

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

HELDER IVO PANDOLFI MARQUES

**ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS EM CACAUEIRO
(*THEOBROMA CACAO* L.) CV. CATONGO
CULTIVADO SOB CONDIÇÕES DE HIPÓXIA NA
PRESENÇA DE SILÍCIO**

**São Mateus, ES
Fevereiro de 2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA TROPICAL**

**ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS EM CACAUEIRO
(*THEOBROMA CACAO* L.) CV. CATONGO
CULTIVADO SOB CONDIÇÕES DE HIPÓXIA NA
PRESENÇA DE SILÍCIO**

HELDER IVO PANDOLFI MARQUES

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre

**São Mateus, ES
Fevereiro de 2015**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

M357a Marques, Helder Ivo Pandolfi, 1986-
Alterações fisiológicas em cacauzeiro (*Theobroma cacao L.*)
cv. Catongo cultivado sob condições de hipóxia na presença de
silício / Helder Ivo Pandolfi Marques. – 2015.
63 f. : il.

Orientador: Rodrigo Sobreira Alexandre
Coorientador: Marco Antônio Galeas Aguilar, Marcos Goes
Oliveira, Edilson Romais Schmildt.
Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário
Norte do Espírito Santo.

1. Cacau. 2. Cacauzeiro. 3. Fisiologia Vegetal. 4. Hypoxia I.
Alexandre, Rodrigo Sobreira. II. Aguilar, Marco Antônio Gáneas.
III. Oliveira, Marcos Góes. IV. Schmildt, Edilson Romais. V.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário
Norte do Espírito Santo. VI. Título.

CDU: 63

**ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS EM CACAUEIRO
(*THEOBROMA CACAO* L.) CV. CATONGO
CULTIVADO SOB CONDIÇÕES DE HIPÓXIA NA
PRESENÇA DE SILÍCIO**

HELDER IVO PANDOLFI MARQUES

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical, para obtenção do título de Mestre em Agricultura Tropical.

Aprovada em: 24/02/2015

Prof. Dr. Rodigo Sobreira Alexandre
Universidade Federal do Espírito Santo
(Orientador)

Dr. Marco Antônio Galeas Aguiar
CEPLAC ES
(Co-orientador)

Dr. Marcos Goes Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
(Co-orientador)

Prof. Dr. Edilson Romais Schmidt
Universidade Federal do Espírito Santo
(Co-orientador)

À minha família, especialmente meu avô David Pandolfi (*in memoriam*).

Aos meus amados pais, Helder José e Maria Davina.

A Minha querida irmã, Alcea.

A minha linda e amada esposa, Sâmia Liberato Caon.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelos livramentos, por não ter me deixado faltar nada e por sempre me direcionar o melhor caminho que tenho que seguir.

À minha esposa Sâmia Liberato Caon, pelo amor, carinho, paciência, dedicação, incentivo, confiança e sempre estar ao meu lado.

À minha mãe, Maria Davina Pandolfi Marques, pelas orações em meu favor, pelo apoio, por acreditar e me incentivar a correr atrás dos meus ideais.

Ao meu pai, Helder José Rosa Marques, por ser um exemplo de pai e amigo, por me amar, por dedicar seu tempo ao bem estar da nossa família e por não deixar faltar nada em minha vida.

A minha irmã Alcea Maria Pandolfi Marques e meu cunhado Rômulo por sempre estarem ao meu lado me apoiando e me incentivando.

Ao meu sogro Rock Lane Caon, minha sogra Vânea Liberato Caon, minha cunhada Sara Liberato Caon e meu amigo Artur Henrique por todo apoio.

Ao orientador, professor e amigo, Dr. Rodrigo Sobreira Alexandre, pelo ensinamento, experiência de vida e apoio que me foi passado.

Aos meus co-orientadores, professor Edilson Romais Schmildt, Marco Antonio Galeas Aguilare Marcos Goes Oliveira pelas relevantes contribuições ao desenvolvimento do trabalho.

As minhas colegas de trabalho Eliane Pina, Irlei Gonçalves, Haryanne Mabel e Aparecida Clara pela força, amizade e ajuda.

A CEPLAC de Linhares pelo fornecimento das sementes.

Ao professor Fabricio de Ávila Rodrigues e seu orientando Dr. Alessandro Antonio Fortunato, da Universidade Federal de Viçosa, por passar experiências de trabalhos anteriores com silício e doar reagentes necessários para preparo da solução de silício utilizada no experimento.

Ao Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES) pela oportunidade de realizar o curso.

Aos amigos Joel Cardoso Filho, Francisco de Assis Ferreira, Francisco de Castro Neto, Alex Campanharo, Kristhiano Chagas, José Alvarenga e demais colegas, por toda ajuda e companheirismo.

A todos, muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULOS	7
2.1 SILÍCIO E AERAÇÃO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA SOBRE OS PIGMENTOS FOOSSINTÉTICOS E CRESCIMENTO DE MUDAS DE CACAU	8
RESUMO	8
ABSTRACT	9
INTRODUÇÃO	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
CONCLUSÕES	20
REFERÊNCIAS.....	21
2.2 TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA EM MUDAS DE CACAU CULTIVADAS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA COM DIFERENTES DOSES DE SILÍCIO E NÍVEIS DE AERAÇÃO	26
RESUMO	26
ABSTRACT	27
INTRODUÇÃO	28
MATERIAL E MÉTODOS.....	29
RESULTADOS E DISCUSSÃO	31

CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS.....	39
3. CONCLUSÕES GERAIS	45
4. REFERÊNCIAS.....	46

RESUMO

MARQUES, Helder Ivo Pandolfi; M.Sc.; Universidade Federal do Espírito Santo; fevereiro de 2015; **Alterações fisiológicas em cacauero (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo cultivado sob condições de hipóxia na presença de silício**; Orientador: Rodrigo Sobreira Alexandre, Co-orientadores: Marco Antônio Galeas Aguilár, Marcos Goes Oliveira, Edilson Romais Schmildt.

O cacauero é cultivado em toda região tropical do mundo e sua amêndoa é o principal ingrediente do chocolate. Alguns locais de cultivo tendem a sofrer com alagamento em determinada época do ano. A baixa disponibilidade de oxigênio, provocada pelo alagamento, induz alterações nos processos fisiológicos e morfológicos modificando o desenvolvimento e crescimento das plantas. A aeração da solução nutritiva é necessária para disponibilizar oxigênio para as raízes em plantas cultivadas em sistema hidropônico. O silício é benéfico para várias culturas, principalmente quando submetidas a algum tipo de estresse, o que pode ajudar a aliviar os danos provocados pelo alagamento. Na literatura não há relato do cultivo de cacau com omissão enível de silício, principalmente pela presença do elemento em todos os tipos de solo. Com base nessa prerrogativa, foi realizado um experimento com mudas de cacauero, cv. Catongo. O experimento foi realizado na casa de vegetação do CEUNES, localizada no município de São Mateus–ES. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições sendo uma planta por repetição na primeira e segunda época de avaliação e na terceira foram utilizadas duas plantas por repetição. Os tratamentos

foram distribuídos num arranjo fatorial 2x3x5, sendo com e sem aeração da solução nutritiva, três épocas de avaliação (1, 10 e 30 dias) e 5 níveis de silício (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 mmol L⁻¹). As avaliações realizadas foram divididas em dois capítulos, o primeiro avaliou as variáveis de crescimento, teor foliar de silício e teores de pigmentos fotossintéticos. O segundo capítulo, reuniu os caracteres de fluorescência da clorofila *a* e trocas gasosas. Com base nos resultados, foram observados a influência da falta de aeração no teor foliar de silício, degradação de pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila *a* e trocas gasosas. Pode ser observado efeito isolado do silício sobre algumas variáveis fisiológicas de plantas não submetidas ao estresse, bem como em plantas submetidas, nesse caso aliviando o estresse provocado pela falta de aeração.

Palavras-chave: *Theobroma cacao* L., hipóxia, ácido monossilícico, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, pigmentos fotossintéticos.

ABSTRACT

MARQUES, Helder Ivo Pandolfi; M.Sc.; Federal University of Espírito Santo; february of 2015; **Physiological changes in cocoa (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo grown under hypoxic conditions in the presence of silicon**; Adviser: Rodrigo Sobreira Alexandre, Committeed Members:Marco Antônio Galeas Aguiar, Marcos Goes Oliveira, Edilson Romais Schmildt.

The cocoa is grown throughout the tropical region of the world and its almond is the main ingredient of chocolate. Some cultivation sites tend to suffer from flooding during a period of the year. The low availability of oxygen caused by flooding, induces changes in physiological and morphological processes, modifying the development and growth of plants. Aeration of the nutrient solution is necessary to provide oxygen to the roots of plants grown hydroponically. Silicon is beneficial for several crops, especially when subjected to some kind of stress, can help alleviate the damage caused by flooding. In the literature, there is no report of cocoa cultivation with omission and silicon level, mainly because the presence of this element in all soil types. Based on this prerogative, an experiment was conducted with cocoa seedlings cv. Catongo. The experiment was conducted in CEUNES greenhouse, located in the municipality of São Mateus-ES, in a completely randomized design with four repetitions being one plant on each repetition in the first and second evaluation time and the third used two plants per replicate. The treatments were arranged in a 2x3x5 factorial arrangement, being with and without aeration of the nutrient solution, the three sampling times and five silicon levels (0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mmol L⁻¹). The evaluations were divided into two chapters, the first objective was to evaluate the growth variables, foliar silicon content and

photosynthetic pigments content. The second chapter, gathered the character fluorescence of chlorophyll *a* and gas exchange. Based on the results, were observed influence of lack of aeration leaves concentration of silicon, degradation of photosynthetic pigments, chlorophyll fluorescence and gas exchange. It can be seen the isolated effect of silicon on some physiological parameters of plants not subjected to stress, as well as in plants submitted in this case relieves stress caused by lack of aeration.

Key words: *Theobroma cacao* L., hypoxia, monosilicic acid, gas exchange, chlorophyll *a* fluorescence, photosynthetic pigments.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) é uma eudicotiledônea que pertence a família Malvaceae (APG III, 2009), em que 22 espécies fazem parte do gênero *Theobroma* L., sendo esta espécie a de maior exploração comercial e importância agrônômica (GARCIA et al., 2014). O cacauzeiro é uma planta arbustiva de sub-bosque e tronco liso, de folhas grandes e oblongas, podendo atingir 20 metros de altura em seu ambiente natural. Sobre condições de cultivo, sua altura está entre 3 e 5 metros, sendo que as plantas propagadas por enxertia tendem a ter um porte menor. Suas pequenas flores se inserem sobre o tronco e ramos, onde também surgem os frutos. É uma espécie diplóide ($2n=2x=20$) (DAVIE, 1935) que possui ampla variabilidade genética nas características de tamanho, forma e cor dos frutos e das sementes, resistência a doenças e pragas, vigor e tamanho da árvore (ALMEIDA et al., 2009).

Cultivado em todas as regiões tropicais do planeta, o país de maior produção de amêndoas secas de cacau é a Costa do Marfim, com uma produção de um milhão e 550 mil toneladas na safra 2013/2014, que corresponde a 37,7% da produção mundial. O Brasil, nesta mesma safra, produziu 200 mil toneladas, mantendo a mesma produção ao longo das últimas safras, com apenas pequena variação (INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION - ICCO, 2014).

Os grãos de cacau são fermentados e secos, tornando-se o ingrediente fundamental na fabricação de chocolate. Seus grãos também são usados para produção de manteiga de cacau, licor, vinho, destilado, cosméticos, sucos,

doces e sorvetes (ALMEIDA & VALLE, 2009; AFOAKWA et al., 2013). O sabor agradável é o principal atrativo para o grande consumo destes produtos, principalmente o chocolate. Além disso, a riqueza de substâncias benéficas para a saúde também é um atrativo para o consumo. Ramljak et al. (2005), usando procianidina pentamérica *in vitro*, preparadas a partir das sementes de *Theobroma cacao*, observaram inibição da proliferação de células de câncer da mama em humanos. A concentração de polifenóis em amêndoas de cacau varia entre 12 e 18% do seu peso total, cujo composto é responsável pela grande capacidade antioxidante, que possui ainda atividade cardioprotetora e anti-inflamatória (RUSCONI, 2010; EFRAIM et al., 2011).

Evidências arqueológicas, datadas de pelo menos 1000 a.C., indicam a Mesoamérica como primeiro centro da domesticação do cacau (HENDERSON et al., 2007; POWIS et al., 2011), que está em concordância com o aparecimento da palavra cacau na linguagem usada pelos zapotecas e datada de 850 a.C. (BROWN, 2009). No entanto, estudos apontam como centro de origem do cacau América do Sul, região do Alto Amazonas, próximo da fronteira Colômbia-Ecuador, na região oriental da Cordilheira dos Andes (CHEESMAN, 1944). Para ser domesticado na América Central, um pequeno número de indivíduos atravessou os Andes, levado pelo homem, para serem cultivados e depois foram espalhados nessa região (MOTAMAYOR et al., 2002).

No melhoramento genético, o *T. cacao* L. tem sido dividido em três grandes grupos: Criollo, Forasteiro e Trinitário (CHEESMAN, 1944; JI et al., 2012). Os Criollos e Forasteiros estão divididos pelas suas direções de espalhamento a partir do seu centro de origem. O Criollo foi cultivado na Venezuela, na Colômbia, no Ecuador, no norte da América Central e no México a partir do seu centro de origem. Este grupo é composto por variedades que produzem frutos com grãos graudos, brancos ou rosados, de melhor sabor e chocolates finos, porém, tem elevada susceptibilidade para doenças (ALMEIDA & VALLE, 2007). O Forasteiro tem sido cultivado primeiramente no norte do Brasil e nas Guianas, também vindo do centro de origem da espécie. As cultivares deste grupo são amplamente cultivadas devido a seus altos rendimentos e resistência às doenças, sendo que, aproximadamente 80% do cacau produzido mundialmente provêm deste grupo. Na Bahia, originaram-se as seguintes cultivares forasteiras de cacau: Pará, Parazinho e Maranhão. Mutações destas variedades resultaram no cacau Catongo (MORORÓ, 2012). O

grupo Trinitário é proveniente de cruzamentos naturais entre Crioulos e Forasteiros do baixo Amazonas, apresentando características distintas dos outros dois (MOTAMAYOR et al., 2002).

A cultivar Catongo possui sementes brancas e despigmentação das folhas tenras. Quando ocorre polinização cruzada com outras cultivares perde essas características. É altamente susceptível à vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa*) e apresenta moderada resistência à podridão-parda (*Phytophthora palmivora*), sendo essas as principais doenças que afligem as plantações brasileiras (SANTOS et al., 2009; PACHECO et al., 2013). Seu nome foi dado por ter sido identificado na fazenda Catongo, na segunda metade dos anos 30, na antiga localidade de Pirangi, hoje município de Itajuípe (BA) (DANTAS NETO et al., 2005).

