

Doses de zinco e de boro e efeitos nas trocas gasosas durante a fase vegetativa do milho

Zinc and boron doses and effects of gas exchange during maize vegetative phase

Vanessa Ohana Gomes Moreira¹, Helon Hébano de Freitas Sousa², Thiago Henrique Ferreira Matos Castañon³, Boanerges Freire de Aquino⁴

RESUMO: A disponibilidade de nutrientes é um fator que pode afetar as trocas gasosas das culturas. O objetivo desse estudo foi avaliar os efeitos da aplicação dos micronutrientes zinco (Zn) e boro (B) na fotossíntese, condutância estomática e transpiração de plantas de milho cultivadas em Cambissolo Eutrófico durante a fase vegetativa. O estudo foi realizado em casa de vegetação com a condução de dois experimentos concomitantemente. Em um experimento aplicou-se níveis de doses de zinco (0, 2, 4 e 6 mg dm⁻³). No outro, foram aplicadas doses de boro (0, 1, 2 e 3 mg dm⁻³). O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com cinco repetições. O estudo teve duração de 50 dias após a emergência das plantas. As variáveis avaliadas foram: taxa de fotossíntese (Tf), transpiração foliar (E) e condutância estomática (gs). A partir desses parâmetros, foi possível calcular a eficiência momentânea (EUAm = Tf/E) e intrínseca (EUAi = Tf/g_s) do uso da água. A aplicação de doses de Zn e B resultou em diferenças significativas (P < 0,01) em todas as variáveis. A dose de 6 mg dm⁻³ de Zn resultou em menor fotossíntese e maior condutância estomática e transpiração. As doses de B utilizadas causaram aumento linear na fotossíntese, condutância estomática e transpiração. Observou-se que as doses dos micronutrientes Zn e B aumentam significativamente as trocas gasosas de plantas de milho em estágio vegetativo e há redução da taxa fotossintética a partir da dose de 3,75 mg dm⁻³ de Zn.

Palavras-chave: Comportamento fisiológico. Micronutrientes. Nutrição mineral. *Zea mays* L.

ABSTRACT: Nutrient availability is a factor that affects crops' gas exchange. Current study evaluates the effects of the application of micronutrients zinc (Zn) and boron (B) on photosynthesis, stomatic conductance and transpiration of corn plants grown in Eutrophic Cambide during the vegetative phase. The study was carried out in a greenhouse with two concomitant experiments. In the first experiment, zinc dose levels (0, 2, 4 and 6 mg dm⁻³) were applied, whilst in the other, boron doses (0, 1, 2 and 3 mg dm⁻³) were applied. Experimental design was totally randomized, with five replications. Study lasted 50 days after plant emergence. Variables evaluated comprised photosynthesis rate (Tf), leaf transpiration (E) and stomatic conductance (gs). Above parameters were employed to calculate the momentary (EUAm = Tf/E) and intrinsic (EUAi = Tf/g_s) efficiency of water use. The application of Zn and B doses resulted in significant differences (p < 0.01) in all variables. Further, 6 mg dm⁻³ of Zn resulted in lower photosynthesis rates and greater stomatic conductance and transpiration. B doses caused linear increase in photosynthesis, stomatic conductance and transpiration. Doses of micronutrients Zn and B significantly increased gas exchange of corn plants in vegetative stage. Photosynthetic rate decreased as from dose 3.75 mg dm⁻³ of Zn.

Keywords: Micronutrients. Mineral nutrition. Physiological behavior. *Zea mays* L.

Autor correspondente:

Vanessa Ohana Gomes Moreira: van_ohana1@hotmail.com

Recebido em: 17/03/2020

Aceito em: 01/09/2020

INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal por volume mais produzido no mundo entre todas as culturas de grãos, como trigo e arroz. É cultivado em diferentes condições de ambiente, em regiões frias e quentes, gerando diferentes

¹ Engenheira Agrônoma e Doutoranda em Ciência do Solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza (CE), Brasil.

² Professor Permanente do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza (CE), Brasil.

³ Engenheiro Agrônomo e Doutor em Agricultura Tropical pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá (MT), Brasil.

⁴ Professor Aposentado do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza (CE), Brasil. In memoriam.

potenciais de produtividade (ARTUZO *et al.*, 2018; DESWAL; PANDURANGAM, 2018) e possui um papel significativo na nutrição humana e animal (MARTINS *et al.*, 2012).

Dentre os fatores que podem prejudicar a qualidade da produção das plantas de milho, destaca-se a disponibilidade de nutrientes no solo. Embora a participação dos micronutrientes seja menor, a falta de qualquer um deles pode resultar perdas significativas de produção devido a influência desses elementos em funções fisiológicas importantes como fotossíntese e atividade e estruturação de enzimas e proteínas (ILYAS *et al.*, 2015).

O zinco (Zn) e o boro (B) são os micronutrientes que, com mais frequência, se mostram deficientes em solos brasileiros (RIBEIRO; SANTOS; MENEZES, 1994). A baixa fertilidade de alguns solos, a remoção pelas colheitas e o uso crescente de calcário e adubos fosfatados são fatores que podem contribuir para maior insolubilização desses micronutrientes, influenciando no rendimento e produção das culturas.

