

Respostas morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo mediados pelo aumento da concentração de CO₂ atmosférico

Keilor da Rosa Dorneles¹, Douglas Antônio Posso², Ihan Rebhahn¹, Sidnei Deuner², Paulo Cesar Pazdiora¹, Luis Antonio de Avila¹, Leandro José Dallagnol¹

¹ Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Fitossanidade, Capão do Leão, RS, Brasil. E-mail: keilor.rd@hotmail.com (ORCID: 0000-0001-8098-1539); irebhahn50@gmail.com (ORCID: 0000-0002-6828-1318); paulo.pazdiora@yahoo.com.br (ORCID: 0000-0001-6996-9619); laavilabr@gmail.com (ORCID: 0000-0002-2532-7152); leandro.dallagnol@ufpel.edu.br (ORCID: 0000-0002-2131-4944)

² Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Fisiologia vegetal, Pelotas, RS, Brasil. E-mail: douglasposso@hotmail.com (ORCID: 0000-0003-1560-2023); sdeuner@yahoo.com.br (ORCID: 0000-0003-3131-1867)

RESUMO: O incremento de CO₂ atmosférico é uma das principais variáveis ambientais que podem afetar a produtividade das plantas cultivadas. O objetivo neste estudo foi avaliar os efeitos da elevação da concentração do CO₂ atmosférico sobre características morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo. Para tal, plantas de trigo da cultivar Marfim foram cultivadas sob duas concentrações de CO₂ (400 ou 700 μmol mol⁻¹). As variáveis avaliadas foram: trocas gasosas, alterações morfológicas e componentes de rendimento de grãos. A elevação da concentração de CO₂ alterou significativamente os parâmetros de trocas gasosas, incrementou o índice de antocianina, a estatura da planta, a área foliar, a massa seca de folha e da raiz. Em relação ao rendimento, incrementou o número de grãos por espiga, o peso de mil grãos, o peso hectolitro (PH) e a produção total. Assim, a elevação da concentração de CO₂ atmosférica influenciou no desempenho agrônomo de trigo através de alterações fisiológicas, ganho de biomassa e no incremento do rendimento de grãos.

Palavras-chave: enriquecimento de CO₂; fotossíntese; open top chambers; rendimento de grãos; *Triticum aestivum* L.

Morpho-physiological responses and grain yield of wheat mediated by increased atmospheric CO₂ concentration

ABSTRACT: The increase in the concentration of atmospheric CO₂ is one of the main environmental variables that can affect the production of cultivated plants. The objective of this study was to evaluate the effects of increase the atmospheric CO₂ concentration on morphological and grain yield characteristics of wheat. For this, wheat plants of cultivar Marfim were cultivated under two CO₂ concentrations (400 or 700 μmol mol⁻¹). The variables evaluated were: gas exchange, morphological alteration and grain yield components. The increases in the CO₂ concentration significantly altered the gas exchange parameters, increased anthocyanin index, plant height, leaf area, dry mass of leaves and roots. In regarding to yield, plants at 700 μmol mol⁻¹ produced high number of grains per ear, high weight of thousand grains, high hectoliter weight (PH) and total production. Thus, the increase in atmospheric CO₂ concentration influenced the agronomic performance of wheat through physiological alteration, biomass gain and increase in the grains yield.

Key words: CO₂ enrichment; photosynthesis; open top chambers; grain yield; *Triticum aestivum* L.

Introdução

O trigo (*Triticum aestivum* L.) foi uma das primeiras espécies domesticadas pelo homem. Atualmente é um dos cereais mais cultivados no planeta, ocupando aproximadamente 20% da área agricultável (CONAB, 2017). A importância desse cereal na alimentação humana deve-se ao fato de ser uma fonte rica em carboidratos, bem como conter glúten, que é uma mistura de proteínas, tornando-se assim uma matéria prima para a produção de inúmeros alimentos (Scheuer et al., 2011).

No Brasil, a cultura ocupa a quarta posição em produção, ficando atrás apenas das culturas da soja, milho e arroz, com um volume de 6,8 milhões toneladas na safra de 2015/16. Os Estados do Paraná e Rio Grande do Sul são os principais produtores correspondendo por 92% da produção nacional (CONAB, 2017). A produção brasileira corresponde ao segundo lugar na América do Sul em relação à produção de trigo, superado apenas pela Argentina. Entretanto, a produção brasileira não supre a demanda do mercado interno, tornando assim, o Brasil um importador de trigo (CONAB, 2017).

Atualmente, o Brasil tem obtido ganhos significativos em produtividade devido à adoção de tecnologias modernas de cultivo e uso de variedades com potencial produtivo superior a 8.000 kg ha⁻¹ (Wart et al., 2013). Porém, há fatores que ainda limitam a expressão desse potencial produtivo como a ocorrência de problemas fitossanitários e as condições climáticas.

