, apoio, amizade e companheirismo. Vocês são muito especial!

As companheiras de república, Vanessa Rosa, Estefany Gomes e Thaís Pinto, pela amizade e apoio.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram para que alcançasse este objetivo.

E, aos demais membros da banca.

Obrigada!

## RESUMO

O gênero *Eucalyptus* vem se expandindo devido uma série de fatores que tem favorecido o plantio de várias de suas espécies. Dentre alguns fatores, os mais relevantes, estão relacionados a alta produtividade, a expansão e o direcionamento para novos investimentos de empresas que utilizam a madeira como matéria prima nas indústrias. A deficiência hídrica pode acarretar vários impactos sobre o desenvolvimento da planta. Com isso, sabemos que o silício (Si) é um elemento que pode minimizar os efeitos dessa deficiência. O objetivo do estudo foi examinar os efeitos fisiológicos e metabólicos causados pela deficiência hídrica em clones de eucaliptos tolerantes e sensíveis a este estresse e o papel do Si aplicado via foliar na tolerância à deficiência hídrica. Os clones foram cultivados em estufa agrícola, com monitoramento das relações hídricas além do estudo de trocas gasosas, análise de crescimento, e respostas das atividades enzimáticas. O experimento foi em esquema fatorial triplo (lâminas x clones x aplicação de Si), constituído por 8 tratamentos e 4 repetições. As lâminas de irrigação (100% da necessidade hídrica da cultura e 50% da necessidade hídrica da cultura), dois clones de eucalipto (ECO 103 e AEC 144) e plantas com e sem aplicação de Si. Com os resultados obtidos, observou-se que a aplicação de silício via foliar não reverteu os efeitos fisiológicos provocados pela deficiência hídrica moderada, independentemente dos demais fatores combinados no ensaio. E conclui-se que a indução de deficiência hídrica moderada em plantas de eucaliptos variou de acordo com o clone estudado e o tempo de exposição ao estresse.

**Palavras-chave:** *fisiologia vegetal, adubo foliar, regimes hídricos*



## **ABSTRACT**

The genus *Eucalyptus* has been expanding due to a series of factors that have favored the planting of several of its species. Among some factors, the most relevant are related to high productivity, expansion and targeting for new investments of companies that use wood as raw material in industries. Water deficiency can have several impacts on the development of the plant. With this, we know that silicon (Si) is an element that can minimize the effects of this deficiency. The objective of the study was to examine the physiological and metabolic effects caused by water deficiency in tolerant and stress - sensitive eucalyptus clones and the role of Si applied by foliar tolerance to water deficiency. The clones were cultivated in an agricultural greenhouse, with monitoring of water relations besides the study of gas exchange, growth analysis, and responses of enzymatic activities. The experiment was a triple factorial scheme (irrigation x clones x Si application), consisting of 8 treatments and 4 replicates. The irrigation levels (100% of the water requirement of the crop and 50% of the water requirement of the crop), two eucalyptus clones (ECO 103 and AEC 144) and plants with and without Si application. That foliar silicon application did not reverse the physiological effects caused by moderate water deficiency, independently of the other factors combined in the trial. It was concluded that the induction of moderate water deficiency in eucalyptus plants varied according to the clone studied and the time of exposure to stress.

Key words: vegetal physiology, foliar fertilizer, water regimes



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Curva de retenção de água no solo utilizada para o experimento.....                                     | 30 |
| Figura 2 – Clones ECO 103 (A) e AEC 144 (B), transplantados nos vasos .....  | 31 |
| Figura 3 – Linhas secundárias com <i>manifolds</i> e gotejadores do tipo flecha .....                              | 32 |
| Figura 4 – Monitoramento de água no solo por tensiometria .....  | 34 |
| Figura 5 – Realização da aplicação do produto por tratamento .....   | 36 |
| Figura 6 – Retirada dos discos foliares das cultivares ECO 103 (A) e AEC 144 (B),<br>para análise do CRA (C) ..... | 38 |
| Figura 7 – Câmara de pressão digital utilizada para as leituras de potencial hídrico...                            | 39 |
| Figura 8 – Medidor portátil de trocas gasosas (IRGA) .....   | 40 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Análise biométrica da altura de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....            | 44 |
| Tabela 2 – Análise biométrica do diâmetro do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação ..... | 45 |
| Tabela 3 – Análise biométrica do número de folhas de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 45 |
| Tabela 4 – Determinação da área foliar de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....             | 46 |
| Tabela 5 – Biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                | 46 |
| Tabela 6 – Interação de biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação .....              | 47 |
| Tabela 7 – Biomassa seca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                  | 47 |
| Tabela 8 – Interação de biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação .....              | 47 |
| Tabela 9 – Biomassa fresca de folha de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 10 – Biomassa seca das folhas de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                                       | 48 |
| Tabela 11 – Biomassa fresca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 48 |
| Tabela 12 – Interação da biomassa fresca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação .....                                      | 48 |
| Tabela 13 – Biomassa seca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 49 |
| Tabela 14 – Interação de biomassa seca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação .....  | 49 |
| Tabela 15 – Conteúdo relativo de água de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                                      | 49 |
| Tabela 16 – Potencial hídrico foliar ( $\Psi_{Hf}$ ) em de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                    | 50 |
| Tabela 17 – Assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                     | 51 |
| Tabela 18 – Condutância estomática ( $g_s$ ) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                               | 52 |
| Tabela 19 – Concentração intercelular de CO <sub>2</sub> (C <sub>i</sub> ) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação ..... | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 20 – Transpiração ( <i>E</i> ) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 53 |
| Tabela 21 – Concentração de clorofila <i>a</i> em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....   | 54 |
| Tabela 22 – Interação em concentração de clorofila <i>a</i> em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 54 |
| Tabela 23 – Concentração de clorofila <i>b</i> em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....   | 55 |
| Tabela 24 – Interação de concentração de clorofila <i>b</i> em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação .....   | 55 |
| Tabela 25 – Concentração de carotenoides em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....   | 56 |
| Tabela 26 – Interação da concentração de carotenoides em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....  | 56 |
| Tabela 27 – Atividade da enzima superóxido dismutase SOD (UI µg proteína <sup>-1</sup> ) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....             | 57 |
| Tabela 28 – Interação da atividade da enzima superóxido dismutase SOD (UI µg proteína <sup>-1</sup> ) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação..... | 57 |
| Tabela 29 – Concentração de L-prolina (µmol g <sup>-1</sup> MF) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação .....                                      | 58 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Caracterização química do solo no início do ensaio .....  | 28 |
| Quadro 2 – Caracterização química do solo no final do ensaio .....   | 29 |
| Quadro 3 – Parâmetros do modelo de Van Genuchten para camada 0 a 0,20 m de solo .....  | 29 |
| Quadro 4 – Necessidade hídrica da cultura durante o tempo de experimento .....   | 34 |
| Quadro 5 – Tratamentos realizados no experimento .....   | 36 |
| Quadro 6 – Concentração de silício (%) em tecidos vegetais (caule, folha e raiz) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação ..... | 51 |



## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 21 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA .....   | 22 |
| 2.1 Eucalipto .....   | 22 |
| 2.2 Deficiência hídrica e seus efeitos .....                            | 23 |
| 2.3 Silício nas plantas .....   | 25 |
| 2.4 Atividades enzimáticas .....  | 26 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS .....  | 28 |
| 3.1 Localização da área experimental .....                              | 28 |
| 3.2 Solo .....  | 28 |
| 3.3 Curva de retenção de água no solo.....                              | 29 |
| 3.4 Material vegetal .....  | 30 |
| 3.5 Irrigação .....   | 31 |
| 3.5.1 Sistema de irrigação .....  | 31 |
| 3.5.2 Teste de uniformidade do sistema.....                             | 32 |
| 3.5.3 Manejo de irrigação e monitoramento do teor de água no solo ..... | 32 |
| 3.6 Fatores ambientais na estufa .....                                  | 34 |
| 3.7 Delineamento experimental e tratamentos .....                       | 35 |
| 3.7.1 Tratamentos .....   | 35 |
| 3.8 Aplicação da fonte de silício .....                                 | 36 |
| 3.9 Análises estatísticas.....  | 36 |
| 3.10 Períodos de avaliações .....                                       | 37 |
| 3.11 Análises dos parâmetros biométricos .....                          | 37 |
| 3.11.1 Altura das plantas .....   | 37 |
| 3.11.2 Diâmetro do caule .....  | 37 |
| 3.11.3 Número de folhas .....   | 37 |
| 3.11.4 Área foliar .....  | 37 |
| 3.11.5 Biomassa vegetal .....   | 38 |
| 3.12 Relações hídricas .....  | 38 |
| 3.12.1 Conteúdo relativo de água (CRA) .....                            | 38 |
| 3.12.2 Potencial hídrico foliar ( $\Psi_{Hf}$ ) .....                   | 39 |
| 3.13 Determinação das características fisiológicas .....                | 39 |
| 3.13.1 Trocas gasosas .....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
| 3.13.2 Teor de pigmentos foliares (TPF) .....                            | 40 |
| 3.13.3 Análise de silício nos tecidos vegetais .....                     | 41 |
| 3.14 Análises bioquímicas .....  | 41 |
| 3.14.1 Coleta e armazenamento do material vegetal .....                  | 41 |
| 3.14.2 Procedimentos para obtenção do extrato bruto .....                | 42 |
| 3.14.3 Determinação do teor de L-prolina .....                           | 42 |
| 3.14.4 Atividade da enzima Superóxido Dismutase (SOD; EC 1.15.1.1) ..... | 42 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 44 |
| 4.1 Parâmetros biométricos .....   | 44 |
| 4.1.1 Altura de plantas .....  | 44 |
| 4.1.2 Diâmetro de caule .....  | 44 |
| 4.1.3 Número de folhas .....   | 45 |
| 4.1.4 Área foliar .....  | 45 |
| 4.1.5 Biomassa fresca e seca do caule .....                              | 46 |
| 4.1.6 Biomassa fresca e seca das folhas .....                            | 47 |
| 4.1.7 Biomassa fresca e seca de raízes .....                             | 48 |
| 4.2 Relações hídricas .....  | 49 |
| 4.2.1. Conteúdo relativo de água (CRA) .....                             | 49 |
| 4.2.2 Potencial hídrico foliar ( $\Psi_H$ ) .....                        | 50 |
| 4.3 Análise de silício nos tecidos vegetais .....                        | 50 |
| 4.4 Trocas gasosas .....   | 51 |
| 4.4.1 Assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A) .....                   | 51 |
| 4.4.2 Condutância estomática (gs) .....                                  | 51 |
| 4.4.3 Concentração intercelular de CO <sub>2</sub> (Ci) .....            | 52 |
| 4.4.4 Transpiração (E) .....   | 53 |
| 4.5 Teor de clorofila .....  | 53 |
| 4.5.1 Clorofila a .....  | 54 |
| 4.5.2 Clorofila b .....  | 55 |
| 4.5.3 Carotenoides .....   | 56 |
| 4.6 Análises bioquímicas .....   | 57 |
| 4.6.1 Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD; EC 1.15.1.1) .....  | 57 |
| 4.6.2 Teor de L-prolina.....   | 58 |
| 5 CONCLUSÕES .....   | 59 |
| REFERÊNCIAS .....  | 60 |

## 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da silvicultura nacional nos últimos anos, no atual momento, o setor dispõe de tecnologia de ponta. De acordo com o IBGE (2016), o setor florestal apresentou um total estimado de 9.935.353 ha, de área plantada, sendo 74,9% plantada com eucalipto; 20,8%, com pinus; e 4,3% demais espécies. Desse total, Minas Gerais é o maior destaque em área plantada de eucalipto (1.881.381 ha), seguido por Paraná (1.626.944 ha), Rio Grande do Sul (1.161.657 ha) e São Paulo (1.101.608 ha).

Com a expansão desse setor, percebe-se a grande importância econômica do eucalipto, por sua colaboração no desenvolvimento de maior parte dos setores da economia, nas regiões onde ele é plantado (BAESSO; RIBEIRO; SILVA, 2010).

No Brasil, o eucalipto encontrou condições favoráveis no solo e no clima para uma produção em grande escala. Assim, por conta da sua alta capacidade de adaptação e diversidade de uso, tornou-se a principal espécie utilizada para a formação de florestas plantadas no território brasileiro (ABRAF, 2011).

Mesmo com essas condições favoráveis, existem alguns fatores limitantes na produção agrícola, dos quais, atualmente, a água é o principal deles. A sua escassez ou falta interfere no desenvolvimento das culturas, sendo este fator diretamente relacionado com a redução da produtividade das culturas (MARTINS et al., 2010). Consequentemente, afeta severamente o metabolismo das plantas, provocando o fechamento dos estômatos ao tentar evitar a perda de água por transpiração, induzindo a diminuição da atividade fotossintética (TAIZ; ZEIGER, 2013).

De acordo com Martins et al. (2008), na fase de muda, os sintomas de deficiência hídrica no eucalipto são mais severos e visíveis. Contudo, há mecanismos das plantas que diminuem esses efeitos causados pela falta de água, os chamados, mecanismos de tolerância, tendo como exemplo, a diminuição do potencial osmótico, em relação ao déficit (MORANDO et al. 2014); a condutância estomática a qual varia em função do processo difusivo da transpiração (LAWLOR; TEZARA, 2009); a identificação de genes de referência para análise de expressão de tolerância a estresse hídrico (STOLF-MOREIRA et al. 2011), entre outros.

