

**Toxidez de Micronutrientes em
Sorgo-Sacarino: Fotossíntese**



ISSN 1679-0456

Outubro, 2016

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agropecuária Oeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 75

Toxidez de Micronutrientes em Sorgo-Sacarino: Fotossíntese

Oscar Fontão de Lima Filho

Embrapa Agropecuária Oeste
Dourados, MS
2016

Embrapa Agropecuária Oeste

BR 163, km 253,6 – Trecho Dourados-Caarapó

79804-970 Dourados, MS

Caixa Postal 449

Fone: (67) 3416-9700

Fax: (67) 3416-9721

www.embrapa.br/

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Harley Nonato de Oliveira*

Secretária-Executiva: *Sílvia Mara Belloni*

Membros: *Auro Akio Otsubo, Clarice Zanoni Fontes, Danilton Luiz Flumignan, Ivo de Sá Motta, Marciana Retore, Michely Tomazi, Oscar Fontão de Lima Filho e Tarcila Souza de Castro Silva*

Membros suplentes: *Augusto César Pereira Goulart e Crébio José Ávila*

Supervisora editorial: *Eliete do Nascimento Ferreira*

Revisora de texto: *Eliete do Nascimento Ferreira*

Normalização bibliográfica: *Eli de Lourdes Vasconcelos*

Editoração eletrônica: *Eliete do Nascimento Ferreira*

Foto da capa: *Oscar Fontão de Lima Filho*

1ª edição

On-line (2016)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei N° 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agropecuária Oeste

Lima Filho, Oscar Fontão de

Toxidez de micronutrientes em sorgo-sacarina: fotossíntese /

Oscar Fontão de Lima Filho. — Dourados, MS : Embrapa

Agropecuária Oeste, 2016.

25 p. : il. color. ; 16 cm. x 21 cm. — (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agropecuária Oeste, ISSN 1679-0456 ; 75).

1. Fisiologia 2. Toxidez. 3. Nutriente. 4. *Sorghum bicolor*. I. Embrapa Agropecuária Oeste. II. Título. III. Série.

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	8
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	10
Conclusão	20
Referências	21

Toxidez de Micronutrientes em Sorgo-Sacarino: Fotossíntese

Oscar Fontão de Lima Filho¹

Resumo

Diversos nutrientes estão envolvidos, direta ou indiretamente, no processo fotossintético. Isto significa que tanto o excesso como a carência nutricional podem afetar a conversão da energia luminosa em energia química e, portanto, o crescimento e a produção da cultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da toxicidade de micronutrientes na fotossíntese do sorgo-sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench), planta com grande potencial de uso como complemento na produção de etanol no sistema de produção da cana-de-açúcar. Foram induzidos sintomas de toxidez de boro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco, em condições hidropônicas. Aproximadamente três dias após o aparecimento dos sintomas, com um analisador de gás no infravermelho (IRGA), foram realizadas medições dos seguintes parâmetros fisiológicos: taxa fotossintética (A); transpiração (E), condutância estomatal (Gs), gradiente de CO₂ (ΔC), concentração interna de CO₂ (Ci) e eficiência no uso da água (EUA). Níveis tóxicos de B, Cu, Mn, Mo e Zn em sorgo-sacarino afetaram significativamente os parâmetros ligados à fotossíntese e ao uso da água: gradiente de CO₂, concentração interna de CO₂, condutância estomatal, taxa fotossintética, transpiração e eficiência no uso da água. A composição mineral foliar e radicular foi afetada de modo diverso, de acordo com o

⁽¹⁾Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências (Nutrição Mineral de Plantas e Fertilidade do Solo), pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS.

micronutriente em excesso. No presente estudo, apesar da sintomatologia apresentada de excesso de Fe em sorgo-sacarino, não houve variações significativas da fotossíntese.

Termos de indexação: fisiologia, toxidez, nutriente, IRGA, *Sorghum bicolor*.

Micronutrient Toxicity in Sweet Sorghum: Photosynthesis

Abstract

*Several nutrients are involved, directly or indirectly, in the photosynthetic process. This means that both the excess and nutritional deficiency can affect the conversion of light energy into chemical energy and thus the growth and crop yield. The aim of this study was to evaluate the effect of micronutrient toxicity in sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) photosynthesis, which has great potential for use as a supplement in the production of alcohol in sugarcane production system. Toxicity symptoms of boron, copper, iron, manganese, molybdenum and zinc were induced in hydroponic conditions. About three days after the onset of symptoms, with a gas analyzer infrared (IRGA), measurements were made of the following physiological parameters: photosynthetic rate (A); transpiration (E), stomatal conductance (Gs), CO₂ gradient (ΔC), internal CO₂ concentration (Ci) and efficient use of water (USA). Toxic levels of B, Cu, Mn, Mo and Zn in sweet sorghum significantly affected the parameters related to photosynthesis and efficiency in water use: CO₂ gradient, internal CO₂ concentration, stomatal conductance, photosynthetic rate, transpiration and efficient use of water. The leaf and root mineral composition was affected different depending on the excess micronutrient. In the present study, despite of Fe symptoms in excess presented in sweet sorghum, there were no significant variations of photosynthesis.*