O Zn é constituinte de inúmeras moléculas e sua deficiência provoca perturbações nas atividades das enzimas envolvidas na fixação de carbono que ocorre no processo de fotossíntese (HANSCH *et al.*, 2009). Além disso, assume um papel crucial em algumas funções celulares básicas, por exemplo, metabolismo de proteínas e ácido indolacético (TIONG *et al.*, 2015).

O B está envolvido em diferentes processos tais como aumento e diferenciação celular, integridade e função da membrana, metabolismo fenólico e translocação de açúcar (MARSCHNER, 1995). A falta de B no solo pode promover a redução da área foliar e alterações de compostos presentes nas folhas, influenciando em processos fisiológicos, como a fotossíntese e a transpiração (KEURBAUY, 2004).

Apesar da importância dos altos rendimentos da cultura do milho, a influência de Zn e B nas trocas gasosas ainda não foi avaliada suficientemente, por isso mesmo a avaliação desses parâmetros nos estágios iniciais do desenvolvimento das plantas pode indicar, antecipadamente, se esses micronutrientes agem nesses processos (FUJIYAMA *et al.*, 2019).

Diante desse contexto, neste estudo objetivou-se avaliar a taxa de fotossíntese, transpiração e condutância estomática durante a fase vegetativa do milho cultivado em função de doses crescentes de zinco e boro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em casa de vegetação, localizada no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (latitude 3°44'25.45"S, longitude 38°34'31.62"O), Fortaleza (CE), em vasos contendo 5 dm³ de substrato, no período de junho de 2016 a abril de 2017.

Segundo a classificação de Köppen, o local de realização do estudo apresenta clima do tipo Aw', considerado tropical chuvoso (AQUINO *et al.*, 2007; CAJAZEIRA; ASSIS JÚNIOR, 2011). A média anual de precipitação da região é de 1.523 mm, a evapotranspiração potencial é de 1.747,2 mm e a temperatura média anual igual a 26,9 °C (SOUSA *et al.*, 2010).

A temperatura e umidade relativa do ar foram monitoradas dentro da casa de vegetação, durante a coleta dos dados de trocas gasosas, variando de 25,4 a 30,4 °C e 63,7 a 95,3%, respectivamente, durante as 6h e 13h.

O solo utilizado como substrato foi coletado na camada de 0-0,25 m de uma área de mata nativa da Chapada do Apodi (CE), área de potencial agrícola do município de Limoeiro do Norte, a 198 km de distância da cidade de Fortaleza, sendo classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, textura franco argilo-arenosa (SANTOS *et al.*, 2018), que apresenta 51,5; 17,3; e 31,2 g dm⁻³ de areia, silte e argila, respectivamente.

Na caracterização química do solo, obteve-se os seguintes resultados: pH em H₂O = 7,6; CE = 0,26 dS m⁻¹; matéria orgânica = 27,68 g dm⁻³; K = 0,36 cmol_c dm⁻³, Ca = 6,30 cmol_c dm⁻³; Mg = 3,40 cmol_c dm⁻³; B = 0,23 mg dm⁻³; Cu = 0,6 mg dm⁻³; Fe = 45 mg dm⁻³; Mn = 1,5 mg dm⁻³; Zn = 0,3 mg dm⁻³; H+Al = 2,23 cmol_c dm⁻³, SB = 9,2 cmol_c dm⁻³; V = 80 %; e CTC = 11,5 cmol_c dm⁻³.

Foram realizados dois experimentos, em mesmas condições, utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com cinco repetições. Em um experimento, realizou-se a fertilização com níveis de zinco (Zn), sendo aplicadas doses de 0, 2, 4 e 6 mg dm⁻³, utilizando como fonte o sulfato de Zn (ZnSO₄·7H₂O). No outro, foi realizada a adubação com níveis de boro (B), sendo os tratamentos compostos pelas doses de 0, 1, 2 e 3 mg dm⁻³, na forma de ácido bórico (H₃BO₃) (ALLEN *et al.*, 1976).

Com base nos resultados da análise química, foi feita a correção da fertilidade do solo conforme recomendação do Manual de adubação e calagem para o Estado do Ceará (AQUINO *et al.*, 1993), aplicando-se 0,3 g dm⁻³ de N (sulfato de amônio - (NH₄)₂SO₄); 0,12 g dm⁻³ de P (superfosfato triplo - Ca(H₂PO₄)₂·2H₂O); 0,2 g dm⁻³ de K (cloreto de potássio - KCl); 5 mg dm⁻³ de Mn (sulfato manganoso hidratado - MnSO₄·H₂O); 2,4 mg dm⁻³ de Fe (Fe-EDTA); 1 mg dm⁻³ de Cu (sulfato cúprico hidratado - Cu₅O₄·5H₂O); 0,2 mg dm⁻³ de Mo (molibdato de amônio - (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O); 1,2 mg dm⁻³ de B (ácido bórico - H₃BO₃) (aplicado no experimento com zinco) e 3,2 mg dm⁻³ de Zn (sulfato de zinco - ZnSO₄·7H₂O) (aplicado no experimento com boro).

Os vasos utilizados tinham capacidade de 10 dm³, entretanto, para preenchê-los com o solo, estabeleceu-se uma densidade global de 1,3 g cm⁻³ para todas as parcelas. Dessa forma, cada vaso foi preenchido com 5 dm³ de terra fina seca ao ar (TFSA) e dispostos sobre a bancada de concreto da casa de vegetação, a 88 cm de altura do solo. A seguir, sementes de milho (*Zeamay* L.) BRS 4104 foram semeadas, que germinaram após 7 dias, sendo acompanhado o desenvolvimento das plantas até completar 50 dias após a emergência das plantas (DAE).