Outra forma de também minimizar os efeitos da deficiência hídrica é o uso de nutrientes. O Si (silício), por exemplo, é um micronutriente que tem vantagens como:

aumento na produção das culturas e na resistência das plantas a estresses bióticos, como pragas e doenças, e a estresses abióticos, como deficiência hídrica e excesso de metais pesados (KORNDÖRFER, 2006).

Com essas informações relevantes, neste estudo objetivou-se examinar os efeitos metabólicos causados pela deficiência hídrica em mudas de clones de eucaliptos tolerantes e sensíveis a este estresse. E o papel do silício na tolerância à deficiência hídrica.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Eucalipto

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, ordem Myrtales das angiospermas e nativo da Austrália. Já foram identificadas mais de 670 espécies pelo Serviço Florestal da Austrália. Além desse grande número de espécies, existe uma elevada quantidade de híbridos e variedades (MARTINI, 2013).

O gênero, vem se expandindo devido uma série de fatores que tem favorecido o plantio de várias espécies deste gênero. Dentre estes fatores os mais relevantes, estão relacionados a alta produtividade, a expansão e o direcionamento para novos investimentos de empresas que utilizam a madeira como matéria prima nas indústrias (ABRAF, 2010).

A madeira oriunda do eucalipto é responsável pelo abastecimento da maioria do setor industrial de base florestal do Brasil, onde as espécies mais plantadas são: o *E. grandis* (55%), *E. saligna* (17%), *E. urophylla* (9%), *E. viminalis* (2%), híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (11%) e outras espécies (6%) (SANSÍGOLO, 2011).

A espécie *E. urophylla* é usada para produção de celulose, especialmente por conta da sua rusticidade. Outro ponto importante é seu uso para produção de híbridos com outras espécies de rápido crescimento (MORA; GARCIA, 2000).

Atualmente, o Brasil é tido como o 4º maior produtor mundial de celulose e a demanda por matéria-prima tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. A produção de eucalipto tem sido importante para a economia de vários países, inclusive para o Brasil, onde destaca-se na eficiência de aplicação de tecnologias, materiais genéticos de alta qualidade, desenvolvimento rápido em relação aos demais países

produtores e elevado índice de produtividade, favorecendo a demanda de produtos desse setor (BRACELPA, 2011).

Ultimamente, a cultura do eucalipto tem crescido nas regiões com altos índices de deficiência hídrica. Temos como exemplo, a região do nordeste que se destacou na produção com essa expansão, principalmente nos estados da Bahia, Piauí e Maranhão (MAGALHÃES, 2013). O estado do Piauí, de acordo com a ABRAF (2011), ocupou a 15ª posição em área de floresta plantada (37.025 ha) no Brasil, com cultivo predominante de eucalipto.

Com a exigência de conseguir florestas ainda mais produtivas, visando uma ou outra característica da madeira, seja para maior densidade, ou baixos teores de extrativos, ou outras qualidades, vem despertando o interesse das empresas brasileiras de investir cada vez mais em programas de melhoramento genético e técnicas que permitem maior homogeneidade da matéria prima, possibilitando aumento na qualidade do produto final (TONINI et al., 2006).

Portanto, boa parte dos plantios são realizados com clones, os quais têm características como alta produtividade, adaptados a diversas regiões, melhorias nas propriedades da madeira, resistência ao déficit hídrico, entre outras características silviculturais desejáveis (TEIXEIRA, 2012).

## **2.2 Deficiência hídrica e seus efeitos**

No gênero *Eucalyptus*, ao ser submetido a um estresse ambiental, principalmente a deficiência hídrica (SHULAEV et al., 2008), pode ocorrer redução do crescimento e perdas na produtividade (MARTINS et al., 2010; TATAGIBA, 2006).

Condições adversas podem ocorrer em diferentes estádios, intensidades e períodos de desenvolvimento das plantas, tendo diferentes resultados em relação a fisiologia ou adaptação. Diante disso, as plantas terão diversas respostas frente à essa deficiência (VERSLUES et al., 2006).

A deficiência hídrica promove nas plantas uma série de respostas com a percepção do estresse. Assim, as plantas emitem inúmeras respostas, sendo elas, fisiológicas, metabólicas e de desenvolvimento (QUEIROZ, 2010). Essa deficiência, temporária ou permanente, influencia no desenvolvimento e crescimento da planta. A

primeira resposta da planta é a diminuição da turgescência celular, que consequentemente afeta seu crescimento (LARCHER, 2004; ANJUM et al., 2011).

Outras respostas das plantas à deficiência hídrica será a diminuição na fotossíntese e na condutância estomática causada pelo fechamento dos estômatos, resultando, na redução da fixação de carbono. Temos como exemplos das alterações morfológicas nas plantas sob esse déficit, a diminuição da área foliar, queda de folhas e senescência (PAULA; PAULA; MARINO, 2012).

Devido ao fechamento estomático, ocorre uma limitação nas trocas gasosas causando uma redução na fotossíntese e na transpiração (BEDON et al., 2011), por causa de alterações na difusão de CO<sub>2</sub> da atmosfera para o local de carboxilação (FLEXAS et al., 2006; WARREN et al., 2011). Segundo Kennan et al. (2010), quando em condições de deficiência hídrica a principal razão de pequenas taxas de fotossíntese é a menor difusão de CO<sub>2</sub>.

Com tudo isso, o interesse de plantas resistentes à seca aumentou bastante nos últimos anos. As causas para a expansão deste interesse foram as mudanças climáticas e a escassez da água na agricultura. Enquanto há uma demanda mundial crescente por alimentos, os recursos hídricos para a produção agrícola estão diminuindo (BLUM, 2011).

O retardo e a tolerância da desidratação, são prováveis mecanismos de resistência à seca (TAIZ; ZEIGER, 2010). Dentre os mecanismos de resistência a deficiência hídrica, várias são as respostas fisiológicas e bioquímicas (STRECK, 2004; BARTELS; SUNKAR, 2005).

Quando se trata do retardo da desidratação, há um mecanismo que certifica-se a resistência ao déficit hídrico que é a proporcionalidade entre absorção de água pelas raízes e perdas, especialmente, através dos estômatos, objetivando o mantimento da turgência da célula. O aumento da absorção de água é tido pelo crescimento e aprofundamento do sistema radicular, isso se dá devido ao aumento da relação raiz/parte aérea (PINHEIRO; CHAVES, 2011).

A planta se torna mais aclimatada, à medida que suporta mais o estresse, no entanto isso não quer dizer que ela é adaptada, a adaptação está relacionada a um grau de resistência geneticamente determinado (LOPES e et al., 2011).

### 2.3 Silício nas plantas

O silício (Si) despertou o interesse entre técnicos, pesquisadores e agricultores. Por ser um elemento químico que proporciona maior resistência as plantas quando são submetidas a um estresse, sendo biótico ou abiótico (HASHEMI et al., 2010).

O Si pode também fornecer maior resistência ao acamamento, redução do ataque por pragas e doenças e maior resistência a condições adversas (EPSTEIN; BLOOM, 2005). Além de melhorar a absorção de água que, conseqüentemente, aumenta a tolerância da cultura ao déficit hídrico (SONOBE et al., 2011).

Outra característica importante do Si para as culturas é a melhoria da arquitetura das plantas, nas quais as folhas se desenvolvem mais eretas proporcionando a interceptação dos raios solares. Durante a fotossíntese, o crescimento na taxa fotossintética das plantas contribuiu para o aumento da quantidade total de fotoassimilados, resultando em maior crescimento e desenvolvimento das partes vegetais (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Este elemento é considerado benéfico a diversas culturas, principalmente para as gramíneas, em que sua disponibilidade em algumas espécies vem obtendo resultados expressivos no crescimento e na produção, visto que o elemento pode exercer sobre a atividade bioquímica e fotossintética, quando essas plantas estão particularmente sobre algum tipo de estresse, sendo eles de natureza biótica, como pragas e doenças, ou abiótica, como elevadas ou baixas temperaturas, deficiência hídrica, toxidez de Fe, Mn e Al (MA, 2004; ZHU et al., 2004; HATTORI et al., 2005; MITANI e MA, 2005; MA e YAMAJI, 2006; GUNES et al., 2007a; 2007b; 2008; DATNOFF et al., 2007; CRUSCIOL et al., 2009; SORATTO et al., 2012; PILON et al., 2014).

Prates (2010) observou que os resultados da acumulação de Si nas células da epiderme são mais visíveis em gramíneas, podendo assim perceber que as folhas se mantêm mais eretas, proporcionando maior absorção de luz e diminuição da transpiração, reduzindo ou até evitando os efeitos que podem ser causados nas plantas pela deficiência hídrica, e também possibilitando maior resistência ao acamamento.

Em dicotiledôneas, o acúmulo de Si é menor devido baixa densidade do transportador da solução externa para a célula cortical, e por causa de defeito ou falta de um transportador de células corticais para o xilema (MA; YAMAJI, 2008).

As plantas são classificadas quanto ao teor de Si. São identificadas como espécies acumuladoras as que apresentam teor foliar acima de 1% e não acumuladoras aquelas com teor de silício abaixo de 0,5% (MA et al., 2001). As espécies acumuladoras possuem em sua formação uma camada de sílica abaixo da cutícula, enquanto nas não acumuladoras existe um mecanismo bioquímico, em que o Si ativa um mecanismo de defesa, aumentando a formação de fitoalexinas (fungicidas naturais) que aumenta a resistência ao ataque de patógenos e pragas, por reduzir a palatabilidade (TONIN, 2005; GOMES, 2011).

O uso do Si via foliar fornecido em pequenas quantidades para as plantas é visto como uma alternativa viável, pois além de suprir a necessidade, estimula a absorção de Si e outros nutrientes, resultando em efeitos benéficos às culturas (FIGUEIREDO et al., 2010; REIS et al., 2008; SOUSA et al., 2010; SORATTO et al., 2012; CRUSCIOL et al., 2013). Quando aplicado, a disposição do elemento nas folhas diminui a transpiração cuticular e estomática, aumenta a resistência e rigidez das paredes celulares, resultando num aumento a tolerância à seca (MA e YAMAJI, 2006).

## **2.4 Atividades enzimáticas**

Constantemente as plantas passam por várias condições de estresses, como: hídricos, ambientais, entre outros, e acabam conseguindo encontrar respostas de defesa e se aclimatam diante de tais estresses, retomando ao metabolismo normal (SOARES; MACHADO, 2007).

O sistema de defesa enzimático é formado por enzimas capazes de neutralizar, retirar ou limpar as espécies reativas de oxigênio (ERO) do interior das células de organismos vivos (CAVALCANTI et al., 2004; MARTINS; MOURATO, 2008).

Além disso, em relação as células, um período longo de seca pode induzir a formação de ERO como um efeito destruidor para o sistema de membranas celulares. Durante a escassez de água nos tecidos, alguns processos metabólitos auxiliam as células na proteção da integridade estrutural e funcional de suas membranas. Entre estes, destacam-se a prolina, a glicina betaína e alguns açúcares (SMIRNOFF, 1998). A acumulação de ERO em estresse oxidativo resultam da proporcionalidade entre as

taxas de produção e a capacidade do antioxidante do sistema de defesa (SILVA et al., 2010).

Destacam-se como as principais enzimas antioxidantes, a ascorbato peroxidase (APX), a catalase (CAT), a peroxidase (POD), a superóxido dismutase (SOD), as enzimas e metabolitos do ciclo da glutathiona ascorbato, e a glutathiona redutase - GR (BROETTO et al, 2003; GILL et al, 2011).

Quando as plantas são expostas a condições ambientais adversas é evidenciada uma alta expressão da SOD como forma de proteção a um possível estresse, com base nisso a importância deste trabalho realizar está análise. As SODs desempenham importante função na defesa contra a toxicidade causada pelas EROs, sendo desta forma consideradas importantes no mecanismo de tolerância ao estresse (SCANDALIOS, 2001). Ela é a mais eficaz enzima antioxidante intracelular que está presente em todos os organismos aeróbios e em todos os compartimentos subcelulares propensos a ERO. Está bem estabelecido que vários estresses ambientais muitas vezes levem à geração de ERO, aumentando assim a produção de SOD (GILL; TUTEJA, 2010).

A SOD, é uma enzima metaloproteína que estimula a dismutação de radicais superóxido a peróxido de hidrogênio e oxigênio. Três são as classes da SOD, diferenciadas em relação a quantidade de metal contido em seu sítio ativo: cobre/zinco (Cu/Zn SOD), ferro (Fe-SOD) e manganês (Mn-SOD), encontradas em diversos compartimentos celulares (SCANDALIOS, 2005).

Para Moldes et al. (2006), diversas concentrações de Si estimulam atividades enzimáticas antioxidativas tendo como principais o ascorbato peroxidase (APX), a catalase (CAT) e a superóxido dismutase (SOD), na cultura do algodão.

Uma planta para ser resistente a uma restrição hídrica, ela passa por uma rede complexa de vias metabólicas, onde estão conectadas por diversos processos bioquímicos que englobam percepção de sinal, transdução de sinal e regulação da expressão gênica em padrões espaciais e temporais (GORANTLA et al., 2007).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização da área experimental

O ensaio foi conduzido no período de maio/2016 a agosto/2016, na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, no Departamento de Química e Bioquímica do Instituto de Biociências - IB/UNESP, Campus de Botucatu – SP, em uma estufa agrícola com 60 m<sup>2</sup>, que se encontra a aproximadamente 840 m de altitude, nas coordenadas geográficas 22°52'55" de latitude Sul e 48°26'22" de longitude Oeste.