*Index terms: physiology, toxicity, nutrient, IRGA, *Sorghum bicolor*.*

Introdução

Todos os nutrientes têm funções específicas nos processos metabólicos das plantas. Tanto a carência como o excesso de um determinado nutriente leva a alterações moleculares e, em seguida, celulares, com aparecimento de sintomas visuais. Processos metabólicos incluem fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e outras moléculas, absorção iônica, multiplicação e diferenciação celular, entre outros (MALAVOLTA, 2006). A toxidez de um micronutriente afeta o metabolismo, influenciando o crescimento e a síntese de produtos intermediários, a absorção e utilização de outros nutrientes, a dinâmica energética do metabolismo, etc. De modo geral, o excesso de um micronutriente causa desarranjo metabólico, pela quebra de moléculas de proteínas e/ou outros componentes celulares, com clorose em desarranjos mais leves, ou levando à morte celular em casos mais severos, apresentando necrose como sintoma aparente. Causas de toxidez de micronutrientes surgem, principalmente, devido à ação antropogênica, como adubação excessiva, salinidade da água de irrigação, uso inadequado de pesticidas e co-produtos industriais, poluição ambiental, etc. (BERGMANN, 1992).

Direta ou indiretamente, a toxidez de um elemento afeta um ou mais processos fisiológicos, os quais estão interligados no metabolismo geral do vegetal. Assim, é provável que o excesso de um micronutriente interfira, de modo direto ou indireto, no processo fotossintético, o que acabará por afetar o crescimento e a produção comercial da cultura.

A associação funcional com a integridade da parede celular (boro – B), a participação como constituintes de enzimas e outras substâncias essenciais do metabolismo (cobre – Cu, ferro – Fe, manganês – Mn, molibdênio – Mo e zinco – Zn) e a ativação ou controle da atividade enzimática (Cu, Fe, Mn e Zn) (EPSTEIN ; BLOOM, 2006), caracterizam a importância que o desbalanço nutricional – neste trabalho a toxidez – de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn pode ter no processo fotossintético.

O sorgo-sacarino (*Sorghum bicolor* L. Moench) tem um grande potencial de uso como complemento na produção de álcool, dentro do sistema de produção da cana-de-açúcar. A hipótese geral é a de que o excesso dos micronutrientes citados no parágrafo anterior afeta de modo negativo a captação e incorporação de CO_2 , prejudicando também a eficiência do uso da água pelas plantas. O objetivo deste trabalho, portanto, foi avaliar o efeito da toxicidade de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn na fotossíntese do sorgo-sacarino.

Material e Métodos

Sementes de sorgo-sacarino, variedade BRS 511, foram colocadas para germinar em areia lavada e autoclavada. No estágio V2 foram transferidas para vasos plásticos, adaptados para cultivo hidropônico, com capacidade volumétrica para 3,6 litros. A solução nutritiva utilizada foi a de Johnson, modificada (EPSTEIN; BLOOM, 2006) e diluída a 1/10. Após 10 dias, a solução foi trocada para 1/1 e mantida nessa concentração, com trocas periódicas a cada 10 dias. O delineamento estatístico foi inteiramente casualizado, com sete tratamentos e três repetições, sendo que no estágio V6 foram aplicados os tratamentos relativos ao excesso de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn, além do tratamento controle (testemunha).

Foram utilizadas soluções de H_3BO_3 ; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Fe-EDTA (90 mM); $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; H_2MoO_4 (85% MoO_3) e $\text{Zn SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, para atingir a concentração final na solução nutritiva de 10; 20; 200; 100; 200 e 10 mg L^{-1} de B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn, respectivamente.

Aproximadamente três dias após o aparecimento dos sintomas de fitotoxicidade, foram realizadas medições de parâmetros fisiológicos com um analisador de gás no infravermelho (IRGA), no meio do limbo foliar da primeira folha com aurícula visível a partir do ápice. Os parâmetros medidos ou calculados foram: 1) taxa fotossintética (A) – avalia a taxa de incorporação do carbono na biomassa, em $\mu\text{mol m}^2 \text{ s}^{-1}$; 2) transpiração (E) – mede a perda de água através dos estômatos, em $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 3) condutância estomatal (Gs) – mostra a passagem de água ou CO_2 pelos

estômatos, em $\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$; 4) gradiente de CO_2 (ΔC) – é o dióxido de carbono consumido durante a fotossíntese, sendo calculado pela diferença de CO_2 do exterior da folha e o CO_2 presente no mesófilo, em $\mu\text{mol mol}^{-1}$; 5) concentração interna de CO_2 (C_i) – é o teor de gás carbônico dentro da folha (mesófilo), em $\mu\text{mol mol}^{-1}$; e 6) eficiência no uso da água (EUA) – é a relação entre o que a planta assimila de CO_2 e a perda de água pela transpiração, em $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$.