A aplicação dos fertilizantes foi realizada aos 7 DAE, após a realização do desbaste. Os fertilizantes fonte de nitrogênio e potássio foram reaplicados 20 dias após a primeira adubação.

A irrigação foi realizada diariamente com a utilização de água destilada, com o objetivo de manter o solo na umidade da capacidade de campo, previamente obtida pelo método gravimétrico em laboratório (BONFIM-SILVA *et al.*, 2011).

Inicialmente, as massas da parte aérea e das raízes não foram levadas em consideração na estimativa da quantidade de água a ser colocada diariamente. Entretanto, a partir dos 20 DAE, amostras de raízes e da parte aérea foram pesadas para estimar a correção dos valores de referência. Para isso, algumas parcelas com plantas foram cultivadas, nas mesmas condições das parcelas do experimento, para serem cortadas aos 20 DAE e 45 DAE.

A taxa de fotossíntese (Tf), taxa de transpiração (E) e condutância estomática (gs) foram avaliadas aos 50 DAE com uso de um medidor portátil de fotossíntese, IRGA, modelo LI-6400 (LI-COR) que mede a concentração de CO₂ e de vapor de água, por radiação infravermelha. O equipamento ainda mede a temperatura e umidade relativa do ar. As medidas foram feitas sempre na região mediana da folha completamente expandida, exposta à radiação solar no período das 09h às 10h30min (SILVA *et al.*, 2010) em um dia ensolarado e sem nuvens.

Com os parâmetros de trocas gasosas, foi possível calcular a Eficiência momentânea (EUAm) (EUAm = Tf/E) e intrínseca (EUAi) (EUAi = Tf/g_s) do uso da água (OSMOND *et al.*, 1980).

Para a análise estatística utilizou-se o *software* SPSS. Os dados foram submetidos ao teste Fao nível de 1% de significância (p < 0,01), realizando análises de regressão para as variáveis que apresentaram diferença significativa. Os gráficos foram confeccionados com uso do *software* SIGMAPLOT versão 14.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DOSES DE ZINCO

As plantas de milho responderam positivamente as doses de zinco (Zn) aplicadas, apresentando diferenças significativas (p < 0,01) nas taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração (Figura 1).

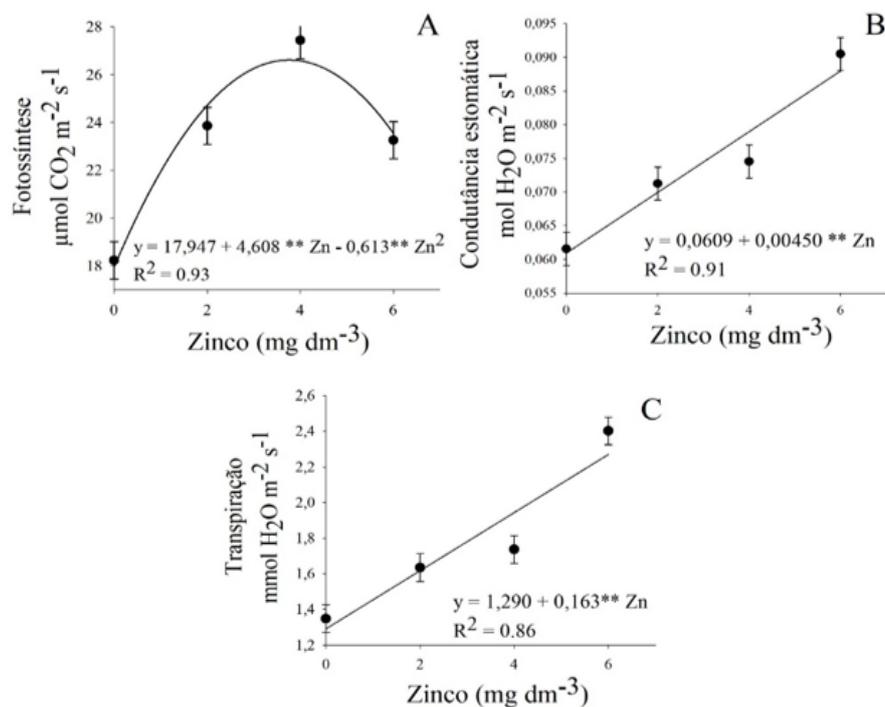


Figura 1. Taxa de Fotossíntese (A), Condutância estomática (B) e Transpiração (C) das plantas de milho aos 50 DAE em função das doses de zinco. As barras representam o erro padrão do ponto médio.

642

A taxa de fotossíntese ajustou-se ao modelo quadrático de regressão apresentando maior taxa quando atingiu $26,6 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ na dose de $3,75 \text{ mg dm}^{-3}$ com posterior decréscimo a partir dessa (Figura 1A).

Esses resultados demonstram que a deficiência desse elemento afeta negativamente as plantas, resultando uma menor atividade fotossintética. Por outro lado, o Zn em elevada concentração no solo também interfere no comportamento fisiológico do milho, pois na maior dose aplicada houve redução significativa do processo de fotossíntese (Figura 1A).