#### 3.2 Solo

O solo utilizado para o ensaio foi proveniente da Fazenda Experimental Lageado, na gleba denominada "Patrulha", classificado como Latossolo Vermelho distrófico de textura média (EMBRAPA, 2013).

Para a análise de caracterização química inicial do solo foram coletadas amostras compostas na camada de 0 – 0,20 m de profundidade (Quadro 1). Em seguida, as amostras de solo foram analisadas no Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP – Botucatu, SP. Com base no resultado e na necessidade da cultura do eucalipto, não foi realizada adubação de base para o experimento.

**Quadro 1 – Caracterização química do solo no início do ensaio**

| Camada   | pH<br>CaCl <sub>2</sub> | M.O.<br>g dm <sup>-3</sup> | P <sub>resina</sub><br>mg dm <sup>-3</sup> | H+Al<br>----- | K<br>mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | Ca<br>dm <sup>-3</sup> | Mg | SB | CTC | V<br>% | B    | Cu  | Fe | Mn  | Zn  |
|----------|-------------------------|----------------------------|--|---------------|---|------------------------|----|----|-----|--------|------|-----|----|-----|-----|
|          |                         |                            |  |               |   |                        |    |    |     |        |      |     |    |     |     |
| (0 - 20) | 6,0                     | 9                          | 43   | 19            | 4,1                                     | 44                     | 33 | 80 | 92  | 80     | 0,18 | 0,5 | 6  | 0,3 | 0,4 |

Durante a condução do experimento foram realizadas quatro adubações de cobertura, nos quais foi utilizado nitrogênio na forma de uréia (0,79 g vaso<sup>-1</sup>) e potássio na forma de cloreto de potássio (0,79 g vaso<sup>-1</sup>). Esses nutrientes foram diluídos em água sendo que cada vaso recebeu 50 mL da solução. A adubação foi repetida a cada 10 dias.

Para a realização da caracterização química final do solo, foram coletadas dos vasos amostras indeformadas na camada de 0 – 0,20 m de profundidade (Quadro 2). E em seguida, as amostras foram analisadas no Laboratório do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP – Botucatu, SP.

**Quadro 2 – Caracterização química do solo no final do ensaio**

| Tratamentos          | pH                | M.O.               | P <sub>resina</sub> | H+Al  | K     | Ca                                 | Mg    | SB    | CTC   | V%    | Si                  |
|----------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
|                      | CaCl <sub>2</sub> | g dm <sup>-3</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | ----- | ----- | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | ----- | ----- | ----- | ----- | mg kg <sup>-1</sup> |
| <b>Controle C/Si</b> | 6,2               | 11                 | 10                  | 10    | 1,0   | 48                                 | 23    | 71    | 82    | 87    | 3                   |
| <b>Controle S/Si</b> | 6,1               | 11                 | 8                   | 10    | 1,0   | 44                                 | 24    | 69    | 79    | 88    | 3                   |
| <b>DHM S/S</b>       | 6,5               | 9                  | 7                   | 10    | 1,4   | 42                                 | 24    | 68    | 78    | 87    | 3                   |
| <b>DHM C/S</b>       | 6,3               | 13                 | 8                   | 10    | 1,4   | 45                                 | 23    | 70    | 80    | 88    | 4                   |

| Tratamentos          | B                               | Cu  | Fe | Mn  | Zn  |
|----------------------|---------------------------------|-----|----|-----|-----|
|                      | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- |     |    |     |     |
| <b>Controle C/Si</b> | 0,16                            | 0,7 | 11 | 0,6 | 0,7 |
| <b>Controle S/Si</b> | 0,11                            | 0,7 | 11 | 0,5 | 0,6 |
| <b>DHM S/S</b>       | 0,13                            | 0,6 | 11 | 0,6 | 0,8 |
| <b>DHM C/S</b>       | 0,15                            | 0,7 | 10 | 0,6 | 0,7 |

Tratamentos: Controle C/Si: Controle com silício; Controle S/Si: Controle sem silício; DHM S/S: Deficiência hídrica moderada sem silício; DHM C/S: Deficiência hídrica moderada com silício.

### 3.3 Curva de retenção de água no solo

Para a determinação da curva de retenção de água, coletou-se duas amostras de solo na profundidade de 0,20 m, as mesmas foram analisadas no Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP.

Foi utilizando o método da câmara de pressão de Richards, sendo determinados o conteúdo de água no solo para as tensões 10, 30, 50, 100, 300, 500 e 1500 kPa. Os pontos, foram modelados no software SWRC versão 3.0 de Dourado Neto et al. (1995) para gerar os parâmetros de  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$  (Quadro 3).

**Quadro 3 – Parâmetros do modelo de Van Genuchten para camada 0 a 0,20 m de solo**

| Camada<br>(m) | $\theta_r$<br>(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) | $\theta_s$<br>(cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) | $\alpha$<br>(cm <sup>-1</sup> ) | $m$   | $n$    | $\rho$<br>(g cm <sup>-3</sup> ) |
|---------------|---|---|---------------------------------|-------|--------|---------------------------------|
| 0 – 20        | 0,099   | 0,166   | 0,0287                          | 1,186 | 1,3765 | 1,62                            |

Para o ajuste da curva de retenção, aplicou-se o modelo proposto por Van Genuchten (1980), equação (1).

$$\theta = \theta_r \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\psi m|)^n]^m} \quad (1)$$

Onde:

$\theta$  - Teor de água atual à base de volume ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$  - Teor de água residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

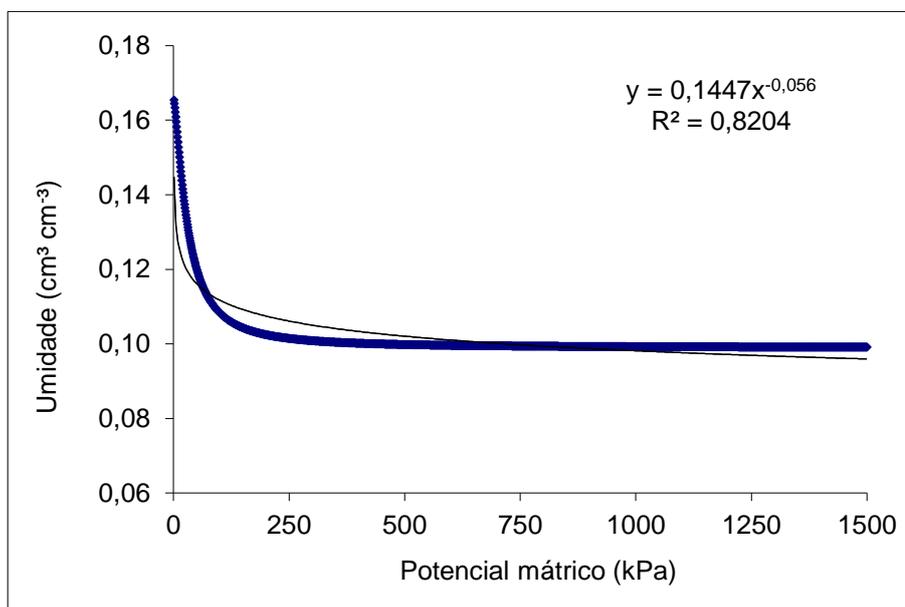
$\theta_s$  - Teor de água de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\Psi_m$  - Potencial de água no solo (kPa);

$\alpha$  - Parâmetro de ajuste ( $\text{cm}^{-1}$ );

m e n - Parâmetros empíricos do modelo matemático.

**Figura 1 – Curva de retenção de água no solo utilizada para o experimento**



Depois de obter a curva de retenção de água do solo, estabeleceu-se o ponto de capacidade de campo. Então, o solo foi saturado e esperou-se o excedente parar de drenar. Após 48 h, coletou-se três amostras e determinou o conteúdo de água no solo presente para a situação. Logo em seguida, correlacionou com a curva de retenção.

### 3.4 Material Vegetal

Foram utilizadas mudas de dois clones de eucalipto com diferentes sensibilidades a deficiência hídrica, sendo o ECO 103 (*E. urophylla* x *E. tereticornis* x *E. pellita*) com 4 meses, sensível, e o AEC 144 (*E. urophylla*) com 3 meses de idade, tolerante (Figura 2). Esses clones foram escolhidos por possuírem características desejáveis para realização do experimento.

O ECO 103 possui folhas mais espessas e largas, com um número menor de folhas por planta e caule mais grosso.

O AEC 144 tem como características, folhas mais finas e estreitas, porém com maior número de folhas por planta e caule fino quando se comparada a cultivar mais sensível.

Os clones foram obtidos pelo Departamento de Ciências Florestais da FCA/UNESP – Campus de Botucatu. Depois foram transplantadas para vasos plásticos modelo *Citruspot*, com dimensões de 14 x 35,5 x 10,2 cm e volume aproximadamente de 5 L.

Figura 2 – Clones ECO 103 (A) e AEC 144 (B), transplantados nos vasos



### 3.5 Irrigação

#### 3.5.1 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação foi por gotejamento. Utilizou-se um reservatório de água de 1000 L, o bombeamento da água foi realizado por uma bomba periférica IDB-35,  $\frac{1}{4}$  cv.

A linha principal foi constituída de cano PVC de 1", registros em cada derivação, manômetro para monitoramento da pressão do sistema e filtro de disco de 120 mesh para filtragem de água.

Nas linhas secundárias foram utilizadas mangueiras cegas de polietileno com diâmetro de 16 mm. Em cada linha haviam 20 gotejadores PCJ com vazão  $2 \text{ L h}^{-1}$  integrado a um *manifolds* de 2 saídas, sendo que cada saída era constituída de

microtubo interligado a um gotejador do tipo flecha de 2 L h<sup>-1</sup>, espaçados a 0,50 m (Figura 3).

**Figura 3 – Linhas secundárias com *manifolds* e gotejadores do tipo flecha**



Fonte: Jéssica de Lima, 2016

### 3.5.2 Teste de uniformidade do sistema

Depois da instalação do sistema de irrigação, foi realizado o teste de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) para verificar a uniformidade da distribuição de água no sistema a uma pressão de serviço de 15 mca. Após o teste, o CUC (equação 2) foi calculado e constatou um coeficiente de distribuição de 98%, sendo considerada excelente segundo critérios de Mantovani (2001).

$$CUC = \left[ \frac{\sum_{i=L}^N X_i - \bar{X}}{N * \bar{X}} \right] \quad (2)$$

Onde:

N: número de coletores;

X<sub>i</sub>: lâmina de água aplicada no i-ésimo ponto sobre a superfície do solo;

$\bar{X}$ : lâmina média aplicada.

### 3.5.3 Manejo de irrigação e monitoramento do teor de água no solo

O manejo da irrigação visou manter o teor de água do solo em dois níveis diferentes, levando em consideração a necessidade hídrica da cultura. Para o cálculo

estimado da lâmina de irrigação, utilizou-se o conceito da capacidade de água disponível (CAD), apresentado pela equação (3).

$$\text{CAD} = (\text{CC} - \text{PM}) * Z * d \quad (3)$$

Em que:

CAD - Capacidade de água disponível (mm);

CC - Teor de água volumétrico na capacidade de campo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

PM - Teor de água volumétrico atual no momento da leitura ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

Z - Profundidade efetiva do sistema radicular (mm);

d - Densidade do solo.

Dessa forma, a lâmina de irrigação a ser aplicada (mm), foi determinada de acordo com equação (4). E para obtenção do tempo de irrigação para cada tratamento, em minutos, utilizou-se a equação (5).

$$\text{Li} = \text{CAD} / \text{Ef} \quad (4)$$

Em que:

Li - Lâmina de irrigação aplicada (mm);

CAD - Capacidade de água disponível (mm);

Ef - Eficiência do sistema de irrigação (0,98).

$$\text{Ti} = (\text{Li} * \text{A} / \text{n} * \text{q}) * 60 \quad (5)$$

Em que:

Ti - Tempo de irrigação (minuto);

Li - Lâmina de irrigação aplicada (mm);

A - Área ocupada por planta ( $0,18 \text{m}^2$ );

n - Número de emissores por planta (1);

q - Vazão do gotejador ( $1,0 \text{L h}^{-1}$ ).

Para o monitoramento do teor de água no solo foi utilizado o método de tensiometria (Figura 4). Foram instalados 3 tensiômetros por tratamento, distribuídos de maneira aleatória com profundidade de 0,15 m.

As leituras eram realizadas diariamente no período da manhã (entre 9 e 11 h), antes da aplicação da lâmina de água (Quadro 4). As tensões foram mantidas para o controle entre 8 –15 kPa e quando em condição de déficit hídrico moderado 45 – 55 KPa.

