

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INCREMENTO DE CO₂ E TEMPERATURA NO ACÚMULO E
EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM *Stylosanthes
capitata* E *Panicum maximum* CULTIVADAS EM SISTEMA
MINI T FACE**

Juliana Mariano Carvalho

Engenheira Agrônoma

2018

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**INCREMENTO DE CO₂ E TEMPERATURA NO ACÚMULO E
EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM *Stylosanthes
capitata* E *Panicummaximum* CULTIVADAS EM SISTEMA
MINI T FACE**

Juliana Mariano Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Dr. Carlos Alberto Martinez y Huaman

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal).

2018

B783i

Bovolato, Juliana Mariano Carvalho

Incremento de CO_2 e temperatura do ar no acúmulo e eficiência de nutrientes em *Stylosanthes capitata* e *Panicum maximum* cultivadas em sistema mini t face / Juliana Mariano Carvalho Bovolato. -- Jaboticabal, 2018

55 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Carlos Alberto Martinez y Huaman

1. Capim mombaça. 2. Nutrição mineral. 3. Incremento de dióxido de carbono ao ar.
4. Leguminosa forrageira. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: INCREMENTO DE CO₂ E TEMPERATURA NO ACÚMULO E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM *Stylosanthes capitata* E *Panicum maximum* CULTIVADAS EM SISTEMA MINI T FACE

AUTORA: JULIANA MARIANO CARVALHO BOVOLATO

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORDENADOR: CARLOS ALBERTO MARTINEZ Y HUAMAN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Pesquisadora Dra. ANELISA DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES
Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento (UPD)-APTA / Marília/SP



Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. CLAUDENIR FACINCANI FRANCO
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza / FATEC / Jaboticabal/SP



Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 13 de julho de 2018

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

JULIANA MARIANO CARVALHO BOVOLATO - Nascida em 26 de outubro de 1982, no município de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. Ingressou no curso de Agronomia na Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Câmpus de Aquidauana, em 2003. Durante a graduação, participou como voluntária em projetos de iniciação científica e de cursos voltados à Entomologia Agrícola. No ano de 2009, iniciou o curso de mestrado pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), cujo título de dissertação foi “Tempo de decomposição de palha e contribuição na nutrição da cana-de-açúcar em função da aplicação de vinhaça e gesso”. Durante o mestrado, realizou estágio no laboratório de fertilidade do solo, obtendo, no ano de 2011, o título de mestre por esta instituição. Em junho de 2018, submeteu-se a banca para defesa de Tese de Doutorado.

“Para os crentes, Deus está no princípio das coisas. Para os cientistas, no final de toda reflexão.”

Max Planck

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, autor da vida e fim último de nossas realizações. Ao meu esposo, Luiz Otávio de Carvalho Bovolato, amado e exemplo de dedicação aos objetivos de vida, cujo apoio e incentivo me fez alçar vôos mais altos. Aos meus pais, João Batista Mariano Carvalho e Claudinéia Regina A. Carvalho, amados, que sempre estiveram presentes nas alegrias e tristezas. À minha mãe, amor mais puro que uma filha pode ter, por dedicar sua vida a me criar e por todos os conselhos maternos. Ao meu pai, meu herói, que me incentivou a almejar uma vida digna e honrada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso criador, pai e amigo, que cuidou de meus trabalhos e manteve a centelha da perseverança em mim.

Ao meu esposo, Luiz Otávio de Carvalho Bovolato, por todo incentivo e apoio no decorrer deste trabalho.

Aos meus pais, Claudinéia Regina A. Carvalho e João Batista de Carvalho pelos incentivos e exemplos de dedicação e seriedade ao trabalho.

Aos professores Renato de Mello Prado e Carlos Alberto Martinez y Huaman, pela confiança depositada em mim e orientações ao longo deste projeto.

À minha amiga, Kamila Meneses, pelo exemplo de dedicação e de esforço, à qual não mediu esforços no auxílio para a concretização deste trabalho.

Aos meus amigos do grupo Genplant, Gilmara Pereira da Silva, Rafael Barreto, Thais Barros, Edilaine Transpatini e Cibele Mantovani pelo apoio em análises laboratoriais, auxílio nos estudos e conselhos acadêmicos.

Aos docentes, em especial aos professores Durvalina Maria B. dos Santos, Rogério Falleiros Carvalho, Arthur Bernardes Cecílio Filho, Rouverson Pereira da Silva e Newton La Scala, e ao campus da UNESP de Jaboticabal, por todo suporte acadêmico e técnico.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade de cursar o Doutorado e todo o conselho dos professores que atuam nesta comissão em prol dos discentes.

Aos funcionários da pós-graduação por toda atenção e orientações durante todo o curso.

Ao Conselho Nacional de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico pelo suporte financeiro e pela concessão de bolsa durante o curso de Doutorado.

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

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	xv
RESUMO	xvii
ABSTRACT.	xviii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	19
1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo Geral	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3 REVISÃO DE LITERATURA	21
3.1 Aumento da concentração de CO ₂ atmosférico e da temperatura do ar na produção agrícola	21
3.2 Influência do aumento da concentração de CO ₂ atmosférico e da temperatura do ar na produtividade e na nutrição de plantas	22
REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO 2 – O incremento de CO₂ e temperatura do ar sobre as exigências nutricionais e produtividade do <i>Stylosanthes capitata</i>	30
1INTRODUÇÃO	31
2MATERIAL E MÉTODOS	33
2.1 Local do estudo	33
2.2 Preparo do solo e adubação	34
2.3 Descrição dos tratamentos	35
2.4 Descrição do sistema Mini-T-FACE	35
2.5 Característica do <i>Stylosanthes capitata</i>	36
2.6 Dados climáticos	36
2.7 Avaliações	37
2.8 Análise dos dados	37

3 RESULTADOS	37
4 DISCUSSÃO	40
4.1 Acúmulo dos macronutrientes	40
4.2 Eficiência do uso dos macronutrientes	43
4.3 Biomassa seca	44
5 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 3 - O enriquecimento de CO₂ e temperatura não induz dano ao acúmulo e a eficiência de uso dos nutrientes em <i>Panicum maximum</i>	50
1 INTRODUÇÃO	51
2 MATERIAL E MÉTODOS	52
2.1 Local de estudo	52
2.3 Descrição dos tratamentos e plantio	54
2.4 Sistema Mini-FACE	54
2.5 Sistema T-FACE	55
2.6 Dados climáticos	55
2.7 Avaliações	55
2.8 Análise dos dados	56
3. RESULTADOS	57
3.1 Acúmulo e eficiência de uso dos macronutrientes	57
3.2 Acúmulo e eficiência de uso dos micronutrientes	58
3.3 Produção de biomassa seca da planta	59
3.4 Produção de biomassa seca das raízes	60
4 DISCUSSÃO	61
5 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	63
CAPÍTULO 4 – Considerações finais	68

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 (Capítulo 2) - Mapa de localização da área experimental.....	33
Figura 2 (Capítulo 2) - Médias diárias da temperatura e precipitação durante exposição aos tratamentos em dias julianos. Ambas foram medidas do início da aplicação (24/05/2015) dos tratamentos, até o término (24/06/2015).....	36
Figura 3 (Capítulo 2) - Acúmulo dos macronutrientes na parte aérea de estílosantes, submetidos a incrementos: de 2°C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO ₂ (eCO ₂), eT+eCO ₂ e condições do ambiente (controle, C)	38
Figura 4 (Capítulo 2) - Eficiência de uso dos macronutrientes na parte aérea do estílosantes, submetidos a incrementos: de 2 °C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO ₂ (eCO ₂), eT+eCO ₂ e condições do ambiente (controle, C)	39
Figura 5 (Capítulo 2) - Biomassa seca da parte aérea do estílosantes, submetidos a incrementos: de 2 °C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO ₂ (eCO ₂), eT+eCO ₂ e condições do ambiente (controle, C).....	40
Figura1(Capítulo3) - Mapa de localização da área experimental.....	53
Figura 2 (Capítulo 3) - Média diária das temperaturas do dossel por tratamentos: temperatura ambiente (C), incremento de temperatura (eT), incremento de [CO ₂] e combinação de eT+eC e precipitação do início da aplicação dos tratamentos (19/11/2015) ao final (19/12/2015), em dias Julianos (USP-Ribeirão Preto/SP, 2015).....	56
Figura 3 (Capítulo 3) - Acúmulo e eficiência de uso dos macronutrientes na parte aérea do <i>Panicum maximum</i> , em função dos tratamentos com temperatura e concentração de CO ₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2 °C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO ₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC	58

Figura 4 (Capítulo 3) - Acúmulo e eficiência de uso dos micronutrientes na parte aérea do <i>Panicum maximum</i> , em função dos tratamentos com temperatura e concentração de CO ₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2°C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO ₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC	59
Figura 5 (Capítulo 3) - Biomassa seca da parte aérea do <i>Panicum maximum</i> , em função dos tratamentos temperatura e concentração de CO ₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2°C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO ₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC	60
Figura 6 (Capítulo 3) - Biomassa seca de raiz do <i>Panicum maximum</i> em duas camadas 0-20 e 20-40 cm de profundidade em função dos tratamentos temperatura e concentração de CO ₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2 °C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO ₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC	61

INCREMENTO DE CO₂ E TEMPERATURA NO ACÚMULO E EFICIÊNCIA DE USO DE NUTRIENTES EM *Stylosanthes capitata* E *Panicum maximum* CULTIVADAS EM SISTEMA MINI T FACE

RESUMO- Os efeitos de elevados níveis de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar foram previstos para 2050, aumentarem 200 ppm e 2°C, respectivamente. Deste modo, estudos sobre o desenvolvimento das plantas tornou-se necessário, principalmente em plantas de biomas temperados. No entanto, estudos sobre os estes efeitos em espécies tropicais, sobre a exigência nutricional são escassos. O objetivo neste estudo foi verificar os efeitos do acúmulo e eficiência de uso dos nutrientes, e da produtividade em *Stylosanthes capitata* Vogel. e *Panicum maximum* Jacq. cultivadas em incremento de concentração de CO₂ atmosférico e aquecimento sob condições de campo utilizando o sistema Trop-T-FACE instalado na USP de Ribeirão Preto- SP, Brasil. As plantas receberam após 0, 60 m altura, um corte de uniformização, simulando pré pastejo, em seguida, foram submetidas a quatro tratamentos: CO₂ e temperatura ambiente (Controle -C), incremento de CO₂ (600 ppm) - (eC); aumento da temperatura em 2°C acima da temperatura ambiente (eT) e a combinação de eC + eT, com 4 repetições. Optou-se pelo delineamento inteiramente casualizado. As plantas foram avaliadas quanto os teores macronutrientes e micronutrientes e a biomassa seca da parte aérea e das raízes. Aos 30 dias de exposição ao tratamento eT + eC, houve aumento do acúmulo de N, P, K, Ca e S, aumento da eficiência de uso de N, Ca e S, que concordaram com o aumento da biomassa seca de *S. capitata*, podendo estas sobre as condições de eT + eC tornarem –se mais produtiva. Já para o *P. maximum*, como as mudanças climáticas estão ocorrendo de forma simultânea, prevemos que não haverá mudanças no acúmulo, na eficiência de uso de nutrientes e na produção de biomassa seca, entretanto, este efeito foi verificado para biomassa seca de raízes.

