



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas. UNIFAL-MG
Rua Gabriel Monteiro da Silva, 700. Alfenas/MG. CEP 37130-000



Alessander Lopes Caetano

**Crescimento inicial, trocas gasosas e anatomia de *Cenostigma pluviosum*
var. *peltophoroides* cultivada em rejeito de mineração da Barragem de
Fundão de Mariana-MG e sob diferentes níveis de água**

Alfenas/MG

2020

Alessander Lopes Caetano

**Crescimento inicial, trocas gasosas e anatomia de *Cenostigma pluviosum*
var. *peltophoroides* cultivada em rejeito de mineração da Barragem de
Fundão de Mariana-MG e sob diferentes níveis de água**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio José Pereira
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Polo

Alfenas/MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas

C128c Caetano, Alessander Lopes.
Crescimento inicial, trocas gasosas e anatomia de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* cultivada em rejeito de mineração da Barragem de Fundão de Mariana-MG e sob diferentes níveis de água. / Alessander Lopes Caetano. – Alfenas/MG, 2020.
24f. : il. --
Orientador: Fabricio José Pereira
Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de Alfenas, 2020.
Bibliografia.

1. Reflorestamento. 2. Áreas degradadas. 3. Sibipiruna. 4. *Caesalpinia peltophoroides*. 5. Fotossíntese. 6. Crescimento inicial. I. Pereira, Fabricio José. II. Título.

CDD-577

Alessander Lopes Caetano

**Crescimento inicial, trocas gasosas e anatomia de *Cenostigma pluviosum*
var. *peltophoroides* cultivada em rejeito de mineração da Barragem de
Fundão de Mariana-MG e sob diferentes níveis de água**

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciências Ambientais.

Aprovada em: 11 de fevereiro de 2020

Prof. Dr. Fabrício José Pereira
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Romero Francisco Vieira Carneiro
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Dr. Vinícius Politi Duarte
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao meu Mestre Jesus Cristo por todas as coisas.

Agradeço aos meus pais pela força que me deram.

Agradeço ao Max pela colaboração direta com o trabalho realizado.

Ao Prof. Dr. Marcelo Pela Fé que depositou em mim.

Ao Prof. Dr. Fabricio que me orientou na elaboração do trabalho e na busca pelo meu crescimento pessoal.

Um agradecimento especial para Tatiana A. Silvério pelo incentivo e cuidados para com a minha pessoa.

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

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – Finance Code 001

RESUMO

Com o objetivo de avaliar as respostas de crescimento e desenvolvimento, trocas gasosas e anatomia de plantas de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* cultivadas em lama de rejeito de mineração da barragem rompida de Fundão em Mariana e submetidas a diferentes níveis de água, conduziu-se um experimento com dois tratamentos: Capacidade de campo (CC) e 50% da CC. As sementes foram germinadas diretamente na lama e ficaram na mesma por um total de 100 dias, sendo 60 dias de ambientalização e 40 dias sob tratamento. Os dados coletados durante o experimento foram submetidos à análise de variância e o teste Scott-Knott para $p < 0,05$ utilizando-se o programa Sisvar. As plantas em 50% da CC aumentaram significativamente sua massa seca de raiz comparadas ao de 100% CC. A espécie sob menor nível de água aumentou a densidade estomática, mas manteve respostas iguais em relação a fotossíntese, potencial hídrico e biomassas do caule e da folha, comparadas ao de 100% da CC. Tecidos como xilema/floema, elementos de vasos e parênquima paliçádico foram mantidos iguais nos dois níveis de água, havendo apenas a redução da epiderme adaxial/abaxial e parênquima esponjoso no menor nível. Assim, a conclusão é de que a espécie *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* é capaz de germinar e tolerar crescimento inicial tanto na CC como em 50% da CC sem prejuízos ao seu crescimento. Esses promissores resultados devem ser levados em conta como subsídios para trabalhos que tenham por objetivo o estudo de possíveis espécies com potencial para reflorestamento de áreas impactadas por rejeitos de mineração como os da barragem de Fundão.

Palavras-chave: Reflorestamento. Áreas degradadas. Sibipiruna. *Caesalpinia peltophoroides*. Fotossíntese. Crescimento inicial.

ABSTRACT

In order to evaluate growth and development responses, gas exchange and plant anatomy of *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* cultivated in mining tailings mud from the broken Fundão dam in Mariana and submitted to different water levels, an experiment was conducted with two treatments: Field capacity (FC) and 50% of FC. The seeds were germinated directly in the mud and remained there for a total of 100 days, 60 days of environmentalization and 40 days under treatment. The data collected during the experiment were subjected to analysis of variance and the Scott-Knott test for $p < 0.05$ using the Sisvar program. Plants at 50% of FC significantly increased their root dry weight compared to 100% of FC. The species with the lowest water level increased stomatal density, but maintained equal responses in relation to photosynthesis, water potential and stem and leaf biomass, compared to 100% of FC. Tissues such as xylem / phloem, vessel elements and palisade parenchyma were kept equal in the two water levels, with only a reduction in the adaxial / abaxial epidermis and spongy parenchyma in the lowest level. Thus, the conclusion is that the species *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* is capable of germinating and tolerating initial growth both in FC and in 50% of FC without impairing its growth. These promising results must be taken into account as subsidies for works that aim to study possible species with the potential for reforestation in areas impacted by mining tailings such as those of the Fundão dam.