O Zn participa da fotossíntese ativando a enzima carboxilase pirúvica (PEPcase) (MALAVOLTA, 2006). Essa enzima catalisa a carboxilação primária, durante o processo de assimilação de gás carbônico (CO_2), produzindo um ácido de quatro carbonos, que é descarboxilado e libera o CO_2 , o qual é refixado pela RuBP carboxilase/oxigenase (RUBISCO) via ciclo de Calvin-Benson (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Contudo, uma inibição no processo fotossintético ocorre quando há excesso deste elemento no solo devido à redução da atividade da Rubisco, causada pela competição do Zn com o magnésio no sítio de ativação desta enzima; e pela redução da atividade do fotossistema II (PS II) em função do deslocamento do manganês pelo excesso de Zn na membrana do tilacóide (FAGERIA, 2001; KAYA; HIGGS, 2001; MISRA; RAMANI, 1991).

Portanto, supõe-se que as modificações no aparato fotossintético, na pigmentação e no rendimento do sistema PSII, devido ao excesso de Zn, sejam as principais causas das alterações na assimilação de CO_2 . Cabe salientar que a taxa de fotossíntese das plantas tem alta correlação com a assimilação líquida de CO_2 . Essa relação já foi observada, anteriormente, para a soja (CAMPBELL; ALLEN; BOWES, 1988; FUJIYAMA *et al.*, 2019).

Por outro lado, no caso da deficiência, uma inibição da intensidade do processo é mais provável devido a alterações na atividade de enzimas que contêm o zinco envolvido nas reações (KAZNINA; TITOV, 2017). Resultados semelhantes envolvendo o Zn e a taxa de fotossíntese foram obtidos na cultura do feijão (ASSCHE; CLIJSTERS, 2012) em gramínea (ANDREJIĆ *et al.*, 2018) e para o trigo (KAZNINA; TITOV, 2017), confirmando o papel desse micronutriente no comportamento fisiológico das culturas.

A condutância estomática foi significativa para o modelo linear de regressão, com incremento de 31% quando comparado a dose 6 mg dm⁻³ de Zn em relação à ausência da aplicação (Figura 1B). Isso demonstra a importância do Zn na funcionalidade dos estômatos, contribuindo para a abertura estomática e trocas gasosas.

A menor condutância dos estômatos e baixa eficiência de uso da água pelas plantas já foram associadas à falta de Zn no solo. Isso ocorre pelo envolvimento do Zn com o funcionamento da enzima anidrase carbônica (CA), que mantém adequados os níveis de HCO₃ nas células-guarda, controlando a captação de potássio (K⁺). Com a diminuição da atividade da CA, o influxo de K⁺ é baixo e, portanto, a forma dessas células pode mudar, interferindo no funcionamento dos estômatos (MUKHOPADHYAY; MONDAL, 2015).

A transpiração nas folhas também se ajustou ao modelo linear de regressão, com incremento de 43%, quando realizada a comparação com a maior dose aplicada e a ausência da aplicação (Figura 1C).

Percebe-se que, com a aplicação da dose de 6 mg dm⁻³ de zinco, houve maior transpiração e condutância estomática, porém menor taxa fotossintética, sugerindo que doses maiores de zinco interferem negativamente na assimilação do CO₂ pelas plantas de milho, mesmo que ocorra a abertura dos estômatos.

Com isso, denota-se que a redução da taxa de fotossíntese na maior dose de Zn não ocorre devido a fatores estomáticos, e sim a não-estomáticos ou bioquímicos, como: a redução na eficiência fotoquímica PS II e no teor de clorofila, devido a alterações na atividade das enzimas fotossintéticas, como sugerido anteriormente. Uma vez que as taxas de condutância estomática e transpiração aumentaram à medida que havia o incremento das doses do micronutriente no solo, o que potencializaria a fotossíntese, porém, o contrário ocorreu.

As plantas que receberam a maior dose não apresentaram sintomas visuais de excesso de zinco, apenas as plantas submetidas à ausência desse micronutriente (testemunha) tiveram um crescimento inferior e menor espessura do colmo quando comparadas aos demais tratamentos.

A eficiência momentânea (EUAm) de uso da água apresentou redução significativa, ajustando-se ao modelo quadrático de regressão com o incremento do Zn no solo, chegando ao maior valor quando atingiu 15,8 μmol CO₂/mmol H₂O na dose 2,4 mg dm⁻³ de Zn (Figura 2A).

A eficiência intrínseca (EUAi) também se ajustou ao modelo quadrático de regressão com maior valor de 361 μmol CO₂/mmol H₂O na dose de 2,8 mg dm⁻³ de Zn (Figura 2B). Isso ocorreu como resultado do aumento linear da transpiração e condutância estomática, com o incremento de Zn no solo, e a redução da taxa de fotossíntese na dose de 6 mg dm⁻³.