No entanto, Motamayor et al. (2008) propõem uma nova classificação dos grupamentos genéticos do cacau, ao invés dos três grupos tradicionais (Criollo, Forasteiro e Trinitário) dez grandes grupos ou grupos: Marañon, Curaray, Criollo, Iquitos, Nanay, Contamana, Amelonado, Purus, Nacional e Guiana. Esta nova classificação refletiria com mais precisão a diversidade genética, ajudando os responsáveis pelos bancos de germoplasma e geneticistas conservarem, gerirem e explorarem melhor os recursos genéticos de cacau, porém, dificultaria um pouco na didática.

Conhecer as respostas fisiológicas do cacaueiro quando ocorre variação de nutrientes é útil para o estabelecimento de normas racionais de cultivo (AMORIM et al., 1964). As exigências nutricionais de um elemento e o crescimento das plantas variam de acordo com a espécie e dependem da eficiência de absorção e de translocação deste elemento. É importante saber as respostas fisiológicas das plantas não só para o grupo de elementos que hoje são classificados como essenciais, mas também para outros elementos, como é o caso do silício. Mesmo não sendo classificado como essencial, têm-se relatos na literatura de seus benefícios para várias espécies.

Os benefícios do silício para as plantas são revelados na maioria das vezes quando estas são submetidas a estresses bióticos e abióticos. No caso de estresses bióticos, este elemento pode promover a redução da intensidade de doenças (BOTELHO et al., 2005; LIMA et al., 2010; YE et al., 2013; TESFAGIORGIS et al., 2014) e indução de resistência contra o ataque de insetos-pragas (POLANCZYK et al., 2008; PINTO et al., 2012). Para os estresses abióticos, os benefícios podem

aparecer com este elemento regulando a absorção de nutrientes (ÁVILA et al., 2010; HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014), minimizando os efeitos tóxicos de metais (MAKSIMOVIC et al., 2012; WU et al., 2013; KIM et al., 2014), aumentando a tolerância à deficiência hídrica (CHEN et al., 2011; AHMED et al., 2014), aliviando a deficiência de oxigênio nas raízes (BALAKHNINA et al., 2012) e aumentando a tolerância à salinidade (YIN et al., 2013). Podendo ainda o silício promover outros benefícios para a planta, mesmo sem ela estar em condições adversas, como no incremento da produtividade de diferentes culturas (KORNDÖRFER & LEPSCH, 2001; MARODIN et al., 2014), no aumento da capacidade fotossintética, na concentração de pigmentos e no aumento da biomassa (SILVA et al., 2012; TAHIR et al., 2013; FERRAZ et al., 2014; GUERRA et al., 2014).

Em alguns casos, o silício pode interferir na arquitetura da planta, tornando as folhas mais eretas, aumentando assim a interceptação da radiação solar e a eficiência fotossintética (MARODIN et al., 2014).

O silício é o segundo elemento mais abundante no solo, sendo o primeiro oxigênio (MA & YAMAJI, 2006). O óxido de silício (SiO_2) é o mineral mais abundante no solo, sendo a base para estrutura da maioria dos argilominerais. Em razão do avançado grau de intemperização em que se encontram os solos tropicais, o silício é encontrado basicamente na forma de quartzo, opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e outras formas não-disponíveis às plantas (BARBOSA FILHO et al., 2001). As plantas absorvem o silício da solução do solo na forma ácido monossilícico (H_4SiO_4), quando o pH está abaixo de 9,0 (SILVA & BOHNEN, 2001). No entanto, se a concentração de ácido monossilícico exceder 2 mmol L^{-1} , o composto se polimeriza, formando opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (WU et al., 2013).

Nas plantas, o silício é transportado a partir da raiz pelo xilema sendo sua distribuição e acumulação dependente das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta. O elemento é imóvel na planta e concentrado no tecido epidérmico como uma fina camada de membrana de sílica-celulose associada com os íons de cálcio e compostos de pectina nas lâminas e bainhas foliares, colmos, cascas e raízes. A maior parte do silício absorvido pela planta é depositada nas folhas, logo abaixo da cutícula dos tecidos da epiderme, mais precisamente nas paredes celulares mais externas, conferindo resistência às doenças fúngicas por dificultar a penetração de hifas e ataque de insetos. O silício tem maior concentração nos

tecidos mais velhos, por apresentar característica de não ser móvel dentro da planta (MA & YAMAJI, 2006).

Segundo Epstein (1999), todas as plantas cultivadas em solo contêm silício em seus tecidos e o teor nas plantas varia muito entre espécies e mesmo cultivares. No caso, podendo variar de 1 a 100 g kg⁻¹, que é a maior amplitude entre os elementos minerais (WU et al., 2013). Neste mesmo princípio, as plantas podem ser classificadas em acumuladoras, com teores superiores a 1 g kg⁻¹ de Si na massa seca, intermediária, com 0,5 a 1 g kg⁻¹ de Si e não acumuladoras, possuindo concentração de Si na massa seca inferior a 0,5 g kg⁻¹ de Si (MA & YAMAJI, 2006).

As principais culturas acumuladoras de silício são a cana-de-açúcar, trigo e arroz. As respostas destas culturas à aplicação de silício têm sido amplamente estudadas, tanto em solução nutritiva, como via solo e foliar. A maior quantidade de silício é absorvida pela cana (300-700 kg de Si ha⁻¹), seguido de arroz (150-300 kg de Si ha⁻¹) e trigo (50-150 kg de Si ha⁻¹). Em média, as plantas absorvem de 50 a 200 kg de Si ha⁻¹ (MEENA et al., 2014). Os benefícios tendem a estar mais pronunciados nas plantas que apresentam maior absorção deste elemento.

A absorção de nutrientes e água pelo cacauzeiro é afetada por condições de hipóxia ou anoxia em torno do sistema radicular provocada por alagamento (REHEM et al., 2009). O crescimento de raízes em ambiente com baixa disponibilidade de O₂ afeta as plantas sensíveis de diversas formas, diminuindo o crescimento, a produtividade (JACKSON & COLMER, 2005; SHIONO & YAMADA, 2014), a fotossíntese e a condutância estomática foliar, também inibe a formação de botões florais, abscisão de frutos e aumenta a gravidade de doenças (KOZLOWSKI, 1997).

As plantas podem se adaptar a baixa aeração no seu sistema radicular utilizando adaptações morfológicas, anatômicas e fisiológicas importantes, que envolvem a formação de novas raízes adventícias, aerênquimas e uma barreira tornando mais difícil a perda radial de O₂ (SHIONO & YAMADA, 2014). No entanto, esta barreira poderá reduzir a capacidade de absorção de nutrientes pela planta (CHENG et al., 2010). Muitas espécies que não tem capacidade de utilizar essas adaptações podem em algumas horas, dias ou semanas não sobreviver sem um arejamento suficiente das raízes.

A principal restrição à disponibilidade de oxigênio para as raízes é resultante do excesso de água, pelo menos para as espécies mal adaptadas, pois a difusão de oxigênio através da água é mais lenta do que no ar (JACKSON & COLMER, 2005).

Em algumas áreas de cultivo do cacau no Brasil pode ocorrer alagamento em certos períodos do ano de maior quantidade de chuva, tornando por um período de tempo o solo de cultivo hipóxico.

O presente trabalho teve como objetivo estudar as respostas fisiológicas e morfológicas de mudas de cacau cv. Catongo cultivadas em diferentes concentrações de silício com e sem a influência da aeração da solução nutritiva.

2. CAPÍTULOS

2.1 SILÍCIO E AERAÇÃO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA SOBRE OS PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS E CRESCIMENTO DE MUDAS DE CACAU

RESUMO

O efeito do silício sobre o desenvolvimento e as características fotossintéticas de plantas de cacau é pouco conhecido. Os benefícios do silício para as plantas são mais evidentes em condições de estresse. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de doses de silício sobre o crescimento e a concentração de pigmentos fotossintéticos em mudas de cacau (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo cultivadas com e sem aeração da solução nutritiva. O experimento foi instalado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos foram distribuídos num arranjo fatorial 2x3x5, sendo com e sem aeração da solução nutritiva, três épocas de avaliação (1, 10 e 30 dias) e 5 doses de silício (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 mmol L⁻¹). Foi determinada a massa seca da folha, da raiz e do caule, utilizando uma planta por repetição nas duas primeiras épocas de avaliação e duas plantas na terceira. Foram determinados os teores de clorofila *a*, *b*, total, razão *a/b* e carotenóides da terceira folha madura, na qual foi utilizada uma planta por repetição. A falta de aeração reduziu em 22% a concentração foliar de silício. Para os tratamentos com aeração, a concentração foliar de silício respondeu linearmente ao aumento das doses de silício. A média da relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea dos tratamentos sem aeração, após 10 e 30 dias, foram menores que nos tratamentos com aeração. Aos 30 dias, os valores médios da concentração de clorofila *a* e total foram 14,1 e 15,1%, respectivamente menores nos tratamentos sem aeração. Para a razão clorofila *a/b*, o valor da média dos tratamentos sem aeração foi 10,4% maior, depois de 30 dias. Concentração próxima

a 0,75 mmol L⁻¹ de Si, foi que proporcionou menor valor da razão clorofila *a/b* após 30 dias nos tratamentos sem aeração. Nesse caso, o silício aliviou dano no sistema fotossintético, provocada pela falta de aeração.

Palavras-chaves: *Theobroma cacao* L., ácido monossilícico, nutrição mineral, hipóxia.

ABSTRACT

The effect of silicon on the development and photosynthetic characteristics of cocoa plants is little known. The benefits of silicone to plants are more evident in conditions of stress. The aim of this study was to evaluate the effect of silicon doses on growth and the concentration of photosynthetic pigments in cocoa (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo plants grown with and without aeration of the nutrient solution. The experiment was completely randomized design with four replications. The treatments were arranged in a 2x3x5 factorial arrangement, being with and without aeration of the nutrient solution, the three sampling times (1, 10 and 30 days) and 5 silicon levels (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mmol L⁻¹). We determined the dry weight of leaf, root and stem, using one plant per repetition in the first two periods of evaluation and two plants in the third. Were determined contents of chlorophyll *a*, *b*, total, *a/b* ratio and carotenoid the third mature leaf, where it was used by a plant repetition the three assessment times. The lack of aeration was reduced by 22% the foliar concentration of silicon. For treatments with aeration, the foliar concentration of silicon has responded linearly to increasing doses of silicon. The average dry matter root/shoot dry mass of the treatments without aeration, after 10 and 30 days was lower than in treatments with aeration. After 30 days, the average values of chlorophyll *a* and chlorophyll were 14,1 and 15,1%, respectively, lower in treatments without aeration. For the ratio of chlorophyll *a/b*, the average value of the treatments without aeration was 10,4% higher after 30 days. Concentration close to 0.75 mmol L⁻¹ Si, has provided the lowest value of the ratio of chlorophyll *a/b* after 30 days in treatments without aeration. In this case, silicon relieved the photosynthetic system failure caused by lack aeration.

Keywords: *Theobroma cacao* L., monosilicic acid, mineral nutrition, hypoxia.

INTRODUÇÃO

Nativo das florestas tropicais da América e domesticado na Mesoamérica a pelo menos 1000 a.C. pelos Mayas (HENDERSON et al., 2007; POWIS et al., 2011), *Theobroma cacao* L. é uma espécie arbórea de sub-bosque, que é cultivada tradicionalmente em todo o mundo à sombra de outras árvores. No entanto, o cultivo a pleno sol é crescente, principalmente pelo alto rendimento de amêndoas por área, podendo incrementar 50% quando comparado com plantas cultivadas sob sombra (KOKO et al., 2013). Zonas tropicais dos continentes americanos, asiáticos e africanos são as principais regiões produtoras de cacau. Nessas áreas a precipitação total muitas vezes excede largamente a evapotranspiração, criando condições de baixa disponibilidade de oxigênio para as raízes, provocada pelo alagamento do solo.

O crescimento de plantas de cacau em ambiente alagado pode acarretar em redução na área foliar, na condutância estomática e na taxa fotossintética, além de induzir a formação de lenticelas e raízes adventícias (ALMEIDA & VALLE, 2007). A baixa disponibilidade de oxigênio para a raiz também afeta negativamente a absorção dos nutrientes pela planta, pois esta depende muitas vezes da energia metabólica (ATP) originada da respiração das raízes (ARMSTRONG, 1979; DENNIS et al., 2000).

Estudos do efeito da absorção de macro e micronutrientes essenciais são escassos para cultura do cacau. Para nutrientes não essenciais, os estudos ainda são menores. O silício, elemento não essencial, promove efeitos benéficos, para diversas espécies de plantas, como o aumento da produtividade (KORNDÖRFER et al., 2001; MARODIN et al., 2014), da capacidade fotossintética, da concentração de pigmentos e da biomassa (SILVA et al., 2012; TAHIR et al., 2013; GUERRA et al., 2014). Normalmente, os efeitos do silício são mais evidentes em plantas que acumulam silício na parte aérea. No entanto, os efeitos são expressos mais claramente quando as plantas estão sobre estresses abióticos ou bióticos (MA & YAMAJI, 2006).

Plantas que crescem em solos contêm alguma forma de silício em seus tecidos, pois todos os solos têm o elemento na forma disponível para planta (MA & YAMAJI, 2006). Para creditar que determinada planta responde positivamente ou negativamente a absorção de um nutriente, há necessidade de cultivá-la em um

ambiente onde o nutriente fique disponível e em outro omissivo. O efeito negativo da falta de silício para algumas espécies só foi observado quando se passou a cultivá-las em solução nutritiva (VOOGT & SONNEVELD, 2001).

O cultivo em solução nutritiva, dependendo da aeração da solução, pode proporcionar uma condição de hipóxia ou anóxia para as raízes. A aeração da solução busca disponibilizar oxigênio, fazendo com que se tenha uma renovação do oxigênio disponibilizado para as raízes, onde a falta da aeração da solução pode simular o cultivo em solo alagado (HOAGLAND & ARNON, 1950; KRATKY, 1993).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do silício sobre o crescimento e concentração de pigmentos fotossintéticos em mudas de cacau cv. Catongo cultivadas sob doses de silício, com e sem aeração da solução nutritiva.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação, na fazenda experimental do Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado no município de São Mateus-ES. Foi utilizado o cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo, em que suas sementes foram extraídas de frutos maduros coletados na estação da CEPLAC, município de Linhares-ES. O experimento foi instalado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições sendo uma planta por repetição na primeira e segunda época de avaliação e na terceira foram utilizadas duas plantas por repetição. Os tratamentos foram distribuídos num arranjo fatorial 2x3x5, sendo com e sem aeração da solução nutritiva, três épocas de avaliação (1, 10 e 30 dias) e 5 níveis de silício (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 mmol L⁻¹).

As sementes, após esterilização superficial com hipoclorito de sódio 0,5% durante 3 minutos, foram lavadas em água corrente, selecionadas quanto ao tamanho e colocadas para pré-germinar por dois dias em bandejas com água. Após esse período, as sementes pré-germinadas foram colocadas em bandejas plásticas, contendo areia lavada com HCl 5% e esterilizada por autoclavagem. A irrigação das plântulas foi realizada diariamente com água destilada, por um período de 30 dias. Após isso, as plântulas foram selecionadas quanto ao tamanho, lavadas e transferidas, em número de quatro, para vasos de polietileno, pintados externamente na cor alumínio, envolvidos com sacola plástica internamente, contendo 7,0 litros de

solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) nº 2, pH 6,0, com $\frac{1}{4}$ da força iônica modificada para cada nível de silício. O pH foi corrigido diariamente com solução de NaOH 0,1 N e de HCL 0,1 N, juntamente com o volume da solução. O silício foi fornecido como ácido monossilícico, sendo obtido pela passagem do silicato de potássio através de uma resina de troca de cátions (Amberlite IR-120B, H⁺ forma, Sigma-Aldrich, São Paulo, Brasil) (MA et al., 2002).