Keywords: Reforestation. Degraded areas. Sibipiruna. *Caesalpinia peltophoroides*. Photosynthesis. Initial growth.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 7 |
| 2 | MATERIAL E MÉTODOS..... | 9 |
| 2.1 | MATERIAL VEGETAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO | 9 |
| 2.2 | CONDIÇÃO DO SUBSTRATO | 10 |
| 2.3 | TROCAS GASOSAS..... | 10 |
| 2.4 | ANÁLISES DE CRESCIMENTO..... | 11 |
| 2.5 | ANÁLISES ANATÔMICAS | 11 |
| 2.6 | ANÁLISES ESTATÍSTICAS | 12 |
| 3 | RESULTADOS..... | 13 |
| 4 | DISCUSSÃO..... | 18 |
| 5 | CONCLUSÃO | 21 |
| | REFERÊNCIAS | 22 |

1 INTRODUÇÃO

Acidentes com barragens de mineração acontecem por todo o mundo e essas tragédias vêm se intensificando. A barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais - Brasil, rompeu-se em 2015, provocando o maior despejo de rejeito de mineração já registrado no mundo, acometendo áreas urbanas e florestais ao longo do curso do Rio Doce e chegando ao mar (FERNANDES *et al.*, 2016). De fato, cerca de 55 milhões de metros cúbicos de lama se espalharam como consequência deste rompimento (GFT, 2016). Este desastre é um sério problema pois a lama destruiu o ambiente natural (recobrando o solo e contaminando rios) dificultando a recuperação natural (IBAMA, 2015).

Análises da água do Rio Doce mostraram que nos pontos de coleta as concentrações de metais pesados estão acima do permitido pela legislação brasileira (CARVALHO *et al.*, 2017), mas ainda são necessárias análises mais aprofundadas, pois esses metais podem ser provenientes das formações naturais dos solos da região de Mariana, e o rejeito de mineração pode ter contribuído para a elevação desses valores. Porém, metais pesados, quando em concentrações elevadas interferem negativamente no crescimento e desenvolvimento das plantas (GOMES *et al.*, 2011).

Como é inviável retirar toda a lama espalhada, recuperar essas áreas afetadas com espécies arbóreas tolerantes é de extrema importância. A introdução de espécies arbóreas nativas na região pode recuperar o ambiente impactado e prover serviços ambientais como abrigo e alimento para animais. Mas a escolha das espécies para a revegetação deve ser feita com cautela, pois áreas de mineração apresentam dificuldades para a sobrevivência das plantas (ALMEIDA; SÁNCHEZ, 2004).

Escolher espécies adequadas para reflorestamento dessas áreas impactadas, requer conhecimentos sobre a biologia da planta, que a permite tolerar o substrato artificial (lama) e variações climáticas que a região apresenta além de outros fatores. Um dos principais desafios às mudas destinadas ao reflorestamento é a redução da disponibilidade hídrica, pois as chuvas, em determinados períodos pode chegar a apenas 9 mm totais mensais (CLIMATE-DATA.ORG, 2019). Isso faz com que haja necessidade em se conhecer os mecanismos de tolerância das espécies, sobretudo cultivadas em rejeitos como a lama de Mariana.

Uma espécie com potencial para reflorestar a região afetada é *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Benth.) E. Gagnon & G.P. Lewis (GAGNON *et al.*, 2016), basônimo

Caesalpinia peltophoroides Benth., pertencente à família Fabaceae. É uma espécie nativa conhecida no Brasil como Sibipiruna, ocorre na mata Atlântica e é utilizada na arborização urbana em vários estados do Brasil (SILVA *et al.*, 2008). A espécie apresenta potencial madeireiro, produz grandes quantidades de sementes, é heliófita e semidecídua (transição), sendo esta última característica importante para locais que apresentam períodos de estiagem (SILVA *et al.*, 2008). Segundo Pontes *et al.* (2006), a espécie se desenvolve bem em diversos tipos de solo podendo ser usada para recuperação de áreas degradadas (PONTES *et al.*, 2006).

A hipótese deste trabalho é que a restrição hídrica em rejeitos de mineração dificulta o crescimento e o desenvolvimento de espécies arbóreas que possuem potencial para recuperação de áreas impactadas. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar as respostas de crescimento e desenvolvimento, trocas gasosas e anatomia de plantas *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* cultivadas em lama de rejeito de mineração da barragem rompida em Mariana, e submetidas a diferentes níveis de disponibilidade hídrica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAL VEGETAL E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O trabalho foi realizado em sala de crescimento, localizada no campus sede da Universidade Federal de Alfenas. As sementes de *C. pluviosum* foram coletadas dentro do campus supracitado e armazenadas em sacos de papel, sendo posteriormente mantidas em temperatura ambiente, em ambiente seco e sombreado até a montagem do experimento.

A região afetada pela lama de Mariana possui clima variado, com períodos de estiagem entre maio e agosto e períodos chuvosos de outubro a março, tendo temperaturas médias de 20,4°C, sendo sua classificação cwa de acordo com Köppen e Geiger (INPE, 2019; CLIMATE-DATA.ORG, 2019).

A lama foi coletada no local do acidente, cerca de 4 km do rompimento da barragem. A altura da lama no local de coleta foi de cerca de 1,0 m. Para a montagem do experimento, peneirou-se a lama com a granulometria de 2,6 mm.

A capacidade de campo (CC) da lama foi determinada pelo método gravimétrico (SOUZA *et al.*, 2000).