Após as medições pelo IRGA, as plantas foram coletadas e preparadas para análise química de macro e micronutrientes, segundo Malavolta et al. (1997), separando-se parte aérea (folhas + colmo) e raízes.

A análise estatística das variáveis (análise de variância, teste T e de Dunnett) foi realizada por meio do programa Assistat (SILVA; AZEVEDO, 2009).

Resultados e Discussão

Os dados apresentados na Tabela 1, referentes aos parâmetros fisiológicos obtidos com o IRGA, mostram que a fotossíntese foi significativamente afetada por causa dos níveis tóxicos dos micronutrientes no sorgo-sacarina, com exceção do ferro. A seguir, são apresentados os resultados referentes a cada um dos micronutrientes em estudo.

Boro

Níveis tóxicos de boro induziram uma queda de 31% na taxa fotossintética e 17% na eficiência no uso da água. A baixa incorporação de carbono na biomassa foi comprovada pela alta concentração de CO_2 no mesófilo das plantas com níveis tóxicos de boro, um aumento de 1.650%, corroborando a diminuição na condutância estomatal e no gradiente de CO_2 , ao redor de 30% para ambos (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros fisiológicos avaliados em sorgo-sacarino, usando o analisador de gás no infravermelho (IRGA).

	Gradiente de CO ₂ (DC)		Concentração interna de CO ₂ (Ci)		Condutância estomatal (Gs)		Taxa fotossintética (A)		Transpiração (E)		Eficiência no uso da água (EUA)	
	Controle	+Micro	Controle	+Micro	Controle	+Micro	Controle	+Micro	Controle	+Micro	Controle	+Micro
B	93,7 a**	64,7 b	3,17 b**	52,2 a	0,19 a**	0,14 b	32,6 a**	22,5 b	7,0 a*	5,8 b	4,7 a**	3,9 b
Cu	90,5 a**	4,8 b	22,8 b**	171,8 a	0,19 a**	0,01 b	31,5 a**	1,8 b	5,0 a**	0,52 b	6,4 a**	3,3 b
Fe	73,8 a	64,3 a	25,2 a	52,7 a	0,15 a	0,14 a	25,7 a	22,4 a	5,0 a	4,8 a	5,1 a**	4,7 b
Mn	94,5 a**	41,7 b	66,7 b*	118,2 a	0,26 a**	0,11 b	32,9 a**	14,6 b	4,5 a**	2,7 b	7,4 a**	5,3 b**
Mo	86,8 a**	2,2 b	98,7 b**	253,3 a	0,25 a**	0,003 b	30,2 a**	0,92 b	4,3 a**	0,27 b	6,9 a**	3,1 b
Zn	98,0 a**	31,0 b	23,3 b**	62,0 a	0,22 a**	0,06 b	34,0 a**	10,9 b	5,9 a**	2,5 b	5,8 a**	4,4 b

Nota: ** e *; médias seguidas por letras distintas, na horizontal e apenas dentro da mesma variável, diferem estatisticamente pelo teste T ao nível de 1% e 5%, de probabilidade, respectivamente.

Reid et al. (2004) obtiveram queda de 60% na respiração e 23% na fotossíntese, quando plantas de cevada (*Hordeum vulgare* L., cv. Schooner) foram supridas com 100 mM de B. O crescimento foi inibido muito antes da fotossíntese. De acordo com os autores, a diminuição na expansão de meristemas e o aparecimento de necrose de tecidos mais velhos podem ter sido as causas primordiais para a queda na fotossíntese e no crescimento. Neste caso, fotoassimilados não transportados para as áreas de crescimento (drenos) podem expor células maduras a um estresse foto-oxidativo e, conseqüentemente, a um colapso do tecido (DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 1992).

O estresse por excesso de boro afeta proteínas envolvidas na captação da luz e fixação de CO₂ (CHEN et al., 2014). Tanto deficiência como toxidez de boro podem causar estresse oxidativo, responsável pelo excesso de espécies reativas de oxigênio e seus radicais, os quais são bastante tóxicos para as plantas, como peroxidação lipídica nas membranas, desnaturaçãõ proteica ou mesmo mutaçãõ do DNA (HOSSAIN et al., 2015). Toxidez de B (entre 10 e 20 mM de B no substrato) em abobrinha (*Cucurbita pepo* L.) e pepino (*Cucumis sativus* L.) ocasionou declínio na eficiência fotossintética no fotossistema II (FS II) e aumento nos mecanismos não fotoquímicos envolvidos na dissipação do excesso de energia de excitação. Houve maior proporção de clorofila *b* em relação a clorofila *a*, menor teor de clorofilas, diminuição na taxa fotossintética, condutância estomatal e transpiração. Também houve um acentuado estresse oxidativo, evidenciado pelo acúmulo de malondialdeído, que indiretamente estima a peroxidação lipídica. O aumento de enzimas oxidativas (ascorbato peroxidase, catalase e peróxido dismutase) mostra que houve uma tentativa de defesa das plantas contra os radicais livres, cujo aumento ocorreu em decorrência do excesso de boro (LANDI et al., 2013).