**Figura 4 – Monitoramento de água no solo por tensiometria**



**Quadro 4 – Necessidade hídrica da cultura durante o tempo de experimento**

| Tratamentos     | Lâminas (mm) |           |       | NI |
|-----------------|--------------|-----------|-------|----|
|                 | Inicial      | Irrigação | Total |    |
| <b>CONTROLE</b> | 22, 15       | 39,72     | 61,87 | 46 |
| <b>DHM</b>      | 20, 52       | 23,60     | 44,12 | 34 |

Tratamentos hídricos (C e DHM), lâminas aplicadas antes da diferenciação dos tratamentos (Inicial) e após a diferenciação dos tratamentos (Irrigação), lâmina de irrigação utilizada durante todo o experimento (Total) e número de irrigações (NI)

### 3.6 Fatores ambientais na estufa

Os valores internos de umidade relativa média do ar (60%) e das temperaturas máximas (46°) e mínimas (3°) da estufa agrícola, foram registrados diariamente através de um termo higrômetro digital, localizado no centro da estufa a uma altura de 1,5 m do solo, programado para realizar leituras a cada 30 minutos. Com os valores que foram obtidos diariamente, calculou-se o déficit de pressão de vapor (DPV).

A pressão de saturação de vapor da água foi determinada utilizando-se a equação proposta por Tetens (1930), equação (6).

$$e_s = 0,6108 * 10^{(7,5 * T) / 237,5 + T} \quad (6)$$

Em que:

$e_s$  - Pressão de saturação de vapor de água no ar (kPa);

$T$  - Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Em seguida, a partir da pressão de saturação de vapor d'água no ar e da umidade relativa, determinou-se a pressão parcial de vapor d'água no ar, equação (7).

$$e_a = e_s * UR \quad (7)$$

Em que:

$e_a$  - Pressão parcial de vapor de água (kPa);

$e_s$  - Pressão de saturação do vapor de água no ar (kPa);

UR - Umidade relativa do ar (decimal).

Utilizando-se a pressão de vapor de saturação e a pressão parcial de vapor de água, calculou-se o déficit de pressão de vapor de água, que é a medida da capacidade de evaporação do líquido para o ambiente. O DPV foi calculado conforme a equação (8).

$$\text{DPV} = e_s - e_a \quad (8)$$

Onde:

DPV - Déficit de pressão de vapor de água no ar (kPa).

Contudo, o DPV no interior da estufa, variou de 0,31 a 4,21 KPa durante o período do experimento.

### 3.7 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi em esquema fatorial triplo (lâminas x clones x aplicação de Si), constituído por 8 tratamentos e 4 repetições. Cada parcela foi composta por 20 vasos de 5 L, sendo dividida em 5 vasos sem e 5 vasos com silício da cv. ECO 103; e 5 vasos sem e 5 vasos com silício da cv. AEC 144, totalizando 160 vasos.

#### 3.7.1 Tratamentos

Os tratamentos foram organizados com duas lâminas de irrigação (100% e 50% da necessidade hídrica da cultura), dois clones de eucalipto (ECO 103 e AEC 144) e, com e sem silício nas parcelas (Quadro 5).

Quadro 5 – Tratamentos realizados no experimento

| CONTROLE (100%) |                     | DHM (50%) |                     |
|-----------------|---------------------|-----------|---------------------|
| T1              | CLONE ECO 103 - S/S | T5        | CLONE ECO 103 - S/S |
| T2              | CLONE ECO 103 - C/S | T6        | CLONE ECO 103 - C/S |
| T3              | CLONE AEC 144 - S/S | T7        | CLONE AEC 144 - S/S |
| T4              | CLONE AEC 144 - C/S | T8        | CLONE AEC 144 - C/S |

### 3.8 Aplicação da fonte de silício

O produto utilizado foi o Silamol (0,8% de Si solúvel como um concentrado estabilizado de ácido silícico, que forma ácido ortossilícico  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$  e ácido dissilícico quando diluído), aplicado via foliar. A dissolução foi feita numa proporção de 20 mL do produto em 180 mL de água deionizada, sendo aplicado 5 mL dessa solução por planta. Foram realizadas 5 aplicações durante o ensaio, em intervalos de dez dias após o início dos tratamentos (Figura 5).

Figura 5 – Realização da aplicação do produto por tratamento



### 3.9 Análises estatísticas

O tratamento estatístico realizado mediante o emprego da análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico *AGROESTAT* (Barbosa & Maldonado Júnior, 2015).

### **3.10 Períodos de avaliações**

O transplântio das mudas para os vasos foi realizado dia 20/05/2016. Houve um período de 53 dias de adaptação das mudas nos vasos, onde as mudas foram irrigadas igualmente.

A aplicação dos tratamentos iniciou-se logo após esse período (11/07/16), foram 15 dias até a planta chegar em estresse, sendo feita a primeira avaliação dia 25/07/16.

Logo após a avaliação foram suspêndidos os tratamentos de déficit e iniciou-se um intervalo de recuperação de 21 dias para que assim as mudas se recuperassem, depois desse intervalo iniciou-se novamente a aplicação dos tratamentos dia 14/08/16. Após 15 dias, realizou-se uma segunda avaliação dia 28/08/16.

### **3.11 Análises dos parâmetros biométricos**

Para as análises biométricas foram utilizadas 3 plantas por tratamento, totalizando 24 plantas por avaliação.

#### **3.11.1 Altura das plantas**

Para a determinação desse parâmetro, as plantas coletadas foram medidas com uma fita métrica graduada em cm. A medição começava do nível do solo até o ápice da planta.

#### **3.11.2 Diâmetro do caule**

As medidas do diâmetro do caule foram feitas a partir de um cm do nível do solo no colo da planta com auxílio de um paquímetro digital (mm).

#### **3.11.3 Número de folhas**

Todas as folhas adultas expândidas foram retiradas e contadas.

#### **3.11.4 Área foliar**

Para determinação da área foliar, contou-se o número de folhas de cada planta, e com a ajuda do integrador modelo LICOR LI- 3000 determinou-se a área foliar total das plantas. Os resultados foram expressos em m<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>.

### 3.11.5 Biomassa vegetal

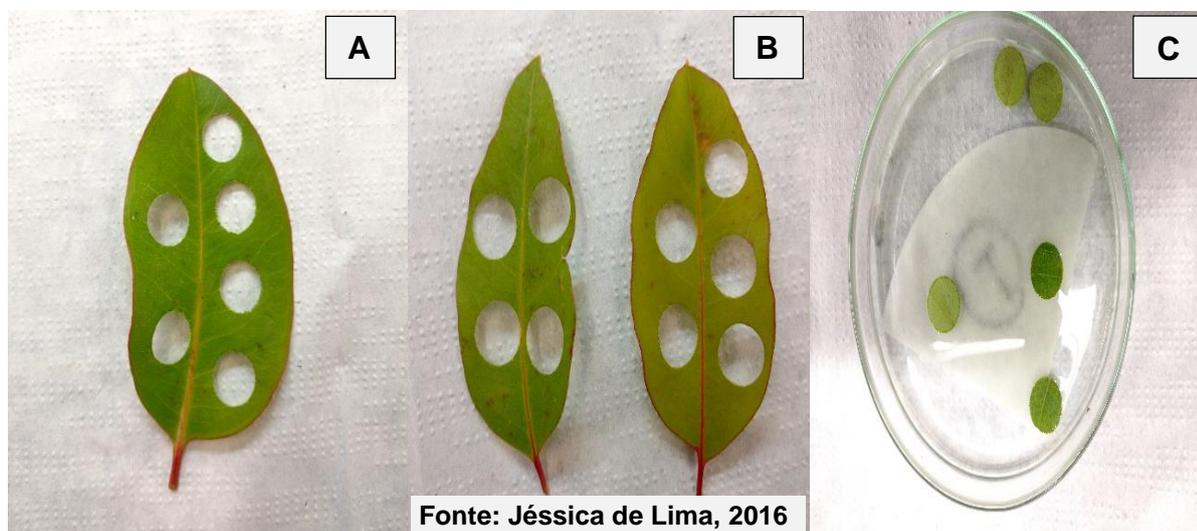
Para a avaliação de massa da matéria fresca (MMF) e massa da matéria seca (MMS) de folha, caule e raiz, os materiais foram pesados e seu peso foi dado em g planta<sup>-1</sup>. A MMF foi determinada logo que as plantas foram coletadas da estufa. Já para MMS as plantas foram colocadas em sacos de papel e em seguida colocadas na estufa com circulação de ar forçado a 60 °C ± 5 até atingirem a massa constante.

### 3.12 Relações hídricas

#### 3.12.1 Conteúdo relativo de água (CRA)

Determinou-se o CRA pela relação da massa fresca, túrgida e seca. As coletas das folhas foram feitas pela manhã (8 h), onde a folha foi coletada do terço médio da planta e depois retiravam-se cinco discos (1 cm<sup>2</sup>) para cada repetição, totalizando 20 discos por tratamento (Figura 6).

Figura 6 – Retirada dos discos foliares das cultivares ECO 103 (A) e AEC 144 (B), para análise do CRA (C)



Após a retirada dos discos, foi feita a pesagem da massa fresca (MF). Em seguida, os discos foram imergidos em água deionizada e mantidos na geladeira por 6 horas para determinação da massa túrgida (MT).

Depois destes processos, os discos foram levados para estufa de circulação forçada de ar (60 °C) por 24 h, obtendo-se a massa seca (MS) e conforme a equação (9), determinou-se o CRA.

$$\text{CRA (\%)} = [(MF - MS) / (MT - MS)] * 100 \quad (9)$$

Em que:

CRA - Conteúdo relativo de água;

MF - Massa fresca (mg);

MT - Massa túrgida (mg);

MS - Massa seca (mg).

### 3.12.2 Potencial hídrico foliar ( $\psi_{Hf}$ )

O potencial hídrico foliar ( $\psi_{Hf}$ ) foi determinado através de uma câmara de pressão (Figura 7), onde aplicava uma pressão crescente com gás de nitrogênio até que ocorresse a exsudação da seiva do xilema pelo corte feito no pecíolo da folha.

As leituras eram feitas no período das 5:00 às 6:00 h. As folhas utilizadas para a avaliação, eram pecioladas e retiradas do terço médio de cada planta.

As leituras obtidas na hora da avaliação eram dadas em bar que depois foram convertidas para kPa, conforme sistema internacional de unidades.

**Figura 7 – Câmara de pressão digital utilizada para as leituras de potencial hídrico**



## 3.13 Determinação das características fisiológicas

### 3.13.1 Trocas gasosas

Durante os períodos de avaliação, foram utilizadas 4 plantas por tratamento para a realização das leituras. Foram feitas no período da manhã entre as 9:30 e 11:00 h,

com auxílio de um medidor portátil de trocas gasosas (IRGA), modelo LI-6400XT (LICOR, Lincoln, Nebraska – EUA) (Figura 8).

O objetivo foi avaliar o efeito dos tratamentos hídricos sobre os seguintes parâmetros: assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  ( $A$ ) expressa em  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) expressa em  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ; condutância estomática ao vapor de água ( $g_s$ ) expressa em  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; e taxa transpiratória ( $E$ ) expressa em  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

A radiação fotossinteticamente ativa foi de  $1100 \mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de PAR (*photosynthetic active radiation*) e umidade relativa entre 50 e 60%. A atmosfera de referência do IRGA foi captada e direcionada para um recipiente homogeneizador de 5 L (*buffer*) antes de alcançar a câmara foliar, a fim de impedir grandes oscilações no  $\text{CO}_2$  de referência e temperatura da câmara foliar.

**Figura 8 – Medidor portátil de trocas gasosas (IRGA)**



Fonte: Jéssica de Lima, 2016

### 3.13.2 Teor de pigmentos foliares (TPF)

Para esta análise foram coletadas folhas do terço médio da planta no período da manhã (9 h). Por tratamento, foram utilizados oito discos foliares com diâmetro de 10 mm ( $1,04 \text{ cm}^2$ ), onde cada disco foi colocado em um tubo de vidro e mantido em um volume de 2 mL de dimetilformamida (DMF) por 24 h, em ambiente escuro, para extração de clorofila (*a*, *b* e carotenoides).

As medidas foram realizadas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda 480, 646,8 e 663,8 nm para clorofila *a*, *b* e carotenoides (equações 10, 11 e 12). Os resultados foram expressos em  $\mu\text{g cm}^{-2}$ , de acordo com o método de Lee et al. (1987).

$$\text{Clor. } a = ((12 * A_{663,8} - 3,11 * A_{646,8}) * V) / (1000 * W) \quad (10)$$

$$\text{Clor. } b = ((20 * A_{646,8} - 4,68 * A_{663,8}) * V) / (1000 * W) \quad (11)$$

$$\text{Caroten.} = [(1000 * A_{480} - 1,12 * \text{Cl } a - 34,07 * \text{Cl } b) / 245] / 1000 * W \quad (12)$$

Em que:

A = Absorbância no comprimento de onda indicado (nm);

V = Volume final do extrato clorofila – DMF (mL);

W = Área do disco fresco do material vegetal utilizado ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.13.3 Análise de silício nos tecidos vegetais

Nessa análise, foram selecionadas três plantas por tratamento, onde separou folha, caule e raiz em cada avaliação do ensaio. O material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 60 °C, até massa constante. Em seguida as amostras foram moídas, misturadas (amostras compostas) e levadas ao Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas situado no Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA – UNESP/Campus de Botucatu, para análise de silício nos tecidos vegetais.

### 3.14 Análises bioquímicas

Para a realização das análises bioquímicas do experimento conduzido, os protocolos utilizados estão descritos na publicação intitulada Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas (BROETTO, 2014).