As sementes receberam um tratamento pré-germinativo no qual foram submersas em água destilada por 8 horas e em seguida receberam o fungicida Captana 500 em função da ocorrência de fungos em pré-testes para o experimento. As sementes foram plantadas diretamente na lama, acondicionadas em vasos plásticos de 500 mL com 400 mL de lama, mantendo a CC, e ficaram por um total de 53 dias na sala de crescimento com fotoperíodo de 12h00 com temperatura em torno 23°C e umidade relativa de 60% medidas pelo termo higrômetro (J.Prolab-1566-1). A radiação incidente foi de 40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ medidas pelo espectro-radiômetro (Luzchem, SPR-4002, Ottawa, Canadá). Após este período foram aplicados dois tratamentos: capacidade de campo e restrição hídrica com 50% da capacidade de campo. A justificativa de não utilizar um outro substrato é que a região afetada pelo rompimento da Barragem de Fundão foi totalmente coberta pela lama à uma grande profundidade. Então mesmo espécies arbóreas que possuem capacidade de produzir raízes longas, demorarão atravessar esta camada com metros de lama até atingir o solo, sendo obrigadas a se desenvolverem apenas na lama por um longo período.

2.2 CONDIÇÃO DO SUBSTRATO

Antes de iniciar o período experimental as plantas foram padronizadas realizando-se um desbaste, deixando apenas duas folhas totalmente expandidas por planta; as plantas tinham aproximadamente 10,0 cm de altura. Para as plantas do tratamento de 50% da CC houve um período de transição da condição de capacidade de campo, mantida por 53 dias, para a restrição hídrica, a qual demorou sete dias para perder por evaporação aproximadamente 50 % do volume de água. A manutenção das condições experimentais (CC e 50% da capacidade de campo) foi mantida pesando-se as plantas em balança Q-510-1500 (Quimis, São Paulo, Brazil) diariamente e repondo a massa de água perdida por evapotranspiração. As plantas foram mantidas nestas condições por 40 dias. A altura das plantas foi medida com régua, em intervalos de 10 dias. Aos 40 dias após imposição dos tratamentos foi avaliado o número de folhas completamente expandidas, o potencial hídrico (Ψ_w), as trocas gasosas e a quantificação de clorofila.

2.3 TROCAS GASOSAS

As trocas gasosas foliares foram avaliadas, por meio do analisador de trocas gasosas por infravermelho (IRGA), modelo LI-6400XT (LI-COR, Lincoln, Nebraska, EUA) entre 08h00 e 10h00, usando radiação fotossinteticamente ativa de $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na câmara de LI-6400-02B com fonte de radiação (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). A intensidade de radiação foi determinada após realizar uma curva de luz, que encontrou o ponto de saturação da planta em estudo. As variáveis analisadas foram: taxa fotossintética líquida (A), taxa transpiratória (e), condutância estomática (gs). Com os valores (A) e (e) calculou-se a eficiência do uso da água ($\text{EUA}=\text{A}/\text{e}$). Estimou-se o teor de clorofila com o SPAD 502-Plus (Konica Minolta, Osaka, Japão), sendo expresso em unidades SPAD. As trocas gasosas foliares e as avaliações do teor de clorofila foram realizadas na primeira folha completamente expandida, em um folíolo por folha e em folhas com boas condições fitossanitárias. O potencial hídrico (Ψ_w) foi determinado com bomba de pressão tipo Scholander modelo 3115 (Soilmoisture Equipment Corp., Santa Barbara, EUA) no período da manhã, à partir das 8h00.

2.4 ANÁLISES DE CRESCIMENTO

Ao final do experimento (40 dias), as plantas foram separadas em folhas, caule e raízes. Todas as folhas das plantas foram fotografadas para determinar a área foliar utilizando-se o programa imageJ. A massa fresca de cada órgão foi mensurada em balança analítica modelo AY220 (Marte/Shimadzu, Minas Gerais, Brazil). Posteriormente, a massa seca das raízes, caule e folhas, foi determinada acondicionando cada parte das plantas em sacos de papel e em estufa de circulação forçada de ar, modelo SI-102 (Solab, São Paulo, Brazil), à uma temperatura de 60°C por até massa constante e em seguida, foram pesados. A alocação de biomassa em cada órgão foi calculada com base nas massas secas sendo: $AL\% = MO/MST$, onde AL% a alocação de biomassa em percentual, MO corresponde à massa seca do órgão e MST a massa seca total da planta. O teor de água na planta foi calculado pela diferença entre a MFT pela MST.

2.5 ANÁLISES ANATÔMICAS

Para as análises anatômicas foram coletados dois folíolos de cada planta, fixados e armazenados em etanol 70%. Para o estudo dos estômatos foram feitas secções paradérmicas na epiderme da face abaxial em um foliólulo de um dos folíolos, na região mediana do folíolo. A superfície foi revestida com resina de cianoacrilato que, após a secagem, foi removida e montada com lâmina e lamínula. As lâminas foram fotomicrografadas utilizando uma câmera digital modelo Canon PowerShot G-10 (Canon, Tóquio, Japão), acoplada ao microscópio Axio A1 (Zeiss, OberKochen, Alemanha). Estas foram utilizadas para as medições das características estomáticas (comprimento, largura e contagem de estômatos) utilizando-se o programa de análise de imagem Image J. Esses dados foram usados para calcular a razão entre comprimento e largura dos estômatos e, calcular a densidade estomática.