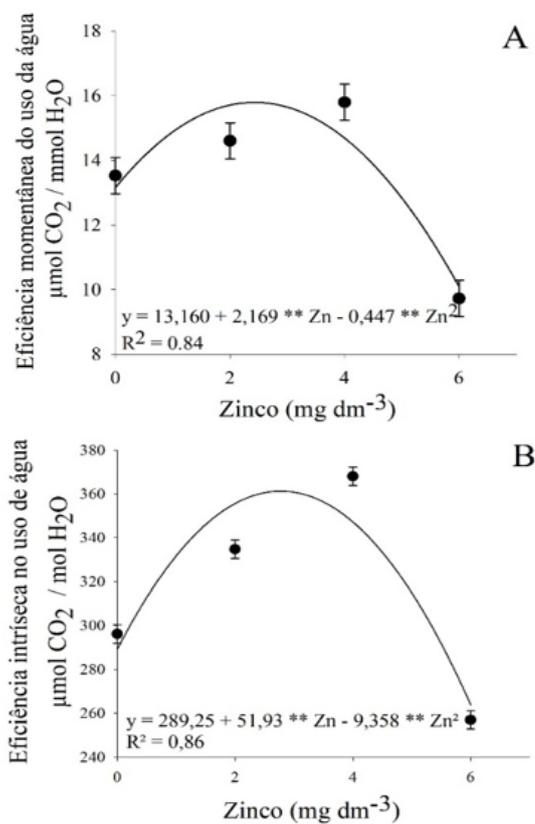


Figura 2. Eficiência momentânea (A) e intrínseca (B) do uso da água das plantas de milho em função das doses de zinco. As barras representam o erro padrão do ponto médio.

644

Os resultados encontrados neste trabalho sugerem que o incremento de Zn no solo pode aumentar a eficiência de uso de água, porém, em excesso, o micronutriente resulta em plantas com menor tolerância ao déficit hídrico.

De acordo com Fageria (2000), para obtenção de 90% da produção relativa do milho em Latossolo argiloso, recomenda-se níveis de Zn entre 0,5 e 5,0 mg dm^{-3} , corroborando os resultados encontrados nesse estudo; no entanto, diferentemente dos níveis recomendados por Abreu (1996), situado na faixa entre 0,5 e 1,2 mg dm^{-3} . O tipo de solo e a variedade da cultura são fatores que podem influenciar na recomendação adequada dos nutrientes (MALAVOLTA, 2006).

Esses resultados e levantamentos demonstram a importância do manejo correto na nutrição das plantas para as trocas gasosas, em especial ao zinco, influenciando na produção e no manejo da adubação da cultura do milho.

3.2 DOSES DE BORO

As plantas de milho responderam positivamente às aplicações de doses de boro (B) com relação às taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração ($p < 0,01$) (Figura 3).

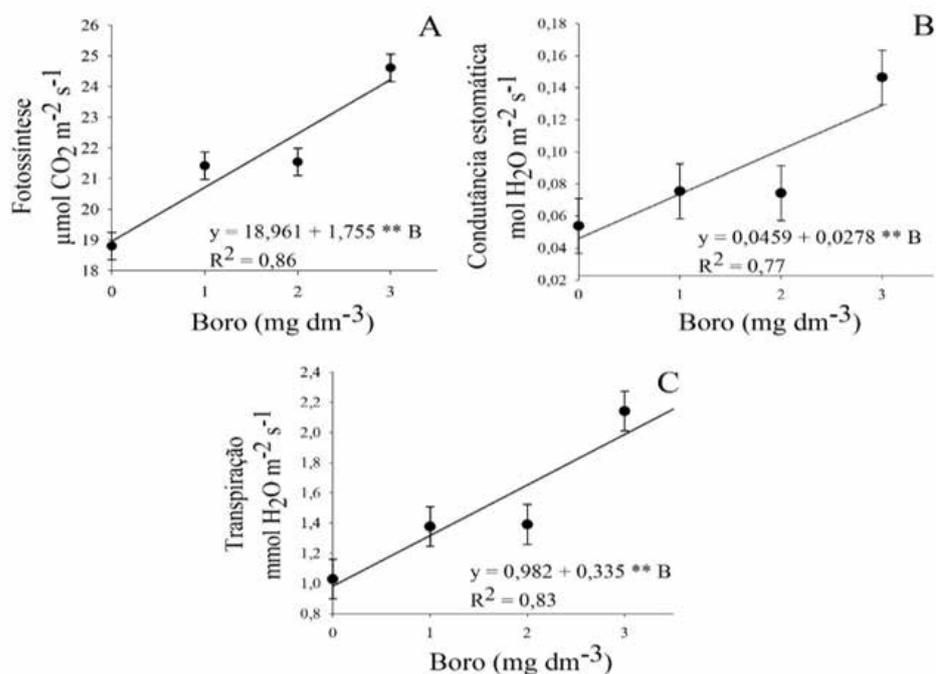


Figura 3. Taxa de Fotossíntese (A), Condutância estomática (B) e Transpiração (C) das plantas de milho aos 50 DAE em função das doses de boro. As barras representam o erro padrão do ponto médio.

A taxa de fotossíntese foi significativa para o modelo linear de regressão, com incremento de 22%, comparando a ausência da aplicação e a dose de 3 mg dm³ (Figura 3A).

O incremento da oferta de B no solo, provavelmente, influenciou na abertura estomática, facilitando a difusão do CO₂ nas folhas. Outra possível causa do aumento na taxa de fotossíntese é devido ao efeito da aplicação de B estar relacionada ao aumento no número e dimensão dos estômatos.

Embora não se saiba o verdadeiro papel do B na fotossíntese, são relatadas funções na biossíntese da parede celular e no metabolismo de carboidratos (CAKMAK; RÖMHELD, 1997) na síntese de polifenóis (BLEVINS; LUKASZEWSKI, 1998), no transporte de açúcares através de membranas (TAIZ; ZEIGER, 2013), na síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA) e no potencial hídrico e abertura estomática (SHARMA; RAMCHANDRA, 1990).