Entre as variações climáticas, o dióxido de carbono (CO₂) se tornou uma problemática a ser estudada pela comunidade científica, devido ao seu constante aumento na concentração atmosférica, nos últimos dois séculos. Dessa forma, inúmeros estudos sobre o efeito da fertilização do CO₂ na fisiologia, crescimento e desenvolvimento das espécies cultivadas, vem sendo realizados em diversos países.

Para o trigo as evidências indicam que o incremento na disponibilidade de CO₂ confere ganho de biomassa, aumento da produção de grãos e alterações na qualidade do grão. Essas evidências foram obtidas por meio de estudos em “open top chambers” – (OTC) e em campo pelo método “free-air carbon dioxide enrichment” (FACE). Estes estudos foram desenvolvidos na Austrália (Fernando et al., 2014), Alemanha (Högy & Fangmeier, 2008), China (Erda et al., 2005), Índia (Pandey et al., 2017) e Itália (Verrillo et al., 2017). Todavia, apesar da importância do trigo para o Brasil, ainda são desconhecidas informações sobre os efeitos do aumento da concentração do CO₂ para cultivares de trigo cultivadas no Brasil nas condições brasileiras.

Dessa forma, nesse estudo foram avaliados os efeitos da elevação da concentração do CO₂ atmosférico sobre características morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo no Sul do Brasil.

Material e Métodos

Área experimental (“open-top chambers”, OTC) e cultivo do trigo

A cultivar de trigo Marfim (Biotrigo Genética) foi utilizada no experimento. A semeadura foi realizada em vasos plásticos

com capacidade 2 litros, contendo aproximadamente 1,5 kg de solo peneirado. Após análise da fertilidade do solo foi adicionado fertilizante químico para obter uma produção de 4 t ha⁻¹ conforme as indicações técnicas para a cultura do trigo (Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2017). Após a semeadura, os vasos foram alocados em estufas de topo aberto (“open-top chambers”, OTC). Em cada vaso foi mantido quatro plântulas de trigo.

As OTCs tinham formato quadrangular e estrutura de madeira (4 m² e 2 m de altura) com as laterais protegidas por um filme plástico transparente de polietileno, equipadas com um redutor de abertura do topo para deflexionar o ar e, assim, prevenir a diluição da concentração desejada de CO₂ dentro da estufa. A transferência do CO₂ puro contido no cilindro para os OTCs, ocorreu através de uma tubulação até atingir o controlador de fluxo, que faz a regulação da quantidade de CO₂ distribuído em cada OTC. As concentrações de CO₂ utilizadas foram 400 μmol mol⁻¹ [considerada como atual no ambiente (teste controle)] e 700 μmol mol⁻¹ [concentração prevista para no ano de 2050 (IPCC, 2014)].

Delineamento experimental

Os tratamentos foram organizados em delineamento inteiramente casualizado. Para a quantificação dos parâmetros morfofisiológicos e de rendimento de grãos foi considerado o esquema unifatorial, consistindo de uma cultivar de trigo em duas concentrações de CO₂ (400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂), com oito repetições, cada uma constituída por quatro plantas. O experimento foi repetido duas vezes.

Determinação das variáveis de trocas gasosas e índices fisiológicos

As noventa (90) dias após a semeadura (estádio fenológico 11, maturação, conforme escala de Feeks (Large, 1954)) realizaram-se as determinações das variáveis de trocas gasosas e os índices de clorofila, flavonoides e antocianinas.

As variáveis de trocas de gasosas foram medidas na folha bandeira de duas plantas de cada replicação. As medições foram conduzidas sob CO₂ ambiente (400 ± 1 μmol mol⁻¹) e condições de temperatura com luz artificial (1.200 mmol de ftons m⁻² s⁻¹ no nível da folha). A taxa fotossintética líquida (A), a condutância estomática de vapores de água (gs), concentração interna de CO₂ interno (Ci) e a taxa de transpiratória (E) foram medidas durante a manhã (8:30 h a 10:30 h) usando o analisador de gás infravermelho portátil (LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Durante as medidas fotossintéticas, os valores médios da temperatura do ar e da umidade relativa foram 28 ± 2 °C e 68 ± 2%, respectivamente. A eficiência da carboxilação (EC) e a eficiência do uso da água (EUA) foram calculadas como a razão de A/Ci e A/E, respectivamente.