Palavras-chave: acúmulo de nutrientes, capim Mombaça, eficiência de uso, incremento de dióxido de carbono ao ar livre, leguminosa forrageira

NUTRITION REQUIREMENT AND CHANGES IN CHEMICAL COMPOSITION OF *STYLOSANTHES CAPITATA* AND *PANICUM MAXIMUM* CULTURED IN HIGH LEVEL OF CO₂ AND HEATING, SIMULATING FUTURE WEATHER

ABSTRACT- The effects of high levels of atmospheric CO₂ and air temperature were predicted for 2050, increasing 200 ppm and 2°C, respectively. The effects of high levels of atmospheric CO₂ and air temperature were predicted for 2050, increasing 200 ppm and 2°C, respectively. Thus, studies on the development of plants became a reason for study, especially in temperate biome plants. However, study on these effects on tropical species, on nutritional requirement was been necessary. The objective of this study was to verify the effects of accumulation and efficiency of nutrient use, and of the crop yield of *Stylosanthes capitata* Vogel. and *Panicum maximum* Jacq. cultivated in increasing atmospheric CO₂ concentration and warming under field conditions, using the Trop-T-FACE system installed at University of São Paulo, located in Ribeirão Preto, Brasil. Plants will be submitted to four treatments: CO₂ and temperature ambient (C), conditions of elevated CO₂ (600 ppm-eC), enhance temperature (2° C above ambient- eT) and combination of elevated CO₂ and temperature (eC + eT), and using four replicates. The plot was completely randomized. It was be analyzed sampling of plants after 30 days after the treatment beginning, after were evaluated as the macronutrients and micronutrients contents, and the aboveground biomass and belowground biomass. At 30 days of exposure to the eT + eC treatment, there was an increase in N, P, K, Ca and S accumulation, increase in N, Ca and S use efficiency, improved the increase of dry biomass of *S. capitata*, and these conditions on eT + eC leading to be more productive. For *P. maximum*, how the climate changes are occurring simultaneously, we predict that there will be no changes in accumulation, nutrient use efficiency and aboveground biomass production, however, this effect was verified for belowground biomass.

Keywords: accumulation of nutrient, Mombasa grass, efficiency of nutrients use, free-air CO₂ enrichment enhanced, leguminous forage

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

No período de 1951 a 2010 foi observado um aumento de temperatura média na superfície global (GMST). Sabe-se que o forçamento solar é o único agente natural conhecido que atuou para o aquecimento do clima neste período, apesar de ter aumentado muito menos do que, o forçamento induzido pelos gases de efeito estufa (GEE), é extremamente provável que as atividades humanas, através do aumento observado das concentrações dos GEE, tenham causado mais da metade do aumento da GMST durante o período citado. Tal fato é apoiado por sólidas evidências observadas em diversos estudos baseados nos mais variados métodos (IPCC, 2014).

A partir de tais observações, pode-se afirmar que as emissões de GEEs, provindas da queima de combustíveis fósseis para a atmosfera são as causas do aquecimento climático da Terra.

Estes estudos apontam que, as emissões dos GEEs foram iniciadas com a revolução industrial, momento em que a humanidade intensificou a queima dos combustíveis fósseis, por necessidade da produção de energia (LONG et al., 2004). Dessa maneira, houve uma intensa transferência de carbono do solo para a atmosfera (IPCC, 2014).

Alguns fenômenos, em decorrência das acentuadas alterações climáticas, podem ser citados, como, por exemplo, o furacão Catarina que foi causado por um ciclone tropical do Atlântico Sul em 2004, secas na Amazônia, em 2010 e 2015, culminando com a diminuição dos níveis dos rios, prejudicando a navegação, produção de alimentos e na geração de energia elétrica (SIQUEIRA, 2001).

Neste estudo propõem-se avaliar os efeitos do cenário simulado B1 (IPCC, 2007), com relação às exigências nutricionais das espécies forrageiras, pois, não existem estudos correlacionados com os incrementos de temperatura e concentração de CO₂. O manejo da fertilização em forrageiras adotado pelos produtores são frutos de pesquisas realizadas sem mudanças climáticas. Diante

destas alterações climáticas pode diminuir ou aumentar a eficiência nutricional dependendo do nutriente. Caso tenha aumento na eficiência nutricional surge a possibilidade de diminuir as quantidades dos fertilizantes nas forrageiras e caso contrário aumentaria essas quantidades.

Podemos questionar, se a mudança climática aumenta, ou não, a eficiência nutricional, ocasionando em um aumento da produção de biomassa. Em caso afirmativo, quais nutrientes serão mais afetados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos do incremento de CO₂ e aumento da temperatura (do cenário simulado B1), sobre a produtividade, o acúmulo e a eficiência de uso de nutrientes, de *Stylosanthes capitata* Vogel e *Panicum maximum* Jacq., em condições de campo, utilizando o sistema Mini T- FACE.

2.2 Objetivos Específicos

Determinar o acúmulo de nutrientes e a eficiência de utilização nutricional (EUN) de *Stylosanthes capitata* e *Panicum maximum*, submetidas ao incremento de CO₂ e de aquecimento.

Determinar a produtividade de *Stylosanthes capitata* e *Panicum maximum*, submetidas ao incremento de CO₂ e de aquecimento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar na produção agrícola

A produção de alimento, consequentemente a segurança alimentar, para as próximas gerações torna-se motivo de estudo (IPCC, 2014).

Muitos estudos abordam as adversidades climáticas sobre a produção das culturas, relacionando-as aos cenários simulados do IPCC. Considerando o cenário para 2050, os efeitos biofísicos e a produção agrícola (desconsiderando aumento da fertilização com CO₂), serão reduzidos globalmente e que, consequentemente, haverá instabilidade na oferta de alimentos e de seus preços, e aumento da área de produção (NELSON et al., 2014).

Entretanto em meta-análise sobre as hipóteses da elevada concentração de CO₂ atmosférico ([CO₂]) no cultivo de trigo foi observada aumento da produtividade, ressaltando que este resultado depende das seguintes condições experimentais: o método de exposição ao CO₂, o sistema de enraizamento, além de possíveis interferências devido aos fatores de estresse. Foram observados menores produtividades da cultura à elevada [CO₂] em experimentos com sistema aprimorado de enriquecimento de CO₂ ao ar livre - FACE, se comparado com experimentos em ambiente controlado (WANG et al., 2013).

Os fatores climáticos, como a temperatura, a precipitação, os fenômenos extremos e as alterações nas concentrações de carbono e aerossóis na atmosfera, também estão relacionados ao mau uso da terra e exploração dos recursos naturais (IPCC, 2007). Dessa forma, as mudanças climáticas em larga escala têm enormes implicações para os ecossistemas agrícolas, florestais e de pastagens de nosso planeta, dado que, por seu papel na biosfera, estes agroecossistemas têm extrema relevância ambiental e socioeconômica no contexto das mudanças climáticas (MARTINEZ et al., 2015).

No Brasil, avaliando os efeitos do aumento da temperatura do ar em decorrência do aquecimento global poderão ocorrer perdas nas safras de grãos de R\$ 7,4 bilhões para 2020, número que pode subir para R\$ 14 bilhões em 2070 (SIQUEIRA, 2001).

No caso das forrageiras, poucos estudos são encontrados na literatura. Entretanto segundo Martinez et al. (2014), estas possuem a capacidade de

armazenar até 20 % do carbono total do solo, podendo absorver e minimizar a concentração aumentada de carbono atmosférico (MARTINEZ. et al., 2014).

Avaliando os impactos das mudanças climáticas na agricultura do Brasil, Nobre et al. (2001), observaram redução crescente das áreas potenciais para as culturas de milho, feijão, arroz, soja e café arábica em função do aumento da temperatura entre 1 a 5,8 °C.

Diante de condições adversas de clima, as plantas toleram aumentos da concentração de CO₂ e temperatura de acordo os limites de cada espécie, pois, acima destes, a atividade metabólica pode ser reduzida (GRANDIS et al., 2010).

Um estudo detalhado nas regiões aptas para o cultivo do café, diante dos incrementos de temperatura, verificou-se que nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Paraná, reduziram em média 24% com o aumento de 1°C, e praticamente ficaram inaptas com o aumento de 3°C. Ainda, ressaltam que, os resultados estão de acordo com as características genéticas e fisiológicas das cultivares de café arábico no Brasil, que toleram as temperaturas médias anuais entre 18 °C e 23 °C (ASSAD et al., 2004).

3.2 Influência do aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar na produtividade e na nutrição de plantas

As plantas dependem de um conjunto de fatores para obtenção de sua produtividade, o qual envolve os eventos fisiológicos. Esses eventos começam com a absorção dos compostos orgânicos, o CO₂ e a H₂O, presentes na atmosfera, assim como a radiação solar para a fotossíntese (SHARKEY; SHRADER, 2006). A concentração de CO₂ atmosférico está diretamente relacionada com a fotossíntese e o crescimento das plantas (AINSWORTH; LONG, 2005; LONG et al. 2004; AINSWORTH; ROGERS, 2007; LEAKEY et al., 2009). As respostas das culturas aos níveis elevados de CO₂ e os tipos de estresse abióticos, como a seca e aumento das temperaturas, precisam ser avaliadas em condições de campo (AINSWORTH et al., 2008)

O efeito do aumento da temperatura em 1°C pode causar danos às plantas, reduzindo sua produtividade em até 17%. Outro aspecto que o aumento da

temperatura do ar pode causar, é o aumento da fotorrespiração, o que pode vir a anular o efeito do aumento da concentração de CO_2 (eCO_2), e concomitantemente a inibição da fotossíntese e a variação da biomassa. Pois o efeito da temperatura pode variar entre curto e longo prazo com a elevação da concentração de CO_2 atmosférico (CAI et al., 2018).

Somando-se a estes, as plantas precisam também de nutrientes: N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Cl e Mo, que normalmente são absorvidos do solo e que, mesmo estando presentes em quantidades menores que os orgânicos, constituem a composição da biomassa do vegetal (PRADO, 2007). Estes nutrientes possuem funções estruturais nas plantas, como constituintes de enzimas e participantes de processos metabólicos (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Pois quando a quantidade de nutrientes no solo for suprida e as condições climáticas (água, luz, temperatura) estiverem disponíveis às plantas, essas poderão realizar suas funções metabólicas durante seu ciclo fenológico.

Existem critérios específicos para o funcionamento do mecanismo da fotossíntese, que podem reduzir ou cessar o crescimento, consequentemente afeta a produção de biomassa (VONG; MURATA, 1978).