O aumento de taxa de fotossíntese devido à aplicação de B também foi obtido para outras plantas cultivadas como algodão (LI *et al.*, 2017), nabo (*Brassica rapa*) (HAJIBOLAND; FARHANGHI, 2010), chá (*Camellia sinensis*) (MUKHOPADHYAY; OSH; MONDAL, 2013) e pistache (*Pistacia vera*) (TAVALLALI, 2017), confirmando o papel do B nas trocas gasosas em diversas espécies de plantas.

Em estudo com plantas de *Brassica campestris* L., Sharma e Ramchandra (1990) relatam reduzida taxa de fotossíntese líquida, sob deficiência de B. Para os autores, esses resultados estão relacionados, em grande parte, à menor atividade da reação de Hill e à baixa concentração de CO₂ intercelular causada pela alta resistência de abertura estomática nas folhas.

A menor assimilação líquida de CO₂ foi relacionada à baixa condutância estomática em folhas jovens e velhas de plantas de chá (*Camellia sinensis* L.) cultivada sob baixo suprimento de B. A eficiência fotoquímica e o rendimento quântico do PS II não foram influenciados pela deficiência do elemento (HAJIBOLAND; BASTANI, 2012).

A condutância estomática ajustou-se ao modelo linear de regressão, com acréscimo de 64%, na comparação com a ausência da aplicação e a dose de 3 mg dm³ (Figura 3B), resultado que pode estar relacionado ao aumento da abertura estomática, conforme sugerido anteriormente.

Evidências na literatura também indicam que o B influencia no número adequado, na integridade estrutural dos estômatos e na captação líquida de K⁺ pelas células-guarda (WIMMER; EICHERT, 2013).

A taxa de transpiração das folhas apresentou efeito significativo para o modelo linear de regressão, com incremento de 51%, quando comparado à dose de 3 mg dm⁻³ de boro com a ausência da aplicação (Figura 3C). Esse aumento pode ser atribuído, substancialmente, à maior frequência e à abertura estomática.

Pinho *et al.* (2010) relataram existência de correlação linear entre a condutância estomática e a transpiração com a aplicação de doses de B em folhas de coco (*Cocos nucifera*). Em plantas de algodão (*Gossypium hirsutum*), o incremento das doses de B também resultou aumento significativo na taxa de fotossíntese, na condutância estomática e na taxa de transpiração (AHMAD *et al.*, 2019).

Resultados semelhantes em relação às trocas gasosas foram encontrados para soja (*Glycine max* L.) em Latossolo de textura argilosa, porém os autores relatam que a partir da dose de 4,8, 3,2 e 3,2 mg dm⁻³ de B, houve redução significativa nas taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração, respectivamente (FUJIYAMA *et al.*, 2019).

Os resultados encontrados nesse estudo para o milho corroboram os níveis recomendados por Fageria (2000) para uma produção máxima da cultura do milho em Latossolo de textura argilosa, que está entre 0,4 e 4,7 mg dm⁻³ de B.

A eficiência momentânea e eficiência intrínseca do uso da água ajustaram-se ao modelo linear de regressão, com decréscimo de 33% e 45%, respectivamente, quando comparado à ausência da aplicação de boro com a dose de 3 mg dm⁻³ (Figura 4A) (Figura 4B). Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da condutância estomática e da taxa de transpiração das folhas à medida que foram aumentadas as doses de B no solo.

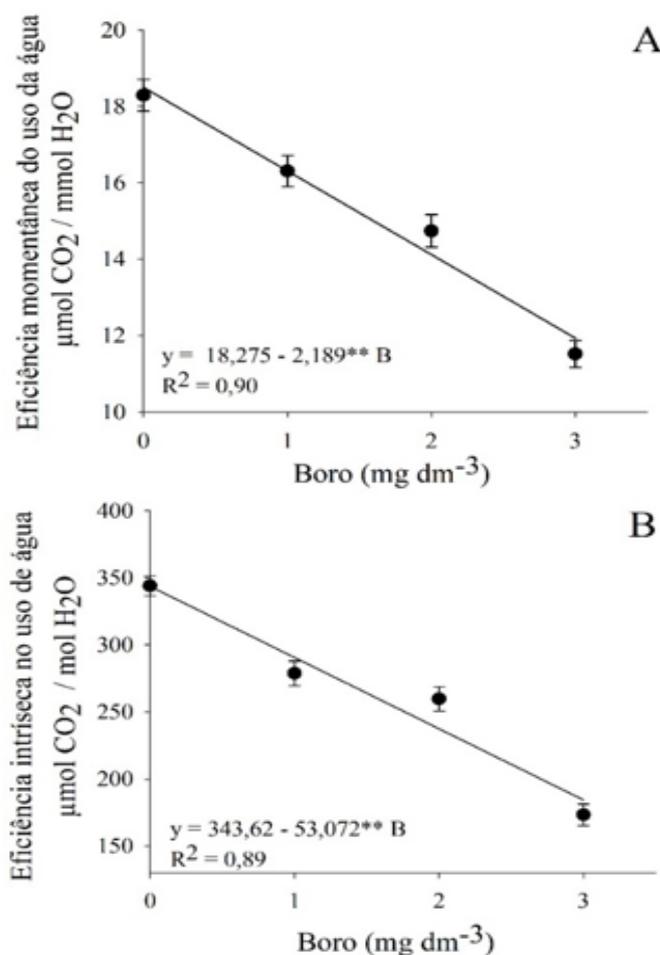


Figura 4. Eficiência momentânea (A) e intrínseca do uso da água (B) das plantas de milho em função das doses de boro. As barras representam o erro padrão do ponto médio.