O índice de clorofila, flavonoides e antocianinas foram medidos usando fluorômetro portátil Dualex FORCE-A (Dualex FORCE-A, Orsay, France) em duas folhas da parte superior, média e inferior da planta. Dualex (“dupla excitação”) fornece informações sobre o teor de polifenóis da cultura, medindo

a absorção ultravioleta (UV) da epiderme foliar por excitação dupla da fluorescência da clorofila. Para isso, ele emite um feixe de luz do comprimento de onda a 375 nm (absorvido pelos polifenóis) e outro de referência a 650 nm (região de vermelho), que penetra na epiderme da folha. Os feixes UV não absorvidos pelos polifenóis excitam a clorofila no mesófilo da folha, e a sua fluorescência é emitida, quantificada pelo aparelho (Goulas et al., 2004).

Avaliação das variáveis biométricas

Aos noventa (90) dias após a sementeira (estádio fenológico 11, maturação, conforme escala de Feeks (Large, 1954)) foram realizadas as determinações dos parâmetros biométricos: estatura, área foliar, massa seca de folha, caule e raiz.

A estatura da planta, em centímetros, foi determinada através da mensuração da distância do nível do solo ao ápice da espiga, excluindo as aristas. A Área foliar (AF) foi determinada através do medidor de área foliar LI 3100C (LICOR, Lincoln, USA). A massa seca de folha (MSF), caule (MSC) e raiz (MSR) foram determinados a partir da secagem do material em estufa de circulação de ar forçado a 70°C até peso constante, com auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,01 g (modelo BL 3200H, Shimadzu). Foram utilizadas duas plantas por repetição, totalizando 16 plantas por tratamento.

Componentes de rendimento

Os componentes de rendimento, determinados na fase de maturação fisiológica da cultura, foram a porcentagem de perfilhos férteis, o tamanho de espiga, número de grãos por espiga, peso dos grãos por espiga, peso de mil grãos, peso de hectolitro e produção por planta.

A porcentagem de perfilhos férteis (PPF) é o número de perfilhos com produção de sementes em relação ao número total de perfilhos. O tamanho da espiga (TE), em centímetros, foi determinado com paquímetro digital (modelo, Micrometer, Vernier Digital Vernier Caliper) e expresso pela média do comprimento, da base até a extremidade superior, de cinco espigas por repetição. O número de grãos por espiga (GE) foi obtido pela média de contagem direta do número de grãos de cinco espiga. O peso dos grãos por espiga (PE) foi determinado através da mensuração da massa dos grãos da espiga com auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,0001 g (modelo M124Ai, BEL Engineering). O peso hectolítrico (PH) foi determinado de acordo com Brasil (2009) e os resultados expressos em kg L⁻¹, com auxílio de tabela de equivalência (Brasil, 2009). O peso de mil grãos (PM) foi obtido através da contagem manual de mil sementes em dez repetições de cem, e pesadas separadamente.

Análises dos dados

A homogeneidade dos dados de todas as variáveis foi verificada pelo teste de *Shapiro Wilk*. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos comparadas pelos testes de Tukey ou teste -*t* no software SAS®.

Resultados

Para as variáveis de trocas gasosas, o incremento de CO₂ foi significativo para todas as variáveis, exceto para a *A* (Figura 1). Para as plantas cultivadas à 700 μmol mol⁻¹, a *Ci* e a *EUA* aumentaram 81 e 24%, respectivamente, e a *gs*, *E* e *EC*, reduziram, respectivamente 55, 42 e 38%, quando comparadas com plantas cultivadas à 400 μmol mol⁻¹ (Figura 1).

Não houve interação significativa entre os fatores concentração de CO₂ e o terço da planta para clorofilas e flavonoides, exceto para antocianinas (Tabelas 1 e 2).

O aumento na concentração de CO₂ para 700 μmol mol⁻¹ reduziu em 11% a concentração de clorofilas, comparado a 400 μmol mol⁻¹ (Tabela 1). Porém, não houve variação significativa na concentração de flavonoides.

A posição da folha na planta afetou significativamente a concentração de clorofilas e flavonoides. A concentração das clorofilas, nas folhas do terço inferior, reduziu 22% em relação