Decorridos 30 dias de cultivo das plantas em solução nutritiva, procedeu-se a aplicação dos tratamentos com os níveis de silício. Após mais 30 dias de cultivo, foram instalados os tratamentos com e sem aeração. Depois de 1, 10 e 30 dias da instalação dos tratamentos com e sem aeração, foram coletadas uma planta por parcela para as duas primeiras épocas de avaliações e duas para a última. Depois as plantas coletadas foram lavadas em água corrente, em HCl 0,1 N e, em seguida, lavadas em água destilada e separadas em raízes, caules e folhas. Após a secagem em estufa a 60° C, até peso constante, determinou-se a massa seca da raiz, do caule e da folha. Os tecidos das diferentes partes foram moídos em moinho Willey. Foram determinados os teores de silício das folhas conforme Embrapa (1997), somente da coleta de 30 dias após instalação dos tratamentos com e sem aeração.

Os teores de pigmentos fotossintéticos foram determinados da terceira folha madura. Após incubação de três discos foliares (0,5 cm²) em 4 mL de dimetilsulfóxido (DMSO) em banho-maria a 65° C, durante 24h no escuro, as leituras de absorvância dos extratos foram feitas em um espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 470, 645 e 663 nm. Os discos foliares, após a leitura, foram colocados em estufa de ventilação forçada de ar, a 60° C, durante 72 h, para a obtenção da biomassa seca. Os teores de clorofila *a*, *b*, razão *a/b*, total e carotenóides foram expressos em mg g⁻¹ de massa seca (MS) e determinados de acordo com Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987), utilizando as seguintes equações: (i) Clorofila *a* = (12,7 x A663) - (2,69 x A645); (ii) Clorofila *b* = (22,9x A645) - (4,68 x A663); e (iii) Clorofila total = (20,2 x A645 + 8,02 x A663); (iv) Carotenóides (xantofilas + carotenos) = (1000 A470 - 1,82 Ca - 85,02 Cb) / 198; em que A663, A645 e A470 são as absorvâncias em 663, 645 e 470 nm, respectivamente.

Aplicou-se a análise de variância. Todas as interações triplas foram desdobradas, independente das significâncias, e as médias comparadas pelo teste Tukey a 5%. Para os dados quantitativos, realizou-se a análise de regressão. Sendo utilizado o programa Genes (CRUZ, 2013).

RESULTADO E DISCUSSÃO

O teor foliar de silício em plantas de cacau foi influenciado pela sua concentração na solução nutritiva. Nos tratamentos com aeração da solução nutritiva a resposta foi linear crescente (Figura 1), com isso há necessidade de se estudar o crescimento em concentrações superiores a 2 mmol L⁻¹ de silício solúvel. Porém, em concentrações superiores, o elemento se polimeriza, tornando-se menos acessível para a planta (VOOGT & SONNEVELD, 2001; MA & YAMAJI, 2006). Para os tratamentos sem aeração da solução nutritiva, o ponto de máxima absorção foi 1,54 mmol L⁻¹ (Figura 1), que corresponde a 5,9 g Kg⁻¹ de Si foliar.

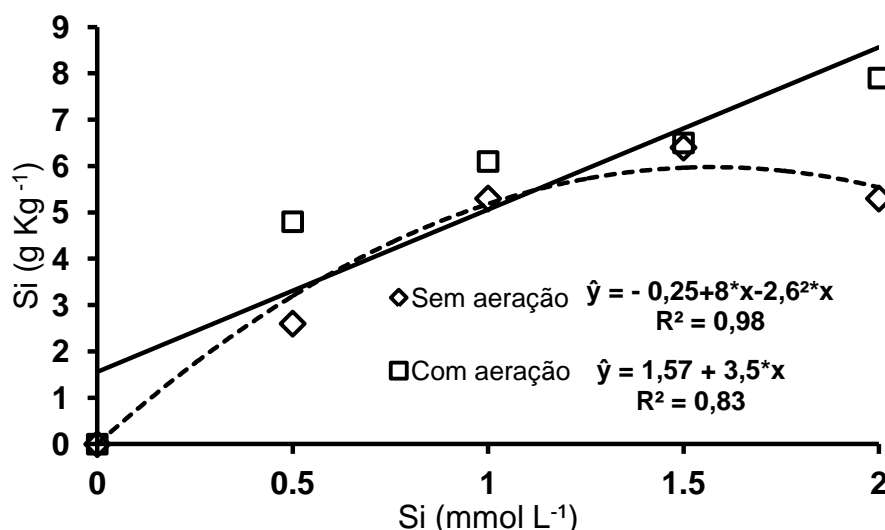


Figura 1. Teor foliar de silício em cacau (*T. cacao*L.) cv. Catongo aos 30 dias após instalação dos tratamentos com e sem aeração sobre diferentes concentrações de Si na solução nutritiva.

(*coeficientes significativos a 5% pelo teste t de Student)

A aeração da solução nutritiva influenciou a concentração de silício foliar, sendo que sem aeração o teor foi 22% menor que nas cultivadas com aeração (Figura 2). Genótipos clonais de cacau cultivados em substrato alagado apresentaram diminuição nos teores foliares de macro e micronutrientes quando comparados com os cultivados sem alagamento (REHEM et al., 2009; BERTOLDE et al., 2012).

A baixa disponibilidade de oxigênio na zona radicular diminui a respiração aeróbica, sendo substituída pela anaeróbica com o tempo (IRFAM et al., 2010). As vias predominantes da respiração anaeróbica são a glicólise e a fermentação, sendo

que estas mantêm uma geração de energia (ATP) em menor quantidade que a fosforilação oxidativa mitocondrial (SAIRAM et al., 2008; SHABALA et al., 2014). Para várias espécies, a absorção de silício é dependente de energia (MA & YAMAJI, 2006).

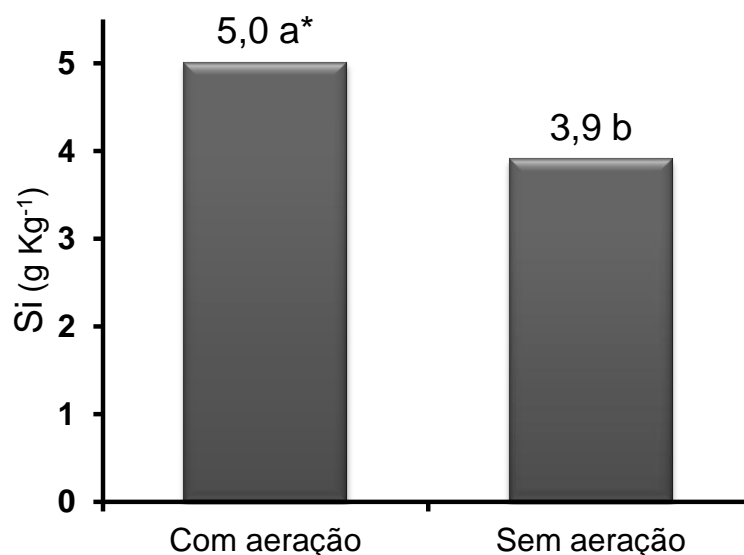


Figura 2. Teor foliar de silício em cacaueiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo em função da aeração da solução nutritiva aos 30 dias. (Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste Tukey a 5% de probabilidade).

Não houve diferenças estatísticas ($P < 0,05$) para as variáveis massa seca do caule, massa seca total e relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea após um dia sem aeração, independente da concentração de silício na solução nutritiva. Para a massa seca do caule e massa seca da raiz, os valores não foram significativos pelo teste F após 1, 10 e 30 dias (Tabela 1). A massa seca foliar com 10 e 30 dias foi 28% e 15%, respectivamente maiores ($P < 0,05$) no tratamento sem aeração.

Trought & Drew (1980), estudando o cultivo do trigo em ambiente anaeróbico, observaram aumento da massa seca da parte aérea acima do encontrado no controle aeróbico. Rehem et al. (2009) ao estudarem o crescimento do cacaueiro em ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio para as raízes, relataram diferenças entre os genótipos, dado pelo grau de tolerância que cada um apresenta. Com isso, classificaram os genótipos de cacaueiros em tolerante, não tolerante e intermediário. Levando em conta a classificação utilizada por Rehem et al. (2009) e as variáveis de crescimento deste experimento, podemos classificar a cv. Catongo como tolerante.

A área de absorção de água e minerais de uma planta é dependente do crescimento radicular. Sendo, o tamanho da área para capturar a luz solar necessária para realizar fotossíntese, dependente do crescimento foliar. O crescimento das raízes e das folhas são dependentes uma da outra e variam em resposta às condições ambientais, de uma maneira que tendem a otimizar a utilização de assimilados e outros recursos (HSIAO & XU, 2000).

A redução do valor da relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea mostra se o crescimento radicular está sendo afetado por algum tipo de estresse quando relacionado com o crescimento da parte aérea. A diminuição no crescimento radicular é comum em muitas plantas sobre estresse de alagamento (WANG et al., 2012).

As médias da relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea dos tratamentos sem aeração, aos 10 e 30 dias, foram ($P < 0,05$) menores que a dos tratamentos com aeração (Tabela 1). Esta diferença pode estar relacionada à paralisação do crescimento da raiz seminal. Estudos com alagamento em cereais relataram que raízes adventícias surgem para substituir parcialmente as raízes seminais danificadas e estas raízes adventícias geralmente desenvolvem mais aerênquimas que as seminais pré-existentes, e com isso melhora a capacidade de oferta de O_2 internamente (TROUGHT & DREW, 1980; COLMER & GREENWAY, 2011). O cultivo de plântulas de cacaueteiro em ambiente alagado provoca a formação de raízes adventícias na base do caule e nas raízes adventícias preexistentes, além do desenvolvimento de lenticelas hipertróficas nas raízes e base do caule (SENA & KOZLOWSKI, 1986; REHEM et al., 2009).

Tabela 1. Massa seca total (MST), massa seca da folha (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca das raízes (MSR) e relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (MSR/MSPA) de cacaueteiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo em diferentes épocas de avaliação e tipo de aeração.

Tempo (dias)	Aeração	MSR (g planta ⁻¹)	MSF (g planta ⁻¹)	MSC (g planta ⁻¹)	MST (g planta ⁻¹)	MSR/MSPA
1	com	0,72a	3,44 a	0,91a	5,07a	0,17 a
	sem	0,61a	2,71 b	0,76a	4,08a	0,18 a
10	com	0,71a	2,69 b	0,80a	4,20a	0,20 a
	sem	0,89a	3,73 a	1,16a	5,78a	0,18 b
30	com	1,45a	5,76 b	2,20a	9,23a	0,19 a
	sem	1,33a	6,76 a	2,57a	10,66a	0,14 b

*Médias seguidas pela mesma letra, para cada tempo, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste Tukey.

Doses crescentes de silício na solução nutritiva não influenciaram significativamente a relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea, massa seca do caule, massa seca da folha, massa seca da raiz e massa seca total, após 1, 10 e 30 dias de instalação dos tratamentos com e sem aeração (Figura 3).

Dependendo da cultura, o aumento da disponibilidade de silício pode favorecer o crescimento da planta, tanto em condições normais ou de estresse. Balakhnina et al. (2012) observaram que o silício influenciou positivamente o crescimento e a produção de biomassa da parte aérea e raízes de cevada em condições adequadas de umidade do solo, porém, não obteve nenhum benefício sobre as condições de alagamento. No entanto, têm-se relatos de que a suplementação de silício alivia o efeito negativo causado por elementos tóxicos para a planta, que afetam o crescimento e acúmulo de biomassa seca.

O silício teve efeito positivo no crescimento e acúmulo de biomassa seca de pepino, sob condições de toxidez de manganês (MAKSIMOVIC et al., 2012) e no milho, sob condições de toxidez de cádmio (MALCOVSKÁ et al., 2014). Bokor et al. (2014) verificaram que a aplicação silício não proporcionou alterações significativas no crescimento do milho e não aliviou o estresse provocado pela toxidez de zinco. A falta de oxigênio no solo pode aumentar a disponibilidade de alguns elementos, podendo ter efeito tóxico para algumas plantas, como é o caso do ferro e do manganês (KOZLOWSKI, 1997).

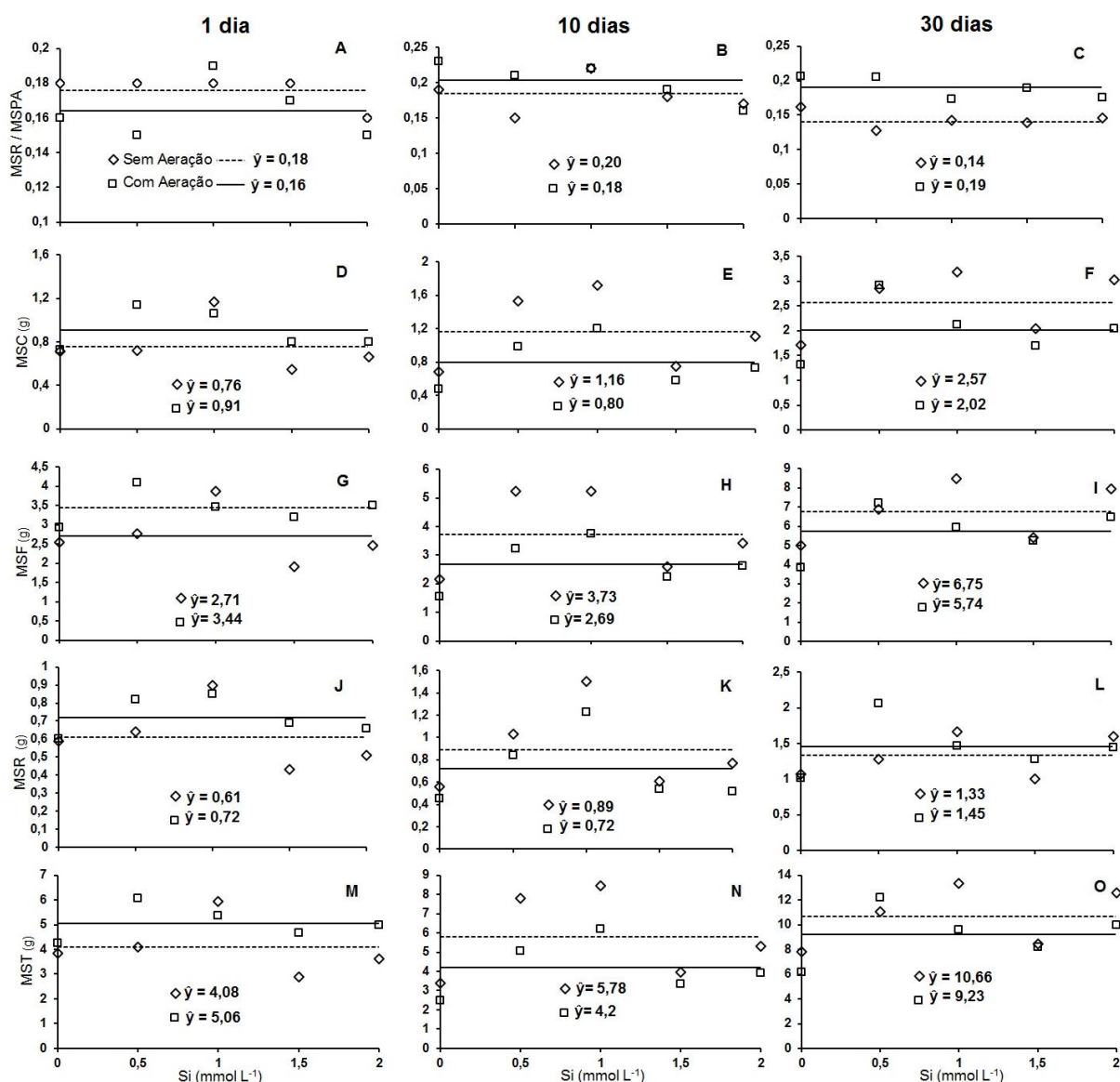


Figura 3. Razão massa seca de raiz/massa seca de parte aérea (MSR/MSPA), massa seca do caule (MSC), massa seca da folha (MSF), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST) de cacaueteiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo cultivado em diferentes concentrações de Si (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mmol L⁻¹) após 1 (A, D, G, J e M), 10 (B, E, H, K e N) e 30 dias (C, F, I, L e O) de instalação dos tratamentos com e sem aeração.