Cortes transversais foliares: os cortes foram feitos a mão livre. Os foliólulos centrais dos folíolos foram colocados em embaúbas para suporte e cortados com lâminas de aço, foram separados os cortes mais finos, que foram despigmentados em hipoclorito 50%, lavados em água destilada e corados com o corante safrablau; as lâminas para as fotomicrografias foram montadas com água glicerínada 50%; foram feitas fotos no microscópio Axio A1 usando câmera digital Canon PowerShot G-10. Fotografou-se a região do feixe central, região intervenal e o canal secretor. Com as fotos, mediu-se usando o programa imageJ, área externa e interna do feixe vascular que resultou na área de fibras, área do floema e a área do xilema,

esses valores foram usados para calcular as porcentagens respectivas. Foi analisado o diâmetro do elemento de vaso. Na parte intervenal mediu-se as espessuras das faces adaxiais e abaxiais, parênquima paliçádico e esponjoso, que permitiu calcular a razão PP/PE e a espessura total foliar. No canal secretor mediu se o diâmetro interno e externo do canal, onde resultou a área do epitélio do canal secretor; ainda calculou-se a porcentagem do lume do canal secretor (Área do lume dividida pela área total vezes 100) e a porcentagem do epitélio do canal secretor (Área do epitélio dividida pela área total vezes 100).

2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O número de repetições por tratamentos foi de 17, sendo 2 tratamentos, dando um total de 34 repetições totais.

Os dados foram submetidos à análise de variância e o teste Scott-Knott para $p < 0,05$ utilizando-se o programa Sisvar (Ferreira, 2011).

A granulometria da lama: peneirou se a lama em malha de 1mm; a lama foi espalhada na lâmina manualmente, logo colocou-se água glicerinada 50% e fechou as com lamínula. Montou-se 10 lâminas, as quais foram microfotografadas, dando um total de 30 fotos e medido o diâmetro de 10 partículas por foto, resultando em 300 valores que deu a média de 1,19662 μm , sendo esse o valor médio da granulometria.

Análise química da lama: Enviou-se uma amostra da lama ao Laboratório de Análise de Solo da Universidade Federal de Lavras com o intuito de quantificar micro/macronutrientes e metais pesados. (Tabela 5).

3 RESULTADOS

As massas fresca e seca da folha e a do caule não apresentaram diferença significativa em nenhum dos tratamentos, contudo, no menor nível de disponibilidade verificou-se aumento da massa fresca e seca radicular (Tabela 1). A redução hídrica não modificou as massas fresca e seca totais de *C. pluviosum* (Tabela 1). Além disso, a redução hídrica não modificou a alocação de biomassa para as folhas e o caule, mas promoveu um aumento na alocação de biomassa para as raízes (Tabela 1). A redução hídrica não promoveu modificações significativas no comprimento da raiz maior, número de folhas, área foliar total, alongamento do caule, teor de água na planta e potencial hídrico em *C. pluviosum* (Tabela 1).

Tabela 1 - Crescimento e potencial hídrico (Ψ_w) de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Fabaceae) cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas. Os dados são mostrados como média \pm desvio padrão.

| Variáveis | Capacidade de campo | 50% da capacidade de campo |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Massa fresca da folha (g) | 0,68 \pm 0,4 a | 0,80 \pm 0,2 a |
| Massa fresca do caule (g) | 0,54 \pm 0,3 a | 0,65 \pm 0,2 a |
| Massa fresca da raiz (g) | 1,09 \pm 0,8 b | 1,59 \pm 0,6 a |
| Massa fresca total (g) | 2,40 \pm 1,1 a | 3,00 \pm 0,6 a |
| Massa seca da folha (g) | 0,27 \pm 0,2 a | 0,31 \pm 0,1 a |
| Massa seca do caule (g) | 0,25 \pm 0,2 a | 0,30 \pm 0,1 a |
| Massa seca da raiz (g) | 0,31 \pm 0,2 b | 0,49 \pm 0,2 a |
| Massa seca total (g) | 0,98 \pm 0,4 a | 1,15 \pm 0,2 a |
| Biomassa da folha (%) | 35,02 \pm 9,1 a | 29,63 \pm 9,4 a |
| Biomassa do caule (%) | 31,56 \pm 9,2 a | 26,97 \pm 6,0 a |
| Biomassa da raiz (%) | 33,42 \pm 8,7 b | 43,40 \pm 8,9 a |
| Comprimento da raiz maior (cm) | 13,45 \pm 7,5 a | 15,43 \pm 3,6 a |
| Número de folhas | 4,18 \pm 1,6 a | 5,29 \pm 2,3 a |
| Área foliar total (cm ²) | 89,21 \pm 35,3 a | 91,05 \pm 13,8 a |
| Alongamento caule (cm/dia) | 0,01 \pm 0,01 a | 0,02 \pm 0,01 a |
| Teor de água na planta (%) | 63,74 \pm 3,1 a | 64,22 \pm 3,4 a |
| Potencial hídrico(Ψ_w)(MPa) | -0,51 \pm 0,1 a | -0,68 \pm 0,3 a |

Fonte: Do Autor

Nota: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para $p < 0,05$.

A redução hídrica não promoveu modificações na fotossíntese e no teor de clorofila de *C. pluviolum*, contudo, reduziu a condutância estomática e a transpiração das plantas, promovendo um aumento na eficiência do uso da água (Tabela 2).

Tabela 2 - Trocas gasosas e teor de clorofila de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Fabaceae) cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas. Os dados são mostrados como média \pm desvio padrão.

| Variáveis | Capacidade de campo | 50% da capacidade de campo |
|---|---------------------|----------------------------|
| Fotossíntese ($\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 2,15 \pm 0,6 a | 2,29 \pm 1,1 a |
| Condutância estomática ($\mu\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 0,02 \pm 0,003 a | 0,01 \pm 0,007 b |
| Transpiração ($\text{mmol}_{\text{H}_2\text{O}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) | 0,55 \pm 0,1 a | 0,39 \pm 0,2 b |
| EUA ($\mu\text{mol}_{\text{CO}_2} \text{mmol}_{\text{H}_2\text{O}}$) | 3,61 \pm 1,9 b | 6,23 \pm 3,5 a |
| Clorofila (unidades SPAD) | 29,61 \pm 11,3 a | 26,39 \pm 11,1 a |

Fonte: Do Autor

Nota: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para $p < 0,05$.