A abertura dos estômatos está relacionada ao uso mais eficiente da água pelas plantas, pois enquanto as células absorvem o CO₂ para o processo de fotossíntese, a água é perdida para o ambiente por evapotranspiração (TAIZ *et al.*, 2017). Esses resultados sugerem que o incremento de B no solo pode reduzir a eficiência do aproveitamento de água pelas plantas.

Resultados de redução da eficiência de uso da água devido ao incremento de níveis de B foram obtidos em brócolis (*Brassica oleracea* L.) em condições salinas (SMITH *et al.*, 2010). O contrário foi observado em girassol (*Helianthus annuus* L.) sob déficit hídrico (SHEHZAD *et al.*, 2016).

Sugere-se a avaliação desses parâmetros da cultura do milho sob diferentes doses de B em condições de déficit hídrico, onde a primeira reação das plantas é o fechamento dos estômatos e a redução das trocas gasosas (PAULA *et al.*, 2012).

4 CONCLUSÕES

A aplicação de doses crescentes de zinco e boro em Cambissolo eutrófico aumenta significativamente as trocas gasosas das plantas de milho em estágio vegetativo.

Há redução da atividade fotossintética de plantas de milho a partir da dose de 3,75 mg dm⁻³ de zinco.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. **Análise do solo para micronutrientes**: tema de reuniões de laboratórios. Piracicaba: Informações Agronômicas, 1996. (n. 74).
- AHMAD, S.; HUSSAIN, N.; AHMED, N.; ZAKA, S. M. Influence of boron nutrition on physiological parameters and productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) crop. **Pakistan Journal of Botany**. Pakistan, v. 51, n. 2, p. 401-408, abr. 2019.
- ALLEN, S. E.; TERMAN, G. L.; CLEMENTS, L. B.; MIKKELSEN, R. **Greenhouse techniques for soil - plant-fertilizer research**. Alabama: Muscle schools, 1976.
- ANDRJIĆ, G.; GAJIC, G.; PRICA, M.; DZELETOVIC, Z.; RAKIC, T. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll *a* fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus × giganteus* plants. **Photosynthetic**, v. 56, p. 1249-1258, jun. 2018.
- ARTUZO, F. D.; FAGUESATTO, C. R.; SOUZA, A. R. L. de; SILVA, L. X. da. Costs management in maize and soybean production. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**. São Paulo, v. 20, n. 2, p. 273-294, abr./jun. 2018.
- ASSCHE, F. V.; CLIJSTERS, H. Inhibition of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* by treatment with toxic concentration of zinc: Effect on Ribulose - 1,5 - bisphosphate - carboxylase/oxygenase. **Physiologia Plantarum**, Bélgica, v. 66, n. 4, p. 717-721, abr. 2006.
- AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, M. A.; GOMES FILHO, E.; COSTA, R. N. T. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 961-971, jun. 2007.
- AQUINO, A. B. *et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Ceará**. Fortaleza: UFC, 1993.
- BLEVINS, D. G.; LUKASZEWSKI, K. M. Boron in plant structure and function. **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 49, p. 481-500, 1998.

BONFIM-SILVA, E. M.; DA SILVA, T. J. A.; CABRAL, C. E. A.; KROTH, B. E.; REZENDE, D. Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 180-186, abr./jun. 2011.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 258-267, abr./jun. 2011.

CAKMAK, I.; RÖMHELD, V. Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant Soil**, Holanda, v. 193, n. 1/2, p. 71-83, 1997.

CAMPBELL, W. J.; ALLEN JÚNIOR, L. H.; BOWES, G. Effects of CO₂ concentration on rubisco 217 activity, amount, and photosynthesis in soybean leaves. **Plant Physiology**, v. 88, n. 4, p. 1310 -1316, dez. 1988.

DESWAL, K.; PANDURANGAM, V. Morpho-physiological and biochemical studies on foliar application of zinc, iron and boron in Maize (*Zea Mays* L.). **Journal of pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 2, p. 3515-3518, maio. 2018.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 1, p. 57-62, out. 2000.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 390-395, out. 2000.

FAGERIA, N. K. Screening method of lowland rice genotypes for zinc uptake efficiency. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 623-626, jul./set. 2001.

FUJIIYAMA, B. S.; SILVA, A. B. B.; SILVA JÚNIOR, M. L.; CARDOSO, N. R. P.; FONSECA, A. B.; VIANA, R. G.; SAMPAIO, L. S. Boron fertilization enhances photosynthesis and water use in soybean at vegetative growth stage. **Journal of plant nutrition**, v. 42, n. 19, jul. 2019.

HAJIBOLAND, R.; BASTANI, S. Tolerance to water stress in boron-deficient tea (*Camellia sinensis*) plants. **Folia Horticulturae**, Krakow, v. 24, n. 1, jan. 2012.

HAJIBOLAND, R.; FARHANGHI, F. Remobilization of boron, photosynthesis, phenolic metabolism and antioxidant defense capacity in boron deficient turnip (*Brassica rapa* L.) plants. **Journal Soil Science and Plant Nutrition**. Chile, v. 56, n. 3, p. 427-437, fev. 2010.

HANSCH, R.; MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). **Plant Biology**. Germania, v. 12, n. 3, p. 259-266, jul. 2009.