Houve diferença significativa entre os tratamentos com e sem aeração, após 30 dias, para a razão clorofila *a/b*, concentração de clorofila *a* e total. A média das concentrações de clorofila *a* e total foram 14,1% e 15,1%, respectivamente menores para os tratamentos sem aeração do que com aeração (Tabela 2). Plantas cultivadas em condições de alagamento reduzem a concentração de pigmentos fotossintéticos, podendo a degradação ser atribuída ao fechamento dos estômatos (KOZLOWSKI, 1997; BERTOLDE et al., 2012). A redução da concentração de

pigmentos fotossintéticos é um mecanismo de proteção para as estruturas fotossintéticas, pois reduzindo a absorção de luz solar, pode-se reduzir a fotossintese (DU et al., 2012).

Para a razão clorofila *a/b*, a média dos tratamentos sem aeração foi 10,4% maior do que a média dos tratamentos com aeração após trinta dias (Tabela 2). Os dados encontrados corroboram com os observados por Ashraf & Arfana (2005) em plantas de quiabo, que, em situação de alagamento apresentaram aumento nos valores da razão clorofila *a/b*, quando comparado com a testemunha. Mesmo não tendo diferença significativa para a concentração de clorofila *b* entre os tratamentos com e sem aeração após 30 dias, pode-se observar que a concentração deste pigmento reduziu mais que a da clorofila *a*, quando observado os valores da razão clorofila *a/b*, sugerindo que possa ter ocorrido uma conversão de clorofila *b* em clorofila *a*.

Todas as clorofilas identificadas até o momento em plantas superiores são derivadas da clorofila *a* e a redução de clorofila *b* em clorofila *a* é um indicio de dano no sistema fotossintético. A conversão da clorofila *a* em clorofila *b* ocorre com duas reações seguidas de oxigenação, catalisadas pela enzima clorofila *a* oxigenase. Para a conversão de clorofila *b* em clorofila *a* são necessários duas reduções seguidas, a primeira dependente de NADPH, catalisada pela enzima clorofila *b* redutase, e a segunda dependente de ferredoxina, catalisada pela enzima hidroxil-clorofila *a* redutase (HORTENSTEINER & KRAUTLER, 2011).

Não houve diferença significativa nos teores de carotenóides entre os tratamentos com e sem aeração (Tabela 2). Carotenóides são considerado pigmentos acessórios que podem ter a função na fotossíntese de absorção de luz para os complexos de captação e também exercer a função de prevenir a fotossintese das clorofilas sob alta irradiação (STREIT et al., 2005).

Tabela 2. Teores de clorofila *a* (Chl *a*), clorofila *b* (Chl *b*), clorofila total (Chl *a+b*), razão clorofila *a/b* (Chl *a/b*) e carotenóides (Car) em folhas de cacauero (*T. cacao* L.) cv. Catongo após 1, 10 e 30 dias de instalação dos tratamentos com e sem aeração da solução nutritiva.

Tempo (dias)	Aeração	Pigmentos				
		Chl <i>a</i> (mg g ⁻¹)	Chl <i>b</i> (mg g ⁻¹)	Chl <i>a+b</i> (mg g ⁻¹)	Razão Chl <i>a/b</i>	Car (mg g ⁻¹)
1	COM	9,15 a*	2,59 b	11,74 a	3,50 a	2,66a
	SEM	10,04 a	3,17 a	13,21 a	3,19 a	2,81a
10	COM	8,44 a	2,80 a	11,24 a	3,04 a	2,15a
	SEM	7,91 a	2,56 a	10,46 a	3,03 a	2,11a
30	COM	9,23 a	1,84 a	11,11 a	5,00 b	2,55a
	SEM	7,93 b	1,51 a	9,43 b	5,52 a	2,44a

*Médias seguidas pela mesma letra, para cada tempo, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste Tukey.

As doses crescentes de silício na solução nutritiva não influenciaram significativamente os teores de clorofila *a* (Figura 4 A e C), clorofila *b* (Figura 4 D e F), clorofila *a + b* (Figura 4 G, H e I), razão clorofila *a/b* (Figura 4 J e K) e carotenóides (Figura 4 M, N e O) tanto para os tratamentos com e sem aeração. Aos dez 10 dias foram observados aumentos lineares nos teores de clorofila *a* e *b* nos tratamentos com aeração de acordo com o aumento das doses de silício na solução nutritiva. Doses crescentes de silício, neste mesmo período, não influenciaram significativamente os tratamentos sem aeração (Figura 4 B e E).

Os benefícios do silício para as plantas são revelados na maioria das vezes quando estas são submetidas a estresses (MA & YAMAJI, 2006). A razão clorofila *a/b*, após 30 dias de suspensão da aeração, foi influenciada pelas doses de silício (Figura 4L), reduzindo a razão com o aumento da dose até 0,75 mmol L⁻¹, voltando a aumentar com o aumento da dose aplicada. O aumento da razão clorofila *a/b* é um sinal de dano no sistema fotossintético da planta (HORTENSTEINER & KRAUTLER, 2011).

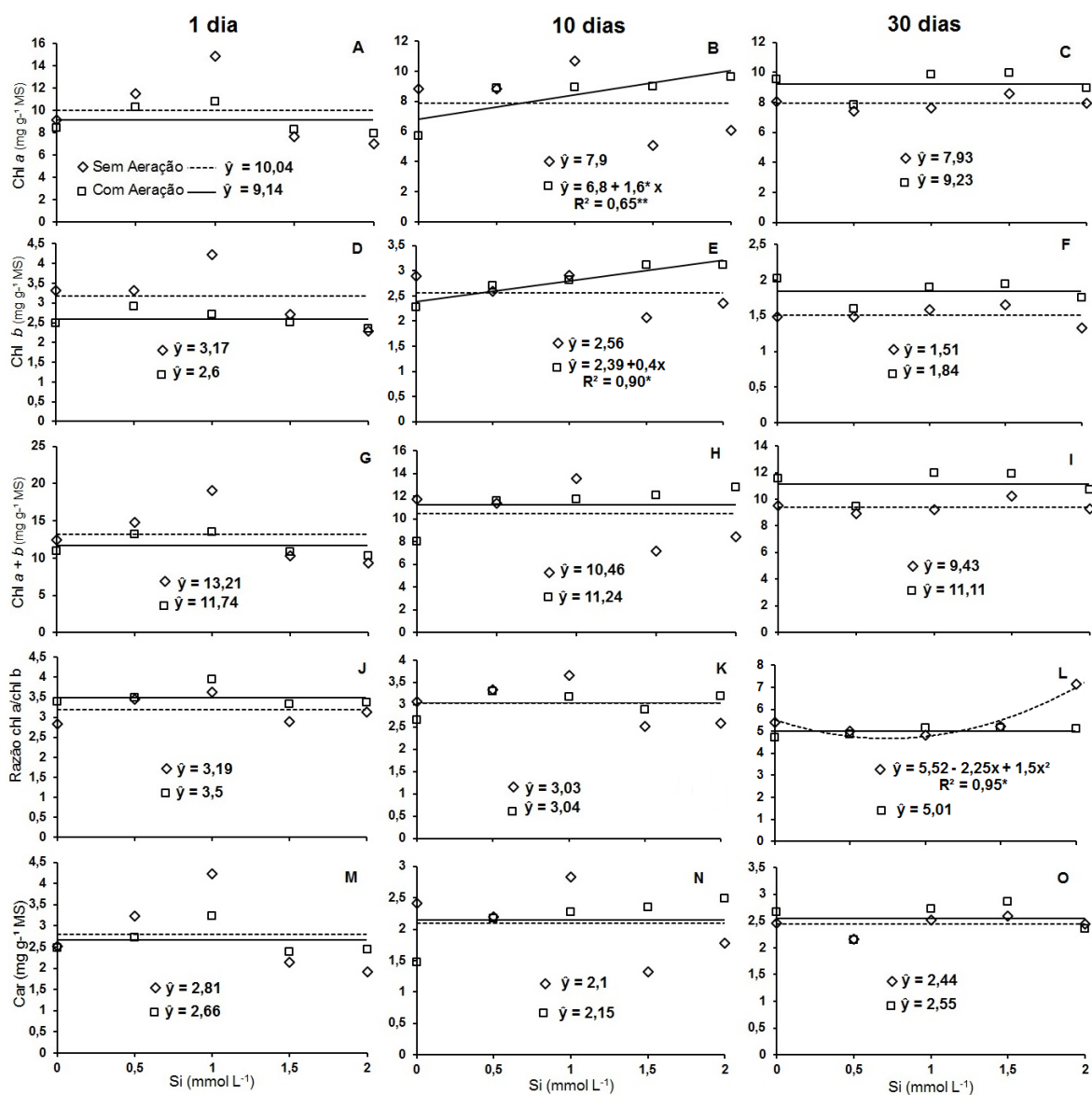


Figura 4. Teor de clorofila *a* (Chl *a* (mg g⁻¹ MS)), clorofila *b* (Chl *b* (mg g⁻¹ MS)), clorofila total (Chl *a+b* (mg g⁻¹ MS)), razão clorofila *a/b* (Razão Chl *a/b*) e teor de carotenóides (Car (mg g⁻¹ MS)) em folhas decacaueiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo cultivadas em diferentes concentrações de Si (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mmol L⁻¹) após 1 (A, D, G, J e M), 10 (B, E, H, K e N) e 30 dias (C, F, I, L e O) de instalação dos tratamentos com e sem aeração.

CONCLUSÕES

Aos 10 e 30 dias sem aeração o crescimento do sistema radicular é afetado, pelo decréscimo na relação massa seca da raiz/massa seca da parte aérea.

A concentração de clorofila *a*, total e razão *a/b* é influenciada negativamente pela falta de aeração aos 30 dias.

Com 30 dias sem aeração, a concentração próxima a 0,75 mmol L⁻¹ de Si, aliviou o sistema fotossintético da planta, através do decréscimo na razão

clorofila *a/b*.

A absorção de silício, por mudas de cacaueteiro cv. Catongo é influenciada negativamente pela falta de aeração.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A-A.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 425-448, 2007.

ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplast: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

ARMSTRONG, W. Aeration in higher plants. **Advanced Botanical Research**, v.7, p. 226-332, 1979.

ASHRAF, M.; ARFAN, M. Gas exchange characteristics and water relations in two cultivars of *Hibiscus esculentus* under waterlogging. **Biologia Plantarum**, v. 49, n. 3, p. 459-462, 2005.

BALAKHNINA, T. I.; MATICHENKOV, V. V.; WLODARCZYK, T.; BORKOWSKA, A.; NOSALEWICZ, M.; FOMINA, I. R. Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. **Plant Growth Regulation**, v. 67, n. 1, p. 35-43, 2012.

BERTOLDE, F. Z.; ALMEIDA, A. A.; PIROVANI, C. P.; GOMES, F. P.; AHNERT, D.; BALIGAR, V. C.; VALLE, R. R. Physiological and biochemical responses of *Theobroma cacao* L. genotypes to flooding. **Photosynthetica**, v. 50, n.3, p. 447-457, 2012.

BOKOR, B.; VACULÍK, M.; SLOVÁKOVÁ, Ľ.; MASAROVIČ, D.; LUX, A. Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 3, p. 733-743, 2014.

COLMER, T. D.; GREENWAY, H. Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O₂ deficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 39-57, 2011.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

DENNIS, E.S.; DOLFERUS, R.; ELLIS, M.; RAHMAN, M.; WU, Y.; HOEREN, F.U.; GROVER, A.; ISMOND, K.P.; GOOD, A.G.; PEACOCK, W.J. Molecular strategies for improving waterlogging tolerance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 342, p. 89-97, 2000.

DU, K.; XU, L.; WU, H.; TU, B.; ZHENG, B. Ecophysiological and morphological adaptation to soil flooding of two poplar clones differing in flood-tolerance. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 207, n.2, p. 96-106, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documento, 1).

HENDERSON, J. S.; JOYCE, R. A.; HALL, G. R.; HURST, W. J.; MCGOVERN, P. E. Chemical and archaeological evidence for the earliest cacao beverages. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n. 48, p. 18937-18940, 2007.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D.I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experiment Station**, Berkeley, California, Circ. 347, p. 32, 1950.

HORTENSTEINER, S.; KRAUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1807, n. 8, p. 977-988, 2011.

HSIAO, T. C.; XU, L-K. Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 350, p. 1595-1616, 2000.

GUERRA, A. M. N. M.; RODRIGUES, F. A.; LIMA, T. C.; BERGER, P. G.; BARROS, A. F.; DA SILVA, Y. C. R. Capacidade fotossintética de plantas de algodoeiro

infectadas por ramulose e supridas com silício. **Bragantia**, v. 73, n. 1, p. 50-64, 2014.

IRFAN, M.; HAYAT, S.; HAYAT, Q.; AFROZ, S.; AHMAD, A. Physiological and biochemical changes in plants under waterlogging. **Protoplasma**, v. 241, n. 1, p. 3-17, 2010.

KRATKY, B. A. A capillary, noncirculating hydroponic method for leaf and semi-head lettuce. **HortTechnology**, v. 3, n. 2, p. 206-207, 1993.

KOKO, L. K.; SNOECK, D.; LEKADOU, T. T.; ASSIRI, A. A.Cacao-fruit tree intercropping effects on cocoa yield, plant vigour and light interception in Côte d'Ivoire. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 5, p. 1043-1052, 2013.

KORNDÖRFER, G.H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and crop yield. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. **Silicon in Agriculture**. Elsevier Science, Amsterdam, v. 8, p. 133-147, 2001.