#### 3.14.1 Coleta e armazenamento do material vegetal

Foram coletadas em média 6 folhas/planta de cada tratamento para as análises bioquímicas, no período da manhã entre as 9:00 e 10:00 h. O material fresco coletado era acondicionado em envelope de papel alumínio e imediatamente imerso em nitrogênio líquido para o congelamento do material. Em seguida, os envelopes eram armazenados em freezer a – 80°C.

### 3.14.2 Procedimentos para obtenção do extrato bruto

O material vegetal foi moído com o uso de nitrogênio líquido, até que se obtivesse um pó. Depois foi feita a pesagem desse material, para que as amostras fossem acondicionadas em tubos Falcon e armazenadas em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ . Essas amostras, foram processadas para obtenção de dois extratos diferentes: um para a análise do teor de L-prolina e o outro para as análises de atividade enzimática.

Para a análise do teor de L-prolina, as amostras de tecido foliar (500 mg) foram ressuspensas em 10,0 mL de ácido sulfosalicílico (3% em água destilada). Após centrifugação por 15 min a  $4.000 \times g$  a  $4^{\circ}\text{C}$ , o sobrenadante foi coletado e armazenado em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Para a análise enzimática (SOD) e teor de proteína solúvel total, o extrato foi obtido pela ressuspensão do material vegetal (300 mg) em 5,0 mL de tampão fosfato de potássio 0.1 M, pH 6.8, suplementado com 300 mg de polivinilpolipirrolidona (PVPP). Após centrifugação por 15 minutos a  $5.000 \times g$ , o sobrenadante foi coletado e armazenado em freezer a  $-80^{\circ}\text{C}$ .

### 3.14.3 Determinação do teor de L-prolina

A determinação do teor de L-prolina ( $\mu\text{g mL}^{-1}$  extrato) se deu pelo método de Bates, Waldren e Teare (1973). Na realização do teste colorimétrico, pipetou-se alíquotas de 100  $\mu\text{L}$  do extrato bruto; 2,0 mL de ninhidrina ácida; 2,0 mL de ácido acético glacial. Depois do aquecimento em banho-maria à aproximadamente  $100^{\circ}\text{C}$  por 60 minutos, os frascos foram resfriados e realizou-se a leitura a 520 nm. De referência, utilizou-se a curva padrão com (0, 20, 40, 60, 80 e 100 mg) de L-prolina.

### 3.14.4 Atividade da enzima Superóxido Dismutase (SOD; EC 1.15.1.1)

Nesta análise foi verificada a capacidade da enzima em inibir a fotoredução do NBT (Azul de nitrotetrazólio cloreto). A atividade foi determinada pela adição de 50  $\mu\text{L}$  do extrato bruto a uma solução obtendo 13 mM de metionina, 75  $\mu\text{M}$  de NBT, 100 nM de EDTA e 2  $\mu\text{M}$  de riboflavina em 3,0 mL de tampão fosfato de potássio 50 mM a pH 7,8.

A reação se deu pela iluminação das placas sobre um suporte composto por tubos fluorescentes (15 W) a  $25^{\circ}\text{C}$ . Após cinco minutos de iluminação, o final da catálise foi determinado pela suspensão da luz. Em seguida, foi feita a leitura do

composto cinza formado (formazana) pela fotoredução do NBT no espectrofotômetro, em comprimento de onda de 560 nm. Para os tubos tidos como brancos, eles receberam os mesmos reagentes, porém foram mantidos cobertos com papel alumínio protegidos da luz. Uma unidade de SOD equivale a quantidade de enzima necessária para a inibição de 50% da fotoredução do NBT. Para se obter o cálculo da atividade específica da enzima, levou-se em consideração a percentagem de inibição obtida, o volume da amostra e a concentração de proteína na amostra, sendo os resultados expressos em UI  $\mu\text{g}$  proteína<sup>-1</sup> (BROETTO, 2014).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Parâmetros biométricos

#### 4.1.1 Altura de plantas

Na Tabela 1, observou-se que houve aumento das plantas na 2ª avaliação para todos os tratamentos, esse aumento se deu devido ao tempo que as plantas permaneceram a mais em relação a 1ª avaliação.

As médias que diferiram entre si pelo teste Tukey a 5%, elas diferiram entre os fatores (na 1ª avaliação entre clones e na 2ª avaliação entre os regimes hídricos e clones). Os clones por serem de idades diferentes se deu essa diferença entre as médias. A disponibilidade de água afeta o crescimento das plantas, assim, as plantas tendem a desenvolver menos quando em deficiência hídrica.

Segundo Gomes et al. (2002), a qualidade das mudas pode ser determinada com base na altura, pois é um parâmetro de fácil medição e possui uma boa contribuição relativa.

**Tabela 1 – Análise biométrica da altura de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Altura de plantas (cm planta <sup>-1</sup> ) |         |             |         |     |         |
|--|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                 |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                     | 54,80 a | cl. ECO 103 | 62,41 a | S/S | 53,25 a |
| DHM  | 53,66 a | cl. AEC 144 | 46,04 b | C/S | 55,20 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                 |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                     | 60,50 a | cl. ECO 103 | 64,87 a | S/S | 58,75 a |
| DHM  | 55,80 b | cl. AEC 144 | 51,41 b | C/S | 57,54 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.1.2 Diâmetro do caule

Na biometria do caule Tabela 2, observou que no fator clones, houve diferença nas avaliações. Essa diferença está relacionada às características dos mesmos.

De acordo com Alfenas et al. (2009), mudas de boa qualidade precisam apresentar diâmetro do colo igual ou superior a 4 mm, com base nos valores obtidos, independente de quaisquer fatores, observa-se que esses valores foram superiores, tendo assim mudas de boa qualidade.

O diâmetro do colo é de fundamental importância na avaliação do potencial da muda para sobrevivência e crescimento após o plantio (Souza et al., 2006).

**Tabela 2 – Análise biométrica do diâmetro do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Diâmetro do caule (mm planta <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                 |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                     | 4,70 a | cl. ECO 103 | 5,01 a | S/S | 4,73 a |
| DHM  | 4,56 a | cl. AEC 144 | 4,23 b | C/S | 4,52 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                 |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                     | 5,22 a | cl. ECO 103 | 5,55 a | S/S | 4,92 a |
| DHM  | 4,73 a | cl. AEC 144 | 4,40 b | C/S | 5,02 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.1.3 Número de folhas

Com base na Tabela 3, nos regimes hídricos houve diferença na 2ª avaliação. De acordo com Taiz e Zeiger (2004), em resposta a deficiência hídrica o número de folhas acaba diminuindo, o que se observou neste experimento. Para os clones as médias diferiram nas duas avaliações, que se dá por diferença nas suas características pois o clone AEC 144, possui um número maior de folhas.

**Tabela 3 – Análise biométrica do número de folhas de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Número de folhas |      |             |      |     |      |
|------------------|------|-------------|------|-----|------|
| 1ª AVALIAÇÃO     |      |             |      |     |      |
| CONTROLE         | 20 a | cl. ECO 103 | 16 b | S/S | 18 a |
| DHM              | 17 a | cl. AEC 144 | 22 a | C/S | 19 a |
| 2ª AVALIAÇÃO     |      |             |      |     |      |
| CONTROLE         | 30 a | cl. ECO 103 | 18 b | S/S | 28 a |
| DHM              | 25 b | cl. AEC 144 | 36 a | C/S | 26 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.1.4 Área foliar

A determinação da área foliar de uma planta está relacionada principalmente ao tempo da folha permanecido na planta e ao tamanho das folhas (MONTEIRO et al., 2005).

Na Tabela 4, nota-se que nos tratamentos hídricos houve diferença significativa nas avaliações. Essa redução da área foliar pode ser considerada como a primeira

linha de defesa da planta contra uma situação de deficiência hídrica (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003; TAIZ; ZEIGER, 2010).

Para os clones houve diferença na 1ª avaliação, embora podemos ver na análise anterior que o clone AEC 144 possui mais folhas que o ECO 103 o que poderia mostrar médias maiores, mas como as folhas do clone ECO 103 são maiores e mais largas fazem com que suas médias sejam maiores em relação ao outro clone.

**Tabela 4 – Determinação da área foliar de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Área foliar (m <sup>2</sup> planta <sup>-1</sup> ) |          |             |          |     |          |
|--|----------|-------------|----------|-----|----------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                       |          |             |          |     |          |
| CONTROLE   | 395,77 a | cl. ECO 103 | 382,48 a | S/S | 337,33 a |
| DHM  | 280,94 b | cl. AEC 144 | 294,24 b | C/S | 339,38 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                       |          |             |          |     |          |
| CONTROLE   | 567,98 a | cl. ECO 103 | 518,98 a | S/S | 497,92 a |
| DHM  | 439,83 b | cl. AEC 144 | 488,86 a | C/S | 509,93 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.1.5 Biomassa fresca e seca do caule

Com base nas Tabelas 5 e 7, houve diferença na 2ª avaliação para os regimes hídricos, tanto para MF como para MS. Em relação aos clones houve nas duas avaliações, também para MF e MS.

**Tabela 5 – Biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa fresca do caule (g planta <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|---|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                    |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 5,62 a | cl. ECO 103 | 7,05 a | S/S | 5,68 a |
| DHM   | 5,35 a | cl. AEC 144 | 3,93 b | C/S | 5,30 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                    |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 8,53 a | cl. ECO 103 | 9,22 a | S/S | 7,57 a |
| DHM   | 6,70 b | cl. AEC 144 | 6,00 b | C/S | 7,65 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Nas Tabelas 6 e 8, observa-se os efeitos das interações entre regimes hídricos e clones na 2ª avaliação. A deficiência hídrica reduz a produção de biomassa, variando de cultivar para cultivar.

**Tabela 6 – Interação de biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação**

|          | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
|----------|-------------|-------------|
| CONTROLE | 10,77 aA    | 6,28 aB     |
| DHM      | 7,67 bA     | 5,70 aB     |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

**Tabela 7 – Biomassa seca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa seca do caule (g planta <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|---|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                      | 2,56 a | cl. ECO 103 | 3,35 a | S/S | 2,54 a |
| DHM   | 2,43 a | cl. AEC 144 | 1,64 b | C/S | 2,45 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                      | 3,77 a | cl. ECO 103 | 4,24 a | S/S | 3,40 a |
| DHM   | 2,94 b | cl. AEC 144 | 2,47 b | C/S | 3,31 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

**Tabela 8 – Interação de biomassa fresca do caule de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação**

|          | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
|----------|-------------|-------------|
| CONTROLE | 19,53 aA    | 12,21 aB    |
| DHM      | 11,50 bA    | 10,50 aA    |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4.1.6 Biomassa fresca e seca das folhas

Nas Tabelas 9 e 10, observa-se que nos regimes hídricos e nos clones houve entre os fatores nas duas avaliações. A deficiência hídrica reduz a produção de biomassa, variando de cultivar para cultivar.

**Tabela 9 – Biomassa fresca de folha de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa fresca das folhas (g planta <sup>-1</sup> ) |         |             |         |     |         |
|---|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                      |         |             |         |     |         |
| CONTROLE  | 10,76 a | cl. ECO 103 | 10,67 a | S/S | 8,68 a  |
| DHM   | 7,10 b  | cl. AEC 144 | 7,17 b  | C/S | 9,17 a  |
| 2ª AVALIAÇÃO                                      |         |             |         |     |         |
| CONTROLE  | 14,58 a | cl. ECO 103 | 14,66 a | S/S | 12,82 a |
| DHM   | 10,91 b | cl. AEC 144 | 10,84 b | C/S | 12,67 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

**Tabela 10 – Biomassa seca das folhas de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa seca das folhas (g planta <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|---|--------|-------------|--------|-----|--------|
| COLETA 2  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 4,94 a | cl. ECO 103 | 5,41 a | S/S | 3,98 a |
| DHM   | 3,23 b | cl. AEC 144 | 2,84 b | C/S | 4,28 a |
| COLETA 3  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 6,61 a | cl. ECO 103 | 6,87 a | S/S | 5,69 a |
| DHM   | 4,59 b | cl. AEC 144 | 4,33 b | C/S | 5,51 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.1.7 Biomassa fresca e seca de raiz

Na Tabela 11 houve diferença entre os fatores hídricos e clones nas duas avaliações.

**Tabela 11 – Biomassa fresca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa fresca de raiz (g planta <sup>-1</sup> ) |         |             |         |     |         |
|--|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                   |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                       | 8,20 a  | cl. ECO 103 | 8,80 a  | S/S | 6,83 a  |
| DHM  | 6,35 b  | cl. AEC 144 | 5,75 b  | C/S | 7,70 a  |
| 2ª AVALIAÇÃO                                   |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                       | 15,87 a | cl. ECO 103 | 15,51 a | S/S | 13,56 a |
| DHM  | 10,50 b | cl. AEC 144 | 10,86 b | C/S | 12,82 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na Tabela 12 e 14, observou-se a interação dos fatores hídricos e clones. A deficiência hídrica reduz a produção de biomassa, variando de cultivar para cultivar (GUIMARÃES et al, 2006), como podemos observar nos valores encontrados nas avaliações.

**Tabela 12 – Interação da biomassa fresca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação**

|          | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
|----------|-------------|-------------|
| CONTROLE | 19,53 aA    | 12,21 aB    |
| DHM      | 11,50 bA    | 10,50 aA    |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A tabela 13, mostra que na 1ª avaliação houve diferença entre os clones, na 2ª avaliação houve entre regimes hídricos e clones.