ILYAS, A.; ASHRAF, M. Y.; HUSSAIN, M.; ASHRAF, M.; AHMED, R.; KAMAL, A. Effect of micronutrients (Zn, Cu and B) on photosynthetic and fruit yield attributes of citrus reticulata blanco var. Kinnow. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi. v. 47, n. 4, p. 1241-1247, ago. 2015.

KAZNINA, N. M.; TITOV, A.F. Effect of zinc deficiency and excess on the growth and photosynthesis of winter wheat. **Journal of stress Physiology and Biochemistry**, Petrozavodsk, v. 13, n. 4, p. 88-94, 2017.

KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, out. 2001.

KEURBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.

LI, M.; ZHANG, Z.; ZHANG, W.; ZHOU, J.; XU, F.; LIU, X. Effects of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Scientific reports**. Inglaterra, v. 7, n. 4420, nov. 2017.

- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. Minas Gerais: Agronômica Ceres, 2006.
- MARTINS, F. A.; FERREIRA, F. M. D.; FERREIRA, F. D.; BANDO, E.; NERILO, S. B.; HIROOKA, E. Y.; MACHINSKI, M. J. R. Daily intake estimates of fumonisins in corn-based food products in the population of Parana, Brazil. **Food Control**, Holanda, v. 26, n. 2, p. 614-618, jul. 2012.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995.
- MISRA, A.; RAMANI, S. Inhibition of iron absorption by zinc induced Fe-deficiency in Japanese mint. **Acta Physiologica Plantarum**, Alemanha, v. 13, n. 1, p. 37-42, 1991.
- MUKHOPADHYAY, M.; MONDAL, T. R. Effect of zinc and boron on growth a water relations of *Camellia sinensis* L. O. kuntze cv. T-78. **National Academy Science Letters**, Índia, v. 38, n. 3, p. 283-286, jun. 2015.
- MUKHOPADHYAYA, M.; GOSH, P. D.; MONDAL, T. K. Effect of boron deficiency on photosynthesis and antioxidant responses of young tea plantlets. **Russian Journal of plant Physiology**, India, v. 60, n. 5, p. 633-639, maio. 2013.
- OSMOND, C. B.; WINTER, K.; POWLES, S. B. Adaptive significance of carbon dioxide cycling during photosynthesis in water stressed plants. *In*: TURNER, N. C.; KRAMMER, P. J. (ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**, 1980. p. 139-154.
- PAULA, R. C. de; PAULA, N. F. de; MARINO, C. L. Breeding Perennial Species for abiotic stress. *In*: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (ed.). **Plant Breeding for Abiotic Stress Tolerance**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 157-172.
- PINHO, L. G. R.; CAMPOSTRINI, E.; MONNERT, P. H.; NETTO, A. T.; PIRES, A. A.; MARCIANO, C. R.; YASKA, J. B. S. Boron deficiency affects gas exchange and photochemical efficiency (JPI test parameters) in green dwarf coconut. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, n. 3, p. 439-451, jun. 2010.
- RIBEIRO, N. D.; SANTOS, O. S.; MENEZES, N. L. Efeito do tratamento com fontes de zinco e boro na germinação e vigor de sementes de milho. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, set./dez. 1994.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 355p.
- SHARMA, P. N.; RAMCHANDRA, T. Water relations and photosynthesis in mustard plants subjected to boron deficiency. **Indian Journal Plant Physiology**, India, v. 33, n. 2, p. 150-154, jun. 1990.
- SHEHZAD, M. A.; MAQSOOD, M.; ABBAS, T.; AHMAD, N. Foliar boron spray for improved yield oil quality and water use efficiency in water stressed sunflower. **Sains Malaysiana**, Bangi, v. 45, n. 10, p. 1497-1507, nov. 2016.
- SILVA, A. C.; LEONEL, S.; SOUZA, A. P.; DOMINGOS, J. R.; DUCATTI, C. Trocas gasosas e ciclo fotossintético da figueira 'Roxo de Valinhos'. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1270-1276, jun. 2010.
- SMITH, T. E.; GRATAN, S. R.; GRIEVE, C. M.; POSS, J. A.; SUAREZ, D. L. Salinity's influence on boron toxicity in broccoli: I. Impacts on yield, biomass, distribution and water use. **Agricultural water management**, Holanda, v. 97, p. 777-782, jan. 2010.
- SOUSA, A. E. C.; BEZERRA, F. M. L.; SOUSA, C. H. C.; SANTOS, F. S. S. Produtividade do meloeiro sob lâmina de irrigação e adubação potássica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 271-278, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAVALLALI, V. Interactive effects of zinc and boron on growth, photosynthesis and water relations in pistache. **Journal of plant nutrition**, v. 40, n. 11, p. 1588-1603, mar. 2017.

TIONG, J.; MCDONALD, G.; GENC, Y.; SHIRLEY, N.; LANGRIDGE, P.; HUANG, C. Y. Increased expression of six ZIP family genes by zinc (Zn) deficiency is associated with enhanced uptake and root-to-shoot translocation of Zn in barley (*Hordeum vulgare*). **New Phytologist**, v. 207, n. 4, p. 1097-1099, abr. 2015.

WIMMER M, A.; EICHERT, T. Review: Mechanisms for boron deficiency-mediated changes in plant water relations. **Plant Science**, Irlanda, v. 204, p. 25-32, mar. 2013.