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology Monograph**, v. 1, n. 1, p. 1-29, 1997.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: COLOWICK, S.P.; KAPLAN, N.O. **Methods enzymology**. New York: Academic, p. 350-382, 1987.

MA, J.F.; TAMAI, K.; ICHI, M.; WU, G.F. A rice mutant defective in Si uptake. **Plant Physiology**, v. 130, n. 4, p. 2111-2117, 2002.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 392-397, 2006.

MARODIN, J. C.; RESENDE, J. T.; MORALES, R. G.; SILVA, M. L.; GALVÃO, A. G.; ZANIN, D. S. Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 220-224, 2014.

MAKSIMOVIĆ, J. D.; MOJOVIĆ, M.; MAKSIMOVIĆ, V.; ROMHELD, V.; NIKOLIC, M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical

accumulation in the leaf apoplast. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 7, p. 2411-2420, 2012.

MALCOVSKÁ, S. M.; DUCAIOVÁ, Z.; MASLANÁKOVÁ, I.; BACKOR, M. Effect of silicon on growth, photosynthesis, oxidative status and phenolic compounds of maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium excess. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 225, n. 8, p. 1-11, 2014.

POWIS, T. G.; CYPHERS, A.; GAIKWAD, N. W.; GRIVETTI, L.; CHEONG, K. Cacao use and the San Lorenzo Olmec. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 21, p. 8595-8600, 2011.

REHEM, B. C.; ALMEIDA, A. F.; MIELKE, M. S.; GOMES, F. P. Efeitos do alagamento do substrato no crescimento e na composição química de genótipos clonais de *Theobroma cacao* L. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 805-815, 2009.

SAIRAM, R.K.; KUMUTHA, D.; EZHILMATHI, K.; DESHMUKH, P.S.; SRIVASTAVA, G.C. Physiology and biochemistry of waterlogging tolerance in plants. **Biology Plant**, v. 52, n. 3, p. 401-412, 2008.

SENA GOMES, A.R.; KOKOZLOLOWSKI, T.T. The effects of flooding on water relations and growth of *Theobroma cacao* var. *catongo* seedlings. **Journal of Horticultural Science**, v. 61, p. 265-276, 1986.

SHABALA, S.; SHABALA, L.; BARCELO, J.; POSCHENRIEDER, C. Membrane transporters mediating root signalling and adaptive responses to oxygen deprivation and soil flooding. **Plant, Cell & Environment**, v. 37, n. 10, p. 2216-2233, 2014.

SILVA O.N.; LOBATO, A.K.S.; AVILA, F.W.; COSTA, R.C.L.; OLIVEIRA NETO, C.F.; SANTOS FILHO, B.G.; MARTINS FILHO, A.P.; LEMOS, R.P.; PINHO, J.M.; MEDEIROS, M.B.C.L.; CARDOS, M.S.; ANDRADE, I.P. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil and Environment**, v. 58, n. 11, p. 481-486, 2012.

STREIT, N. M.; CANTERLE, L. P.; CANTO, M. W.; HECKTHEUER, L. H. H. As clorofilas. **Ciência Rural**, v.35, n.3, p. 748-755, 2005.

TAHIR, M.; AHMAD, S.; AYUB, M.; NAEEM, M.; SARWAR, M. A. Impact of planting time and silicon levels on yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Pakistan Journal of Life and Social Sciences**, v. 11, n. 1, p. 60-64, 2013.

TROUGHT, M. C. T.; DREW, M. C. The development of waterlogging damage in young wheat plants in anaerobic solution cultures. **Journal of Experimental Botany**, v. 31, n. 6, p. 1573-1585, 1980.

VOOGT, W.; SONNEVELD, C. Silicon in horticultural crops grown in soilless culture. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Elsevier Science, Amsterdam, v. 8, p. 115-131, 2001.

WANG, X.; LIU, T.; LI, C.; CHEN, H. Effects of soil flooding on photosynthesis and growth of *Zea mays* L. seedlings under different light intensities. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 30, p. 7676-7685, 2012.

2.2 TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA A EM MUDAS DE CACAU CULTIVADAS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA COM DIFERENTES DOSES DE SILÍCIO E NÍVEIS DE AERAÇÃO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as características fotossintéticas em mudas de *Theobroma cacao* L., cv. Catongo, submetidas a tratamentos com doses silício e dois níveis de aeração da solução nutritiva. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x3x5 [aeração da solução nutritiva (com e sem) x três épocas de avaliação (1, 10 e 30 dias) x doses de silício (0, 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 mmol L⁻¹)] com quatro repetições, sendo utilizada uma planta por repetição. Avaliou-se as trocas gasosas e fluorescência modulada das clorofilas em estado adaptado à luz, no período da manhã e na mesma folha, através do analisador de gás infravermelho com fluorômetro acoplado modelo IRGA PP System, UK. Com 1 e 10 dias sem aeração verificou-se queda na eficiência fotoquímica máxima do FSII (F_v'/F_m'). Em concentração próxima a 1,0 mmol L⁻¹ de silício houve aumento nos valores de F_v'/F_m' , tanto para os tratamentos com e sem aeração. As taxas de assimilação líquida de carbono (A) dos tratamentos sem aeração apresentaram valores inferiores a dos tratamentos com aeração após trinta dias. Para as variáveis condutância estomática (g_s), transpiração (E) e concentração interna de CO₂ (C_i) não houve diferença neste mesmo período, entre os tratamentos com e sem aeração. Aos 10 dias sem aeração, a concentração de 0,99 mmol L⁻¹ de silício foi a que proporcionou maior valor da A . No entanto, aos 30 dias sem aeração o silício influenciou negativamente a A . Esse estudo mostrou que a falta de aeração

da solução nutritiva teve efeito sobre astrocas gasosas e a fluorescência da clorofila. Dependendo do período sem aeração, o silício pode aliviar o efeito desse estresse ou até mesmo atenuar.

Palavras-chaves: *Theobroma cacao* L., fotossíntese, ácido monossilícico, hipóxia.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the physiology of *Theobroma cacao* L. cv. Catongo seedlings submitted to treatments with silicon doses and two levels of aeration of the nutrient solution. The experimental design was completely randomized in a factorial 2x3x5, aeration of the nutrient solution (with and without) x three sampling times (1, 10 and 30 days) x silicon doses (0, 0,5, 1,0, 1,5 and 2,0 mmol L⁻¹), with four replications, with one plant used by repetition. We evaluated the gas exchange and chlorophyll fluorescence modulated in a state adapted to light in the morning period and in the same sheet, through the infrared gas analyzer coupled with fluorometer model IRGA PP System, UK. Between 1 to 10 days without aeration found a reduction in photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m'). In a concentration close to 1.0 mmol of silicon L⁻¹ there was an increase in the values of F_v/F_m' for both treatments with and without aeration. The carbon net assimilation rate (A) without aeration treatments were lower than the treatments with aeration after thirty days. For the variables stomatal conductance (g_s), transpiration (E) and internal CO₂ concentration (C_i) there was no difference in this period, between treatments with and without aeration. After 10 days without aeration, the concentration of 0.99 mmol silicon L⁻¹ has provided the highest value of A . However, after 30 days without aeration silicon negatively influenced A . This study showed that the lack of aeration nutrient solution had no effect on gas exchange and chlorophyll fluorescence. Depending on the time without aeration, silicon relieved the effect of stress or even attenuated.

Keywords: *Theobroma cacao* L., photosynthesis, monosilicic acid, hypoxia.

INTRODUÇÃO

O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) é uma eudicotiledônea, pertencente à família Malvaceae, tendo como centro de origem o alto Amazonas (CHEESMAN, 1944; APG III, 2009). Suas amêndoas são o principal ingrediente do chocolate, alimento favorito de grande parte da população mundial. Cultivado principalmente nas regiões tropicais da África, Ásia, América do Sul e Central, os três principais países produtores de amêndoas de cacau são a Costa do Marfim, Gana e Indonésia, participando respectivamente com 38%, 21% e 10% da produção mundial na safra 2013/2014. Nesta mesma safra, o Brasil produziu 200 mil toneladas, representando 5% da produção mundial (INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION, 2014).

A demanda mundial por chocolate é crescente. Tradicionalmente, a principal meta dos estudos sobre o uso dos nutrientes minerais na cultura do cacau tem a finalidade de aumentar a produtividade, utilizando-se principalmente os elementos considerados essenciais para as plantas (PUENTES-PÁRAMO et al., 2014). O silício não é considerado um elemento essencial, exceto para diatomáceas e equisitaceae, quando se leva em conta os critérios de essencialidade da nutrição mineral (EPSTEIN & BLOOM, 2006). Possui vários efeitos benéficos para as plantas, como a redução da intensidade de doenças (BOTELHO et al., 2005; LIMA et al., 2010; YE et al., 2013; TESFAGIORGIS et al., 2014), indução de resistência contra o ataque de insetos-pragas (POLANCZYK et al., 2008; PINTO et al., 2012), aliviando os efeitos tóxicos de metais (MAKSIMOVIĆ et al., 2012; WU et al., 2013; KIM et al., 2014), aumentando a tolerância à deficiência hídrica (CHEN et al., 2011; AHMED et al., 2014), aliviando a deficiência de oxigênio nas raízes (BALAKHNINA et al., 2012), aumentando a tolerância a salinidade (YIN et al., 2013) e melhorando a capacidade fotossintética (FERRAZ et al., 2014; GUERRA et al., 2014).

Plantas cultivadas em solo contêm silício em seus tecidos, sendo que o teor depende muito da espécie e até mesmo da cultivar, podendo variar de 1 a 100 g kg⁻¹ de silício na massa seca (WU et al., 2013). Em culturas hortícolas, o efeito da falta de silício só foi observado quando se passou a cultivá-las sem solo, com o início do cultivo hidropônico em estufas na Holanda (VOOGT & SONNEVELD, 2001).

No Brasil, os estados da Bahia, Pará, Amazonas e Espírito Santo sofrem com o alagamento das áreas cultivadas com cacau localizadas sobre solos rasos após pesadas chuvas ou quando localizadas nas margens de rios, devido principalmente

às precipitações concentradas nas cabeceiras dos rios. O alagamento periódico ocorre também em outros países tropicais produtores de cacau, como Gana, Nigéria e Costa do Marfim. Em solos inundados, a troca gasosa realizada com a atmosfera através dos poros é fortemente inibida pelo excesso de água. Plântulas de cacau cultivadas em ambiente alagado tendem a sofrer com reduções nas taxas de condutância estomática e fotossíntese, além de alterara absorção de macro e micronutrientes, podendo ainda, induzir a formação de lenticelas e raízes adventícias em caules submersos (ALMEIDA & VALLE, 2007; BERTOLDE et al., 2012).

O cultivo em solução nutritiva, sem aeração, pode simular o cultivo em ambiente alagado. A aeração da solução busca aumentar as trocas gasosas da solução com a atmosfera, fazendo com que haja renovação do oxigênio disponibilizado para as raízes e a eliminação de gases produzidos pela deterioração da matéria orgânica presente na solução (HOAGLAND & ARNON, 1950; KRATKY, 1993). São poucos trabalhos que relatam o papel do silício em plantas cultivadas sobre alagamento. Sayed & Gadallah (2014) ao estudarem o efeito do silício sobre aspectos bioquímicos e fisiológicos do milho cultivado em ambiente com deficiência de oxigênio, mencionam a necessidade de se disponibilizar para o milho este nutriente como forma de aliviar os efeitos do estresse provocado pelo alagamento.

Diante do exposto, objetivou-se determinar o efeito de doses de silício em interação com a influência da aeração sobre o desempenho fisiológico de mudas de cacau cv. Catongo cultivadas em solução nutritiva completa.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação, na fazenda experimental do Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado no município de São Mateus-ES. Foram utilizadas sementes docacau (*Theobroma cacao* L.) cv. Catongo, coletadas na estação da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC, município de Linhares-ES. O experimento foi instalado em delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo utilizada uma planta por repetição. Os tratamentos foram distribuídos num arranjo fatorial 2x3x5, constituído de dois níveis de aeração da solução nutritiva (com e sem), três épocas

de avaliação experimental (1, 10 e 30 dias) e 5 níveis de silício (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 mmol L⁻¹).

As sementes de cacau utilizadas na produção das mudas foram esterilizadas superficialmente com hipoclorito de sódio 0,5% durante 3 minutos e depois lavadas em água corrente, sendo selecionadas quanto ao tamanho e colocadas para pré-germinar por dois dias em bandejas com água. As sementes pré-germinadas foram colocadas em bandejas plásticas, contendo areia lavada com HCl 5% e esterilizada por autoclavagem. A irrigação das plântulas foi realizada diariamente com água destilada, durante 30 dias. Em seguida, as plântulas foram selecionadas quanto ao tamanho. Então, foram lavadas e transferidas, em número de quatro, para vasos de polietileno pintados externamente na cor alumínio e envolvidos internamente com sacola plástica. Foram utilizados 7,0 litros por vaso de solução nutritiva de Hoagland & Aarson (1950) n° 2, pH 6,0, com ¼ da força iônica. O pH foi corrigido diariamente com solução de NaOH 0,1 N e de HCL 0,1 N. O silício foi fornecido como ácido monossilícico, sendo obtido pela passagem do silicato de potássio através da uma resina de troca de cátions (Amberlite IR-120B, H+ forma, Sigma-Aldrich, São Paulo, Brasil) (MA et al., 2002).

Decorridos 1, 10 e 30 dias da instalação dos tratamentos com e sem aeração, foram determinadas, na terceira folha madura, as trocas gasosas entre 7h e 11h da manhã. Utilizou-se um analisador de gás infravermelho IRGA (Infrared Gas Analyzer, PPSysten, UK) em irradiância de 800 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, conforme Figura 1 da curva de luz, para avaliar a taxa assimilatória líquida de CO₂ (A, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); concentração intracelular de CO₂ (C_i, $\mu\text{mol mol}^{-1}$); condutância estomática (g_s, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e taxa transpiratória (E, $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

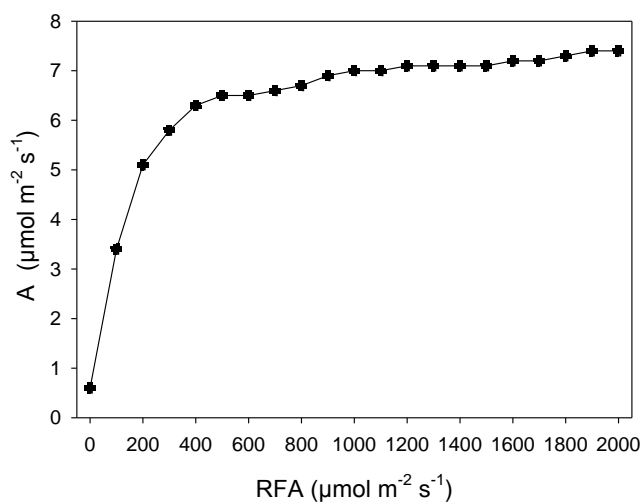


Figura 1. Taxa assimilatória líquida de CO₂ (A , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em resposta a radiação fotossinteticamente ativa (RFA, $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em folhas de cacaueteiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo.