A redução na assimilação de CO₂ em plantas com excesso de B pode ser causada por uma combinação de fatores, como dano oxidativo (já citado), diminuição na atividade de enzimas ligadas à fotossíntese e menor capacidade de transporte eletrônico na fotossíntese (HAN et al., 2009).

Pesquisas mostram que o dano oxidativo influencia negativamente a condutância estomatal e o processo fotossintético como um todo, principalmente no FS II, que tem um papel fundamental em relação aos estresses ambientais, o que inclui desordens nutricionais.

Níveis bastante elevados de B nos tecidos do sorgo-sacarino induziram redução significativa nos teores de N, P e Mg na parte aérea e de N, P, K e S nas raízes (Tabela 2).

Cobre

Os parâmetros ligados ao metabolismo de captação do CO_2 e da EUA mostram que a toxidez de cobre prejudicou de modo acentuado a fotossíntese e a regulação hídrica nas plantas. Tanto o ΔC como o G_s diminuíram 95% em relação às plantas não submetidas ao estresse nutricional, ao passo que o C_i aumentou 750%, indicando queda acentuada na utilização de CO_2 e, conseqüentemente, queda na taxa fotossintética (A), que foi 94% menor. A transpiração caiu 90%, mas como a incorporação de C na biomassa também diminuiu bastante, a EUA foi significativamente reduzida em cerca de 50% (Tabela 1).

O cobre participa de diversas reações de óxido-redução, além de outros processos, como no metabolismo de carboidratos, lipídeos e nitrogênio, bem como na lignificação, formação de pólen e fertilização da planta (MARSCHNER, 1995). Além disso, tem papel fundamental na fotossíntese, pois é constituinte da plastocianina, proteína mais abundante nos cloroplastos e, também, da superóxido dismutase, enzima ligada à proteção de espécies reativas de oxigênio, geradas durante o estresse oxidativo, que é derivado das reações ocorridas no processo fotossintético (YRUELA, 2013). Assim, tanto a deficiência como a toxidez de Cu causam prejuízos à fotossíntese. A toxidez pode induzir deficiência de Fe e prejudicar a peroxidação lipídica, com destruição de membranas (BERGMANN, 1992), mas não foi o que ocorreu no presente estudo, com níveis de Fe nas folhas semelhantes à testemunha. Houve, no entanto, uma acumulação significativa de Fe nas raízes de plantas com níveis excessivos de Cu – um aumento de 330%.

Tabela 2. Teores nutricionais da parte aérea e das raízes de sorgo-sacarina, em plantas normais e com níveis excessivos de Boro, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio e Zinco.

Tratamento	N		P		K		Ca		Mg		S		B		Cu		Fe		Mn		Zn	
	P.A.	Raiz	P.A.	Raiz	P.A.	Raiz	P.A.	Raiz	P.A.	Raiz	P.A.	Raiz										
Controle	51	38	12	17	58	58	4,3	1,3	3,9	1,2	2,1	16	17	25	18	31	90	7.607	21	15	61	48
+ B	47*	31*	8*	9*	56	45*	4,4	1,7	3,2*	1,3	2,0	10*	1.140*	368*	15	14	77	7.887	19	16	47	47
+ Cu	43*	31*	10*	12*	49*	20*	3,7	2,0*	3,6*	1,0	2,3	6,5*	19	19	130*	2.750*	84	17.698*	24	12	49	43
+ Fe	45*	28*	14*	26*	41*	29*	2,4*	1,3	3,4*	0,9	2,4	15	22	17	14	11	409*	25.425*	22	15	73	71
+ Mn	45*	33	9*	14	47*	55	2,7*	1,3	2,4*	1,1	2,9	19	28	21	21	98	120	5.973	2.461*	1.731*	109	150
+ Mo	45*	34	10*	6*	42*	16*	3,8	2,0*	4,4*	0,8*	1,7	3,8*	16	-	11	13	90	3.279	14	14	52	42
+ Zn	29*	34	7*	14	36*	50	3,0*	1,5	3,4*	1,0	1,4	12	16	29	12	15	105	14.044*	8	10	575*	2.859*

Nota: *médias seguidas por asterisco diferem estatisticamente, pelo teste de Dunnett, ao nível de 5% de probabilidade (bilateral), do tratamento testemunha (controle), tanto para parte aérea (P.A.) como para raiz.