O sistema fotossintético de absorção de CO_2 distingue as plantas em duas categorias, do tipo C3 e C4, ou seja, plantas menos adaptadas às concentrações de CO_2 atuais das mais adaptadas, respectivamente (SAGE; CODEMAN, 2002).

No mecanismo fotossintético de plantas C3, o responsável em capturar o CO_2 do ambiente é uma enzima denominada ribulose 1,5 bifosfatocarboxilase/ oxigenase (Rubisco). Esta enzima possui algumas exigências para exercer sua função carboxilase, que são: alta quantidade de CO_2 atmosférica, quantidade adequadas dos nutrientes magnésio e nitrogênio, além de condições de temperatura entre 25°C e 35°C (BERG et al., 2008). Caso contrário, a enzima pode ser ativada em sua função oxigenase e ocorrer o fenômeno da fotorrespiração, que causa uma perda líquida de carbono e a redução de biomassa (TAIZ; ZEIGER, 2017; JENKINS, 1989).

Enquanto as plantas C4 podem capturar CO_2 em situação de baixa concentração atmosférica devido a presença de uma enzima que atua exclusivamente como carboxilase, a fosfoenol piruvato carboxilase (PEP CASE). Percebe-se que existe um maior aproveitamento e rendimento produtivo de

biomassa, se comparadas às plantas do tipo C3 (TAIZ; ZEIGER, 2017; BERG et al., 2008).

Em um estudo desenvolvido em ambiente controlado com as culturas de trigo e centeio, foi verificado para a massa seca da parte aérea resultados semelhantes para os tratamentos, tanto com a elevada concentração de CO₂ ([eCO₂]) e o fornecimento limitado de fósforo (P), como para o fornecimento suficiente de P e [CO₂] atual, como também obteve maior densidade de raízes laterais e eficiência de uso do P (IRAEL et al., 1990).

Wang et al. (2013) verificaram que, a produtividade do trigo sob enriquecimento com CO₂ apresentou diminuição após um período mais longo de exposição em comparação com um período curto, que amenizou as respostas de crescimento e também se relacionou com um declínio significativo na concentração de N nas plantas.

Avaliando a produção de biomassa de uma leguminosa, *Medicago truncatula*, e uma gramínea, *Brahypodium distachyon*, foram encontrados aumentos lineares para as concentrações favoráveis e elevadas de fósforo (P) e sob [eCO₂], enquanto que, em baixas concentrações de P, não houve efeito para a leguminosa e o aumento continuou perceptível para a gramínea. Quanto ao conteúdo de P e condições de [eCO₂] encontrou-se menor acúmulo de P na leguminosa, enquanto que, para a gramínea, e concentrações crescentes de P, não houve efeito. Pode-se justificar esta diminuição para a leguminosa devido à maior eficiência de uso de P (EUP), enquanto que no caso da gramínea, a EUP aumentou até a concentração de 3 mg P (JAKOBSEN, et al. 2016).

Em cultivo de milho (metabolismo C4) foi observado resposta a elevada [CO₂] em condições de déficit hídrico (LEAKEY et al., 2006).

Segundo Ghannoum et al. (2000), as forrageiras C4 apresentam pouca resposta ao CO₂, devido ao mecanismo exclusivo de concentração de CO₂ nas células da bainha do feixe vascular. Este fato pode diminuir as expectativas de melhoria nos processos de absorção e de uso dos nutrientes deste grupo de plantas.

Durante o cultivo de *Panicum maximum* no inverno, os autores Prado et al. (2014) verificaram aumento do conteúdo de N nas folhas em função do aumento da

temperatura do ar. No entanto, houve diminuição da biomassa em função do aumento das concentrações de CO₂.

O desenvolvimento de trigo sob exposições de CO₂, 370 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (concentração ambiente) e 559 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (elevada concentração), foi observado declínio do teor de N total nas folhas em ambas concentrações. Entretanto avaliando a concentração de nitrato no teor total de N foliar, a concentração foi maior sob elevado CO₂ do que sob o CO₂ ambiente (BLOOM et al., 2014).

No caso da forrageira *Stylosanthes capitata*, a qual foi exposta ao aumento de 2°C em relação ao controle, em sistema de temperatura controlada ao ar livre - T-FACE em parcelas de campo aberto, obteve-se o aumento de 16 % da biomassa (MARTINEZ, 2014).

Cultivares de café arábico foram expostas à duas concentrações de CO₂, 380 e 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$, em seguida, sob temperaturas de 25 °C (diurna) e 20°C (noturna) gradualmente, obtiveram uma baixa diluição dos nutrientes. As temperaturas acima de 38°C, a tendência foi de aumento dos nutrientes nas folhas independente da concentração de CO₂ (TOMAZ et al., 2014).

Para a determinação de temperaturas ótimas para a absorção dos nutrientes NH₄-N, P e K, em solução nutritiva e medida após seis horas, foram observadas as melhores faixas de temperaturas: de 24 a 30°C para arroz e soja (espécies do tipo C3); de 30 a 35° C para sorgo e milho (espécies do tipo C4) (VONG e MURATA, 1977).

O Brasil se destaca na produção agrícola devido às condições climáticas e extensão territorial, muito pouco se sabe a respeito das exigências nutricionais das espécies vegetais tropicais sob elevada concentração de CO₂ em seu ambiente natural (CALFAPIETRA et al., 2010) e muito menos sobre os efeitos combinados de aumento da temperatura e da concentração de CO₂ na atmosfera.

As espécies forrageiras no Brasil ocupam grande parte das áreas cultivadas, cerca de 179 milhões de hectares, principalmente em áreas degradadas das regiões de Cerrado. Portanto, existe uma variedade de espécies forrageiras adaptadas às condições edafoclimáticas nas regiões de Cerrado (ANDRADE et al., 2003), sendo destacada a *Stylosanthes capitata*, uma leguminosa adaptada a estas condições (EMBRAPA, 2007). Outra forrageira de destaque é a espécie *Panicum maximum*,

amplamente empregada, devido à alta produção de biomassa e aceitabilidade pelos ruminantes (KARIA et al., 2010).

Tornando-se relevante o estudo das forrageiras em campo, quando expostas as condições adversas climáticas, principalmente, para auxiliar o agricultor nas recomendações de adubação.

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. CO₂ is a direct substrate for photosynthesis, the increase in [CO₂] will greatly affect photosynthesis and growth in plants. This topic has been discussed in several reviews. 2009a).

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air [CO₂] enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising [CO₂]. **New Phytologist**, v.165, p.351-372, 2005.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, n. 3, p. 258–270, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>>.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO Jr, J.; ÁVILA, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.39, n.11, p.1057-1064, nov. 2004.

BERG, J.M.; TYMOCZKO, J.L; STRYER, L. **Bioquímica Fundamental**. 6 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008.

BLOMM, A. J.; BURGER, M.; KIMBALL, B. A.; PINTER Jr, P. J. Nitrate assimilation is inhibited by elevated [CO₂] in field-grown wheat. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 477 - 480, 2014.

CALFAPIETRA, C.; AINSWORTH, E. A.; BEIER, C.; ANGELIS, de P.; ELLSWORTH, D. S.; GODBOLD, D. L.; HENDREY, G. R.; HICKLER, T.; HOOSBEEK, M. R.; KARNOSKY, D. F.; KING, J.; KÖRNER, C.; LEAKEY, A. D. B.; LEWIN, K. F.; LIBERLOO, M.; LONG, S. P.; LUKAC, M.; MATYSSEK, R.; MIGLIETTA, F.; NAGY, J.; NORBY, R. J. OREN, R.; PERCY, K. E. ROGERS, A.; MUGNOZZA, G. S.; STITT, M.; TAYLOR, G.; CEULEMANS, R. Challenges in elevated CO₂ experiments on forests. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 1, p. 5 – 10, 2010.

CAI, C.; LI, G.; YANG, H.; YANG, J.; LIU, H.; STRUIK, P. C.; LUO, W.; YIN, X.; DI, L.; GUO, X.; JIANG, W.; SI, C.; PAN, G.; ZHU, J. Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated CO₂, elevated temperature, and their combination, in FACE environments? **Global Change Biology**, v. 24, n. 4, p. 1685 -1707, 2018.

CUBASCH, U.; WUEBBLES, D.; CHEN, D.; FACCHINI, M-C.; FRAME, D.; MAHOWALD, N.; WINTHER, J-G. Introduction. In: STOCKER, T.F.D.; QIN, G.K.; PLATTNER, M.; TIGNOR, S.K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V. BEX; MIDGLEY, P.M. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. eds., Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press NY, 2013.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Cultivo e uso do estímulos-campo-grande**. Campo grande: Embrapa gado de corte. 2007. 11 p. (Comunicado técnico, 105).

GRANDIS, A.; GODOI, S.; BUCKERIDGE, M. S. Respostas fisiológicas de plantas amazônicas de regiões alagadas às mudanças climáticas globais. **Revista Brasileira de Botânica**, v.33, n.1, p.1-12, jan.-mar, 2010.

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, S.; ZISKZ, L. H; CONROY, J. P. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, n. 9, p. 931 – 942, 2000. Disponível em: < <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00609.x>>.

HANSEN, J.; NAZARENKO, L.; RUEDY, R.; MAKIKO, S.; WILLIS, J.; DEL GENIO, A.; KOCH, D.; LACIS, A.; KEN, L.; MENON, S.; NOVAKOV, T.; PERLWITZ, J.; RUSSELL, G.; SCHMIDT, G. A.; TAUSNEV, N. Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. **Science**, v. 308, n. 5727, p. 1431-1435, 2005.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE CLIMATE CHANGE -IPCC. Climate change- The Physical Science Basic. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen. Marquis, K. B. Avery, M. Tignor and H. L. Miller 9 (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N Y, USA. 2007. p. 996.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE CLIMATE CHANGE -IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. In: Field CB, Barros VR, DokkenDJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White L, editors. Part A: global and sectoral aspects. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. p. 1132.

ISRAEL, D. W.; RUFTY, T. W.; CURE, J. D. Nitrogen and phosphorus nutritional interactions in a CO₂ enriched environment. **Journal of Plant Nutrition**, v. 13, p. 1419 – 1433, 1990.

JAKOBSEN, I.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A.; WATTS-WILLIAMS, S. J.; CLAUSEN, S. S.; GRØNLUND M. Plant growth responses to elevated atmospheric CO₂ are increased by phosphorus sufficiency but not by arbuscula mycorrhizas. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 21, p. 6173–6186, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erw383>>.

JENKINS, C.L.D.; FURBANK, R.T.; HATCH, M.D. Inorganic Carbon Diffusion between C₄ Mesophyll and Bundle Sheath-Cells – Direct Bundle Sheath CO₂ assimilation in intact leaves in the presence of an inhibitor of the C₄ pathway. **Plant Physiology**, v. 91, n. 4, p. 1356–1363, 1989.

KARIA, C. T.; ANDRADE, R. P. de; FERNANDES, C. D.; SCHUNKE, R. M. Gênero *Stylosanthes*. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A. (Ed.). **Plantas forrageiras**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2010, p. 366-401.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ROGERS, A.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 10, p. 2859–2876, 2009.