A redução hídrica não promoveu modificações significativas no tamanho dos estômatos (largura e comprimento) bem como na forma (razão comprimento/largura) contudo, aumentou a densidade estomática de *C. pluviosum* (Tabela 3).

Tabela 3 - Características estomáticas de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Fabaceae) cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas. Os dados são mostrados como média \pm desvio padrão.

| Variáveis | Capacidade de campo | 50% da capacidade de campo |
|--|---------------------|----------------------------|
| Comprimento dos estômatos (μm) | 23,54 \pm 1,7 a | 23,18 \pm 2,1 a |
| Largura dos estômatos (μm) | 18,51 \pm 1,5 a | 17,84 \pm 2,2 a |
| Razão comprimento/largura | 1,28 \pm 0,1 a | 1,31 \pm 0,1 a |
| Densidade estomática (estômatos mm^{-2}) | 78,57 \pm 28,8 b | 101,20 \pm 28,4 a |

Fonte: Do Autor

Nota: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para $p < 0,05$.

Os resultados da anatomia foliar mostraram que as plantas mantiveram as áreas de floema, xilema, fibras e diâmetro de elementos de vaso iguais nos tratamentos. A espessura da epiderme das faces adaxial/abaxial foi maior a 100% CC; o parênquima paliçádico (PP) não apresentou diferença entre os tratamentos, mas houve redução no parênquima esponjoso (PE) em 50% da CC, resultando uma espessura total foliar maior para 100% da CC (A diferença de

espessura total foliar pode ser observada na Figura 1). O canal secretor também se manteve igual em ambos tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 - Características anatômicas foliares de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* (Fabaceae) cultivada em rejeito de mineração do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil em duas condições hídricas. Os dados são mostrados como média \pm desvio padrão.

| Variáveis | Capacidade de campo | 50% da capacidade de campo |
|--|-----------------------|----------------------------|
| Área do Floema (μm^2) | 688,76 \pm 403,7a | 659,47 \pm 282,5a |
| Área do Xilema (μm^2) | 1005,24 \pm 533,8a | 899,16 \pm 413,0a |
| Área de fibras (μm^2) | 3478,62 \pm 1500,3a | 3542,46 \pm 1208,5a |
| Floema (%) | 39,26 \pm 9,8a | 42,22 \pm 7,3a |
| Xilema (%) | 56,85 \pm 10,7a | 56,51 \pm 7,33a |
| Fibras (%) | 66,99 \pm 7,44a | 69,58 \pm 5,9a |
| Elemento de Vaso (μm) | 7,43 \pm 2,1a | 7,25 \pm 1,6a |
| Espessura adaxial (μm) | 12,98 \pm 2,3a | 11,28 \pm 1,7b |
| Espessura abaxial (μm) | 13,72 \pm 2,4a | 11,89 \pm 1,9b |
| Parênquima paliçádico (PP) (μm) | 34,69 \pm 8,2a | 36,11 \pm 5,4a |
| Parênquima esponjoso (PE) (μm) | 40,2 \pm 9,3a | 33,42 \pm 6,8b |
| Razão PP/PE | 0,9 \pm 0,3b | 1,12 \pm 0,3a |
| Espessura total foliar(μm) | 101,58 \pm 14,9a | 92,7 \pm 10,8b |
| Área do epitélio do canal secretor (μm^2) | 1370,68 \pm 429, 5a | 1429,93 \pm 559,3a |
| Lume do canal secretor (%) | 64,76 \pm 8,5a | 61,28 \pm 12,6 a |
| Epitélio do canal secretor (%) | 35,26 \pm 8,5a | 38,72 \pm 12,6a |

Fonte: Do Autor

Nota: As médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott para $p < 0,05$.