Outros autores também observaram efeitos negativos na taxa fotossintética líquida e na condutância estomatal. Essa diminuição na taxa fotossintética pode estar relacionada ao efeito direto do Cu na concentração de pigmentos do aparelho fotossintético, por causar degradação na estrutura interna (CAMBROLLÉ et al., 2011; MATEOS-NARANJO et al., 2008) ou ter efeito destrutivo na integridade da membrana dos cloroplastos (ELEFThERIOU; KARATAGLIS, 1989). O efeito também pode ser indireto, pela interferência do Cu na concentração de outros elementos ligados à biossíntese de clorofila, como é o caso do Ca no FS II, Mg e N (CAMBROLLÉ et al., 2011; 2013; MARSCHNER, 1995). Neste trabalho, a toxidez de Cu afetou negativamente os teores de N, P, K e Ca na parte aérea, bem como os níveis radiculares de N, P, K e S, sendo que os dois últimos apresentaram queda bastante acentuada. Por outro lado, houve aumento de Ca e Fe nas raízes (Tabela 2).

Ferro

Apesar do Fe estar ligado a vários processos no metabolismo das plantas, incluindo fotossíntese, plantas de sorgo-sacarino com níveis tóxicos de Fe não apresentaram modificações significativas nos parâmetros ligados à fotossíntese, trocas gasosas e transpiração. Houve, apenas, diminuição significativa na eficiência no uso da água – plantas sem estresse foram 8% mais eficientes em relação àquelas com níveis elevados de Fe em seus tecidos, valor bem menor comparando-se aos obtidos pela toxidez dos demais elementos estudados (Tabela 1). Excesso de Fe pode inibir a assimilação de CO₂ e aumentar a respiração de modo anormal (BERGMANN, 1992), esta última, por causa do aumento da atividade da catalase (KAMPFENKEL et al., 1995). De acordo com Price e Hendry (1991), a toxicidade de Fe pode induzir a formação de radicais livres de oxigênio nos cloroplastos.

Apesar dos danos que a toxidez de Fe causa no metabolismo fotossintético, comprovado para outras espécies (ADAMSKI et al., 2011; PEREIRA et al., 2013), não houve prejuízo significativo para sorgo-sacarino, nas condições do presente ensaio. Mesmo os teores de Fe, na parte aérea e raízes, obtidos com a indução de toxidez não terem sido tão

elevados, proporcionalmente à testemunha, como aqueles com os demais elementos estudados, houve danos físicos visíveis, cuja sintomatologia é descrita em Lima Filho (2016).

Excesso de Fe induziu diminuição nos teores de N e K na parte aérea e raízes, e de Ca e Mg somente na parte aérea. Por outro lado, houve aumento no teor de P, tanto em folhas e colmos como no órgão subterrâneo (Tabela 2).

Manganês

Do mesmo modo como ocorreu com B e Cu, a toxidez de Mn provocou efeitos deletérios na fotossíntese, na assimilação do CO_2 e no uso da água. Tanto a taxa fotossintética como o gradiente de CO_2 e a condutância estomatal tiveram seus valores reduzidos entre 55% e 60%, aproximadamente. Apesar de menos pronunciadas, em relação aos parâmetros citados anteriormente, a transpiração e a eficiência no uso da água também foram reduzidas significativamente (- 8% e - 17%, respectivamente). Como a assimilação do CO_2 ficou reduzida em plantas com excesso de Mn, a concentração de CO_2 intercelular aumentou (167% a mais), corroborando os valores da menor taxa fotossintética (Tabela 1).

O Mn atua em diversos processos no metabolismo vegetal, incluindo fotossíntese, respiração, absorção iônica, controle hormonal, sínteses de diversas substâncias, como carboidratos, proteínas, gorduras e metabólitos secundários (MALAVOLTA, 2006). Na fotossíntese, o Mn atua diretamente na divisão da molécula de água, com liberação do gás oxigênio. Neste processo, que ocorre no FS II, o Mn passa por sucessivas oxidações, sendo reduzido no final por quatro elétrons derivados da água (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Assim, é de se esperar que estresse nutricional pelo Mn, incluindo toxidez, interfira na assimilação de C pelas plantas.

Excesso de Mn pode, dentre outras coisas, diminuir o transporte eletrônico, teor de clorofila e aumentar o “quenching” não fotoquímico, ou seja, a energia liberada na forma de calor (KITAO et al., 1997; LEE et al., 2011;

MILLALEO et al., 2013). Pode ocorrer, ainda, interação negativa com o Fe, diminuindo a absorção deste elemento, o que afeta a fotossíntese. Não foi o que ocorreu neste ensaio, mas, por sua vez, os teores de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea diminuíram, o que pode ter colaborado para a diminuição da taxa fotossintética (Tabela 2).

Molibdênio

A toxidez de Mo causou modificações nos parâmetros ligados à assimilação de carbono, semelhantes ao que ocorreu com toxidez de cobre, ou seja, os percentuais de diminuição foram semelhantes para os dois estresses (+Cu e +Mo): ΔC (- 97%), Gs (- 99%), A (- 94%), E (- 94%) e EUA (- 55%) (Tabela 1). No caso de Ci, o aumento (+ 157%) foi menos acentuado em relação à toxidez de cobre, porém similar à toxidez dos demais micronutrientes estudados, exceto ferro, cujo valor obtido não foi significativo.