LEAKEY, A. D. B.; URIBELARREA M.; AINSWORTH, E. A.; NAIDU, S. L.; ROGERS, A.; ORT, D. R.; Long, S. P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought. **Plant Physiology**, v. 140, p. 779 – 790, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1104/pp.105.073957>>.

LONG, S. P.; AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; ORT, D.R. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the Future. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, p.591-628, 2004.

MARTINS, L. D.; TOMAZ, M. A.; LIDON, F. C.; DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. plants. **Climate Change**, v. 126, p. 365-379, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10584-014-1236-7>>.

NELSON, G. C.; VALIN, H.; SANDS, R. D. et al. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3274 - 3279, 2014. doi:10.1073/pnas.1222465110.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D.; OYAMA, M. D. – Mudança Ambiental no Brasil – O impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. In: **Scientific American Brasil**. Nº 12. Set-2005.

SAGE, R. F.; COLEMAN, J. R. Effects of low atmospheric CO₂ on plants: More than a thing of the past. *Trends in Plant Science*, v. 6, n. 1, p.18-24, jan. 200. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01813-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01813-6)>.

SHARKEY T. D.; SCHRADER S. M. High temperature stress. In: MADHAVA R. K. V.; RAGHAVENDRA A. S.; JANARDHAN K. (Eds.). **Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants**. Netherlands: Springer, 2000.p 101 – 129.

SILVA, J. B. L. da; FERREIRA, P. A.; JUSTINO, F.; PIRES, L. C.; TOLEDO, A.S. Leaf concentrations of nitrogen and phosphorus in *Phaseolus vulgaris* L. plants under high CO₂ concentration and drought stress. **Engenharia agrícola jaboticabal**, v. 34, n. 5, p. 935 – 944, 2014.

SIQUEIRA, O. J., Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas. In: Lima, M. A. de, Cabral, O. M. R., Miguez, J. D. G. (Eds.). **Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2001. p. 65-96.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fotossíntese: reação de carboxilação. In:_____ Tradução MASTROBERTI, A. A. et al. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 204-219.

VONG, N. Q.; MURATA, Y. Studies on the Physiological Characteristics of C₃ and C₄ Crop Species I. Effects of air temperature on the apparent photosynthesis, dark respiration, and nutrient absorption of some crops. **Japanese Journal of Crop Science**, v. 46, n.1, p. 45-52, 1977.

WANG, L.; FENG, Z.; SCHJOERRING, J. K. Effects of elevated atmospheric CO₂ on physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analytic test of current hypotheses. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.178, p.57–63, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.013>>.

CAPÍTULO 2 – O incremento de CO₂ e temperatura do ar sobre as exigências nutricionais e produtividade do *Stylosanthes capitata*

RESUMO - O *Stylosanthes capitata* é uma forrageira leguminosa (C3), muito utilizada em consórcio com outras forragens no Brasil. Com as mudanças climáticas, estudos sobre os efeitos da elevação de temperaturas e concentração de [CO₂] atmosférico em forrageiras são necessários para contribuir com extensão de áreas de pastagens. O estudo teve como objetivo avaliar o acúmulo e a eficiência de uso dos nutrientes na produtividade de *S. capitata*, em condições de campo expostas ao incremento de [CO₂] atmosférico e aquecimento, utilizando o sistema Mini T- FACE. As plantas foram cultivadas no verão, e após 60 dias foram cortadas simulando o pré pastejo. Posteriormente, foram expostas aos tratamentos: temperatura e concentração de CO₂ ambiente (controle, C), aquecimento (2 °C acima do controle, eT), incremento da [CO₂] (200 ppm acima do C- eCO₂) e eT + eCO₂, em campo, utilizando os sistemas, controle de temperatura ao ar livre (T-FACE) e mini enriquecimento de CO₂ ao ar livre (Mini FACE). Na primeira avaliação, 15 dias após exposição aos tratamentos, não houve diferença para os aspectos nutricionais ou para produção de biomassa. Na segunda avaliação, 30 dias de exposição ao tratamento eT + eC, houve aumento do acúmulo de N, P, K, Ca e S, aumento da eficiência de uso de N, Ca e S e da produção de biomassa seca das plantas. Em simulação climática futura, é previsto que a combinação do aumento na temperatura em 2 °C e da concentração atmosférica de CO₂ para 600 ppm, em o *S. capitata*, acumule maiores quantidades N, P, K, Ca e S, e aumente a eficiência de uso de N, Ca, Mg e S, podendo ser mais produtiva.

Palavras-chave: Eficiência de uso de nutrientes, dióxido de carbono, forrageira leguminosa, mudanças climáticas, temperatura controlada ao ar livre.

The increase of CO₂ and air temperature on the nutritional requirements and productivity of the *Stylosanthes capitata*

ABSTRACT - *Stylosanthes capitata* is a leguminous forage (C3), widely used in consortium with other forages in Brazil. With climatic changes, studies on the effects of temperature elevation and concentration of atmospheric [CO₂] on forages are

necessary to contribute to the extension of grassland areas. The objective of this study was to evaluate the accumulation and efficiency of nutrient use in *S. capitata* yield under field conditions exposed to the increase of atmospheric $[\text{CO}_2]$ and warming using the Mini T-FACE system. The plants were grown in summer and, after 60 days, there were pruned simulating pre-grazing. Afterwards, the treatments were: temperature and concentration of CO_2 (control, C), warming (2°C above the control, eT), increase of $[\text{CO}_2]$ (200 ppm above C- e CO_2) and eT + e CO_2 , in the field, using the systems, Temperature free-air enhancement system (T-FACE) and Mini free-air CO_2 enrichment system (Mini FACE). At the first evaluation, 15 days after exposure to the treatments, there was no difference for the nutrient aspects or for production of biomass. In the second evaluation, 30 days of exposure to the eT + eC treatment, there was an increase in the accumulation of N, P, K, Ca and S, increase of N, Ca and S use efficiency and dry biomass production of plants. In future climate simulation, it is expected that the combination of an increasing in the temperature by 2°C and the atmospheric concentration of CO_2 to 600 ppm, that *S. capitata* accumulate larger quantities N, P, K, Ca and S, and increase the use efficiency of N, Ca, Mg and S, leading to be more productive.

Keywords: Efficiency of nutrient use, carbon dioxide, leguminous forage, climate change, free air CO_2 enrichment, controlled temperature.

1 INTRODUÇÃO

O contínuo aumento das emissões de dióxido de carbono atmosférico (CO_2), desde o início do período industrial, tem como uma das consequências, o aumento da temperatura média global do ar. Nas estimativas do IPCC, a concentração atmosférica de CO_2 ($[\text{CO}_2]$) deverá ser de 550 ppm em 2050 e aumentar acima de 700 ppm até o final do presente século, o que poderá levar a um aquecimento global de $3 - 5^\circ \text{C}$ (IPCC, 2014; IPCC, 2007).

Os aumentos da $[\text{CO}_2]$ e temperatura do ar influenciam na agricultura, principalmente no crescimento e na produtividade das plantas (GARRUÑA-HERNÁNDEZ, 2014). Dentre as alterações climáticas, espera-se uma resposta positiva na produção de biomassa (AINSWORTH; LONG, 2005; PRASAD et al., 2005).

As plantas toleram aumentos da $[\text{CO}_2]$ e temperatura de acordo com o limite máximo de cada espécie, pois acima deste, a atividade metabólica é reduzida (YAMASAKI et al., 2002; SAGE e COLEMAN, 2001). A maior fixação de CO_2 em resposta ao aumento da $[\text{CO}_2]$ tem-se em plantas de metabolismo fotossintético C3

(TAIZ; ZAGNER, 2017; MARTINEZ et al., 2015). Já em condições limitantes, os efeitos são diretos na fotossíntese, reduzindo sua capacidade de reação de carboxilação (TAIZ; ZAGNER, 2017; LONG; DRAKE, 1992).

Os cultivos expostos às mudanças prolongadas a $[CO_2]$ em ambientes desprotegidos podem ajustar a sua capacidade fotossintética, durante a estação de crescimento (NOGUCHI et al., 2018). O período de exposição ao incremento da $[CO_2]$ também influencia na resposta das plantas (WANG et al., 2013).

Nos sistemas de cultivos bem adubados e sobre estímulo de elevados $[CO_2]$, foram descritas respostas desfavoráveis quando mantidas por longos períodos (BLOOM et al., 2014; FRANZARING et al., 2011; LI; GRENE., 2007; ROGERS et al., 1996).

A produtividade das plantas também depende das disponibilidades de água e nutrientes (HOVENDEN et al., 2014 ; REICH et al., 2006 ; REICH et al., 2014 ; RUSTAD et al., 2001). Uma vez que, os nutrientes do solo limitam a capacidade das plantas de utilizar maior quantidade de carbono.

Cabe ressaltar que a maioria dos estudos sobre a adaptação de cultivos com mudanças climáticas foram realizados em ecossistemas temperados (HOPKINS et al., 2013). Entretanto, nas regiões tropicais são poucas as informações (SCHIMEL et al., 2001; GONZALEZ-MELER et al., 2014).

O *Stylosanthes capitata*, é uma forrageira amplamente cultivada em áreas tropicais e subtropicais, onde os solos são ácidos (CHANDRA, 2009). Esta cultura no Brasil é utilizada em consórcio com outras forragens, por ser uma leguminosa que promove a fixação biológica do N (EMBRAPA, 2010).

Os efeitos da elevação de temperaturas e da $[CO_2]$ em forrageiras são necessários e importantes, principalmente no Brasil, pois a maior parte da atividade econômica é voltada para a produção agrícola. Com isso, a nossa hipótese é que os solos adubados com quantidades recomendadas, em condições de mudanças climáticas, poderão aumentar ou reduzir o acúmulo dos nutrientes na biomassa dessa forrageira. Martinez et al. (2015) verificaram que o aumento moderado de temperatura sob a produção do *S. capitata*, trouxe benefícios para o crescimento e aumento de biomassa seca em 16%.

Nesse contexto, o estudo teve como objetivo avaliar o acúmulo e a eficiência de uso dos nutrientes na produtividade de *Stylosanthes capitata*, em condições de

campo expostas ao incremento da $[CO_2]$ e aquecimento, utilizando o sistema Mini T-FACE.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do estudo

O estudo foi realizado na área experimental da Universidade de São Paulo (USP), Campus de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil nas coordenadas $21^{\circ}10'8''S$ e $47^{\circ}51'48''O$ e a 531 mde altitude (Figura 1), durante fevereiro a junho de 2015.