Os caracteres da fluorescência modulada das clorofilas em estado adaptado à luz foram determinados no período da manhã, à temperatura ambiente, nas mesmas folhas em que foram feitas as avaliações das trocas gasosas. Foram avaliados os seguintes caracteres: fluorescência máxima da amostra adaptada à luz (F_m'); fluorescência inicial adaptado à luz (F_0'); fluorescência constante (F_s); fluorescência máxima variável (F_v' [$F_v' = F_m' - F_0'$]) e eficiência máxima do fotossistema II (PSII) (F_v'/F_m').

Aplicou-se análise de variância. Todas as interações triplas foram desdobradas, independente das significâncias, e as médias comparadas pelo teste Tukey a 5%. Para os dados quantitativos, realizou-se a análise de regressão. Utilizou-se o programa Genes (CRUZ, 2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo da fluorescência da clorofila *a* é uma técnica bastante utilizada para obter informações qualitativas e quantitativas da condição fisiológica do aparato fotossintético, pois seu princípio é relativamente simples, altamente sensível e não destrutivo (FALQUETO et al., 2008). Sheng et al. (2008) descrevem que a energia da luz absorvida pela clorofila pode ser conduzida para a fotossíntese e seu excesso pode ser dissipado na forma de calor ou ainda pode ser reemitida como luz da

fluorescência da clorofila. Não houve diferença significativa para as variáveis F_m' , F_s e F_v' no primeiro, décimo e trigésimo dia entre as médias dos tratamentos com e sem aeração (Tabela 1).

Para a razão F_v'/F_m' houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos com e sem aeração no primeiro e décimo dia, sendo que os valores para os tratamentos com aeração (0,47 e 0,37, respectivamente) foram 14,6% e 8,8%, maiores, respectivamente, que os tratamentos sem aeração (0,41 e 0,34, respectivamente). Entre os tratamentos com e sem aeração no trigésimo dia, não houve diferença significativa (Tabela 1). Quando os valores de F_v'/F_m' diminuem, pode ser um reflexo dos efeitos dos estresses bióticos e abióticos sobre a fotossíntese, indicando que uma parte importante do sistema de transporte de elétrons do PSII foi destruída (BAKER, 2008; WANG, et al., 2012).

Após um dia sem aeração, o valor médio de F_0' do tratamento sem aeração (1531) foi 39,7 % superior ao tratamento com aeração (1096). No entanto, não houve diferença significativa no décimo e trigésimo dia para a variável F_0' (Tabela 1). F_0' representa a emissão de luz pelas moléculas de clorofila *a* quando todos os centros de reações do PSII estão oxidados (KOOTEN & SNEL, 1990). Em muitas situações de estresse, ocorre o aumento nos valores de F_0' , que está relacionado com inativação de alguns centros de reação do PSII, fazendo com que ocorra a dissipação da energia de excitação na forma de calor (BAKER, 2008).

Mielke & Schaffer (2010), ao estudarem alterações provocadas pelo alagamento na fotossíntese de *Eugenia uniflora* L., um arbusto presente em toda América do Sul, também relataram aumento no valor de F_0' e uma redução na razão F_v'/F_m' , logo após submeter as plantas ao alagamento. Mudanças de citros submetidas ao alagamento também apresentaram redução nos valores de F_v'/F_m' , quando comparado com as não cultivadas em ambiente sem alagamento (GARCÍA-SÁNCHEZ et al., 2007).

Tabela 1. Valores médios de fluorescência máxima da amostra adaptada a luz (F_m'), fluorescência inicial adaptado à luz (F_0'), fluorescência constante (F_s), fluorescência variável (F_v' ($F_v'=F_m' - F_0'$)) e eficiência fotoquímica máxima efetiva do PSII (F_v'/F_m') de cacauero (*T. cacao* L.) cv. Catongo sobre influência dos dias nos tratamentos com e sem aeração da solução nutritiva.

Tempo (dias)	Aeração	F_m'	F_0'	F_s	F_v'	F_v'/F_m'
1	com	2101a*	1096b	1785a	955a	0,47 a
	sem	2177a	1531a	2032a	896a	0,41 b
10	com	2199a	1343a	1769a	858a	0,37 a
	sem	2048a	1397a	1883a	682a	0,34 b
30	com	2382 ^{ns}	993a	2229 ^{ns}	1408 ^{ns}	0,60 a
	Sem	2331	985a	2309	1373	0,59 a

*Médias seguidas pela mesma letra, para cada tempo, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste Tukey.

A concentração de silício não influenciou a F_m' no primeiro e décimo dia (Figura 2A e 2B), a F_0' no primeiro e trigésimo dia (Figura 2D e 2F), a F_s no primeiro e décimo dia (Figura 2G e 2H), a F_v' no primeiro e trigésimo dia (Figura 2J e 2L) e a razão F_v'/F_m' no primeiro e trigésimo dia (Figura 2M e 2O) para os tratamentos com e sem aeração da solução nutritiva.

No entanto, para os tratamentos sem aeração, o aumento da concentração de silício teve efeito quadrático sob F_m' no trigésimo dia, com valor mínimo (2175) na concentração de 0,83 mmol L⁻¹ de silício, não houve influencianos tratamentos com aeração (Figura 2C).O valor de F_m' representa a máxima quantidade de energia liberada na forma de luz, quando toda a quinona (Qa) está reduzida pela exposição da folha a um breve pulso de luz saturante (BAKER, 2008). No trigésimo dia houve efeito quadrático do silício na F_s , com valor mínimo (1986) na concentração de 0,83 mmol L⁻¹ de silício para os tratamentos sem aeração, mas o silício não influenciou neste mesmo período os tratamentos com aeração (Figura 2I). Segundo Baker (2008) a F_s fornece pouca informação sobre o desempenho fotossintético da planta, por ser influenciado por diversos fatores não controlados.

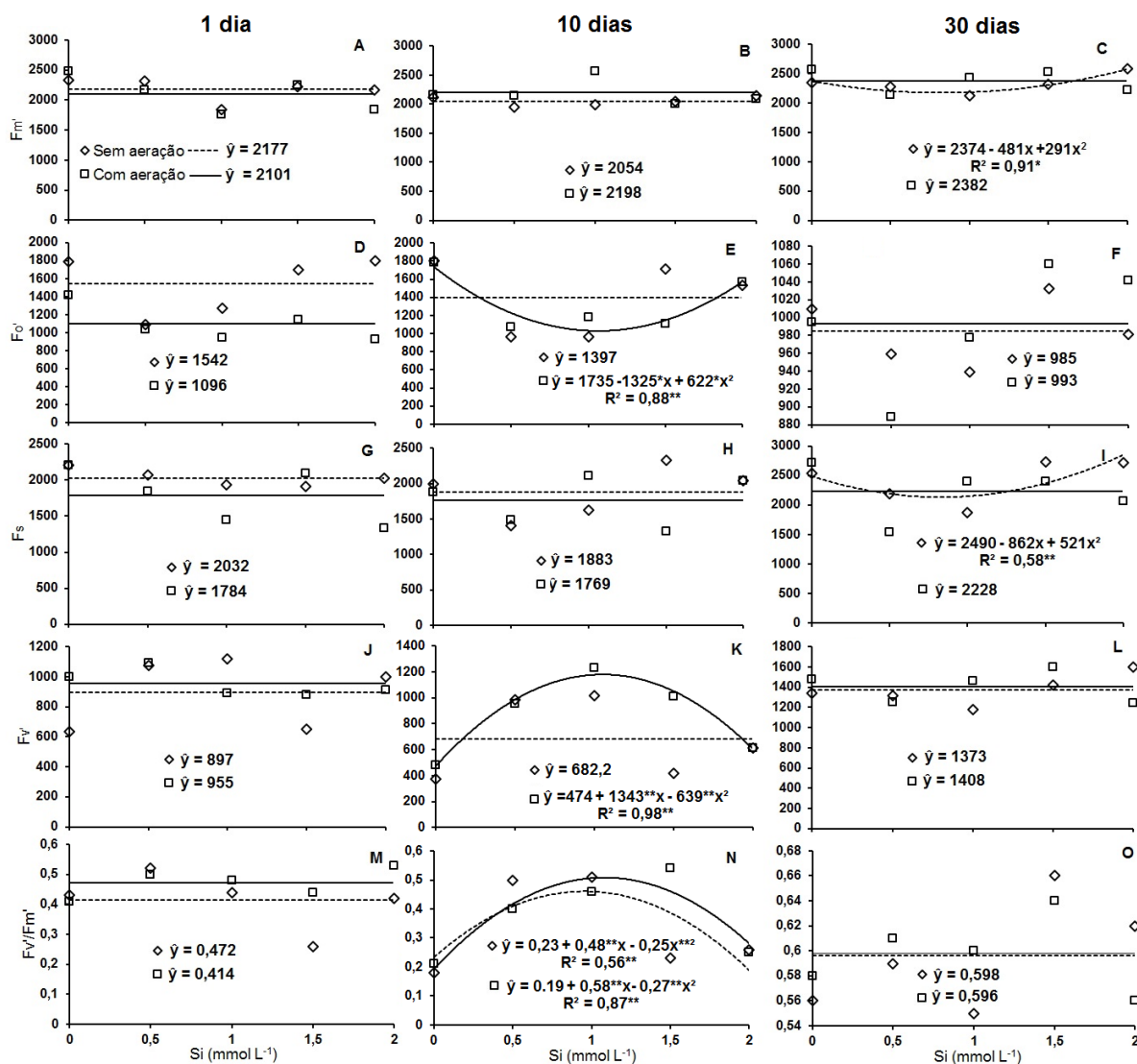


Figura 2. Fluorescência máxima da amostra adaptada à luz (F_m'), fluorescência inicial adaptado à luz (F_0'), fluorescência constante (F_s), fluorescência variável (F_v' ($F_v' = F_m' - F_0'$)) e eficiência fotoquímica máxima de PSII (F_v'/F_m') em cacauero (*T. cacao* L.) cv. Catongo cultivadas em diferentes concentrações de Si (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mmol L⁻¹) após 1 (A, D, G, J e M), 10 (B, E, H, K e N) e 30 dias (C, F, I, L e O) de instalação dos tratamentos com e sem aerção.

No décimo dia, houve efeito quadrático do silício na F_0' com valor mínimo (1029) na concentração de 1,07 mmol L⁻¹ de silício para os tratamentos com aerção, sendo que o silício não influenciou neste mesmo período os tratamentos sem aerção (Figura 2E). Para este mesmo período, houve influência da concentração de silício na F_v' nos tratamentos com aerção, com valor máximo (1214) na concentração de 1,05 mmol L⁻¹ de Si, no entanto, não houve influência sobre os tratamentos sem aerção (Figura 2K). O valor de F_v' é a diferença entre a fluorescência proveniente de centros de reação reduzido e oxidada, que no caso, é

uma medida relativa dos centros de reação fotoquimicamente ativos (KOOTEN & SNEL, 1990; BAKER, 2008). O aumento da concentração de silício na solução nutritiva influenciou a razão F_v'/F_m' , nos tratamentos com e sem aeração, em que foram obtidos no décimo dia sem aeração, os valores máximos (0,50 e 0,46, respectivamente) nas concentrações de 1,07 e 0,96 mmol L⁻¹ de Si, respectivamente (Figura 2N). Nos tratamentos com aeração, a redução nos valores de F_0 e o aumento nos valores de F_v' e F_v'/F_m' no décimo dia mostram um efeito benéfico do silício sobre o aparato fotossintético da planta em uma concentração próxima a 1mmol L⁻¹ na solução nutritiva. O aumento nos valores de F_v'/F_m' no décimo dia sem aeração, em concentração próxima a 1mmol L⁻¹, mostram que o silício aliviou o estresse provocado pela falta de aeração no metabolismo fotossintético neste período.

Segundo Chen et al. (2011), a adição de silício em plantas de arroz submetidas ao déficit hídrico alivia o estresse provocado no metabolismo fotossintético da planta, aumentando os valores da eficiência fotoquímica do FSII (F_v/F_m), em comparação com tratamentos sem adição de silício sobre déficit hídrico. Plantas de pepino submetidas ao estresse provocado pela toxicidade do metal cádmio (Cd) apresentam danos ao metabolismo fotossintético. Comparando o tratamento somente com Cd com o Si + Cd, o silício aumentou de forma significativa o teor de clorofila *a* e carotenóides, a taxa fotossintética líquida e a eficiência fotoquímica do FSII, mostrando que o silício tem um papel importante na proteção do maquinário fotossintético (WU et al., 2013).

Não houve diferença significativa entre a média dos tratamentos com e sem aeração para os caracteres condutância estomática (g_s), transpiração (E) e concentração interna de CO₂ (C_i) (Tabela 2). Para a taxa de assimilação líquida de carbono (A), ocorreu diferença significativa nos três períodos, sendo que no primeiro e no trigésimo dia a média dos tratamentos com aeração (4,07 e 7,69, respectivamente) foi 19% e 17%, respectivamente maiores, quando comparada com a média dos tratamentos sem aeração (3,42 e 6,36, respectivamente). No décimo dia, a média dos tratamentos sem aeração (3,78) foi 34% maior quando comparada com a média dos tratamentos com aeração (2,82) (Tabela 2).

Para os diferentes genótipos de *Theobroma cacao* L. a taxa de assimilação líquida de carbono varia entre 1 e 9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ALMEIDA et al., 2014), no presente estudo os valores estão dentro dessa faixa. Bertolde et al. (2012) relataram

declínio na A em dois genótipos de cacau após dez dias de alagamento. Vários estudos demonstram que a diminuição na A em plantas cultivadas em ambiente com baixa disponibilidade de oxigênio está ligada ao fechamento estomático, provocado pela diminuição do potencial hídrico proveniente da baixa absorção de água pelas raízes, que resulta na baixa absorção de CO_2 pela folha (LARSON et al., 1991; KOZLOWSKI, 1997; ALMEIDA & VALLE, 2007).

Tabela 2. Valores médios da taxa de assimilação líquida de carbono (A), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e concentração interna de CO_2 (C_i) de plantas de cacauzeiro (*T. cacao* L.) cv. Catongo sobre influência dos dias nos tratamentos com e sem aeração da solução nutritiva.

Tempo (dias)	Aeração	A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$)
1	Com	4,07a*	0,08a	0,87a	253a
	Sem	3,42b	0,05a	0,99a	270a
10	Com	2,82b	0,03a	0,53a	202a
	Sem	3,78a	0,04a	0,62a	229a
30	Com	7,69a	0,20a	2,66a	308a
	Sem	6,36b	0,17a	2,77a	303a

*Médias seguidas pela mesma letra, para cada tempo, não diferem estatisticamente entre si a 5% pelo teste Tukey.

Os tratamentos com aeração apresentaram valores inferiores de A no décimo dia, em comparação com os sem aeração. No entanto, tiveram valores superiores aos tratamentos sem aeração no tempo de 1 e 30 dias (Tabela 2). O provável motivo para queda nos valores de A não foi o fechamento estomático, pois, como relatado acima, não houve diferença significativa nos valores de g_s e E entre os tratamentos com e sem aeração (Tabela 2). A g_s e E são variáveis da troca gasosa das folhas que estão correlacionadas com o fechamento estomático.