Poucas enzimas contêm molibdênio, porém são muito importantes, já que estão envolvidas na assimilação do N, no metabolismo do enxofre, na síntese de fitohormônios e em reações a estresses, participando nos processos de transferência eletrônica (MALAVOLTA, 2006; SCHWARZ; MENDEL, 2006;). Há carência de pesquisas e informações a respeito do efeito de níveis elevados, ou mesmo tóxicos, de Mo na fisiologia e no metabolismo vegetal, já que sintomas de toxidez em condições de campo são muito raros. Neste ensaio, níveis elevados e tóxicos de Mo em sorgo-sacarino ocasionaram teores mais baixos de N, P e K na parte aérea, exceto para o teor de Mg, que aumentou levemente. Em relação às raízes, houve um decréscimo nos teores de Mg, P, K e S, sendo que os três últimos apresentaram uma diminuição muito forte, ao passo que a concentração de Ca aumentou (Tabela 2).

Zinco

Plantas de sorgo-sacarino com excesso de Zn foram bastante afetadas nos parâmetros ligados à fotossíntese. Houve redução significativa em ΔC (- 68%), Gs (- 73%), A (- 68%), E (- 58%) e EUA (- 24%). Como é de se

esperar, C_i apresentou comportamento oposto a ΔC , com um aumento de 166% em relação às plantas sem estresse nutricional (Tabela 1).

Excesso de Zn pode afetar o desenvolvimento e a função das células-guardas, reduzindo drasticamente a condutância estomatal (SAGARDOY et al., 2010); provocar a degradação funcional e estrutural dos fotossistemas (FS I e FS II) e diminuir a atividade da Rubisco (ribulose-1,5-bifosfato carboxilase) (HE; LEE, 2001; VAILLANT et al., 2005). A funcionalidade da clorofila pode ser afetada pela substituição parcial do Mg pelo Zn, o que pode ocorrer também na quebra da molécula de água no FS II, além de diminuir os níveis das clorofilas *a* e *b* (TSONEV; LIDON, 2012). Níveis muito elevados de Zn na planta também podem diminuir acentuadamente a síntese de ATP (REICHMAN, 2002).

A toxidez de Zn afetou drasticamente os níveis de macronutrientes na parte aérea, com exceção do S, o que contribuiu para diminuir a condutância estomatal e a assimilação de CO_2 , conseqüentemente a taxa fotossintética, além do decréscimo na EUA. A redução nos teores dos nutrientes em folhas e colmo, em conjunto, foram de 45%, 38%, 39%, 29% e 13%, respectivamente para N, P, K, Ca e Mg. Não houve variação de nutrientes nas raízes (Tabela 2).

O CO_2 consumido pelas plantas (ΔC) reflete o metabolismo de captação e conversão energética. Do mesmo modo, a condutância estomática (G_s) reflete o gradiente de CO_2 (ΔC), havendo similaridade no decréscimo destes dois parâmetros nas plantas com toxidez de B, Cu, Mn, Mo e Zn. A toxidez de cobre e molibdênio apresentou a maior diminuição no gradiente de CO_2 , em relação às plantas consideradas sem estresse, seguida pelos elementos Zn, Mn e B. Como esperado, a concentração interna de CO_2 (C_i) no mesófilo foliar teve comportamento oposto ao ΔC , ou seja, plantas com toxicidade apresentaram aumentos significativos na concentração interna de CO_2 , com percentuais de aumento de 1.650%, 750%, 167%, 157% e 166%, respectivamente para B, Cu, Mn, Mo e Zn. A condutância dos estômatos é a somatória da condutância da epiderme, que é pequena, e da condutância dos estômatos, quando abertos. O controle da abertura

destes depende de vários fatores, internos e externos à planta, incluindo níveis de CO_2 no mesófilo, potencial hídrico na planta (CONCENÇÃO et al., 2012), além dos níveis nutricionais, cujo desbalanço de um ou mais elementos pode afetar a assimilação de CO_2 , consequentemente o crescimento e desenvolvimento da planta (MARCHNER, 1995; MENGEL; KIRKBY, 2001).

As plantas com níveis em excesso de B, Cu, Mn, Mo e Zn apresentaram, em proporções distintas, modificações significativas no consumo de dióxido de carbono, ou seja, aumento na concentração interna de CO_2 e diminuição na diferença de CO_2 entre o interior e o exterior da folha. Essas variações estão relacionadas à diminuição da fotossíntese, pois a maior presença de gás carbônico no mesófilo foliar implica numa menor assimilação de carbono pela planta. Além disso, o gradiente menor de CO_2 nas plantas com toxidez nutricional também pressupõe que houve menor utilização do carbono pela planta. É o que se observa nos valores da taxa fotossintética para as plantas com estresse nutricional e aquelas em condições normais. Verifica-se, portanto, que houve diminuição significativa na incorporação de moléculas de carbono da atmosfera para a formação de biomassa, para todos os nutrientes estudados, exceto ferro. A diminuição, em termos percentuais, variou de 31% para B até 97% para Mo.