**Tabela 13 – Biomassa seca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Massa seca de raiz (g planta <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                 |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                     | 3,73 a | cl. ECO 103 | 4,18 a | S/S | 3,40 a |
| DHM  | 3,13 a | cl. AEC 144 | 2,68 b | C/S | 3,46 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                 |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                     | 5,47 a | cl. ECO 103 | 5,92 a | S/S | 4,88 a |
| DHM  | 4,13 b | cl. AEC 144 | 3,67 b | C/S | 4,72 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

**Tabela 14 – Interação de biomassa seca de raiz de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação**

|          | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
|----------|-------------|-------------|
| CONTROLE | 7,01 aA     | 3,93 aB     |
| DHM      | 4,85 bA     | 3,42 aB     |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

## 4.2 Relações hídricas

### 4.2.1 Conteúdo relativo de água (CRA)

Na Tabela 15, as médias não diferiram em nenhum dos fatores. Mesmo não havendo diferenças estatísticas nos teores de água, é interessante observar que a situação de deficiência hídrica teve um percentual de 85%, quando o esperado é que as plantas que receberam a irrigação necessária (82%) apresentassem maiores teores de água. Esses resultados corroboram àqueles obtidos por Almeida et al, (2002) que, do mesmo modo, não obtiveram diferença no teor relativo de água foliar nos diferentes clones de cacau após a deficiência hídrica, diferentes cultivares e aplicação de Si.

**Tabela 15 – Conteúdo relativo de água de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| CRA (%)      |         |             |         |     |         |
|--------------|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1ª AVALIAÇÃO |         |             |         |     |         |
| CONTROLE     | 82,10 a | cl. ECO 103 | 82,40 a | S/S | 82,68 a |
| DHM          | 84,26 a | cl. AEC 144 | 85,37 a | C/S | 83,70 a |
| 2ª AVALIAÇÃO |         |             |         |     |         |
| CONTROLE     | 83,63 a | cl. ECO 103 | 84,43 a | S/S | 84,14 a |
| DHM          | 85,30 a | cl. AEC 144 | 84,50 a | C/S | 84,80 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.2.2 Potencial hídrico foliar ( $\Psi_{Hf}$ )

Nota-se na Tabela 16 que apenas no fator regimes hídricos as médias diferiam, o que se espera acontecer já que as plantas se encontram em diferentes condições hídricas.

Reduções de  $\Psi_{Hf}$  também foram observadas em trabalhos desenvolvido por Chaves et al. (2004) em plantas de eucalipto com quatro meses de idade, submetidas a deficiência hídrica e à suspensão da irrigação.

**Tabela 16 – Potencial hídrico foliar ( $\Psi_{Hf}$ ) em de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Potencial hídrico foliar (bar) |        |             |        |     |        |
|--------------------------------|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                       | 1,35 b | cl. ECO 103 | 2,18 a | S/S | 2,02 a |
| DHM                            | 2,90 a | cl. AEC 144 | 2,06 a | C/S | 2,22 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                       | 1,80 b | cl. ECO 103 | 2,60 a | S/S | 2,60 a |
| DHM                            | 3,40 a | cl. AEC 144 | 2,58 a | C/S | 2,58 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

#### 4.3 Análise de silício nos tecidos vegetais

A concentração de Si na parte aérea das plantas classificou as espécies vegetais em não-acumuladoras ( $\text{SiO}_2 < 0,5\%$  da massa de matéria seca, ou abaixo de  $5 \text{ g kg}^{-1}$  de Si), acumuladoras (concentração de  $\text{SiO}_2 > 1\%$  da massa de matéria seca, ou de  $100$  a  $150 \text{ g kg}^{-1}$  de Si) e intermediárias ( $0,5\% < \text{SiO}_2 < 1\%$  da massa de matéria seca, ou entre  $10$  a  $50 \text{ g kg}^{-1}$  de Si) (CURRIE; PERRY, 2007; GUNTZER et al., 2012; HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014).

De acordo com o Quadro 6, o teor de Si nas folhas mostra uma diferenciação entre as plantas que recebeu Si e as que não recebeu. Essa diferenciação é devido resíduos do elemento nos tecidos vegetais. Com base nos valores obtidos, o eucalipto é classificado como uma planta não-acumuladora do elemento.

Observa-se que os valores do caule não houve diferença entre os que recebeu Si para os demais, quanto os valores das raízes foram maiores que nos demais tecidos, devido haver resíduos de solo no material.

**Quadro 6: Concentração de silício (%) em tecidos vegetais (caule, folha e raiz) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| cv. ECO 103 |                |      |                |      | cv. AEC 144 |                |      |                |      |
|-------------|----------------|------|----------------|------|-------------|----------------|------|----------------|------|
| CAULE       |                |      |                |      | CAULE       |                |      |                |      |
|             | 1 <sup>a</sup> |      | 2 <sup>a</sup> |      |             | 1 <sup>a</sup> |      | 2 <sup>a</sup> |      |
|             | AVALIAÇÃO      |      | AVALIAÇÃO      |      |             | AVALIAÇÃO      |      | AVALIAÇÃO      |      |
|             | C              | DHM  | C              | DHM  |             | C              | DHM  | C              | DHM  |
| S/S         | 0,16           | 0,18 | 0,14           | 0,16 | S/S         | 0,11           | 0,15 | 0,10           | 0,13 |
| C/S         | 0,16           | 0,16 | 0,20           | 0,16 | C/S         | 0,13           | 0,18 | 0,22           | 0,13 |
| FOLHA       |                |      |                |      | FOLHA       |                |      |                |      |
| S/S         | 0,22           | 0,16 | 0,24           | 0,18 | S/S         | 0,18           | 0,27 | 0,20           | 0,22 |
| C/S         | 0,36           | 0,40 | 0,38           | 0,22 | C/S         | 0,24           | 0,27 | 0,24           | 0,30 |
| RAIZ        |                |      |                |      | RAIZ        |                |      |                |      |
| S/S         | 0,40           | 0,46 | 0,53           | 0,56 | S/S         | 0,56           | 0,63 | 0,70           | 0,58 |
| C/S         | 0,47           | 0,56 | 0,60           | 0,60 | C/S         | 0,60           | 0,62 | 0,84           | 0,60 |

#### 4.4 Trocas gasosas

##### 4.4.1 Assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A)

Na Tabela 17, observa-se que na 2<sup>a</sup> avaliação houve diferença nas médias dos regimes hídricos. Quando em deficiência hídrica os estômatos se fecham com o objetivo de minimizar a desidratação das folhas, isso acaba limitando a difusão do CO<sub>2</sub> para o mesofilo foliar influenciando na redução da fotossíntese (CHAVES et al., 2009).

**Tabela 17 – Assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (A) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Assimilação líquida de CO <sub>2</sub> (A; $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) |         |             |         |     |         |
|---|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1 <sup>a</sup> AVALIAÇÃO  |         |             |         |     |         |
| CONTROLE  | 5,48 a  | cl. ECO 103 | 6,07 a  | S/S | 5,30 a  |
| DHM   | 5,85 a  | cl. AEC 144 | 5,27 a  | C/S | 5,29 a  |
| 2 <sup>a</sup> AVALIAÇÃO  |         |             |         |     |         |
| CONTROLE  | 18,84 a | cl. ECO 103 | 14,50 a | S/S | 13,26 a |
| DHM   | 8,62 b  | cl. AEC 144 | 12,97 a | C/S | 14,20 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

##### 4.4.2 Condutância estomática (gs)

Para condutância estomática (gs), houve diferença nos regimes hídricos na 2<sup>a</sup> avaliação e na aplicação de Si na 1<sup>a</sup> avaliação (Tabela 18).

Em trabalhos desenvolvidos por Silva et al., (2008), há redução da condutância estomática em clones de eucalipto se assimilaram com o desempenho observado em plantas jovens de aroeira, cultivadas em vasos sob deficiência hídrica em condições de campo, avaliadas por Carneiro et al., (2008).

**Tabela 18 – Condutância estomática ( $g_s$ ) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Condutância estomática ( $g_s$ ; mol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|---|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 0,14 a | cl. ECO 103 | 0,10 a | S/S | 0,09 b |
| DHM   | 0,10 a | cl. AEC 144 | 0,14 a | C/S | 0,14 a |
| 2ª AVALIAÇÃO  |        |             |        |     |        |
| CONTROLE  | 0,32 a | cl. ECO 103 | 0,20 a | S/S | 0,19 a |
| DHM   | 0,07 b | cl. AEC 144 | 0,18 a | C/S | 0,20 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

O fechamento estomático ocorre sob deficiência hídrica e a condutância estomática varia em função do cultivar, da idade da folha e do acondicionamento das plantas (SCHULZE; HALL, 1982; DAI et al., 1992).

A aplicação do Si aumento a condutância estomática, porém Pupatto (2003) analisando a aplicação de Si em arroz, mostrou redução da condutância estomática em cultivar de sequeiro com deficiência hídrica.

#### 4.4.3 Concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>)

Na Tabela 19, nota-se que a 1ª avaliação houve diferença em todos os fatores.

Longui (2007) observou que plantas jovens de eucalipto sob deficiência hídrica mostraram maior resistência estomática, o que causa redução na C<sub>i</sub>.

**Tabela 19 – Concentração intercelular de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Concentração intercelular de CO <sub>2</sub> (C <sub>i</sub> ; μmol CO <sub>2</sub> mol ar <sup>-1</sup> ) |          |             |          |     |          |
|--|----------|-------------|----------|-----|----------|
| 1ª AVALIAÇÃO   |          |             |          |     |          |
| CONTROLE   | 323,48 a | cl. ECO 103 | 282,08 b | S/S | 286,38 b |
| DHM  | 276,00 b | cl. AEC 144 | 316,41 a | C/S | 313,14 a |
| 2ª AVALIAÇÃO   |          |             |          |     |          |
| CONTROLE   | 277,70 a | cl. ECO 103 | 215,75 a | S/S | 245,87 a |
| DHM  | 188,24 a | cl. AEC 144 | 250,20 a | C/S | 220,07 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

O aumento na  $C_i$ , quando relacionado com os potenciais hídricos, causa gradativa diminuição na taxa fotossintética (LAWLOR, 2002). Esse aumento da  $C_i$ , referente a baixos valores de potencial hídrico foliar ( $\Psi_{Hf}$ ), pode estar correlacionado à redução na atividade de enzimas envolvidas no processo de fixação de  $CO_2$  (MACHADO et al., 1999).

#### 4.4.4 Transpiração (E)

Observou-se na Tabela 20, que houve diferença nas médias da 2ª avaliação para o fator regimes hídricos.

Por conta de uma maior resistência estomática, clones de eucalipto submetidos a deficiência hídrica, mostraram diminuição na transpiração. O fechamento parcial dos estômatos é uma estratégia de resistência das plantas ao déficit, pois reduz a transpiração e mantém o conteúdo hídrico foliar, reduzindo o risco de perda de água e uma eventual morte por falta da mesma (PEAK et al., 2004).

**Tabela 20 – Transpiração (E) de clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Transpiração (E; mmol H <sub>2</sub> O m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 2,37 a | cl. ECO 103 | 1,97 a | S/S | 1,71 a |
| DHM  | 1,90 a | cl. AEC 144 | 2,26 a | C/S | 2,51 a |
| 2ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 5,09 a | cl. ECO 103 | 3,38 a | S/S | 3,21 a |
| DHM  | 1,60 b | cl. AEC 144 | 3,32 a | C/S | 3,49 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na situação de restrição hídrica, sendo ela por limitação de água no solo ou por altas exigências atmosféricas de água, a planta acaba por fechar seus estômatos para que possa economizar água, provocando uma diminuição das perdas por transpiração (FLEXAS et al., 2009; PINHEIRO; CHAVES, 2011).

#### 4.5 Teor de clorofila

Estresse por falta de água impulsiona alterações nos teores de clorofila *a*, clorofila *b* e carotenoides. Os carotenoides têm como uma das suas funções contribuir para que as plantas tolerem curtos períodos de deficiência hídrica (FAROOQ et al., 2009).

Adatia e Besford (1986) em seus trabalhos declararam que observaram um aumento no teor de clorofila *a* e *b* em plantas de pepino que receberam Si.

#### 4.5.1 Clorofila *a*

A Tabela 21, mostrou que houve uma diferença entre os fatores clones e aplicação de Si para a 1ª avaliação, para a 2ª avaliação houve apenas nos regimes hídricos.

**Tabela 21 – Concentração de clorofila *a* em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Clorofila <i>a</i> ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ de folha) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 7,07 a | cl. ECO 103 | 7,36 a | S/S | 6,77 b |
| DHM  | 7,06 a | cl. AEC 144 | 6,76 b | C/S | 7,35 a |
| 2ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 5,09 a | cl. ECO 103 | 3,38 a | S/S | 3,21 a |
| DHM  | 1,60 b | cl. AEC 144 | 3,32 a | C/S | 3,49 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na Tabela 22, observou-se na 1ª avaliação que houve interação entre regimes hídricos e clones, regimes hídricos e aplicação de Si, e clones e aplicação de Si. Na a 2ª avaliação houve entre regimes hídricos e clones, e regimes hídricos e aplicação de Si.