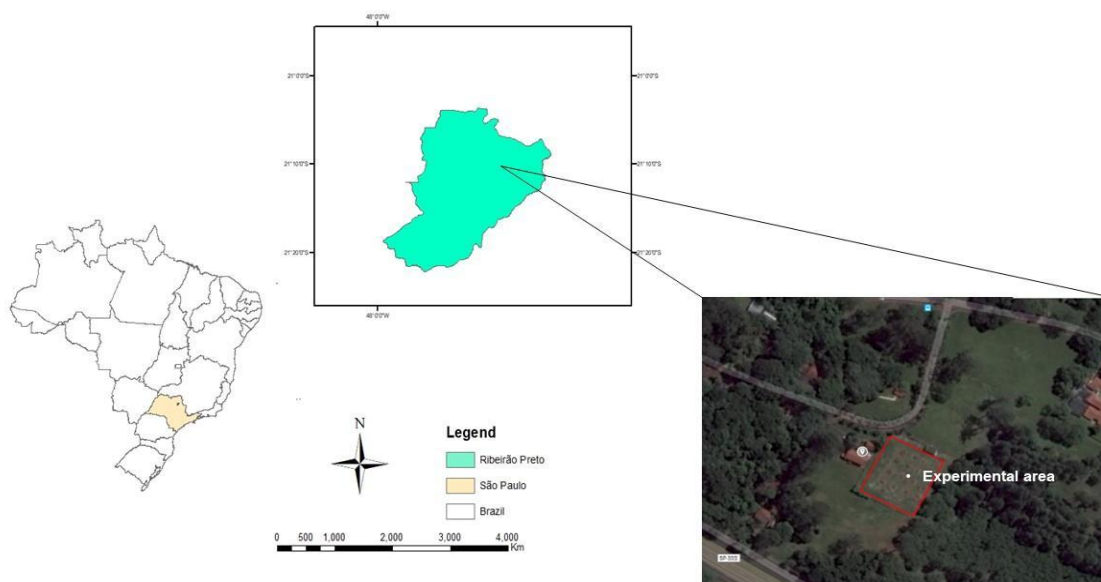


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

O clima da região é classificado como B2rB'4a', mesotérmico úmido com pequena deficiência hídrica, conforme Thornthwaite (1948). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2013).

2.2 Preparo do solo e adubação

Foi realizada a coleta de solo na camada de 0 – 0,20 m, por parcela, com a finalidade de homogeneizar a fertilidade do solo da área experimental antes da

exposição aos tratamentos. Realizou-se a análise química para fins de fertilidade de acordo com a metodologia descrita por Raij e Quaggio (1997) (Tabela 1).

Tabela 1. Resultado da análise química do solo na camada de 0-0,20 m de cada parcela experimental. Ribeirão Preto, 2015.

*ID	pH	MO	P Resina	K	Ca	Mg	H+Al	S	Na	SB	CTC	V	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl	gdm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³			%		mg dm ⁻³			
C	5,1	20,8	28,0	1,4	28,3	9,8	29,5	10,5	0,4	39,8	69,3	56,7	0,2	3,3	14,8	12,4	0,3
eT	5,0	22,0	29,8	1,4	25,8	9,3	32,5	11,5	0,3	37,0	69,5	42,4	0,2	3,2	14,3	11,4	0,2
eCO ₂	5,1	22,3	27,8	1,3	28,3	10,0	32,5	10,5	0,3	39,8	72,3	43,7	0,2	3,3	15,3	11,3	0,3
eT+eCO ₂	5,1	22,5	21,8	1,0	29,8	11,5	31,0	16,8	0,5	42,8	73,3	57,8	0,2	3,3	14,3	12,3	0,4

*ID = identificação dos tratamentos. C= controle, CO₂= incremento de CO₂, eT= elevada temperatura + 2°C e eT+eCO₂= elevado CO₂ e T, MO= matéria orgânica, SB=soma de bases, CTC=capacidade de troca catiônica, V=saturação de bases.

Com os resultados da análise química do solo foi realizada a correção do pH e a adubação das parcelas, conforme recomendado para forrageira leguminosa *Stylosanthes capitata*, grupo II (WERNER et al., 1997).

O preparo para o plantio constou do revolvimento do solo e a aplicação a lanço de calcário calcinado (48 % CaO₃ e 16 % MgO – PRNT 124 %), seguido de incorporação com uso de uma moto cultivadora. Posteriormente, realizou-se a adubação em área total da parcela, cujas fontes utilizadas foram: superfosfato simples (18% P₂O₅); cloreto de potássio (60% K₂O); sulfato de zinco (22% Zn); ácido bórico (17% B) e molibdato de sódio (39% Mo), e uma adubação de cobertura de 200 g de ureia aos 25 dias após emergência.

2.3 Descrição dos tratamentos

As parcelas foram alocadas em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em que os tratamentos foram: incremento de temperatura- eT (+2°C acima do controle- eT), incremento da [CO₂]- eCO₂ (200 ppm acima do controle), a combinação de eCO₂+ eT e as condições do ambiente- C, com quatro repetições. O cultivo do *S. capitata*, foi realizado em espaçamento de 0,2 m x 0,25 m, seguindo a densidade de 2 kg ha⁻¹ sementes puras viáveis – SPV. Aos 60 dias

após emergência foi realizado um corte de uniformização, respeitando a altura de 0,25 m acima do solo, visando o manejo de pós-pastejo (PEREIRA; REIS, 2001).

2.4 Descrição do sistema Mini-T-FACE

Cada parcela de 10 m x 10 m de área foi delimitada uma da outra em 5m, sendo que a área útil experimental constou de uma circunferência de 2m de diâmetro (equivalente a 3,14 m²), alocada no centro de cada parcela.

Portanto para o tratamento eC, foram instaladas oito circunferências com o sistema Mini-Face e outras oito mantidas nas condições ambientes, sendo que, a cada quadro destas oito circunferências foram implantadas refletores de radiação infra-vermelha (IR lâmpadas) T-Face.

O funcionamento do sistema Mini Face é automatizado e controlado por sensores de [CO₂] (IRGAs) e por um anemômetro (GTM220, Vaisala, Finlândia)(MIGLIETTA et al., 1999). Cada IRGA foi instalado no centro de cada parcela, acoplados por uma barra de alumínio, e conectado a unidade de controle central, que recebe a leitura da [CO₂] ambiente da área do dossele em seguida, transmite a quantidade de CO₂, monitorada para aumentar 200 ppm acima da [CO₂] ambiente, chegando a média de 600 ppm. O gás CO₂ utilizado é uma composição constante de carbono isótopo contida em um tanque, controlado por meio de um regulador de pressão automático (SMC Corporação, Japan, series ITV).

O sistema T-FACE é constituído por oito unidades de distribuição de energia, seis elementos de aquecimento de cerâmica e termômetros infravermelhos, por parcela, cujo modelo de aquecedor infravermelho utilizado foi o FTE- 1000 (1000 W, 240 V). Assim, semelhante ao sistema Mini Face ocorre à transmissão das informações para a unidade de controle central e em seguida é refletida a quantidade de luz infravermelha 2°C acima da temperatura ambiente (KIMBALL; CONLEY; LEWIN, 2012; KIMBALL et al., 2008; KIMBALL et al. 1995).

2.5 Característica do *Stylosanthes capitata*

Forrageira leguminosa de ciclo bianual desenvolve-se em solos ácidos, de baixa fertilidade natural. Portanto, tolerantes a saturação por bases no solo de 30 a

35%, e acima deste pode diminuir a quantidade de cobre e manganês e refletir na redução da produção (EMBRAPA, 2008).

2.6 Dados climáticos

As temperaturas do dossel e precipitações diárias foram medidas pela estação climática da área experimental (Figura 2).

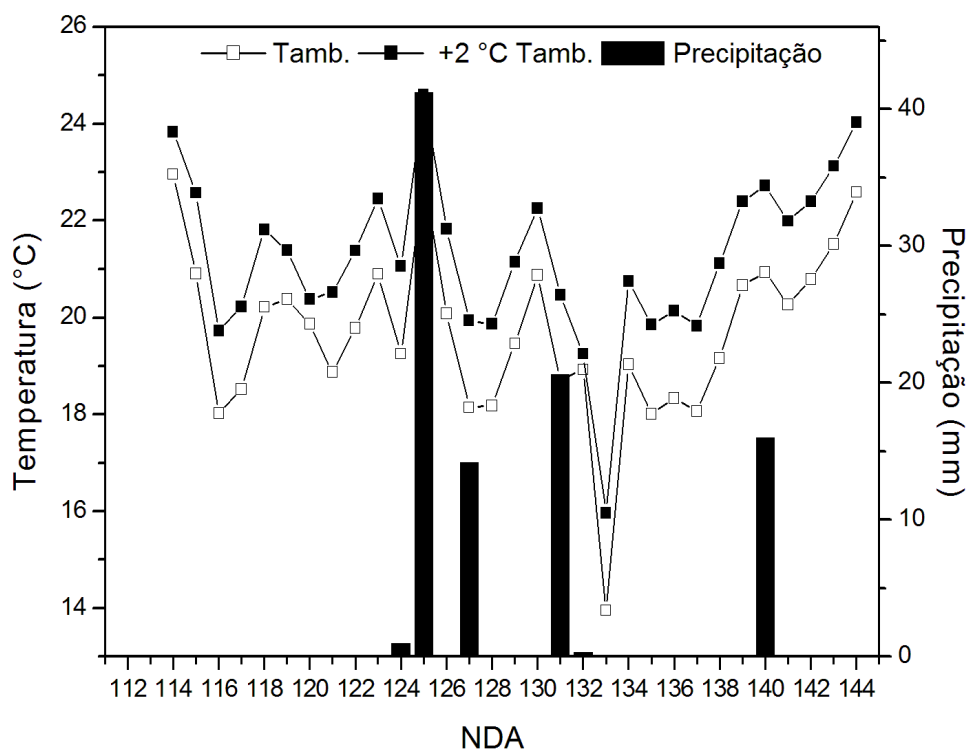


Figura 2. Médias diárias da temperatura e precipitação durante exposição aos tratamentos em dias julianos. Ambas foram medidas do início da aplicação (24/05/2015) dos tratamentos, até o término (24/06/2015). NDA= número de dias julianos, Tamb= temperatura ambiente e +2°C acima da Tamb= incremento de 2° C a temperatura ambiente.

2.7 Avaliações

A parte aérea das plantas foi coletada a 0, 25 m acima do solo, aos 15 e 30 dias após início da exposição aos tratamentos (DET). Em seguida, foram lavadas e acondicionadas em sacos de papel, e secas em estufa com circulação forçada de ar, na temperatura de 65°C até massa constante. Posteriormente foram analisados os

teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) utilizando a metodologia de Bataglia et al. (1983).

Com os teores de nutrientes e a massa seca das plantas, foram calculados o acúmulo e a eficiência de uso para cada nutriente (EUN), pela fórmula (SIDDIQI; GLASS, 1981):

$$EUN = \frac{(\text{matéria seca da parte aérea})^2}{\text{Acúmulo do nutriente da matéria seca da parte aérea}}$$

2.8 Análise dos dados

Foi realizado o teste de análise de variância, após determinadas às médias, realizou-se o teste de comparações múltiplas de Least significant difference – LSD, com um nível de significância de 5%. Os dados foram analisados pelo software Agrostat (BARBOSA; MALDONADO Jr, 2010).