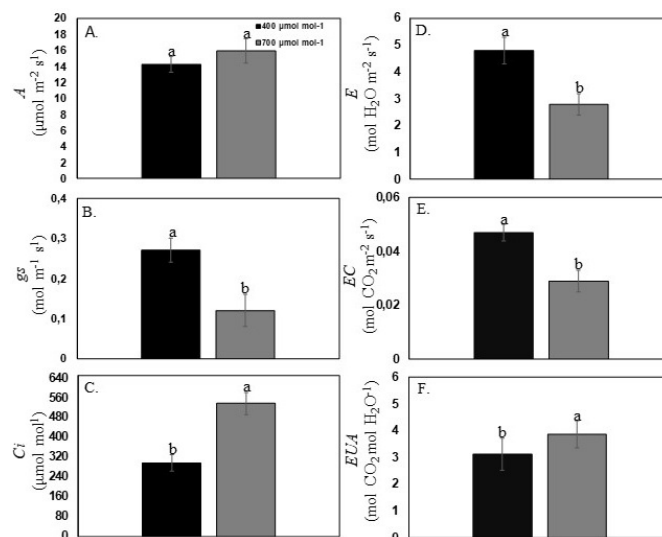


Figura 1. Taxa fotossintética (*A*), condutância estomática de vapores de água (*gs*), concentração interna de CO₂ (*Ci*), taxa transpiratória (*E*), eficiência da carboxilação (*EC*) e a eficiência do uso da água (*EUA*) de plantas de trigo da cultivar Marfim cultivada em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Tabela 1. Teor de clorofila e índice flavonoide em plantas de trigo da cultivar Marfim cultivada em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Concentração CO ₂	Clorofila μ cm ⁻²	Flavonoide
400	46,82 a	1,41 a
700	41,86 b	1,47 a
Terço da planta		
Superior	49,01 a	1,37 b
Mediano	45,73 a	1,41 b
Inferior	38,27 b	1,54 a
CV%	9,32	5,73

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para concentração de CO₂ pelo teste de *t* (*p* ≤ 0,05) ou parte da planta pelo teste de Tukey (*p* ≤ 0,05).

ao terço superior e 16% em relação ao terço mediano (Tabela 1). Os flavonoides, no terço inferior, aumentaram 12% em relação ao terço superior e 9% em relação ao terço mediano (Tabela 1).

O índice de antocianina, em plantas a 700 μmol mol⁻¹, variou de 0,14 a 0,16 entre os terços da planta, enquanto que nas plantas a 400 μmol mol⁻¹ foi detectado apenas no terço inferior com índice de 0,15 (Tabela 2). Para as variáveis biométricas, a elevação do CO₂ foi significativa para todas, exceto MSC (Tabela 3).

Plantas cultivadas a 700 μmol mol⁻¹ apresentaram incremento na estatura, AF, MSF e MSR, de 2, 21, 18 e 44%, respectivamente, quando comparado com plantas cultivadas a 400 μmol mol⁻¹ (Tabela 3) e (Figura 2A). Na figura 2A-C, está demonstrado a diferença de estatura e da qualidade visual dos grãos entre plantas de trigo cultivada a 400 μmol mol⁻¹ e em 700 μmol mol⁻¹ de CO₂. Nestas é observado, além de plantas mais altas, os grãos produzidos com melhor aparência de coloração, tamanho e forma, quando comparadas as plantas cultivadas a 400 μmol mol⁻¹.

Tabela 2. Índice de antocianina em plantas de trigo da cultivar Marfim cultivada em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Terço da planta	Antocianina	
	Concentração de CO ₂	
	400 μmol mol ⁻¹	700 μmol mol ⁻¹
Superior	0,00 bB	0,14 aA
Mediano	0,00 bB	0,14 aA
Inferior	0,15 aA	0,16 aA
CV%	9,44	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05) comparando terços da planta. Letras maiúsculas, na linha, compara as médias dos tratamentos em relação a concentração de CO₂ pelo teste de t (p ≤ 0,05).