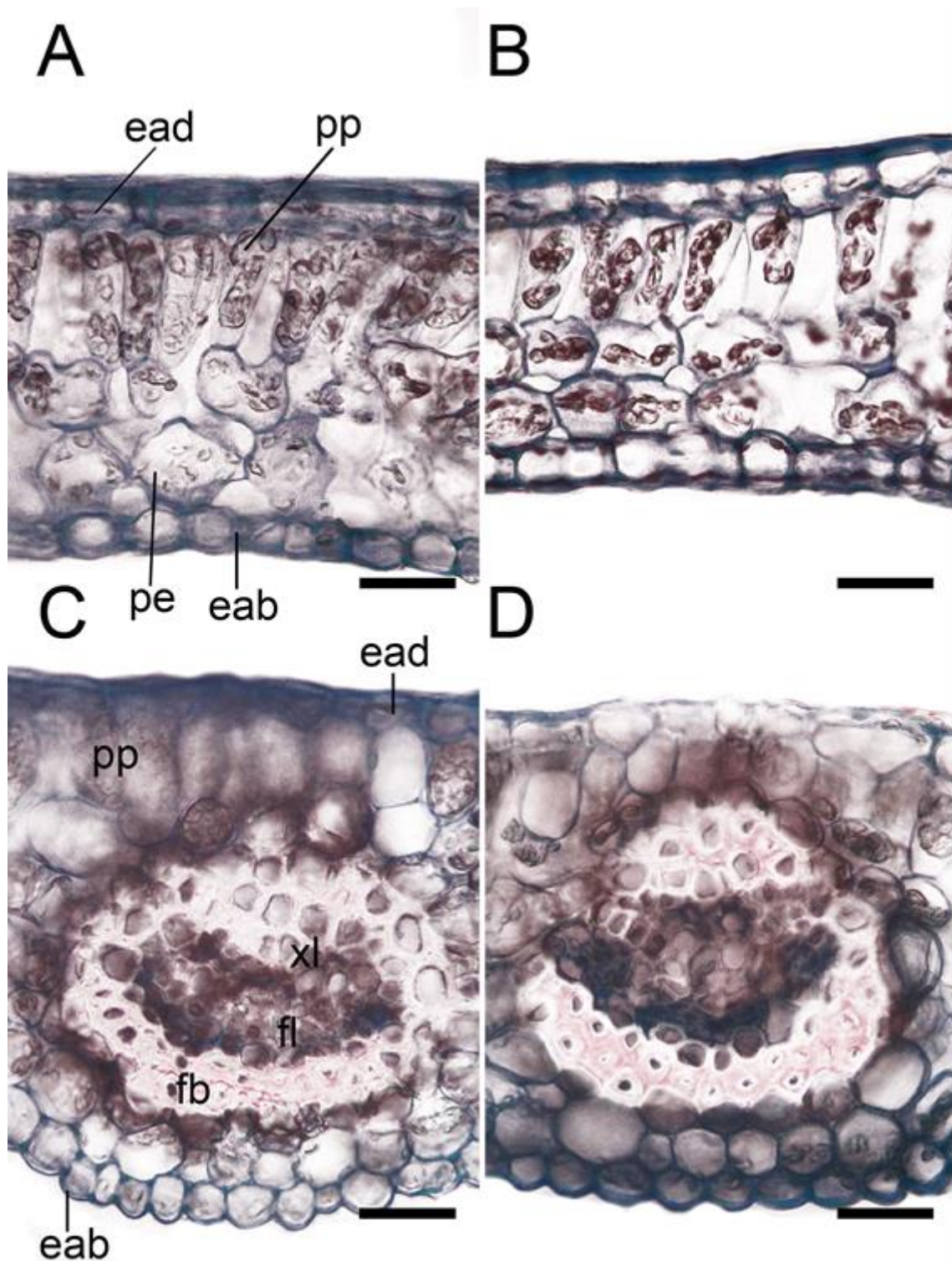
Verificou-se que a lama contém micro e macronutrientes que podem ser usados pelas plantas em seu desenvolvimento, e também concentrações de metais pesados (Tabela 5).

Tabela 5 - Análise dos principais macro e micronutrientes, bem como compostos tóxicos no resíduo de mineração (lama) do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG.

| Macronutrientes | mg elemento Kg resíduo⁻¹ (ppm) |
|------------------------|--|
| P | 150,7 |
| Mg | 79,4 |
| K | 87,9 |
| Ca | 3879,0 |
| Micronutrientes | mg elemento Kg resíduo⁻¹ (ppm) |
| Mn | 400,4 |
| Fe | 23608,3 |
| Zn | 5,8 |
| Cu | 6,3 |
| Na | 54,2 |
| Tóxicos | mg elemento Kg resíduo⁻¹ (ppm) |
| Al | 1962,84 |
| Cr | 11,85 |
| Cd | 1,95 |
| Pb | 5,68 |

Fonte: Do Autor/ Laboratório de Análises Químicas de Solos-UFLA

Figura 1 - Secções transversais dos foliólulos de *C. pluviosum* var. *peltophoroides* (sibipiruna) cultivada em lama de resíduo de mineração de Mariana-MG em duas condições de disponibilidade hídrica.



Fonte: Do Autor

Legenda: A e C = 100% da capacidade de campo; B e D = 50% da capacidade de campo. A e B = região intervenal; C e D = nervura mediana. ead = epiderme da face adaxial; eab = epiderme da face abaxial; pp = parênquima paliçádico; pe = parênquima esponjoso; fb = fibras; xl = xilema; fl = floema. Barras = 25 μ m.

4 DISCUSSÃO

A redução hídrica até 50% da CC não interfere o crescimento e o desenvolvimento de *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* na lama da Barragem de Fundão. Em situação de estresse hídrico, normalmente as plantas reduzem ou até mesmo paralisam o seu crescimento, o que não foi observado nesse trabalho (COSTA; PINHO; PARRY, 2008). Estudos apontam que a condição de 50% da capacidade de campo pode reduzir o crescimento de espécies vegetais (DÍAZ *et al.*, 2018; CRUZ *et al.*, 2019). Portanto, a lama da Barragem de Fundão, quando submetida à redução da disponibilidade hídrica equivalente à 50% da capacidade de campo, não promoveu uma drástica situação de déficit hídrico para as *C. pluviosum*, pois não ocorreram respostas típicas de estresse, mas sim de tolerância, e as plantas mantiveram o crescimento, fotossíntese e mesmo o potencial hídrico neste tratamento.

Apesar disso, a menor disponibilidade hídrica fez com que *C. pluviosum* aumentasse seu sistema radicular como observado nos resultados para a massa seca e fresca e para a alocação de biomassa para a raiz. O maior investimento no sistema radicular é uma resposta comum em plantas quando submetidas a uma menor disponibilidade hídrica, pois favorece maior área para a absorção de água e nutrientes (CORREIA; NOGUEIRA, 2004; JARAMILLO *et al.*, 2013; LYNCH, 2015). Como a redução hídrica não promoveu restrições para a fotossíntese, a taxa de produção de biomassa foi preservada em *C. pluviosum* e o maior aporte de massa para o crescimento das raízes pode ter favorecido a aquisição de água e nutrientes mantendo o crescimento da planta.