3 RESULTADOS

Houve diferença ($p \leq 0,05$) no acúmulo dos macronutrientes na parte área do estiolantes aos 30 dias após exposição aos tratamentos (DET) (Figura 3). Nós verificamos que os maiores valores médios de acúmulo de N, P, K e Ca no cultivo foram submetidos ao eT + eCO₂. Já para o acúmulo de Mg na parte área da cultura, o eT + eCO₂ não diferiu dos tratamentos C e eCO₂. Para o acúmulo de S na parte aérea na cultura, o eT + eCO₂ não diferiu do eT.

Nos 15 DET não houve diferença no acúmulo dos macronutrientes no estiolantes como aumento da temperatura do ar e concentração de CO₂, pois esse intervalo de coleta não foi o suficiente para que ocorresse o estabelecimento da cultura após o manejo de corte.

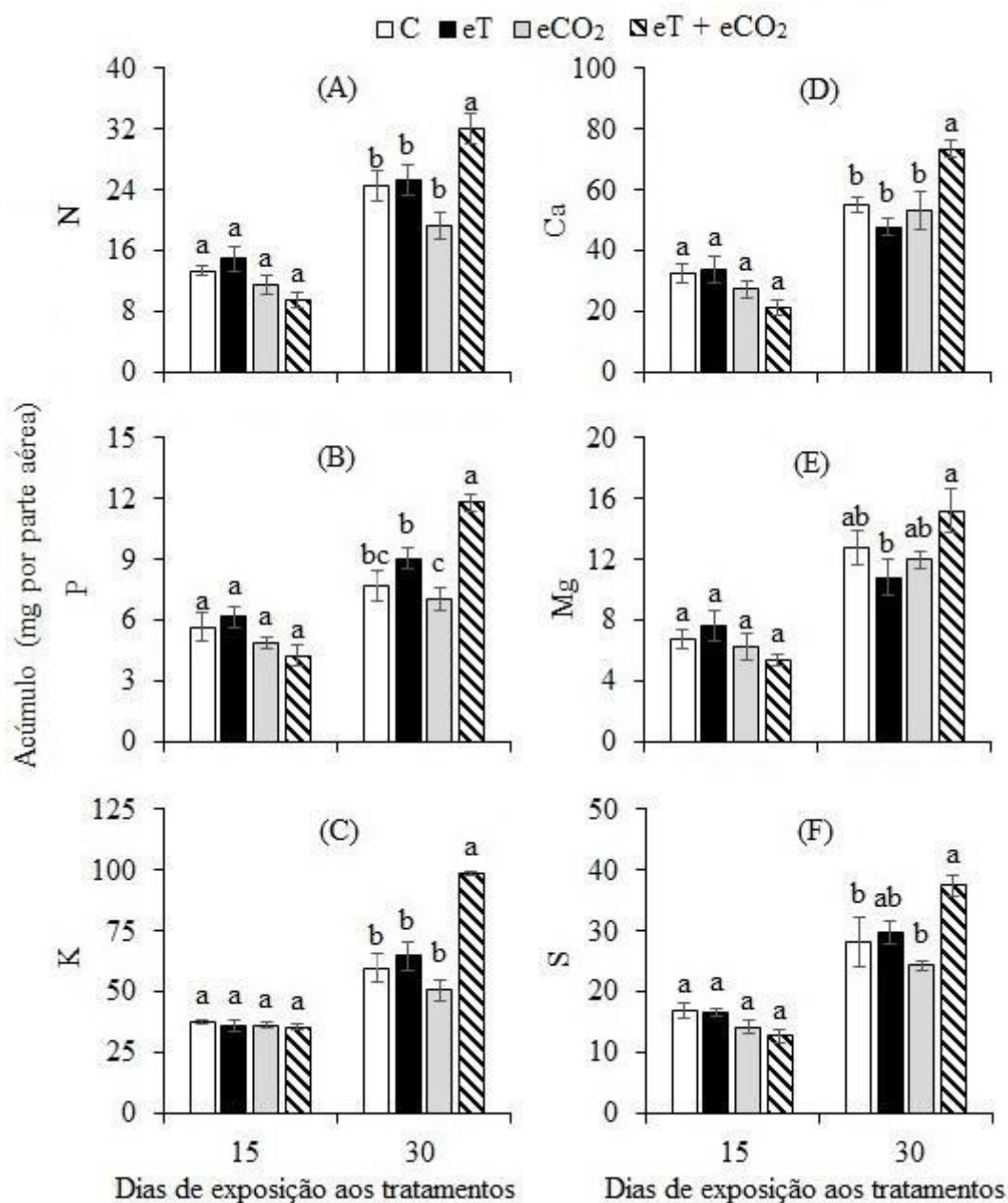


Figura 3. Acúmulo dos macronutrientes na parte aérea de estiloides, submetidos a incrementos: de 2 °C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO₂(eCO₂), eT+eCO₂ e condições do ambiente (controle, C). As barras indicam o erro-padrão das médias. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos em cada período avaliado, a 5% de probabilidade pelo teste LSD.

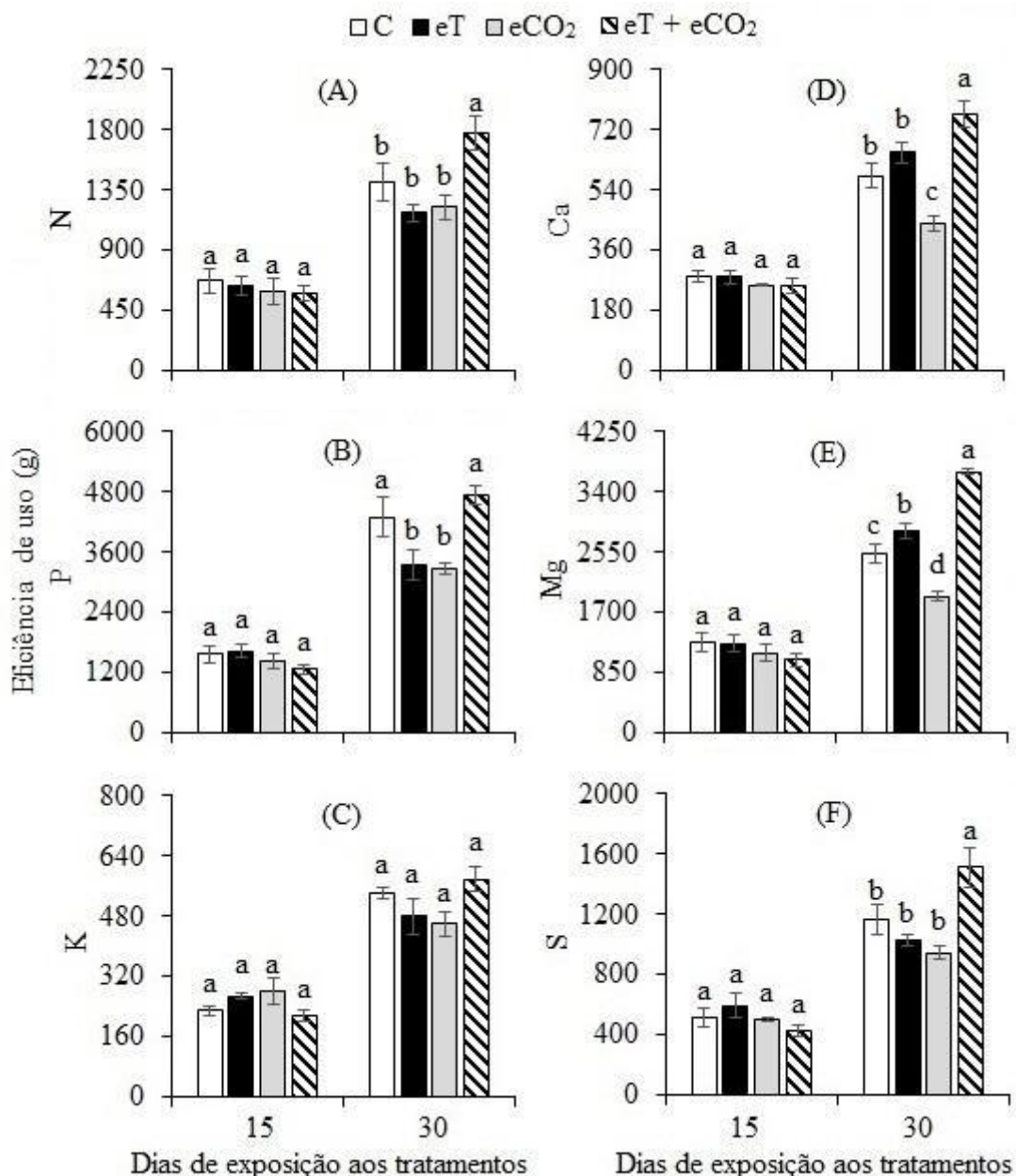


Figura 4. Eficiência de uso dos macronutrientes na parte aérea do estiloides, submetidos a incrementos: de 2 °C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO₂(eCO₂), eT+eCO₂ e condições do ambiente (controle, C). As barras indicam o erro-padrão das médias. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos em cada período avaliado, a 5% de probabilidade pelo teste LSD.

As eficiências dos usos dos macronutrientes na parte aérea do estiloides aos 30 DET diferiram para N, P, Ca, Mg e S (Figura 4). Os maiores valores médios de eficiência do uso de N, Ca, Mg e S os 30 DET no estiloides foram para eT + eCO₂,

dado que a eficiência do uso do P no eT + eCO₂ não diferiu do C. Nós verificamos que as eficiências do uso de Ca e Mg na biomassa da parte aérea do estilosantes, nesse intervalo de coleta, apresentaram os menores valores médios no eCO₂.

Nós observamos que houve diferença da biomassa seca da parte aérea do estilosantes aos 30 DET com os aumentos da temperatura do ar e da concentração CO₂ (Figura 5). Para o tratamento eT + eCO₂, os resultados obtidos foram de 30, 22 e 12 % superiores aos tratamento eCO₂, C e eT, respectivamente.

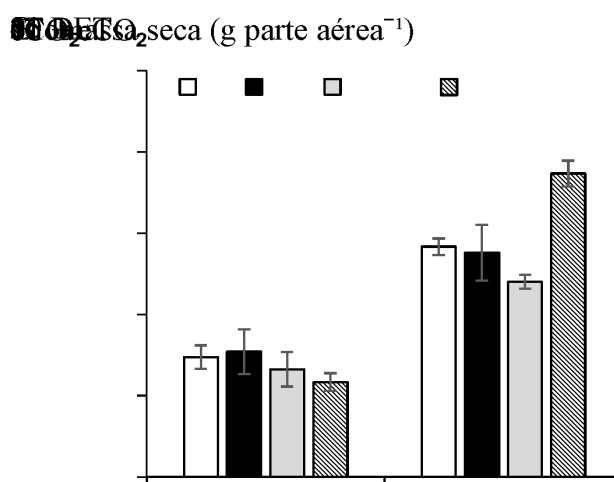


Figura 5. Biomassa seca da parte aérea do Estilosantes, submetidos a incrementos: de 2 °C na temperatura (eT), de 200 ppm na concentração de CO₂ (eCO₂), eT+eCO₂ e condições do ambiente (controle, C). As barras indicam o erro-padrão das médias. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos em cada período avaliado, a 5% de probabilidade pelo teste LSD.