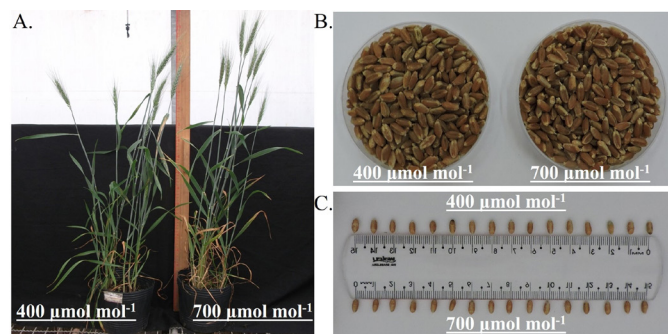


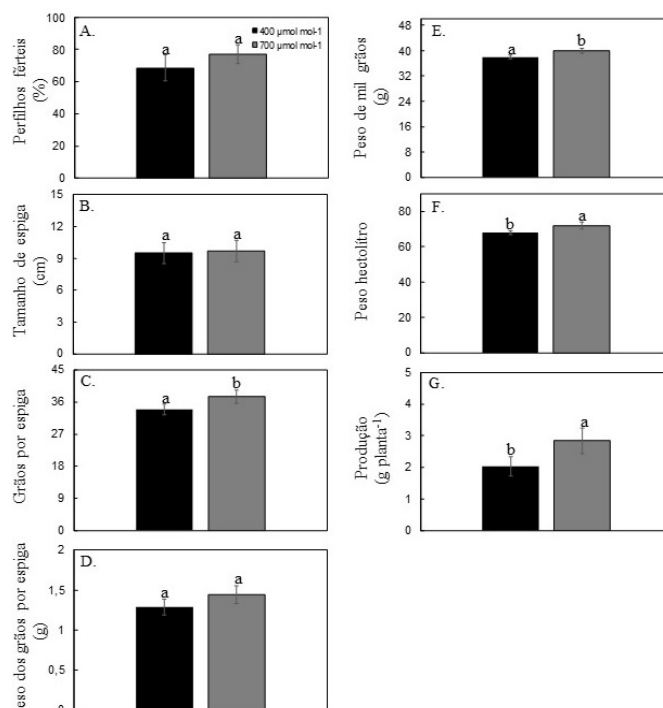
Figura 2. Variação na estatura (A) e qualidade visual dos grãos produzidos, dado pela coloração, tamanho e forma (B-C) de plantas de trigo da cultivar Marfim cultivadas em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Tabela 3. Estatura, área foliar (AF), massa seca de folha (MSA), massa seca do colmo (MSC) e massa seca da raiz (MSR) de plantas de trigo da cultivar Marfim cultivada em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Concentrações de CO ₂	Estatura (cm)	AF (cm ² planta ⁻¹)	MSF	MSC (g planta ⁻¹)	MSR
400	76,00 b	82,90 b	0,67 b	2,09 a	1,99 b
700	77,80 a	100,42 a	0,79 a	1,77 a	2,87 a
CV%	10,0	13,93	15,88	17,95	25,0

Médias de cada variável seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de t (p ≤ 0,05).

Para as variáveis de produção, a elevação da concentração de CO₂ foi significativa para maioria das variáveis avaliadas, exceto para porcentagem de perfilhos férteis (Figura 3A), tamanho de espiga (Figura 3B) e peso dos grãos por espiga (Figura 3D). Nas plantas cultivadas a 700 μmol mol⁻¹ ocorreu aumento de 11, 4, 5 e 40%, respectivamente, no número de grãos por espiga (Figura 3C), peso de mil grãos (Figura 3E), peso hectolitro (Figura 3F) e produção por planta (Figura 3G), quando comparado com plantas a 400 μmol mol⁻¹.



Médias de cada variável seguidas pela mesma letra minúscula, não diferem entre si pelo teste de t (p ≤ 0,05).

Figura 3. Porcentagem de perfilhos férteis (A), comprimento de espiga (B), número de grãos por espiga (C), peso dos grãos por espiga (D), peso de mil grãos (E), peso hectolitro (F) e a produção total (G) por planta de trigo da cultivar Marfim cultivada em ambiente com 400 ou 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ atmosférico.

Discussão

Os resultados demonstram que a elevação da concentração de CO₂ atmosférico promove alterações morfofisiológica no trigo e no seu rendimento de grãos. A concentração atmosférica de CO₂ tem influência direta sobre a fisiologia das plantas, por ser a fonte primária de carbono para a fotossíntese. Neste processo, as plantas utilizam a energia luminosa captada

pelas clorofilas presentes nos cloroplastos, para transformar quimicamente o CO_2 da atmosfera - captado pelos estômatos - em substâncias ricas em energia. Esta energia estocada nas moléculas orgânicas é utilizada nos vários processos celulares da planta (Barnaby & Ziska, 2012).

Plantas com metabolismo C_3 , como o trigo, são beneficiadas pelo aumento da concentração de CO_2 atmosférico, devido à existência da potencialização da atividade carboxilativa, elevando a fotossíntese líquida sem saturação, além de reduzir as perdas pela ocorrência da fotorrespiração (Barnaby & Ziska, 2012; Xu et al., 2015). Contudo, em nosso estudo, a eficiência da carboxilação foi menor em plantas expostas a $700 \mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$, bem como, não houve variação significativa na taxa fotossintética no momento da análise.