A manutenção das dimensões e formato dos estômatos com o aumento da densidade estomática favoreceu o controle da condutância estomática e conseqüentemente o controle da transpiração, sendo importantes para evitar a perda de água. Plantas de ambientes com menor disponibilidade hídrica apresentam redução ou outras alterações na morfologia estomática (BOSABALIDIS; KOFIDIS, 2002; GRISI *et al.*, 2008; CRUZ *et al.*, 2019). Porém, a redução da disponibilidade hídrica não modificou a morfologia dos estômatos de *C. pluviosum* e o aumento da densidade estomática pode ter favorecido as trocas gasosas foliares da espécie. Plantas sob menores disponibilidades hídricas costumam aumentar a densidade estomática para obter maior controle de trocas gasosas, e a incapacidade de realizar esta modificação pode levar a planta a uma deficiência hídrica (PINCELLI; SILVA, 2012; CRUZ *et al.*, 2019). Portanto, a redução da disponibilidade hídrica na lama de mineração não causou estresse hídrico evidente e as modificações estomáticas encontradas em *C. pluviosum* foram

suficientes para um adequado controle da transpiração e manutenção da planta nessa condição de cultivo.

Nos resultados dos cortes transversais foliares, Figura 1 e Tabela 4, observou-se que a planta *C. pluviosum* não reduziu as áreas de floema, xilema e fibras, também mantendo o diâmetro do elemento de vaso, isso fez com que a planta conseguisse manter o transporte de água e nutrientes normalmente nos dois tratamentos. O tratamento de 50% da CC reduziu a espessura total da folha, mas manteve o parênquima paliçádico com as mesmas dimensões da disponibilidade de 100% da CC, lembrando que a área foliar total também foi mantida nos tratamentos, justificando a planta ter mantido seus níveis fotossintéticos normais comparados a 100% da CC, pois os tecidos que foram reduzidos, não são tão prejudiciais na manutenção e no crescimento da planta, mostrando que a espécie se adaptou a menor disponibilidade hídrica mantendo seu funcionamento normal. Quando as plantas são expostas a um déficit hídrico severo, como respostas elas podem reduzir a alocação de biomassa para as folhas, por consequência podem reduzir seus tecidos foliares, como, tecidos vasculares, áreas de parênquimas, entre outros, o que acaba comprometendo, fotossíntese, nutrição, crescimento e desenvolvimento (CORREIA; NOGUEIRA, 2004; CRUZ *et al.*, 2019). O canal secretor manteve seus epitélios iguais nos tratamentos demonstrando que *C. pluviosum* possui plasticidade para manter estruturas e funcionamento dos tecidos foliares normais na disponibilidade de até 50% da CC.

A análise química da lama (Tabela 5) mostrou que micro/macronutrientes importantes como o fósforo (P) e potássio (K) estão presentes no rejeito de mineração, mas também a lama possui concentrações elevadas de ferro (Fe) comparada aos demais nutrientes, algo esperado devido ao rejeito ser proveniente de mineração de minério de ferro. O ferro embora um micronutriente, quando em excesso pode causar um menor crescimento e desenvolvimento em plantas que não possuem tolerância (JUCOSKI *et al.*, 2016). Metais tóxicos como cromo (Cr), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e alumínio (Al) foram quantificados, mas conforme a Prevenção que é determinada pela resolução CONAMA 420/2009, apenas o Cd está acima dos 1,3 mg.kg⁻¹ sendo seu valor 1,95, mas ainda está dentro do valor estabelecido para agricultura como seguro. O Cr e o Pb estão dentro dos valores de Prevenção da norma (CONAMA, 2009, p.81-84). O Al não possui um valor determinado de quantificação dentro da resolução Conama para solos. O Al e o Fe foram os elementos com maiores concentrações na análise da lama, análises de solos da região feitas antes do rompimento da barragem também encontraram valores altos desses metais (ANDRADE;

LEITE; BACELLAR, 2012). O excesso de Al aumenta a acidez do solo, e as plantas que não possuem uma tolerância apresentam toxicidade aparente como, enrolamento dos bordos e necrose da parte aérea, também tendo redução da parte radicular (GORDIN *et al.*, 2013; TABALDI *et al.*, 2007), esses sintomas de intoxicação na parte aérea não foram observados.

Outro aspecto importante é que *C. pluviosum* cultivadas em lama de mineração da Barragem de Fundão apresenta características normais de desenvolvimento e crescimento, mesmo em condições de redução da disponibilidade hídrica. Portanto, não há toxicidade aparente da lama para a espécie e este substrato pode ser favorecido por um menor aporte de água pois as partículas são muito pequenas (1,19 μm) sendo considerado argila (argila < 2 μm) de acordo com a NBR 6502/1995, e solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água (BEUTLER *et al.*, 2002), com isso, o excesso de água pode ser até mesmo prejudicial e a redução para 50% da capacidade de campo pode ter favorecido as raízes por conter mais poros para a circulação de oxigênio. De fato, espécies arbóreas podem demonstrar inclusive maior potencial hídrico em condições naturais de redução das chuvas em função deste efeito (EWE; STERNBERG, 2002).