**Tabela 22 – Interação em concentração de clorofila *a* em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| 1ª AVALIAÇÃO |             |             | 2ª AVALIAÇÃO |             |             |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|              | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |              | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
| CONTROLE     | 7,10 bA     | 7,02 aA     | CONTROLE     | 12,87 aA    | 9,62 bB     |
| DHM          | 7,61 aA     | 6,50 bB     | DHM          | 11,76 bB    | 12,85 aA    |
|              | S/S         | C/S         |              | S/S         | C/S         |
| CONTROLE     | 6,61 aB     | 7,51 aA     | CONTROLE     | 11,92 aA    | 10,57 bB    |
| DHM          | 6,93 aA     | 7,19 aA     | DHM          | 12,21 aA    | 12,40 aA    |
|              | S/S         | C/S         |              | S/S         | C/S         |
| cl. ECO 103  | 6,72 aB     | 8,00 aA     |              |             |             |
| cl. AEC 144  | 6,82 aA     | 6,70 bA     |              |             |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

De acordo com Shen et al. (2010), observou-se que houve um aumento de clorofila *a* em folhas de sojas que receberam aplicação de Si e estavam sob déficit hídrico e também para as plantas sob controle. Para Pei et al. (2010), obtiveram um aumento no teor de clorofila *a* em folhas de trigo que receberam aplicação de Si sob deficiência hídrica, diferindo entre plantas sob controle.

#### 4.5.2 Clorofila *b*

Observou-se na Tabela 23 que apenas na 2ª avaliação houve diferença no fator regimes hídricos.

**Tabela 23 – Concentração de clorofila *b* em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Clorofila <i>b</i> ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ de folha) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 3,30 a | cl. ECO 103 | 3,35 a | S/S | 3,11 a |
| DHM  | 3,21 a | cl. AEC 144 | 3,16 a | C/S | 3,40 a |
| 2ª AVALIAÇÃO   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE   | 4,54 b | cl. ECO 103 | 4,77 a | S/S | 4,98 a |
| DHM  | 5,18 a | cl. AEC 144 | 4,94 a | C/S | 7,74 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na Tabela 24, observou-se a interação entre regimes hídricos e clones. Segundo Poljakoff e Gale (1975), é interessante a habilidade de sintetizar clorofila *b* sob condição de deficiência hídrica em espécies tolerantes à deficiência. Estudos realizados evidenciaram que os teores de clorofila variam muito entre as diferentes espécies.

**Tabela 24 – Interação de concentração de clorofila *b* em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para 2ª avaliação**

|          | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
|----------|-------------|-------------|
| CONTROLE | 4,92 aA     | 4,15 bB     |
| DHM      | 4,62 aB     | 5,73 aA     |
|          | S/S         | C/S         |
| CONTROLE | 4,95 aA     | 4,12 bB     |
| DHM      | 5,00 aA     | 5,35 aA     |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

### 4.5.3 Carotenoides

Notou-se na Tabela 25 que houve diferença entre os fatores clones e aplicação de Si nas duas avaliações.

**Tabela 25 – Concentração de carotenoides em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Carotenoides ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ de folha) |        |             |        |     |        |
|--|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                       | 2,12 a | cl. ECO 103 | 2,17 a | S/S | 2,03 b |
| DHM  | 2,10 a | cl. AEC 144 | 2,05 b | C/S | 2,20 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                   |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                                       | 3,07 a | cl. ECO 103 | 3,18 a | S/S | 3,21 a |
| DHM  | 3,15 a | cl. AEC 144 | 3,03 b | C/S | 3,00 b |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na Tabela 26, observou-se interação nas avaliações. Na 1ª avaliação foi entre regimes hídricos e aplicação de Si, e clones e aplicação de Si. Na 2ª avaliação foi entre regimes hídricos e clones, e regimes hídricos e aplicação de Si.

**Tabela 26 – Interação da concentração de carotenoides em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| 1ª AVALIAÇÃO |         |         | 2ª AVALIAÇÃO |             |             |
|--------------|---------|---------|--------------|-------------|-------------|
|              | S/S     | C/S     |              | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
| CONTROLE     | 1,95 bB | 2,30 aA | CONTROLE     | 3,33 aA     | 2,78 bB     |
| DHM          | 2,12 aA | 2,10 bA | DHM          | 3,03 bB     | 3,26 aA     |
|              | S/S     | C/S     |              | S/S         | C/S         |
| cl. ECO 103  | 2,04 aB | 2,31 aA | CONTROLE     | 3,22 aA     | 2,90 bB     |
| cl. AEC 144  | 2,03 aA | 2,08 bA | DHM          | 3,20 aA     | 3,10 aA     |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os carotenoides têm um papel importante na proteção do pigmento clorofila sob condições de estresse. Segundo Pincelli (2010) a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de vida da planta seja alterado.

## 4.6 Análises bioquímicas

### 4.6.1 Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD; EC 1.15.1.1)

Observou-se na Tabela 27 que todos os fatores nas duas avaliações houve diferença entre as médias. Condições de estresse aumenta a atividade da SOD (BROETTO et al., 2014).

**Tabela 27 – Atividade da enzima superóxido dismutase SOD (UI  $\mu\text{g}$  proteína<sup>-1</sup>) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| SOD UI $\mu\text{g}$ proteína <sup>-1</sup> |         |             |         |     |         |
|---|---------|-------------|---------|-----|---------|
| 1ª AVALIAÇÃO                                |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                    | 12,05 b | cl. ECO 103 | 12,04 b | S/S | 8,33 b  |
| DHM   | 18,22 a | cl. AEC 144 | 18,23 a | C/S | 21,95 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                                |         |             |         |     |         |
| CONTROLE                                    | 30,70 b | cl. ECO 103 | 29,95 b | S/S | 55,57 a |
| DHM   | 42,45 a | cl. AEC 144 | 43,20 a | C/S | 17,58 b |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

Na Tabela 28, observou-se interação na 1ª avaliação, que houve entre regimes hídricos e clones, regimes hídricos e aplicação de Si, e clones e aplicação de Si. Para a 2ª avaliação houve entre regimes hídricos e clones, e regimes hídricos e aplicação de Si.

**Tabela 28 – Interação da atividade da enzima superóxido dismutase SOD (UI  $\mu\text{g}$  proteína<sup>-1</sup>) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| 1ª AVALIAÇÃO |             |             | 2ª AVALIAÇÃO |             |             |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
|              | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |              | cl. ECO 103 | cl. AEC 144 |
| CONTROLE     | 3,70 bB     | 20,39 aA    | CONTROLE     | 11,37 bB    | 50,04 aA    |
| DHM          | 20,38 aA    | 16,07 bB    | DHM          | 48,52 aA    | 36,37 bB    |
|              | S/S         | C/S         |              | S/S         | C/S         |
| CONTROLE     | 12,28 aA    | 11,81 bB    | CONTROLE     | 40,45 bA    | 20,95 aB    |
| DHM          | 4,37 bB     | 30,08 aA    | DHM          | 70,70 aA    | 14,20 bB    |
|              | S/S         | C/S         |              | S/S         | C/S         |
| cl. ECO 103  | 1,53 bB     | 22,56 aA    |              |             |             |
| cl. AEC 144  | 15,13 aB    | 21,33 bA    |              |             |             |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, dentro da mesma coluna e médias seguidas pela mesma letra maiúscula, dentro da mesma linha, não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Deficiência hídrica correlacionada a aplicação de Si via foliar aumenta a atividade da SOD, em comparação à disponibilidade hídrica adequada. Em um experimento com cevada, foi observado uma melhoria na atividade da enzima com relação a aplicação do Si (LIANG et al., 1999).

#### 4.6.2 Teor de L-prolina

Na tabela 29, houve diferença nos fatores regimes hídricos e cultivares na 1ª avaliação. Já na 2ª avaliação houve somente para o fator aplicação de Si.

De um modo geral o teor de prolina nas folhas aumenta quando a planta está em condição de deficiência hídrica (FARHAD et al., 2011). Em períodos curtos de déficit hídrico o Si acaba por favorecer o aumento do teor de prolina. (CRUSCIOL et al. 2009).

**Tabela 29 – Concentração de L-prolina ( $\mu\text{mol g}^{-1}$  MF) em clones de eucaliptos (ECO 103 e AEC 144), em dois regimes hídricos (CONTROLE e DHM), com e sem aplicação de silício para cada época de avaliação**

| Prolina ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF) |        |             |        |     |        |
|--------------------------------------|--------|-------------|--------|-----|--------|
| 1ª AVALIAÇÃO                         |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                             | 1,24 a | cl. ECO 103 | 1,96 a | S/S | 1,55 a |
| DHM                                  | 1,94 b | cl. AEC 144 | 1,21 b | C/S | 1,62 a |
| 2ª AVALIAÇÃO                         |        |             |        |     |        |
| CONTROLE                             | 0,88 a | cl. ECO 103 | 0,90 a | S/S | 0,80 b |
| DHM                                  | 0,94 a | cl. AEC 144 | 0,93 a | C/S | 1,03 a |

Médias com letras iguais dentro da mesma coluna e épocas de avaliação não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada fator.

## **5 CONCLUSÕES**

Considerando-se as condições experimentais e face aos resultados obtidos, concluiu-se que:

A indução de deficiência hídrica moderada em plantas de eucaliptos produziu efeitos fisiológicos em intensidades variáveis de acordo com o clone estudado e o tempo de exposição ao estresse;

A aplicação de silício via foliar não reverteu os efeitos fisiológicos provocados pela deficiência hídrica, independentemente dos demais fatores combinados no ensaio.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF**: ano base 2009/ABRAF. Brasília: DF, 2010. 140p.
- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF**: ano base 2010/ABRAF. Brasília: DF, 2011. 130p.
- ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. Viçosa, MG: Ed. da UFV, 2009. 500 p.
- ALMEIDA A. A. F.; BRITO R. C. T.; AGUILAR M. A. G.; VALLE R. R. Water relations aspects of *Theobroma cacao* L. clones. **Agrotrópica**, v.14, p. 35-44, 2002.
- ANJUM, S. A.; XIE, X.; WANG, L.; SALEEM, M. F.; MAN, C.; LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. **African Journal of Agricultural Research**, Victoria Islands, v. 6, n. 9, p. 2026 – 2032, 2011.
- BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 335-344, abr. – jun., 2010.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica e AgroEstat**: Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda, 2015. p.327 –356.
- BARTELS, D.; SUNKAR, R. Drought and salt tolerance in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 24, n. 1, p. 23 – 58, 2005.
- BATES, L.S.; WALDREN, R.P.; TEARE, I.D. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v.39, p.205 – 207, 1973.
- BEDON, F.; MAJADA, J.; FEITO, I.; CHAUMEIL, P.; DUPUY, J. W.; LOMENECH, A. M.; BARRE, A.; GION, J. M.; PLOMION, C. Interaction between environmental factors affects the accumulation of root proteins in hydroponically grown *Eucalyptus globulus*. **Plant Physiology and Biochemistry**, Maryland, v. 49, p. 69 – 76, 2011.
- BLUM, A. Drought resistance – is it really a complex trait? **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 38, n. 1, p. 753 – 757, 2011.

BRADFORD, M.M. A rapid and sensitive method for the microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye-binding. **Analytical Biochemistry**, v.72 p. 248 – 254, 1976.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Relatório estatístico da BRACELPA**. São Paulo, 2011.

BROETTO, F. Métodos de trabalho em bioquímica vegetal e tecnologia de enzimas. São Paulo: **Cultura Acadêmica**, 2014, 86 p.

BROETTO, F. et al. Respostas bioquímicas durante a indução de estresse salino em plantas de pimentão cultivadas em sistema fertirrigado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 2, p. 290, jul. 2003.

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, 2016

CAVALCANTI, F.R. et al. Superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities do not confer protection against oxidative damage in salt-stressed cowpea plants. **News Phytologist**, v.163, p.563-571, 2004.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt Stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, p. 551 – 560, 2009.

CHAVES, J.H. et al. Seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com disponibilidade diferenciada de água no solo. Relações hídricas de plantas em tubetes. **Revista Árvore**, v.28, n.3, p.333-341, 2004.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, n. 1, p. 239 – 264, 2003.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, Madison, v.49, n.3, p. 949 – 954, 2009.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; CASTRO, G.S.A.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 404 – 410, 2013.

CURRIE, H. A.; PERRY, C. C. Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. **Annals of Botany**, Oxford, v. 100, n. 7, 1383 – 1389, 2007.

DAI, Z.; EDWARD, G.E.; KU, M.S.B. Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L. (Castor bean) by leaf to air vapor pressure deficit. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 99(4), 1426 – 1434, 1992.

DATNOFF, L. E.; RODRIGUES, F. A.; SEEBOLD, K. W. Silicon and Plant Nutrition. In: DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; HUBER, D. M. (Eds.) **Mineral nutrition and plant disease**. St. Paul: APS Press. p. 233 – 246, 2007.

DOURADO NETO, D. et al. Programa SWRC (Version 3.0): **Soil-Water Retention Curve** (Software). Piracicaba: ESALQ; Davis: University of Califórnia, 1995.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 3ª ed., Rio de Janeiro, 2013, 353 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 2005. 400 p.

FARHAD, M. S.; BABAK, A. M.; REZA, Z. M.; HASSAN, R. S. M.; AFSHIN, T. Response of proline, soluble sugars, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in potato (*Solanum tuberosum* L.) to different irrigation regimes in greenhouse condition. **Australian Journal of Crop Science, Lismore**, v. 5, n. 1, p. 55-60, 2011.

FAROOQ, M.; WAHID, A.; KOBAYASHI, N.; FUJITA, D.; BASRA, S. M. A. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 29, p. 185 – 212, 2009.