A eficiência da carboxilação é resultante da relação entre a concentração interna de CO_2 e a taxa fotossintética. Esse fato nos faz crer que por causa da concentração interna de CO_2 ser superior em plantas a $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$, o mesmo se encontra em processo de difusão pelo parênquima e não prontamente disponível a ser utilizado no ciclo de Calvin, especificamente no estroma do cloroplasto. Dessa maneira, por conseguinte, não elevando a capacidade de carboxilação da rubisco, bem como da taxa fotossintética, no momento da avaliação. Além disso, estudo recente realizado em plantas de soja, também foi constatado que o CO_2 elevado a $665 \mu\text{mol mol}^{-1}$, não produziu efeitos significativos na taxa fotossintética líquida em determinadas datas de avaliações, seja nos estudos FACE, ou em OTC (Bunce, 2016). De fato, o metabolismo vegetal, quando exposto a elevadas concentrações de CO_2 , passa por diversas alterações, que objetivam a autorregulação dos processos bioquímicos e fisiológicos, tendendo ao retorno ao estado inicial de equilíbrio. Essa autorregulação pode acontecer dentro de uma ampla escala de tempo, incluindo minutos, horas ou meses após o início da exposição ao CO_2 elevado (Caliman et al., 2009).

Devido à fotossíntese ser um processo bioquímico que depende da presença e atuação de diversas enzimas e moléculas, o aumento da taxa fotossintética não é contínuo ao longo do tempo (Barnaby & Ziska, 2012). À medida que a fotossíntese aumenta, as enzimas (como a Rubisco) vão sendo saturadas no processo, e o metabolismo de regeneração dessas enzimas, além do suprimento de energia na forma de ATP, não é suficiente para atender à necessidade demandada pelos órgãos fotossintéticos (Chen et al., 2005). Portanto, num primeiro momento, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico aumenta a taxa fotossintética, que imediatamente fica limitada em função do maior consumo de RuBisCo e ATP, que não são supridas na mesma velocidade.

Ademais, o aumento na concentração atmosférica de CO_2 causou redução da condutância estomática e da taxa transpiratória, e elevou a eficiência do uso da água. Esse resultado decore do incremento de CO_2 na atmosfera promover o aumento na concentração interna na folha, e conseqüentemente induzir a redução da abertura estomática, que por sua vez causa diminuição da perda de água por transpiração (Allen & Prasad, 2004).

Como conseqüências das alterações fisiológicas proporcionadas pela elevação do CO_2 atmosférico, temos, por exemplo, o aumento da taxa de crescimento e ganho de biomassa (Barnaby & Ziska, 2012). Esse efeito foi observado no trigo onde o aumento na concentração de CO_2 promoveu o aumento da estatura da planta, área foliar, e da massa seca da parte aérea e radicular das plantas. Assim, mesmo não sendo observado incremento na taxa fotossintética, o aumento na área foliar da planta em $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 permite maior interceptação da energia solar incidente e, por conseguinte, determina maior assimilação de carbono, o que contribuiu significativamente para aumentar o acúmulo de matéria seca pelas plantas, conforme outros estudos também já indicaram (Caliman et al., 2009; Xu et al., 2015).

Além disso, compostos tanto do metabolismo primário quanto do secundário podem apresentar maiores concentrações em condições de elevação do CO_2 atmosférico (Xu et al., 2015). Este resultado também foi observado para os índices de flavonoides e antocianina nas folhas da planta de trigo cultivadas a $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 . Os flavonoides e antocianina desempenham uma gama de papéis fundamentais na planta como proteção a danos causados pela luz UV na folha, agentes antioxidantes além de outras funções biológicas (Xu et al., 2015).

Contudo, o índice de clorofila reduziu em plantas cultivadas em $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 . Acreditamos que este resultado esteja relacionado, como conseqüência da série de alterações no metabolismo vegetal, com a demanda por nutrientes como cálcio, magnésio e nitrogênio a qual é mais elevada, e conseqüentemente, ocasiona uma deficiência desses elementos nas folhas. O nitrogênio, por exemplo, é utilizado na síntese de compostos celulares, como a clorofila (Lima et al., 2001), como também o magnésio, constituinte central da molécula de clorofila, base da fotossíntese (Goulas et al., 2004). Estas hipóteses estão fundamentadas no estudo de Houshmandfar et al. (2015) os quais constataram que a concentração de cálcio e magnésio no xilema reduziu quando plantas de trigo foram cultivadas em maior concentração de CO_2 .

Também é válido ressaltar, que devido à alta mobilidade tanto do nitrogênio, quanto do magnésio na planta, acaba por intensificar sua deficiência em folhas velhas, no qual causa amarelecimento generalizado, condizendo com os resultados do estudo, onde as folhas do terço inferior apresentaram os menores índices de clorofila. A redução do teor de clorofila na folha de plantas trigo sob condições de elevação de $350 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para $700 \mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$ atmosférico já foram relatados previamente (Sicher & Bunce, 1997).

A elevação do CO_2 para $700 \mu\text{mol mol}^{-1}$ também incrementou o rendimento de grãos por meio do aumento do número de grãos por espiga, peso de mil de grãos e a produção por planta. Essas alterações são atribuídas a maior alocação dos fotoassimilados em órgãos reprodutivos.