A região afetada pelo derramamento da lama em Mariana, MG, apresenta períodos bem definidos de redução das chuvas (INPE, 2019; CLIMATE-DATA.ORG, 2019). A diminuição da disponibilidade hídrica, não foi estressante, nem limitou o crescimento e desenvolvimento de *C. pluviosum*, sendo que as plantas mantiveram o mesmo potencial hídrico, taxas semelhantes de fotossíntese e acumulação de biomassa total em ambos tratamentos. Desse modo, eventos de estiagem como os que ocorrem na região, provavelmente trarão poucos prejuízos para os processos de revegetação com *C. pluviosum*. Sendo assim, os resultados apontam para um potencial uso dessa espécie em projetos de reflorestamento das áreas afetadas pela lama.

5 CONCLUSÃO

A espécie *Cenostigma pluviosum* var. *peltophoroides* é capaz de germinar e tolerar crescimento inicial tanto na CC como em 50% da CC sem prejuízos ao seu crescimento.

Esses promissores resultados devem ser levados em conta como subsídios para trabalhos que tenham por objetivo o estudo de possíveis espécies com potencial para reflorestamento de áreas impactadas por rejeitos de mineração como os da barragem de Fundão.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ, L. E. Revegetação de áreas de mineração: critérios de monitoramento e avaliação do desempenho. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p.47-54, nov. 2004.
- ANDRADE, L. N.; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. A. P. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do parque estadual do Itacolomi - Ouro Preto/MG. **Quaternary Environmental Geosciences**, Paraná, v. 3, n. 1-2, p.01-08, jan. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- BEUTLER, A. N. *et al.* Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p.829-834, maio 2002.
- BOSABALIDIS, A. M.; KOFIDIS, G. Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. **Plant Science**, v. 163, n. 2, p. 375-379, 2002.
- CARVALHO, M. S. *et al.* Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Acta Brasiliensis**, Campina Grande, v. 1, n. 3, p.37-41, set. 2017.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima Mariana**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/mariana-25091/>>. Acesso em: 18 set. 2019.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Publicada no **Diário Oficial da União** nº249, de 30/12/2009, pag.81-84.
- CORREIA, K. G.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Avaliação do crescimento do amendoim (*Arachis hypogaea* L.) submetido a déficit hídrico. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Paraíba, v. 4, n. 2, p.01-07, 2º semestre de 2004.
- COSTA, J. R.; PINHO, J. L. N.; PARRY, M. M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p.443-450, mar. 2008.

CRUZ, Y. C. *et al.* Growth of *Typha domingensis* as related to leaf physiological and anatomical modifications under drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.41, n.64, p. 1-9, 2019.

DÍAZ, A. S. *et al.* Aerenchyma development in different root zones of maize genotypes under water limitation and different phosphorus nutrition. **Biologia Plantarum**, v. 62, p. 561-568, 2018.

EWE, S. M. L.; STERNBERG, L. S. L. Seasonal water-use by the invasive exotic, *Schinus terebinthifolius*, in native and disturbed communities. **Oecologia**, v. 133, p. 441–448, 2002.

FERNANDES, G. W. *et al.* Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza e Conservação**, Brazil, v. 14, n. 2, p.35-45, out. 2016.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

GAGNON, E. *et al.* A new generic system for the pantropical *Caesalpinia* group (Leguminosae). **PhytoKeys**, Zurich, 71: 93, 2016.

GFT. **Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG**. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2016. Disponível em:

http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf. Acesso em: 19 abr. 2020.

GOMES, M. P. *et al.* Efeitos dos rejeitos da indústria de zinco na anatomia e crescimento de plantas jovens de *Salix humboldtiana* Willd. (salgueiro). **Hoehnea**, São Paulo, v. 38, n. 1, p.135-142, mar. 2011.

GORDIN, C. R. B. *et al.* Emergência de plântulas e crescimento inicial do pinhão manso exposto a alumínio. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p.147-156, fev. 2013.

GRISI, F. A. *et al.* Avaliações anatômicas foliares em mudas de café ‘catuaí’ e ‘siriema’ submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p.1730-1736, dez. 2008.

IBAMA. **Laudo Técnico Preliminar**. Mariana: MMA, 2015. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf. Acesso em: 20/04/2020

INPE. **Centro de previsão de tempo e estudos climáticos**. Disponível em: <http://clima.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 19 set. 2019.

JARAMILLO, R. E. *et al.* Root cortical burden influences drought tolerance in maize. **Annals of Botany**, v. 112, p. 429-437, 2013.

JUCOSKI, G. O. *et al.* Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 2, p.720-728, dez. 2016.

LYNCH, J. P. Root phenes that reduce the metabolic costs of soil exploration: opportunities for 21st century agriculture. **Plante Cell Environ**, v. 38, p. 1775-1784, 2015.

PINCELLI, R. P.; SILVA, M. A. Leaf morphological changes in sugarcane cultivars in response to water deficit. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 4, p.546-556, ago. 2012.

PONTES, C. A. *et al.* Influência da temperatura de armazenamento na qualidade das sementes de *Caesalpinia peltophoroides benth.* (sibipiruna). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p.43-48, nov. 2006.

SILVA, L. F. *et al.* Interceptação da chuva pelas copas das espécies de *Caesalpinia pluviosa* DC. (Sibipiruna) e *Tipuana tipu* O. Kuntze (Tipuana) em arborização urbana. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p.307-315, dez. 2008.

SOUZA, C. C. *et al.* Avaliação de métodos de determinação de água disponível e manejo da irrigação em terra roxa sob cultivo de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p. 338-342, 2000.

TABALDI, L. A. *et al.* Physiological and oxidative stress responses of four potato clones to aluminum in nutrient solution. **Brazilian Journal Of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 3, p.211-222, dez. 2007.