A eficiência de uso da água pela planta, que leva em conta a incorporação de carbono na biomassa e a perda de água num determinado intervalo de tempo, é baseada na relação entre a fotossíntese e a transpiração, na qual a condutância estomatal do vapor d'água também é intrínseca ao processo. A EUA está relacionada à eficiência fotossintética e à dinâmica de abertura dos estômatos, havendo absorção de CO_2 ao mesmo tempo em que ocorre perda de água por transpiração. Essa dinâmica envolve diversos fatores, incluindo nutricional e hormonal, já que potássio e citocinina são conhecidos por regular a abertura e o fechamento dos estômatos (HU et al., 2013). Considerando que a síntese, atividade e degradação das citocininas também são influenciadas por fatores nutricionais, outros nutrientes, além do potássio, são importantes no

movimento estomatal, principalmente nitrogênio, fósforo e boro (MARSCHNER, 1995). Todos os nutrientes em estudo apresentaram queda significativa na EUA, variando com um percentual de 8% para Fe, níveis intermediários de 17%, 24% e 28%, respectivamente para B, Zn e Mn, até chegar a valores mais elevados para Cu e Mo – 48% e 55%, respectivamente.

Deficiência de macro e micronutrientes afetam de modo diferenciado fatores ligados ao processo fotossintético (MARSCHNER, 1995, MENGEL; KIRKBY, 2001). Como visto, todos os elementos em excesso induziram diminuição de vários nutrientes, tanto na parte aérea como nas raízes, o que certamente contribuiu para a queda da eficiência da fotossíntese, afetando a incorporação de carbono na biomassa e a eficiência na utilização da água pelas plantas de sorgo-sacarino.

Conclusão

Níveis tóxicos de B, Cu, Mn, Mo e Zn em sorgo-sacarino afetaram significativamente os parâmetros ligados à fotossíntese e eficiência no uso da água. Ocorreu aumento na concentração de CO_2 e decréscimo no gradiente de CO_2 , condutância estomatal, taxa fotossintética, transpiração e eficiência no uso da água.

No presente estudo, apesar da sintomatologia apresentada de excesso de Fe em sorgo-sacarino, não houve variações significativas nos parâmetros ligados à fotossíntese.

A composição mineral foliar e radicular foi afetada de modo diverso, de acordo com o micronutriente em excesso.

Referências

- ADAMSKI, J. M.; PETERS, J. A.; DANIELOSKI, R.; MARCOS, A.; BACARIN, M. A. Excess iron-induced changes in the photosynthetic characteristics of sweet potato. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, n. 17, p. 2056-2062, Nov. 2011.
- BERGMANN, W. (Ed.). **Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis**. 3rd ed. Jena: Gustav Fischer, 1992. 734 p.
- CAMBROLLÉ, J.; GARCÍA, J. L.; OCETE, R.; FIGUEROA, M. E.; CANTOS, M. Growth and photosynthetic responses to copper in wild grapevine. **Chemosphere**, v. 93, n. 2, p. 294-301, Sept. 2013.
- CAMBROLLÉ, J.; MATEOS-NARANJO, E.; REDONDO-GÓMEZ, S.; LUQUE, T.; FIGUEROA, M. E. Growth, reproductive and photosynthetic responses to copper in the yellow-horned poppy, *Glaucium flavum* Crantz. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, n. 1, p. 57-64, Apr. 2011.
- CHEN, M.; MISHRA, S.; HECKATHORN, S. A.; FRANTZ, J. M.; KRAUSE, C. Proteomic analysis of *Arabidopsis thaliana* leaves in response to acute boron deficiency and toxicity reveals effects on photosynthesis, carbohydrate metabolism, and protein synthesis. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 3/4, p. 235-242, Feb. 2014.

CONCENÇO, G.; ASPIAZU, I.; FERREIRA, E. A.; GALON, L.; SILVA, A. F. Physiology of crops and weeds under biotic and abiotic stresses. In: NAJAFPOUR, M. M. (Ed.). **Applied photosynthesis**. Rijeka: InTech, 2012. p. 257-280. Disponível em: <<http://www.intechweb.org>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W. III. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 43, p. 599-626, 1992.

ELEFThERIOU, E. P.; KARATAGLIS, S. Ultrastructural and morphological characteristics of cultivated wheat growing on copper-polluted fields. **Botanica Acta**, v. 102, n. 2, p. 134-140, May 1989.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 401 p.

HAN, S.; TANG, N.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; LI, Y.; CHEN, L. S. CO₂ assimilation, photosystem II photochemistry, carbohydrate metabolism and antioxidant system of citrus leaves in response to boron stress. **Plant Science**, v. 176, n. 1, p. 143-153, Jan. 2009.

HE, J.; LEE, S. K. Relationship among photosynthesis, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase (Rubisco) and water relations of the subtropical vegetable chinese broccoli grown in the tropics by manipulation of root-zone temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v. 46, n. 2, p. 119-128, Oct. 2001.