Estudos realizados por Yang et al. (2006) indicam que, comparativamente ao ambiente natural, em maiores concentrações de CO_2 na atmosfera, a planta de arroz em

estádio vegetativo, produziu maior quantidade de colmos do que folhas, sugerindo que, em ambiente enriquecido com CO₂, o aumento da taxa de fotoassimilados, resultou em maior acúmulo de biomassa nos órgãos de reserva. E em estágio reprodutivo, a maior produção de fotoassimilados, foram alocadas para os grãos de arroz, favorecendo o seu rendimento final. Resultado semelhante foi observado por Miglietta et al. (1998), que detectaram maior alocação de biomassa na parte subterrânea em plantas de batata submetidas a altas concentrações de CO₂ devido, principalmente ao aumento do número de tubérculos.

Outra variável relevante é o peso de hectolitro, o qual é utilizado na classificação da qualidade do grão para comercialização do trigo, estando relacionado a vários fatores, dentre eles: uniformidade, forma, densidade, tamanho do grão, pelo teor de matérias estranhas e grãos quebrados da amostra, servindo como indicativo para valor comercial do grão (Brasil, 2009). O incremento no peso de hectolitro nas plantas cultivadas em 700 μmol mol⁻¹ de CO₂, como observado na Figura 2 B-C, deve-se a maior uniformidade do tamanho e no enchimento dos grãos de trigo.

Assim, podemos concluir que a elevação da concentração de CO₂ atmosférica influencia no desempenho agrônomo de trigo cultivado no Brasil, através de alterações fisiológicas, ganho de biomassa e no rendimento de grãos. Contudo, vale ressaltar que os resultados observados no estudo, podem variar, já que as interações entre o enriquecimento de CO₂, que representa um fenômeno global, e outras mudanças ambientais contínuas, como, por exemplo, aumento de temperatura ou mudanças na quantidade, tempo e distribuição das precipitações, podem ter implicações importantes para o rendimento, a produção e a qualidade do trigo (Abdelgawad et al., 2016). Infelizmente, o conhecimento disponibilizado sobre essas interações ainda se encontra limitado (Martinez et al., 2015). Dessa forma, outros estudos serão necessários para entender a complexidade dessas interações e servir como base para abordagens de modelagem para prever futuros processos de crescimento e produção das culturas sob condições de elevada concentração atmosférica de CO₂.

Conclusões

A elevação da concentração de CO₂ atmosférica de 400 μmol mol⁻¹ para 700 μmol mol⁻¹, influencia no desempenho agrônomo do trigo cultivado no Brasil.

Plantas de trigo a 700 μmol mol⁻¹ de CO₂ sofrem alterações fisiológicas, aumentando a concentração interna de CO₂ e a eficiência do uso da água, e redução na condutância estomática de vapores de água, taxa transpiratória, eficiência da carboxilação e no índice de clorofila.

O incremento na concentração de CO₂ atmosférico de 400 para 700 μmol mol⁻¹ confere as plantas de trigo ganho de biomassa, pelo aumento da área foliar, incremento da massa seca de parte aérea e raiz, e no rendimento de grãos, através aumento do número de grãos por espiga, peso de mil grãos, peso hectolitro e produção por planta.

Agradecimentos

K. R. Dorneles recebeu uma bolsa de estudo da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil - CAPES (Código de Financiamento 001). Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (400897/2014-8).