Em plantas sob alagamento, tem sido relatada redução na atividade de enzimas que participam do sistema fotossintético (PEZESHKI, 2001; PATEL et al., 2014). O estresse pela baixa disponibilidade de oxigênio para as raízes pode reduzir a atividade e/ou aumentar a degradação da enzima ribulose-1,5-bisfosfato-carboxilase oxigenase (Rubisco) em algumas espécies (PEZESHKI, 2001). Esse fator não está relacionado com o fechamento estomático e pode afetar a A .

Bradford (1983), estudando o efeito do alagamento na troca gasosa de plantas de tomate, relatou que a queda da A não está ligada somente com a redução da C_i . O autor sugere que o alagamento afeta principalmente a regeneração da enzima Rubisco no tomateiro.

Degradação dos pigmentos fotossintéticos é outro fator ligado a redução da A (PEZESHKI et al., 2001). Alguns genótipos de cacau sob alagamento são afetados pela redução na concentração de pigmentos fotossintéticos e A (BERTOLDE et al., 2012).

Não houve influência da concentração de silício sobre a E no primeiro e trigésimo dia (Figura 3D e 3F), g_s em nenhum dos três dias (Figura 3 G, 3H e 3I), A no primeiro dia (Figura 3A) e C_i no primeiro e décimo dia (Figura 3J e 3K).

A concentração de silício na solução nutritiva influenciou E , no décimo dia. O valor máximo (0,63) nos tratamentos com aeração foi obtido na concentração de 1,05 mmol L⁻¹ de Si e para os tratamentos sem aeração o valor máximo (0,76) foi na concentração de 1,13 mmol L⁻¹ de Si (Figura 3E). No trigésimo dia, a C_i aumentou de acordo com a maior concentração de silício na solução nutritiva nos tratamentos com aeração. Para os tratamentos sem aeração, foi obtido um valor mínimo (304,8) C_i na concentração de 1,03 mmol L⁻¹ de Si (Figura 3L). No décimo dia, houve influência da concentração de silício sobre a A para os tratamentos sem aeração, sendo obtido máximo (5,56) A na concentração de 0,99 mmol L⁻¹ de Si, sendo que não houve influência neste mesmo período para os tratamentos com aeração (Figura 3B). No trigésimo dia, o aumento da concentração de silício influenciou negativamente A nos tratamentos sem aeração, porém não houve influência nos tratamentos com aeração (Figura 3C).

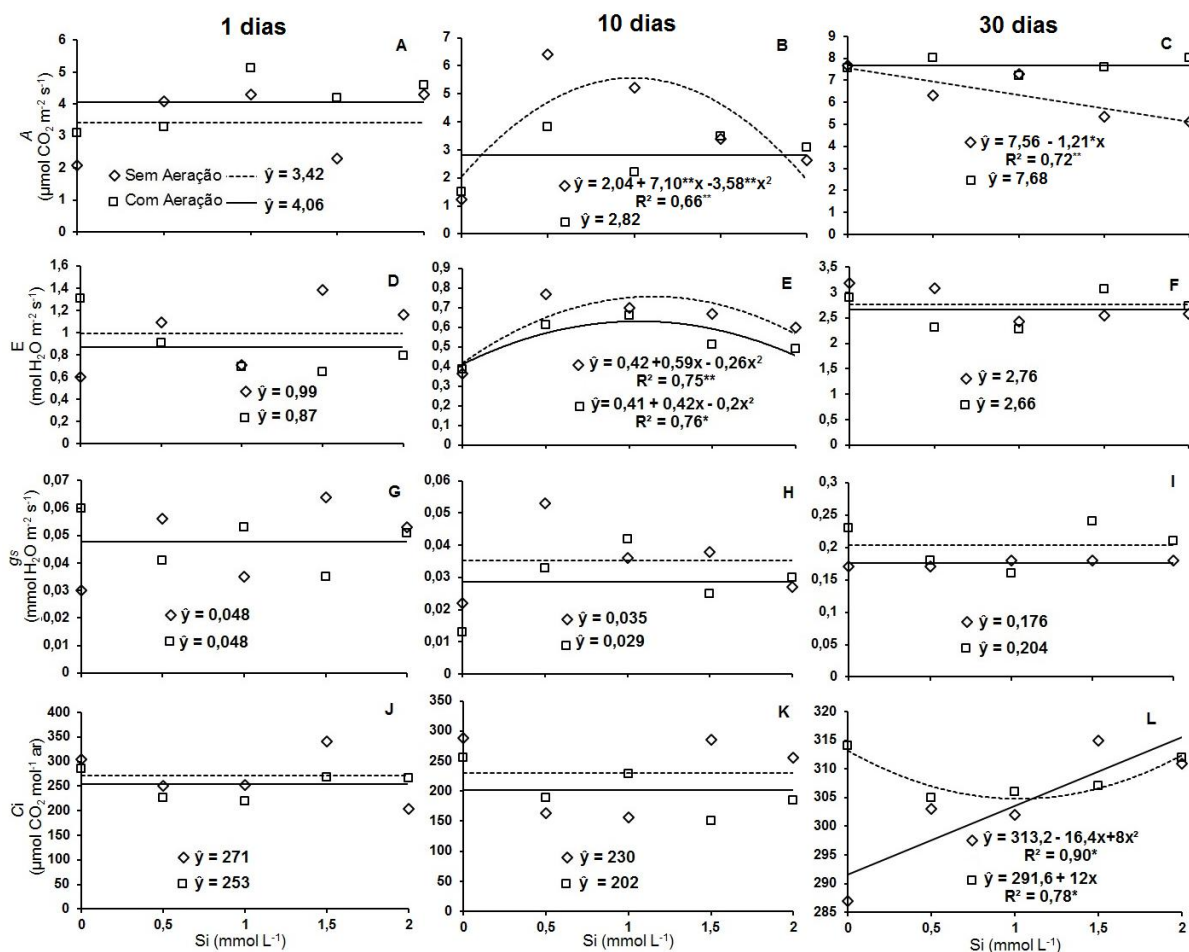


Figura 3. Taxa de assimilação líquida de carbono (A), transpiração (E), condutância estomática (g_s) e concentração interna de CO_2 (C_i) de cacauieiro (*T. caçõ L.*) cv. Catongo cultivadas em diferentes concentrações de Si (0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 mmol L^{-1}) após 1 (A, D, G e J), 10 (B, E, H e K) e 30 dias (C, F, I e L) de instalação dos tratamentos com e sem aeração.

São vários os relatos na literatura que mostram efeito benéfico do silício sobre a A em diversas espécies de plantas, tanto quando estão submetidas ou não a algum tipo de estresse (CHEN et al., 2011; AHMED et al., 2014; POLANCO et al., 2014; RODRIGUES et al., 2014). Porém, como observado na Figura 3C, o silício teve um efeito negativo sobre A. Ferraz et al. (2014) relataram que o efeito de doses de silício pode não influenciar, influenciar positivamente ou negativamente a A, dependendo da cultivar de algodoeiro. Segundo Pinto et al. (2012) a aplicação de silício foliar em mudas de cacau influenciou positivamente A na dose de 3 mL L^{-1} , não influenciando em doses superiores.

CONCLUSÕES

A eficiência fotoquímica máxima do FSII foi afetada negativamente no 1° e 10° dia sem aeração, pelo decréscimo nos valores da razão Fv'/Fm' . Nesse mesmo período, concentração próxima a 1,0 mmol L⁻¹ de silício melhorou a eficiência fotoquímica máxima do FSII.

A falta de aeração afeta a taxa de assimilação líquida de carbono (*A*) aos 10 e 30 dias.

Com 10 dias sem aeração, a concentração próxima a 0,99 mmol L⁻¹ de silício, afeta positivamente a *A*. No entanto, o silício após 30 dias sem aeração, tem influencia negativamente sobre a *A*.

REFERÊNCIAS

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. U. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014.

ALMEIDA, A-A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 19, p. 425-448, 2007.

ALMEIDA, A. A.; GOMES, F. P.; ARAUJO, R. P.; SANTOS, R. C.; VALLE, R. R. Leaf gas exchange in species of the *Theobroma* genus. **Photosynthetica**, v. 52, n. 1, p. 16-21, 2014.

APG III. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 161, p. 105-121, 2009.

BALAKHNINA, T. I.; MATICHENKOV, V. V.; WLODARCZYK, T.; BORKOWSKA, A.; NOSALEWICZ, M.; FOMINA, I. R. Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. **Plant Growth Regulation**, v. 67, n. 1, p. 35-43, 2012.

BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*. **Annual Review Plant Biology**, v. 59, p.89-113, 2008.

BERTOLDE, F. Z.; ALMEIDA, A. A.; PIROVANI, C. P.; GOMES, F. P.; AHNERT, D.; BALIGAR, V. C.; VALLE, R. R. Physiological and biochemical responses of *Theobroma cacao* L. genotypes to flooding. **Photosynthetica**, v. 50, n. 3, p. 447-457, 2012.

BOTELHO, D. M. S.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; BOTELHO, C. E.; SOUZA, P. E. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, n. 6, p. 582-588, 2005.

BRADFORD, K. J. Effects of soil flooding on leaf gas exchange of tomato plants. **Plant Physiology**, v. 73, n. 2, p. 475-479, 1983.

CHEESMAN, E. E. Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cacao populations. **Tropical Agriculture**, v. 21, p. 144-159, 1944.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, J. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological Trace Element Research**, v. 142, n. 1, p. 67-76, 2011.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FALQUETO, A. R.; CASSOL, D.; JÚNIOR, A. M. M.; OLIVEIRA, A. C.; BACARIN, M. A. Características da fluorescência da clorofila em cultivares de arroz com ciclo precoce, médio e tardio. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. 2, p. 579-581, 2008.

FERRAZ, R. L.S.; BELTRÃO, N. E.M.; MELO, A. S.; MAGALHÃES, I. D.; FERNANDES, P. D.; ROCHA, M. S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p. 735-748, 2014.

GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; SYVERTSEN, J.; GIMENO, V.; BOTÍA, P.; PEREZ-PEREZ,

J. G. Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. **Physiologia Plantarum**, v. 130, n. 4, p. 532-542, 2007.

GUERRA, A. M. N. M.; RODRIGUES, F. Á.; LIMA, T. C.; BERGER, P. G.; BARROS, A. F.; SILVA, Y. C. R. Capacidade fotossintética de plantas de algodoeiro infectadas por ramulose e supridas com silício. **Bragantia**, v. 73, n. 1, p. 50-64, 2014.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experiment Station**, Berkeley, California, Circ. 347, p.32, 1950.

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION - ICCO. **Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics**, v. XL, n. 1, Cocoa year 2013/2014. Disponível em: < www.icco.org >. Acesso em: 01 jul. 2014.

KIM, Y.; KHAN, A. L.; KIM, D.; LEE, S.; KIM, K.; WAQAS, M.; JUNG, H.; SHIN, J.; KIM, J.; LEE, I. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones. **BMC Plant Biology**, v. 14, n. 13, p. 2-13, 2014.

KRATKY, B. A. A capillary, noncirculating hydroponic method for leaf and semi-head lettuce. **HortTechnology**, v. 3, n. 2, p. 206-207, 1993.

KOZLOWSKI, T. T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology Monograph**, v. 1, n. 1, p. 1-29, 1997.

KOOTEN, O.; SNEL, J. F. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. **Photosynthesis Research**, v. 25, n. 3, p. 147-150, 1990.

LARSON, K. D.; SCHAFFER, B.; DAVIES, F. S. Flooding, leaf gas exchange, and growth of mango in containers. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 116, n. 1, p. 156-160, 1991.

LIMA, L. M.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; FONSECA, T. A. P. S.; CARVALHO, J. G. Quantificação da ferrugem asiática e aspectos nutricionais de soja suprida com silício em solução nutritiva. **Summa Phytopathologica**, v. 36, n. 1, p. 51-56, 2010.

MA, J. F.; TAMAI, K.; ICHI, M.; WU, G. F. A rice mutant defective in Si uptake. **Plant Physiology**, v. 130, n. 4, p. 2111-2117, 2002.

MAKSIMOVIĆ, J. D.; MOJOVIĆ, M.; MAKSIMOVIĆ, V.; RÖMHELD, V.; NIKOLIC, M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 7, p. 2411-2420, 2012.

MIELKE, M. S.; SCHAFFER, B. Leaf gas exchange, chlorophyll fluorescence and pigment indexes of *Eugenia uniflora* L. in response to changes in light intensity and soil flooding. **Tree Physiology**, v. 30, n. 1, p. 45-55, 2010.

PATEL, P. K.; KUMAR, A.; SINGH, N. T.; YADAV, D.; HEMANTARANJAN, A. Flooding: abiotic constraint limiting vegetable productivity. **Advances in Plants & Agriculture Research**, v. 1, n. 3, p. 1-9, 2014.

PEZESHKI, S. R. Wetland plant responses to soil flooding. **Environmental and Experimental Botany**, v. 46, n. 3, p. 299-312, 2001.

PINTO, D. G.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; SILVA, D. M.; SIQUEIRA, P. R.; CAO, J. R.; ZANETTI, L. V. Alterações fisiológicas após aplicação de silício em cacau e sua influência na preferência por pulgões. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 360-367, 2012.

POLANCO, L. R.; RODRIGUES, F. A.; NASCIMENTO, K. J.; CRUZ, M. F.; CURVELO, C. R.; DAMATTA, F. M.; VALE, F. X. Photosynthetic gas exchange and antioxidative system in common bean plants infected by *Colletotrichum lindemuthianum* and supplied with silicon. **Tropical Plant Pathology**, v. 39, n. 1, p. 35-42, 2014.

POLANCZYK, R. A.; PRATISSOLI, D.; PAYE, H. S.; PEREIRA, V. A.; BARROS, F. L. S.; OLIVEIRA, R. G. S.; PASSOS, R. R.; MARTINS FILHO, S. Indução de resistência à mosca minadora em crisântemo usando composto silicatado. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 2, p. 240-243, 2008.

PUENTES-PÁRAMO, Y.; MENJIVAR-FLORES, J.; ARANZAZU-HERNÁNDEZ, F. Eficiencias en el uso de nitrógeno, fósforo y potasio en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). **Bioagro**, v. 26, n. 2, p. 99-106, 2014.

RODRIGUES, F. A.; POLANCO, L. R.; DUARTE, H. S. S.; RESENDE, R. S.; VALE, F. X. R. Photosynthetic gas exchange in common bean submitted to foliar sprays of potassium silicate, sodium molybdate and fungicide and infected with *Colletotrichum lindemuthianum*. **Journal of Phytopathology**, v. 163, n. 2, p. 1-6, 2014.

SAYED, S. A.; GADALLAH, M. A. A. Effects of silicon on *Zea mays* plants exposed to water and oxygen deficiency. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 61, n. 4, p. 460-466, 2014.

SHENG, M.; TANG, M.; CHEN, H.; YANG, B.; ZHANG, F.; HUANG, Y. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. **Mycorrhiza**, v. 18, n. 6-7, p. 287-296, 2008.

TESFAGIORGIS, H. B.; LAING, M. D.; ANNEGARN, H. J. Evaluation of biocontrol agents and potassium silicate for the management of powdery mildew of zucchini. **Biological Control**, v. 73, n. 6, p. 8-15, 2014.