HOSSAIN, F.; SHENGGANG, P.; MEIYANG, D.; ZHAOWEN, M.; KARBO, M. B.; BANO, A.; XIANGRU, T. Photosynthesis and antioxidant response to winter rapeseed (*Brassica napus* L.) as affected by boron **Pakistan Journal of Botany**, v. 47, n. 2, p. 675-684, 2015.

HU, L.; WANG, Z.; HUANG, B. Effects of Cytokinin and potassium on stomatal and photosynthetic recovery of Kentucky bluegrass from drought stress. **Crop Science**, v. 53, n. 1, p. 221-231, Jan./Feb. 2013.

KAMPFENKEL, K.; MONTAGU, M. V.; INZÉ, D. Effects of iron excess on *Nicotiana plumbagnifolia* plants. **Plant Physiology**, v. 107, n. 3, p. 725-735, Mar. 1995.

KITAO, M.; LEI, T. T.; KOIKE, T. Effects of manganese toxicity on photosynthesis of white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*). seedlings. **Physiologia Plantarum**, v. 101, n. 2, p. 249-256, Oct. 1997.

LANDI, M.; REMORINI, D.; PARDOSSI, A.; GUIDI, L. Boron excess affects photosynthesis and antioxidant apparatus of greenhouse *Cucurbita pepo* and *Cucumis sativus*. **Journal of Plant Research**, v. 126, n. 6, p. 775-786, Nov. 2013.

LEE, T. J.; LUITEL, B. P.; KANG, W. H. Growth and physiological response to manganese toxicity in Chinese Cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *campestris*). **Horticulture, Environment and Biotechnology**, v. 52, n. 3, p. 252-258, 2011.

LIMA FILHO, O. F. de. **Toxicidade de micronutrientes em sorgo-sacarina**: diagnose visual. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2016. 10 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Circular técnica, 38).

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. Piracicaba : Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1995. 887 p.

MATEOS-NARANJO, E.; REDONDO-GÓMEZ, S.; CAMBROLLÉ, J.; FIGUEROA, M. E. Growth and photosynthetic responses to copper stress of an invasive cordgrass *Spartina densiflora*. **Marine Environmental Research**, v. 66, n. 4, p. 459-465, Oct. 2008.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. (Ed.). **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 849 p.

MILLALEO, R.; REYES-DÍAZ, M.; ALBERDI, M.; IVANOV, A. G.; KROL, M.; HÜNER, N. P. A. Excess manganese differentially inhibits photosystem I versus II in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 1, p. 343-354, Jan. 2013.

PEREIRA, E. G.; OLIVA, M. A.; ROSADO-SOUZA, L.; MENDES, G. C.; COLARES, D. S.; STOPATO, C. H.; ALMEIDA, A. M. Iron excess affects rice photosynthesis through stomatal and non-stomatal limitations. **Plant Science**, v. 201/202, p. 81-92, Mar. 2013.

PRICE, A. H.; HENDRY, G. A. F. Iron-catalysed oxygen radical formation and its possible contribution to drought damage in nine native grasses and three cereals. **Plant, Cell and Environment**, v. 14, n. 5, p. 477-484, June 1991.

REID, R. J.; HAYES, J. E.; POST, A.; STANGOULIS, J. C. R.; GRAHAM, R. D. A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, n. 11, p. 1405-1414, Nov. 2004.

REICHMAN, S. M. **The responses of plants to metal toxicity**: a review focusing on copper, manganese and zinc. Melbourne: Australian Minerals & Energy Environment Foundation, 2002. 54 p. (Occasional paper, n. 14).

SAGARDOY, R.; VÁZQUEZ, S.; FLOREZ-SARASA, I. D.; ALBACETE, A.; RIBAS-CARBÓ, M.; FLEXAS, J.; ABADÍA, J.; MORALE, F. Stomatal and mesophyll conductances to CO₂ are the main limitations to photosynthesis in sugar beet (*Beta vulgaris*) plants grown with excess zinc. **New Phytologist**, v. 187, n. 1, p. 145-158, July 2010.

SCHWARZ, G.; MENDEL, R. R. Molybdenum cofactor biosynthesis and molybdenum enzymes. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 57, p. 623-647, 2006.

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. Principal components analysis in the software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7., 2009, Reno.[**Proceedings...**]. [S.l.]: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

TSONEV, T.; LIDON, F. C. Zinc in plants - an overview. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 24, n. 4, p. 322-333, 2012.

VAILLANT, N.; MONNET, F.; HITMI, A.; SALLANON, H.; COUDRET, A. Comparative study of responses in four *Datura* species to a zinc stress. **Chemosphere**, v. 59, n. 7, p. 1005–1013, May 2005.

YRUELA, I. Transition metals in plant photosynthesis. **Metallomics**, v. 5, n. 9, p. 1090-1109, Sept. 2013.



Agropecuária Oeste

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



CGPE 13231