FIGUEIREDO, F.C.; BOTREL, P.P.; TEIXEIRA, C.P.; PETRAZZINI, L.L; LOCARNO, M.; CARVALHO, J.G. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 1306 – 1311, 2010.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; GALMÉS, J.; MEDRANO, H.; RIBAS-CARBÓ. Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum**, Copenhaguen, v. 127, p. 343 – 352, 2006.

- FLEXAS, J. et al. Photosynthesis limitations during water stress acclimation and recovery in the drought-adapted *Vitis* hybrid Richter-110 (*V. berlandieri* x *V. rupestris*). **Journal of Experimental Botany**. v.60: p.2362 – 2377, 2009.
- GILL, S.S. Amelioration of cadmium stress in crop plants by nutrients management: Morphological, physiological and biochemical aspects. **Plant Stress**. n. 5 (Special Issue 1), v. 1 – 23, 2011.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Review. Plant Physiology and Biochemistry**. n. 48 p. 909 – 930, 2010.
- GOMES, C. F. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 531 – 538, out./dez. 2011.
- GOMES, J. M.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 6, p. 655 – 664, 2002.
- GORANTLA, M. et al. Identification of stress-responsive genes in an indica rice (*Oryza sativa* L.) using ESTs generated from drought-stressed seedlings. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 58, n. 2, p. 253 – 265, Jan. 2007.
- GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; CASTRO, E. M. Comportamento de cultivares de arroz de terras altas no sistema plantio direto em duas profundidades de adubação. **Bioscience journal**, Uberlândia, v. 22, p. 53-59, jan. / abr, 2006.
- GUNES, A. et al. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. **Journal of Plant Interactions**, London, v. 2, n. 2, p. 105 – 113, 2007a.
- GUNES, A. et al. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, London, v. 39, n. 13, p. 1885 – 1903, 2008.
- GUNES, A. et al. Silicon – mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic – B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, Dordrecht, v. 164, n. 6, p. 807 – 811, 2007b.

GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, Dordrecht, v. 32, n. 1, p. 201 – 213, 2012.

HASHEMI, A.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R. Beneficial effects of silicon nutrition in alleviating salinity stress in hydroponically grown canola, *Brassica napus* L., plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 56, p. 244 – 253, 2010.

HATTORI, T. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, Tokyo, v. 123, n. 4, p. 459 – 466, 2005.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Planta**, Berlin, v. 240, n.3, p. 447 – 458, 2014.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geografia do Brasil. **Relatório estatístico do IBGE**. Rio de Janeiro, 2015.

KENNAN, T.; SABATE, S.; GRACIA, C. The importance of mesophyll conductance in regulating forest ecosystem productivity during drought periods. **Global Change Biology**, Weinheim, v. 16, p. 1019 – 1034, 2010.

KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2006. p. 355 – 374.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**, São Carlos: RIMA, Artes e Textos, 531p., 2004.

LAWLOR, D. W. Limitation to photosynthesis in Water – stressed Leaves: Stomata vs. Metabolism and the Role of ATP. **Annals of Botany**, v. 89, p. 871 – 885, 2002.

LAWLOR, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of Botany**, Oxford, v. 103, p. 561 – 579, 2009.

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

LIANG, Y. C.; DING, R. X.; LIU, Q. Effects of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism. **Scientia Agricultura Sinica**, Beijing, v. 32, n. 6, p. 75 – 83, 1999.

- LONGUI, B. M. **Fotossíntese e relações hídricas de espécies de *Eucalyptus* sp. submetidas a diferentes regimes hídricos**. 2007. 37p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Pós-Graduação Mestrado em Agronomia, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente – SP.
- LOPES, J. L. W.; GUERRINI, I. A.; SILVA, M. R. da; SAAD, J. C. C.; LOPES, C. F. Estresse hídrico em plantio de *Eucalyptus grandis* vs. *Eucalyptus urophylla*, em função do solo, substrato e manejo hídrico de viveiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 31 – 39, 2011.
- MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Orgs.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 17 – 39
- MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 50, n. 1, p. 11 – 18, 2004.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, Basel, v. 65, p. 3049 – 3057, 2008.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Dordrecht, v. 11, n. 8, p. 392 – 397, 2006.
- MACHADO, E. C.; MEDINA, C. L.; GOMES, M. M. A. Teor de água no substrato de crescimento e fotossíntese em laranjeira ‘Valência’. **Bragantia**, v. 58, p. 217 – 226, 1999.
- MAFIA, R. G.; ALFENAS, A. C.; SIQUEIRA, L.; FERREIRA, E. M.; LEITE, H. G.; CAVALLAZZI, J. R. P. Critério técnico para determinação da idade ótima de mudas de eucalipto para plantio. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 947-953, 2005. DOI: 10.1590/S0100-67622005000600014.
- MAGALHÃES, G. C. **Desempenho de clones de eucalipto nas condições edafoclimáticas de Vitória da Conquista-BA / Gilmara Carvalho Magalhães**, 2013. 101f.: Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Vitória da Conquista – BA, 2013.
- MANTOVANI, E. C. AVALIA: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MARTINI, A. A introdução do eucalipto no Brasil completa 100 anos, Disponível em: < <http://www.canalrioclaro.com.br/antigo/index1.php?s=coluna&coluna=175>> Acesso em 16 de outubro de 2013.

MARTINS, F. B., STRECK, N. A., SILVA, J. D., Morais, W. W., SUSIN, F., NAVROSKI, M. C., & VIVIAN, M. A. (2008). Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa.

MARTINS, L. L.; MOURATO, M. P. Alterações no metabolismo de plantas em meios contaminados por metais pesados: estresse oxidativo. **Revista Agros**, Lisboa, v. 8, p. 6, 2008.

MARTINS, M. O.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; NETO, A. D. A.; SANTOS, M. G. Crescimento de plantas jovens de nim-indiano (*Azadirachta indica* A. Juss. – MELIACEAE) sob diferentes regimes hídricos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 771 – 779, 2010.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 56, n. 414, p. 1255 – 1261, 2005.

MOLDES, C.A. et al. Actividad de enzimas antioxidantes en algodón com diferentes dosis de silicio. In: Reunión de la asociación argentina de fisiología vegetal, 26, 2006. **Anais**. Chascomus, Argentina. Chascomus: AAFV, 2006. 1 CD – ROM.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: Verso e Reverso Comunicações, 2000. 112 p.

MORANDO, R.; SILVA, A. O.; CARVALHO, L. C.; PINHEIRO, M. P. M. A. Déficit hídrico: efeito sobre a cultura da soja. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.3, n. especial, p.114 – 129, 2014.

MONTEIRO, J. E. B. A.; SENTELHAS, P. C.; CHIAVEGATO, E. J.; GUISELINI, C.; SANTIAGO, A. V.; PRELA, A. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa seca das folhas. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 15 – 24, 2005.

PAULA, R. C.; PAULA, N. F.; MARINO, C. L. Breeding Perennial Species for Abiotic Stress. In: FRITSCHÉ – NETO, R.; BORÉM, A. **Plant Breeding for Abiotic Stress Tolerance**. Berlin: Springer – Verlag, 2012, p.157 – 172.

PEAK, D. Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.101, p.918 – 922, 2004.

PEI, Z. F.; MING D. F.; LIU D.; WAN G. L.; GENG X. X.; GONG H. J.; ZHOU W. J. Silicon improves the tolerance to water deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation**. v.29, p. 106 – 115, 2010.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, p. 869 – 882, 2011.

PILON, C. et al. Foliar or soil applications of silicon alleviate water-deficit stress of potato plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, n.6, p. 2325 – 2334, 2014.

POLJAKOFF, M.; GALE, J. **Plants in saline environments**. Berlin: Springer Verlag, 1975. 213 p.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010. 78p.

PRATES, F. B. S. **Crescimento, Desenvolvimento e Nutrição de Pinhão Manso Adubado com Lodo de Esgoto e Silicato de Cálcio e Magnésio**. 2010. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, UFMG. Montes Claros, 2010.

PUPATTO, J.G.C. **Trocas gasosas e eficiência de uso da água da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de silício**. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Agronomia /Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

QUEIROZ, R. J. B. **Resposta fisiológica e molecular de dois genótipos de milho à limitação hídrica**. 2010. 167 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010.

- REIS, T.H.P.; FIGUEIREDO, F.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; BOTREL, P.P.; RODRIGUES, C.R. Efeito da associação silício líquido solúvel com fungicida no controle fitossanitário do cafeeiro. **Coffee Science**, v. 3, p. 78 – 80, 2008.
- SANSÍGOLO, C. A.; RAMOS, E. S. Qualidade da madeira e da celulose de um clone de *Eucalyptus grandis* plantado em três locais. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 47 – 60, jan./mar. 2011.
- SCANDALIOS, J.G. Molecular responses to oxidative stress. In: Hawkesford MJ & Buchner P (Editors), **Molecular Analysis of Plant Adaptation to the Environment**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 181 – 208. 2001.
- SCANDALIOS, J. G. Oxidative stress molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. Brazilian. **Journal of Medical and Biological Research**, v.38, p.995 – 1014, 2005.
- SCHULZE, E.D.; HALL, A.E. Stomatal responses, water loss and CO<sub>2</sub> assimilation rates of plants in contrasting environments. In: LANGE, O.L. et al. **Physiological plant ecology**. II. Water relations and carbon assimilation. Berlin, Springer-Verlag, 1982. v. 12b, p. 181 – 230. (Encyclopedia of plant physiology).
- SHEN X.; ZHOU Y.; DUAN L.; LI Z.; ENEJI A. E.; LI J. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet – B radiation. **Journal of Plant Physiology**, v.167, n.15, p. 1248-1252, 2010.
- SHULAEV, V.; CORTES, D.; MILLER, G.; MITTLER, R. Metabolomics for plant stress response. **Physiologia Plantarum**, Copenhaguen, v. 132, p. 199 – 208, 2008.
- SILVA, M. R.; KLAR, A. E.; PASSOS, J. R. Efeitos do manejo hídrico e da aplicação de potássio nas características morfofisiológicas de mudas de *Eucalyptus grandis* W. (Hill ex. Maiden). **Irriga**, v.9, n.1, p.31 – 40, 2004.
- SILVA, N. E. Photosynthetic changes and protective mechanisms against oxidative damage subjected to isolated and combined drought and heat stresses in *Jatropha curcas* plants. **Journal of Plant Physiology**. v. 165, p. 1157 – 1164, 2010.
- SMIRNOFF, N. Plant resistance to environmental stress. **Curr. Op. Biotechnology**, v. 9, p. 214 – 219, 1998.

- SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. T. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**. v.1, n. 1, p. 9, 2007.
- SONOBE K.; HATTORI T.; AN P.; TSUJI W.; ENEJI A. E.; KOBAYASHI S.; KAWAMURA Y.; TANAKA K.; INANAGA S. Effect of silicon application on sorghum root responses to water stress. **Journal of Plant Nutrition**, v.34, p. 71 – 82, 2011.
- SORATTO, R. P. et al. Produtividade, qualidade de tubérculos e incidência de doenças foliares em batata, influenciados pela aplicação foliar de silício. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 7, p. 1000 – 1006, 2012.
- SOUSA, J.V.; RODRIGUES, C.R.; LUZ, J.M.Q.; CARVALHO, P.C.; RODRIGUES, T.M.; BRITO, H.C. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. *Bioscience Journal*, v. 26, p. 502 – 513, 2010.
- SOUZA, C. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; MARTINS FILHO, S.; LIMA, J. S. S. Crescimento em campo de espécies florestais em diferentes condições de adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 16, n. 3, p. 243 – 249, 2006.
- STRECK, N. A. Do we know how plants sense a drying soil? **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 581 – 584, 2004.
- STOLF – MOREIRA, R.; LEMOS, E. G. M.; ABDELNOOR, R. V.; BENEVENTI, ROLLA, A. A. P.; PEREIRA, S. S.; OLIVEIRA, M. C. N.; NEPOMUCENO, A. L.; GUIMARÃES, M. C. Identification of reference genes for expression analysis by real – time quantitative PCR in drought-stressed soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n.1, p.58 – 65, 2011.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 954p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Sunderland: Sinauer Assoc, 2010, 782p.
- TATAGIBA, S. D. **Crescimento inicial, trocas gasosas e status hídrico de clones de eucalipto sob diferentes regimes de irrigação**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2006.
- TEIXEIRA, L. A. F. **Influência da rustificação no comportamento fisiológico de mudas de *Eucalyptus urograndis* submetidas ao déficit hídrico**. 2012. 47f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, 2012.

TETENS, V. O. Über einige meteorologische Begriffe. v. 6, p. 297 – 309, 1930.

TONIN, F.B. **Atividade de enzimas antioxidativas e absorção de silício em plantas de pimentão submetidas a estresse salino**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* (Smith) para a Depressão Central e Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 27 –43, 2006.

VAN GENUTCHEN, M. T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of insaturated. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 41, p. 892 – 898, 1980.

VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, Oxford, v. 45, p. 523 – 539, 2006.

ZHU, Z. et al. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, Dordrecht, v. 167, n. 3, p. 527 – 533, 2004.

WARREN, C. R.; ARANDA, I; CANO, F. J. Responses to water stress of gas exchange and metabolites in *Eucalyptus* and *Acacia* spp. **Plant, Cell And Environment**. Oxford, p. 1609 – 1629, 2011.