VOOGT, W.; SONNEVELD, C. Silicon in horticultural crops grown in soilless culture. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Elsevier Science, Amsterdam, v. 8, p. 115-131, 2001.

WANG, X.; LIU, T.; LI, C.; CHEN, H. Effects of soil flooding on photosynthesis and growth of *Zea mays* L. seedlings under different light intensities. **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 30, p. 7676-7685, 2012.

WU, J. W.; SHI, Y.; ZHU, Y. X.; WANG, Y. C.; GONG, H. J. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. **Pedosphere**, v. 23, n. 6, p. 815-825, 2013.

YE, M.; SONG, Y.; LONG, J.; WANG, R.; BAERSON, S.; PAN, Z.; ZHU-SALZMAN, K.; XIE, J.; CAI, K.; LUO, S.; ZENG, R. Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicone. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 38, p. 3631-3639, 2013.

YIN, L. N.; WANG, S. W.; LI, J. Y.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 35, n. 11, p. 3099-3107, 2013.

3. CONCLUSÕES GERAIS

A cultivar de *Teobroma cacao* L., Catongo, apresentou alterações nas variáveis fisiológicas analisadas em resposta a falta de aeração da solução nutritiva e doses de silício.

O teor foliar de silício dos tratamentos sem aeração da solução nutritiva foram inferiores aos com aeração.

A aeração e o silício não influenciaram nas variáveis de crescimento.

Após trinta dias sem aeração o teor de clorofila *a* e total nesses tratamentos foram inferiores aos tratamentos com aeração, alterando negativamente a capacidade fotossintética das mudas cultivadas sem aeração.

O silício influenciou a razão clorofila *a/b*, após trinta dias sem aeração, aliviando a avaria provocada pela falta de aeração ao sistema fotossintético na concentração de $0,75 \text{ mmol L}^{-1}$ de silício.

A eficiência fotoquímica máxima do FSII foi afetada negativamente após 1 e 10 dias sem aeração, pelo decréscimo nos valores da razão Fv'/Fm' . Concentração próxima a $1,0 \text{ mmol L}^{-1}$ de silício melhora a eficiência fotoquímica máxima do FSII, tanto para os tratamentos com e sem aeração.

A falta de aeração afetou negativamente a taxa de assimilação líquida de carbono (*A*) após trinta dias, não sendo ocasionada pelo fechamento estomático.

A concentração de $0,99 \text{ mmol L}^{-1}$ de silício foi onde se obteve maior valor na *A* nos tratamentos sem aeração após 10 dias. No entanto, o silício após 30 dias sem aeração, influenciou negativamente a *A*.

4. REFERÊNCIAS

AFOAKWA, E.O.; QUAO, J.; TAKRAMA, J.; BUDU, A.S.; SAALIA, F.K. Chemical composition and physical quality characteristics of Ghanaian cocoa beans as affected by pulp pre-conditioning and fermentation. **Journal of Food Science and Technology**, v.50, n.6, p. 1097-1105, 2013.

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F.U. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.36, n.2, p.473-483, 2014.

ALMEIDA, A-A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. **Brazilian Journal Plant Physiology**, v. 19, p. 425-448, 2007.

ALMEIDA, C.M.V.C.; DIAS, L.A.S.; SILVA, A.P. Caracterização agrônômica de acessos de cacau. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.4, p.368-373, 2009.

ALMEIDA, A-A.F.; VALLE, R.R. Cacao: ecophysiology of growth and production. In: DaMATTA, F. M. (ed). Ecophysiology of tropical tree crops. **Nova Science**, Hauppauge, p. 37–70, 2009.

AMORIM, H. V.; SCOTON, L. C.; HAAG, H.P.; MALAVOLTA, E. Efeitos de diferentes níveis de N, P e K sobre cacauzeiros jovens (*Theorema cacao* L.) em solução nutritiva. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v.21, p. 151-165, 1964.

APG III. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v.161,p. 105-121, 2009.

ÁVILA, F.W.; BALIZA, D.P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J.L.; RAMOS, S.J. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.2, p.184-190, 2010.

BALAKHNINA, T. I.; MATICHENKOV, V. V.; WLODARCZYK, T.; BORKOWSKA, A.; NOSALEWICZ, M.; FOMINA, I. R. Effects of silicon on growth processes and adaptive potential of barley plants under optimal soil watering and flooding. **Plant Growth Regulation**, v.67, n.1, p. 35-43, 2012.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K.; DATNOFF, L. E.; SILVA O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25,n. 325-330, p. 325-330, 2001.

BOTELHO, D.M.S.; POZZA, E.A.; POZZA, A.A.A.; CARVALHO, J.G.; BOTELHO, C.E.; SOUZA, P.E. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, v.30, n.6, p. 582-588, 2005.

BROWN, C.H. Development of agriculture in prehistoric Mesoamerica: The linguistic evidence. In: STALLER, J.E.; CARRASCO, M. **Pre-Columbian Foodways**. Berlin, Germany, Springer, p. 71-107, 2009.

CHEESMAN, E. E. Notes on the nomenclature, classification and possible relationships of cacao populations. **Tropical Agriculture**, v.21,p. 144-159, 1944.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, J. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological Trace Element Research**, v.142, n. 1, p. 67-76, 2011.

CHENG, H.; LIU, Y.; TAM, N. F. Y.; WANG, X.; LI, S. Y.; CHEN, G. Z.; YE, Z. H. The role of radial oxygen loss and root anatomy on zinc uptake and tolerance in mangrove seedlings. **Environmental Pollution**, v.158, n.5, p. 1189-1196, 2010.

DANTAS NETO, A.; CORRÊA, R.X.; MONTEIRO, W.R.; LUZ, E.D.M.N.; GRAMACHO, K.P; LOPES, U.V. Caracterização de uma população de cacauero para mapeamento de genes de resistência à vassoura-de-bruxa e podridão parda. **Fitopatologia Brasileira**, v.30, n.4, p.380-386, 2005.

DAVIE, J.H. Chromosome studies in the Malvaceae and certain related families II. **Genetica**,v.17, n. 5,p. 487-498, 1935.

EFRAIM, P.; ALVES, A. B.; JARDIM, D. C. P. Polifenóis em cacau e derivados: teores, fatores de variação e efeitos na saúde. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 14, n. 3, p. 181-201, 2011.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**,v.50, p.641-644, 1999.

FERRAZ, R. L.S.; BELTRÃO, N. E.M.; MELO, A. S.; MAGALHÃES, I. D.; FERNANDES, P. D.; ROCHA, M. S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p. 735-748, 2014.

GARCIA, T. B.; POTIGUARA, R. C. V.; KIKUCHI, T. Y. S.; DEMARCO D.; DIAS A. C. A. A. Leaf anatomical features of three *Theobroma* species (Malvaceae S.I.) native to the Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, v.44, n.3, p. 291-300, 2014.

GUERRA, A. M. N. M.; RODRIGUES, F. Á.; LIMA, T. C.; BERGER, P. G.; BARROS, A. F.; DA SILVA, Y. C. R. Capacidade fotossintética de plantas de algodoeiro infectadas por ramulose e supridas com silício. **Bragantia**, v.73, n.1, p. 50-64, 2014.

HENDERSON, J.S.; JOYCE, R.A.; HALL, G.R.; HURST, W.J.; MCGOVERN, P.E. Chemical and archaeological evidence for the earliest cacao beverages. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n.48, p. 18937-18940, 2007.

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

INTERNATIONAL COCOA ORGANIZATION - ICCO. **Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics**, v. XL, n. 1, Cocoa year 2013/2014. Disponível em: < www.icco.org >. Acesso em: 01 jul. 2014.

JACKSON, M. B.; COLMER, T. D. Response and adaptation by plants to flooding stress. **Annals of Botany**, v. 96, n. 4, p. 501-505, 2005.

JI, K.; ZHANG, D.; MOTILAL, L.A.; BOCCARA, M.; LACHENAUD, P.; MEINHARDT, L.W. Genetic diversity and parentage in farmer varieties of cacao (*Theobroma cacao* L.) from Honduras and Nicaragua as revealed by single nucleotide polymorphism (SNP) markers. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 60, n. 2, p. 441–453, 2012.

KIM, Y.; KHAN, A. L.; KIM, D.; LEE, S.; KIM, K.; WAQAS, M.; JUNG, H.; SHIN, J.; KIM, J.; LEE, I. Silicon mitigates heavy metal stress by regulating P-type heavy metal ATPases, *Oryza sativa* low silicon genes, and endogenous phytohormones. **BMC Plant Biology**, v.14, n. 13, p. 2-13, 2014.

KORNDÖRFER, G.H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and crop yield. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. **Silicon in Agriculture**. Elsevier Science, Amsterdam, v.8, p. 133-147, 2001.

KOZLOWSKI, T.T. Responses of woody plants to flooding and salinity. **Tree Physiology Monograph**, v. 1, n. 1, p. 1-29, 1997.

LIMA, L.M.; POZZA, E.A.; POZZA, A. A. A.; FONSECA, T. A. P. S.; CARVALHO, J. G. Quantificação da ferrugem asiática e aspectos nutricionais de soja suprida com silício em solução nutritiva. **Summa Phytopathologica**, v.36, n.1, p.51-56, 2010.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, p.392-397, 2006.

MAKSIMOVIĆ, J.D.; MOJOVIĆ, M.; MAKSIMOVIĆ, V.; RÖMHELD, V.; NIKOLIC, M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. **Journal of Experimental Botany**, v.63, n.7, p.2411-2420, 2012.

MARODIN, J. C.; RESENDE, J. T.; MORALES, R. G.; SILVA, M. L.; GALVÃO, A. G.; ZANIN, D. S. Yield of tomato fruits in relation to silicon sources and rates. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.2, p. 220-224, 2014.

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; AJAY; KUNDU, S.; RAO, A. S. A Case for silicon fertilization to improve crop yields in tropical soils. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences**, v.84, n.3, p. 505-518, 2014.

MORORÓ, R. C. Aproveitamento dos derivados, subprodutos e resíduos do cacau. In: VALLE, R. R. **Ciência, tecnologia e manejo do cacauero**. Brasília, CEPLAC/CEPEC/SEFIS, p. 597-653, 2012.

MOTAMAYOR, J.C.; RISTERUCCI, A.M.; LOPEZ, P.A.; ORTIZ, C.F.; MORENO, A.; LANAUD, C. Cacao domestication. I. The origin of the cacao cultivated by the Mayas. **Heredity**, v. 89, p.380-386, 2002.

MOTAMAYOR, J.C.; LACHENAUD, P.; SILVA E MOTA, J.W.; LOOR, R.; KUHN, D.N.; BROWN, J.S.; SCHNELL, R.J. Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). **Plos One**, v. 3, n.10, p. 1-8, 2008.

PACHECO, A. G. M.; CASTILHO, M. S.; LUCHESE, A. M.; PEREIRA, G.; TARANTO, A. G. Comparative modeling studies of lanosterol 14- α demethylase of *Moniliophthora perniciosa*. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v.2, n.4, p.8-14, 2013.

PINTO, D.G.; AGUILAR, M.A.G.; SOUZA, C.A.S.; SILVA, D.M.; SIQUEIRA, P.R.; CAO, J.R.; ZANETTI, L.V. Alterações fisiológicas após aplicação de silício em cacau e sua influência na preferência por pulgões. **Revista Ceres**, v. 59, n.3, p.360-367, 2012.

POLANCZYK, R.A.; PRATISSOLI, D.; PAYE, H.S.; PEREIRA, V.A.; BARROS, F.L.S.; OLIVEIRA, R.G.S.; PASSOS, R.R.; MARTINS FILHO, S. Indução de resistência à mosca minadora em crisântemo usando composto silicatado. **Horticultura Brasileira**, v.26, n.2, p.240-243, 2008.

POWIS, T.G.; CYPHERS, A.; GAIKWAD, N.W.; GRIVETTI, L.; CHEONG, K. Cacao use and the San Lorenzo Olmec. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n.21, p.8595-8600, 2011.

RAMLJAK, D.; ROMANCZYK, L.J.; METHENY-BARLOW, L.J.; THOMPSON, N.; KNEZEVIC, V.; GALPERIN, M.; RAMESH, A.; DICKSON, R.B. Pentameric procyanidin from *Theobroma cacao* selectively inhibits growth of human breast cancer cells. **Molecular Cancer Therapeutics**, v.4, p. 537-546, 2005.

REHEM, B. C.; ALMEIDA, A. F.; MIELKE, M. S.; GOMES, F. P. Efeitos do alagamento do substrato no crescimento e na composição química de genótipos clonais de *Theobroma cacao* L. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, n. 3, p.805-815, 2009.

RUSCONI, M.; CONTI, A. *Theobroma cacao* L., the food of the gods: a scientific approach beyond myths and claims. **Pharmacological Research**, v.61, n.1, p. 5-13, 2010.

SANTOS, E. S. L.; CERQUEIRA-SILVA, C. B. M.; CLEMENT, D. P.; LUZ, E. D. M. Identificação de resistência genética do cacaueteiro à podridão-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n.4, p. 413–416, 2009.

SHIONO, K.; YAMADA, S. Waterlogging tolerance and capacity for oxygen transport in *Brachypodium distachyon* (Bd21). **Plant Root**, v. 8, n. 1, p. 5-12, 2014.

SILVA, L.S.; BOHNEN, H. Rendimento e acúmulo de nutrientes pelo arroz em solução nutritiva com e sem a adição de silício. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.25, n.3, p.771-777, 2001.

SILVA O.N.; LOBATO, A.K.S.; AVILA, F.W.; COSTA, R.C.L.; OLIVEIRA NETO, C.F.; SANTOS FILHO, B.G.; MARTINS FILHO, A.P.; LEMOS, R.P.; PINHO, J.M.; MEDEIROS, M.B.C.L.; CARDOS, M.S.; ANDRADE, I.P. Silicon-induced increase in chlorophyll is modulated by leaf water potential in two water-deficient tomato cultivars. **Plant Soil Environment**, v.58, n.11, p.481–486, 2012.

TAHIR, M.; AHMAD, S.; AYUB, M.; NAEEM, M.; SARWAR, M. A. Impact of planting time and silicon levels on yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Pakistan Journal of Life and Social Sciences**, v. 11, n.1, p. 60-64, 2013.

TESFAGIORGIS, H. B.; LAING, M. D.; ANNEGARN, H. J. Evaluation of biocontrol agents and potassium silicate for the management of powdery mildew of zucchini. **Biological Control**, v.73, n.6, p.8-15, 2014.

WU, J. W.; SHI, Y.; ZHU, Y. X.; WANG, Y. C.; GONG, H. J. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review. **Pedosphere**, v.23, n.6, p. 815–825, 2013.

YE, M.; SONG, Y.; LONG, J.; WANG, R.; BAERSON, S.; PAN, Z.; ZHU-SALZMAN, K.; XIE, J.; CAI, K.; LUO, S.; ZENG, R. Priming of jasmonate-mediated antiherbivore defense responses in rice by silicone. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.110, n.38, p.3631-3639, 2013.

YIN, L.N.; WANG, S.W.; LI, J.Y.; TANAKA, K.; OKA, M. Application of silicon improves salt tolerance through ameliorating osmotic and ionic stresses in the seedling of *Sorghum bicolor*. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.35, n.11, p. 3099-3107, 2013.