Literatura Citada

- Abdelgawad, H.; Zinta, G.; Beemster, G. T.; Janssens, I. A.; Asard, H. Future climate CO₂ levels mitigate stress impact on plants: increased defense or decreased challenge? *Frontiers in Plant Science*, v.2, n.7, p.1-8, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00556>.
- Allen, L. H.; Prasad, P. V. V. Crop responses to elevated carbon dioxide. In: Godman, R.M. (Ed.). *Encyclopedia of plant and crop science*. New York: Marcel Dekker, 2004. p.-346-348.
- Barnaby, J. Y.; Ziska, L. H. Plant responses to elevated CO₂. In: *Encyclopedia of Life Sciences*. Chichester: John Wiley & Sons, 2012. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0023718>.
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília, 2009. 399p.
- Bunce, J. A. Responses of soybeans and wheat to elevated CO₂ in free-air and open top chamber systems. *Field Crops Research*, v.186, n.1, p.78-85, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.11.010>.
- Caliman, F. R. B.; Silva, D. J. H.; Alves, D. P.; Cardoso, T. S.; Mattedi, A. P. Enriquecimento intermitente de CO₂ e análise do acúmulo de massa seca e da partição de fotoassimilados em tomateiro. *Acta Agronômica*, v.58, n.3, p.133-139, 2009. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/11505/12147. 09 Fev. 2018.
- Chen, G.Y.; Yong, Z. H.; Liao, Y.; Zhang, D.Y.; Chen, Y.; Zhang, H. B.; Chen, J.; Zhu, J. G.; Xu, D. Q. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation. *Plant Cell Physiology*, v.46, n.7, p.1036-1045, 2005. <https://doi.org/10.1093/pcp/pci113>.
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. A cultura do trigo. Brasília: Conab, 2017. 218 p.
- Erda, L.; Wei, X.; Hui, J.; Yinlong, X.; Yue, L.; Liping, B.; Liyoung, X. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v.360, n.1463, p.2149-2154, 2005. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1743>.
- Large, E. C. Growth stages in cereals. Illustration of the feeks scale. *Plant Pathology*, v.3, n.4, p.128-129, 1954. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1954.tb00716.x>.
- Fernando, F.; Panozzo, J.; Tausz, M.; Norton, R. M.; Neumann, N.; Fitzgerald, J.; Seneweera, S. Elevated CO₂ alters grain quality of two bread wheat cultivars grown under different environmental conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.185, p.24-33, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.023>.
- Goulas, Y.; Cerovic, Z.G.; Cartelat, A.; Moya, I. Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. *Applied Optics*, v.43, n.23, p.4488-4496, 2004. <https://doi.org/10.1364/AO.43.004488>.

- Högy, P.; Fangmeier, A. Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, v.48, n.3, p.580–591, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.01.006>.
- Houshmandfar, A.; Fitzgerald, G. J.; Tausz, G. Elevated CO₂ decreases both transpiration flow and concentrations of Ca and Mg in the xylem sap of wheat. *Journal of Plant Physiology*, v.174, n.1, p.157–160, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.10.008>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC, 2014. 151p. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr>. 18 Jan. 2018.
- Lima, E. V.; Aragão, C. A.; Morais, O. M.; Tanaka, R.; Filho, H. G. Adução NK no desenvolvimento e na concentração de macronutrientes no florescimento do feijoeiro. *Scientia Agrícola*, v.58, n.1, p.125-129, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000100019>.
- Martinez, C. A.; Oliveira, E. A. D.; Mello, T. R. P.; Marin, A. L. A. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.8, n.6, p.635-650, 2015. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233634/27223>. 09 Fev. 2018.
- Miglietta, F.; Magliulo, V.; Bindi, M.; Cerio, L.; Vaccari, F. P.; Loduca, V.; Pere, A. Free Air CO₂ Enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): Development, growth and yield. *Global Change Biology*, v.4, n.2, p.163 – 172, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00120.x>
- Pandey, V.; Sharma, M.; Deeba, F.; Maurya, V. K.; Gupta, S. K.; Singh, S. P.; Mishra, A.; Nautival, C. S. Impact of Elevated CO₂ on Wheat Growth and Yield under Free Air CO₂ Enrichment. *American Journal of Climate Change*, v.6, n.4, p.573-596, 2017. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.64029>.
- Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. *Informações técnicas para trigo e triticale – safra 2017*. Brasília: Embrapa, 2017. 240 p.
- Scheuer, P. M.; Francisco, A.; Miranda, M. Z.; Limberger, V. M. Trigo: características e utilização na panificação. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.13, n.2, p.211-222, 2011. <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v13n2p211-222>.
- Sicher, R. C.; Bunce, J. A. Relationship of photosynthetic acclimation to changes of Rubisco activity in field-grown winter wheat and barley during growth in elevated carbon dioxide. *Photosynth Research*, v.52, n.1, p.27-38, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1005874932233>.
- Verrillo, F.; Badeck, F. W.; Terzi, V.; Rizza, F.; Bernardo, L.; Maro, A.; Fares, C.; Zaldei, A.; Miglietta, F.; Moschella, A.; Bracale, M.; Vannini, C. Elevated field atmospheric CO₂ concentrations affect the characteristics of winter wheat (cv. Bologna) grains. *Crop & Pasture Science*, v.68, n.3, p.713-725, 2017. <https://doi.org/10.1071/CP17156>.
- Wart, J.V.; Kersebaum, K.C.; Peng, S.; Milner, M.; Cassman, K.G. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, v.143, p.34–43, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>.
- Xu, Z.; Jiang, Y.; Zhou, G. Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidante systems to elevated CO₂ with environmental stress in plants. *Frontiers in Plant Science*, v.6, p.701, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00701>.
- Yang, L.; Huang, J.; Guichun, Y.; Liu, D. G.; Zhu, J.; Wang, Y. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, v.98, n.1, p.12-19, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.11.003>.