4 DISCUSSÃO

4.1 Acúmulo dos macronutrientes

O *S. capitata* obteve maior acúmulo, para a maioria dos nutrientes, em função do tratamento eT + eCO₂, após 30 dias de exposição (DET), período em que as plantas haviam retomado seu crescimento após o manejo de corte (Figura 3).

Os resultados dos acúmulos dos macronutrientes foram, em parte, derivados da biomassa seca das plantas, que também foi maior no tratamento eT + eCO₂ (Figura 5). Os acúmulos de macronutrientes na parte aérea, expostos ao eT + eCO₂

combinados, podem ser explicados pelo mecanismos de fixação de CO₂ em *S. capitata*, tipo C3, por meio da enzima ribulose 1,5 bisfostato carboxilase/oxigenase (Rubisco) em sua função carboxilase, a qual exige condições adequadas de temperatura (20 – 30°C) e concentrações de CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2017; SAGE; COLEMAN, 2001).

Um vez que, a temperatura média esteve dentro da faixa de 22°C durante os 30 DET. Esses resultados indicam que mesmo com o aquecimento previsto para o futuro, em período em que faixas inadequadas para a fotossíntese não sejam atingidas, ocorre efeitos favoráveis para o crescimento do *S. capitata*. Martinez et al. (2014) verificaram maior produtividade do *S. capitata* com aumento de 2°C, em período do ano, que a temperatura nas parcelas aquecidas esteve entre 30 e 32 °C.

Com relação ao tratamento eCO₂, esperava-se que as plantas de *S. capitata* apresentassem incremento de produtividade, devido ao seu tipo de metabolismo fotossintético C3. Entretanto, existe indicação na literatura de aumentos instantâneos na taxa fotossintética das plantas que, com o passar do tempo, estas podem aclimatar-se e manter a taxa fotossintética em níveis normais (Katul et al., 2000; WANG et al., 2013), sendo essa uma possível explicação para que o incremento da [CO₂] não ter aumentado a produção de biomassa seca (Figura 5).

O acúmulo de N na parte aérea do estilosantes expostos a eT+eCO₂ (Figura 3. A) ocorreu primeiramente, devido a sua participação na síntese da Rubisco, a qual é composta, em média, por 50% do N presente na planta (EVANS, 1989). Juntamente com o aumento de +2 °C da temperatura que ativa esta enzima (REF; TAIZ; ZEIGER, 2017).

Há uma correlação positiva com a taxa de assimilação líquida de CO₂ saturado pela luz (FARQUHAR et al., 1980; SAGE; COLEMAN, 2001). Sob enriqueciemnto de CO₂ ao ar livre-FACE no cultivo de azévem (*Lolium perenne*), e avaliando as proporções de velocidade de carboxilação máxima por taxa de transporte de eletróns máxima (Vc max/ J max), os autores puderam concluir que, a assimilação de C pela fotossíntese provocou aumento e inibição do crescimento das plantas, respectivamente, em adequada adubação de N e baixa adubação de N (AINSWORTH et al., 2003).

O P deve estar metabolicamente disponível no cloroplasto, no momento de alta atividade fotossintética, participando das ligações entre os elétrons (transferência de energia), para manter a fotofosforilação e a biossíntese adequada de carboidratos (TICCONI; DELATORRE; ABEL, 2001; CONROY et al., 1986). Portanto seu acúmulo pode estar relacionado com suas funções metabólicas nas plantas (Figura 3 B). Semelhante ao efeito do acúmulo de P deste estudo, em cultivo de *Medicago trincata* (leguminosa) em eCO₂ e crescentes incrementos dos teores de P obtiveram menor teor desse nutriente, porém houve aumento na concentração de biomassa da parte aérea, assim como na eficiência de uso (JAKOBSEN et al., 2016).

O fornecimento adequado do P quando exposto ao incremento médio de 600 ppm de CO₂, proposta neste estudo, foi convertido em biomassa seca, mas este efeito é expresso quanto a temperatura aumenta, assim como, observado para os demais nutrientes estudados nas condições desta pesquisa, expressados pelos resultados de eficiência de utilização. Portanto, acredita que, sobre eT+eCO₂, os incrementos dos aspectos nutricionais avaliados estão relacionados com suas atividades fotossintéticas que requer quantidades adequadas, caso contrário, efeitos inibitórios podem ser produzidos pelas plantas (ROGERS, 1995; CURTIS; WANG, 1998; POORTER; ROUMET; CAMPBELL, 1996).

O acúmulo de K em eT+eCO₂, pode estar relacionado com suas funções na planta (Figura 3 C). Devido a sua participação no controle da pressão de turgescência para assimilação de CO₂ pelos estômatos (SINGH; REDDY, 2018; HOU et al., 2018), e que após a fixação de CO₂, é regulada pela taxa de assimilação nos estômatos (MARTINEZ-LUSCHERA et al., 2015; NOGALSKA et al., 2018).

Para o acúmulo de Ca, estima-se que a exposição sob a maior concentração de CO₂ e temperatura demandou maiores quantidades deste nutriente (Figura 3 D). O Ca participa das funções estruturais do vegetal, tais como: formação da parede celular, ligando os polissacarídeos de pectina e participação nas reações metabólicas como ativador enzimático (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Já o Mg, constituinte da molécula de clorofila, não diferiu do C e eCO₂, portanto esse nutriente não teve um maior acúmulo nessa condição (Figura 3 E). Assim como, o S, que não diferiu entre os tratamentos eT e eT+eCO₂ (Figura 3 F).

Vale ressaltar que não existem outros trabalhos na literatura em simulação climática futura onde foram avaliados os aspectos nutricionais do *S. capitata* para confrontar com os resultados do presente trabalho.

4.2 Eficiência do uso dos macronutrientes

A eficiência do uso dos macronutrientes N, P, Ca, Mg e S aumentaram sob eT+eCO₂, concordando com os acúmulos dos mesmos, na biomassa seca do estilosantes (Figura 4).

A eficiência do uso (EU) dos nutrientes foi discutida utilizando aos estudos existentes na literatura, que abordaram a EU dos nutrientes, em exposição ao eCO₂e/ou temperatura.

Em exposição ao eCO₂ a EUN aumentou (LEAKEY, 2009), enquanto, outros estudos indicam que a assimilação do N, em especial do nitrato, é inibida (PLEIJEL; UDDLING, 2012; LEKSHMY; PANDEY, 2013).

A eficiência de uso do P (EUP) aumentou quando exposto ao eT+eCO₂ e ao C (Figura 4 B). Pandey et al. (2015) observaram pouca diferença sobre a biomassa seca da parte aérea em eCO₂ e baixo fornecimento de P e entre CO₂ de ambiente e suficiente P, e a EUP aumentou em eCO₂ e baixo fornecimento de P, assim concluíram que existe uma maior EUP em eCO₂. Uma possível explicação para o efeito semelhante entre eT+eCO₂ e o C na nossa pesquisa. Outra justificativa seria o efeito diluição, causado pela maior taxa fotossintética em eCO₂ (TAUB e WANG, 2008).

JAKOBSEN et al. (2016) Estudaram duas forrageiras, *Brahypodium distachyon* (gramínea) e *Medicago truncatula* (leguminosa), sob eCO₂ e diferentes fornecimentos de P no solo, foram obtidos, em eCO₂ e em altos níveis de P que há uma diminuição da concentração de P na parte aérea da leguminosa e, para a gramínea, não houve interferência nestas condições. Deste modo, no nosso estudo pode ter ocorrido uma restrição ou falta do nutriente P, que provocou a não diferença com relação ao tratamento C. Além disso, as plantas desenvolveram uma sofisticada melhora na aquisição de ortofosfato inorgânico da rizosfera, podendo este ter sido transportado para as raízes, incorporado na biomassa seca da raiz.

Em cultivo de milho não houve diferenças na dinâmica de N e P em concentrações de CO₂, 500, 750 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e ambiente, utilizando câmaras de topo aberto, exceto para o N, no rendimento de grãos. Entretanto houve aumentos das concentrações e EU destes nutrientes conforme os estágios de crescimento avançaram e de acordo com os incrementos de CO₂ (XIE et al., 2018).

Após a revisão de literatura exposta acima, não existem estudos que abordam EU de K, Ca, Mg e S, seja em condições de incremento de CO₂ e/ou temperatura que foram avaliados neste estudo (Figura 4 C, D, E e F).

4.3 Biomassa seca

Com relação aos aspectos nutricionais abordados no presente estudo, a maior produtividade de biomassa seca com o tratamento eT + eCO₂ (Figura 5) pode ser explicada pela maior eficiência de uso de N, Ca, Mg e S no segundo corte (Figura 4). Supõe-se que expostos ao eCO₂ e a temperatura houve uma aceleração do crescimento, devido as melhores condições para o processo da fotossíntese (SILVA et al., 2014; LEE et al., 2011; SPUNDA et al. 2008).

Em eCO₂ a taxa fotossintética líquida sob luz saturada geralmente é melhorada, entretanto, sob baixa intensidade de luz não ocorre incentivo para absorção de CO₂ (os fótons estão limitando o substrato da fotossíntese) (SPUNDA et al., 2005). A associação com o aumento do CO₂ normalmente estimula a produção primária no cultivo, que também aumentou a respiração da planta (TRUEMAN; GONZALEZ-MELER, 2005).

5 CONCLUSÃO

Em simulação climática futura, é previsto que a combinação do aumento da temperatura em 2 °C e da concentração atmosférica de CO₂ para 600 ppm, que o *S. capitata* acumule maiores quantidades N, P, K, Ca e S, aumente a eficiência de uso de N, Ca, Mg e S, seja mais produtiva.

REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy. **New Phytol**, v. 165, p. 351-372, 2005.
- AINSWORTH, E. A.; DAVEY, P. A.; HYMUS, G. J.; OSBORNE, C. P.; ROGERS, A.; BLUM, H.; NÖSBERGER, J.; LONG, S. P. Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for 10 years at two nitrogen fertilization levels under Free Air CO₂ Enrichment (FACE). **Plant, Cell and Environment**, v. 26, p. 705 -714, 2003.
- BARBOSA, O.; MALDONATO W. Jr. Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos (AgroEstat). Jaboticabal: Gráfica multipress Ltda, 2015. Vi, 396p.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLAM, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico. 1983. 48 p. (IAC. Boletim Técnico, 78).
- CHANDRA A. Diversity among *Stylosanthes* species: habitat, edaphic and agro-climatic affinities leading to cultivar development. **Journal of Environmental Biology**, v. 30, n. 4, p. 471 – 478, 2009.
- CONROY, J. P. Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on plant nutrition. **Australian Journal of Botany**, n. 5, v. 40, p. 445 – 456, 2005.
- CURTIS, P. S.; WANG, X. A meta – analysis of elevated CO₂ effects on wood plant mass, form and physiology. **Oecologia**, v. 113, n. 3, p. 299 – 313, 1998.
- EMBRAPA. *Relatório de Avaliação dos impactos das tecnologias geradas pela Embrapa Gado de Corte - Capim Mombaça*. Embrapa Gado de Corte, Mato Grosso, 2014.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas**. 2 ed. Londrina : Editora Planta, 2006. 401 p. ISBN: 8599144030.
- FARQUHAR, C. D.; von CAEMMERER S.; BERRY J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, v. 149, p. 78 – 90, 1980.
- GRANDIS, A.; GODOI, S.; BUCKERIDGE, M. S. Respostas fisiológicas de plantas amazônicas de regiões alagadas às mudanças climáticas globais. **Revista Brasileira de Botânica**, v.33, n.1, p.1-12, jan.-mar, 2010.
- GARRUÑA-HERNÁNDEZ, R; ORELLANA, R; LARQUE-SAAVEDRA, A; CANTO, A. Understanding the physiological responses of a tropical crop (*Capsicum chinense* Jacq.) at high temperature. **PLoS One**, n. 9, v. 11, p. 111 – 402, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111402> >.

HOPKINS, F.; GONZALEZ-MELER, M. A.; FLOWER, C. E.; LYNCH, D. J., CZIMCZIK, C.; TANG, J., et al. Ecosystem-level controls on root-rhizosphere respiration. **New Phytol.** v. 199, p. 339–351, 2013. Disponível em: <[https://doi:10.1111/nph.12271](https://doi.org/10.1111/nph.12271)>.

IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. In: Field CB, Barros VR, DokkenDJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White L, editors. Part A: global and sectoral aspects. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. p. 1132.

JAKOBSEN, I.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A.; WATTS-WILLIAMS, S. J.; CLAUSEN, S. S.; GRØNLUND M. Plant growth responses to elevated atmospheric CO₂ are increased by phosphorus sufficiency but not by arbuscular mycorrhizas. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 21, p. 6173–6186, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erw383>>.

KATUL G. G., ELLSWORTH D. S., LAI C. T. Modelling assimilation and intercellular CO₂ from measured conductance: a synthesis of approaches. **Plant Cell Environ.** v. 23, p. 1313 – 1328. 2000.

KIMBALL, B. A.; CONLEY, M. M.; WANG, S.; LIN, X. LUO, C. MORGAN, J. et al. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. **Glob Chang Biol**, v. 14, p. 309 – 320, 2008. Disponível em: <[https://doi:10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x)>.

KIMBALL, B. A.; CONLEY, M. M.; LEWIN. K. F. Performance and Energy Costs Associated with Scaling Matthew M. Infrared Heater Arrays for Warming Field Plots from 1 to 100 M. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1, p. 247 – 65, 2012. Disponível em: <[https://doi:10.1007/s00704-011-0518-5](https://doi.org/10.1007/s00704-011-0518-5)>.

KIMBALL, B. A.; PINTER, P. J.; GARCIA, R. L.; La MORTE, R. L.; WALL, G. W.; HUNSAKER, D. J.; WECHSUNG, G.; WECHSUNG, F.; KARTSCHALL, T.; Productivity and water use of wheat under free-air [CO₂] enrichment. **Global Change Biology**, v.1, p.429-442, 1995. Disponível em: <[https://doi:10.1111/j.1365-2486.1995.tb00041.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00041.x)>.

KIMBALL, B.A.; KOBAYASHI, K.; BINDI, M. Responses of agricultural crops to free-air [CO₂] enrichment. **Advances in Agronomy**, v.77, p.293 - 368, 2002.

LAMBERS, H.; POORTER, H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences. **Adv. Ecol. Res.** v. 23, p. 18 – 261, 1992.

LEAKEY, A. D. B. Rising atmospheric carbon dioxide concentration and the future of C4 crops for food and fuel. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 2009. 276:2333–43. doi:10.1098/rspb.2008.1517>.

LEE, T. D.; BARROTT, S. H.; REICH, P. B. Photosynthetic responses of 13 grassland species across 11 years of free-air CO₂ enrichment is modest, consistent and independent of N supply. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, p. 2893 – 2904, 2011.

LEKSHMY, S.; JAIN, V.; KHETARPAL, S.; PANDEY, R. Inhibition of nitrate uptake and assimilation in wheat seedlings grown under elevated CO₂. **Indian J. Plant**. 2013.

LI P, Bohnert HJ, GRENE R. All about FACE—plants in a high-[CO₂] world. *Trends Plant Sci.* 2007, 12: 87–89. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.01.003>>PMID:17280863>.

MARTINEZ, C. A.; BIANCONI, M.; SILVA, L. APPROBATO, A. LEMOS, M. SANTOS, L.; CURTARELLI, L.; RODRIGUES, A.; MELLO, T.; MANCHON, F. Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. **Environ Exp Bot**, v. 102, p. 58 – 67, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.02.001>>.

MARTINEZ, C. A.; DE OLIVEIRA, E. A. D.; MELLO, T. R. P.; ALZATE-MARIN, A. L. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. especial VI (SMUD), p. 635-650, 2015.

MARTINEZ-LÜSCHER, J. et al. Climate change conditions (elevated CO₂ and temperature) and UV-B radiation affect grapevine (*Vitis vinifera* cv. Tempranillo) leaf carbon assimilation, altering fruit ripening rates. **Plant science**. v. 236, p. 168 – 176, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.04.001>>.

NOGALSKA, A.; ZUKOWSKA, A.; GARCIA – VALSS, R. Atmospheric CO₂ capture for the artificial photosynthetic system. *Science of total environment*. v. 621, p. 186 -192, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.248>>

PANDEY, R.; DUBEY, K. K.; AHMAD, A.; NILOFAR, R.;VERNA, R.; JAIN, V.;ZINTA, G.; KUMAR, V. Elevated CO₂ improves growth and phosphorus utilization efficiency in cereal species under sub-optimal phosphorus supply. **Jornal of Plant Nutrition**, v. 38, n. 8, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01904167.2014.983116>>.

PEREIRA, J. R.; REIS, R. A. Produção de silage pré-secada com forrageiras temperadas e tropicais. In: Simpósio sobre produção e utilização de forragens conservadas, Maringá, 2001. Anais...Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001. p. 64.

PLEIJEL, H.; UDDLING, J. Yield vs. Quality trade-offs for wheat in response to carbon dioxide and ozone. **Global Change Biology**, v. 18, n. 2, p. 596 - 605, 2012. Disponível em:< <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.2489.x>> .

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análises de solos para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 31 p. (Boletim Técnico, 81).

SAGE, R. F.; COLEMAN, J. R. Effects of low atmospheric CO₂ on plants: More than a thing of the past. **Trends in Plant Science**, v. 6, n. 1, p.18-24, 2001. Disponível em:<[https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01813-6](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01813-6)>.

SILVA, J. B. L. da; FERREIRA, P. A.; JUSTINO, F.; PIRES, L. C.; TOLEDO, A. S. Leaf concentrations of nitrogen and phosphorus in *Phaseolus vulgaris* L. Plants under high CO₂ concentration and drought stress. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v. 34, n.5, p. 935 – 944, 2014.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R. Co-regulation of photosynthetic processes under potassium deficiency across CO₂ levels in soybean: mechanisms of limitations and adaptations. **Photosynthesis Research**, v. 136, n. 1, p. 1-18, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11120-018-0490-3>>.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289-302, 1981.

SPUNDA, V.; KALINA, J.; URBAN, O.; LUIS, V. C.; SIBISSE, I.; PUERTOLAS, J.; SPRTOVA, M.; MAREK, M. V. Diurnal dynamics of photosynthetic parameters of Norway spruce trees cultivated under ambient and elevated CO₂: the reasons of midday depression in CO₂ assimilation. **Plant Science**, v. 168, p. 1371 – 1381, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fotossíntese: reação de carboxilação. In: _____ Tradução MASTROBERTI, A. A. et al. **Fisiologia vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. p. 204 - 219.

TAUB, D. R.; SEEMANN, J. R.; COLEMAN, J. S. Growth in elevated CO₂ protects photosynthesis against high temperature damage. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, p. 649 – 656, 2000.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, p.55 - 94, 1948.

TICCONI, C. A.; DELATORRE, C. A.; ABEL, S. Attenuation of phosphate starvation responses by 574 phosphate in Arabidopsis. **Plant Physiology**, v. 127, p. 963 – 972, 2001.

TRUEMAN, R. J.; GONZALEZ_MELER, M. A. Accelerated belowground C cycling in a managed agriforest ecosystem exposed to elevated carbon dioxide concentrations. *Global change biology*. v. 11, p. 1258 – 1271, 2005. Disponível em:<<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00984.x>>.

WANG, L.; FENG, Z.; SCHJOERRING, J. K. Effects of elevated atmospheric CO₂ on physiology and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.): A meta-analytic test of current

hypotheses. **Agriculture, Ecosystems&Environment**, v. 178, p. 57–63, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.06.013>>.

WANG, Liang; FENG, Zhaozhong; SCHJOERRING, Jan K. Effects of elevated atmospheric CO₂ on physiology and yield of wheat (*triticumaestivum* L.): a meta analytic test of current hypotheses. **Agriculture, ecosystems & environment**, v.178, n. 15, p. 57– 63, 2013.

XIE, X.; LI, R.; ZHANG, Y.; SHEN, S.; BAO, Y. Effect of Elevated [CO₂] on Assimilation, Allocation of Nitrogen and Phosphorus by Maize (*Zea Mays* L.). **Communications in soil science and plant analysis**. v. 49, p. 1032 – 1044, 2018. Disponível em: <<http://doi.org/10.1080/00103624.2018.1448413>>.

CAPÍTULO 3 - O enriquecimento de CO₂ e temperatura não induz dano ao acúmulo e a eficiência de uso dos nutrientes em *Panicum maximum*

RESUMO - Estima-se que em 2050 a temperatura do ar e a concentração de CO₂ estejam 2°C e 200 ppm acima dos valores atuais. O *Panicum maximum* foi cultivado com adequada disponibilidade de água e nutrientes para verificar os aspectos nutricionais devido às mudanças climáticas. Objetivou-se verificar os efeitos do aquecimento e do incremento da concentração de CO₂ ([CO₂]) sobre o acúmulo e a eficiência de uso de nutrientes, e a produção de biomassa seca da parte aérea e de raiz de *P. maximum* em sistema Mini- T- FACE. As plantas foram expostas à temperatura e concentração de CO₂ atmosférico ambiente (controle, C), aquecimento (2 °C acima do C, eT), incremento da [CO₂] (200 ppm acima do C- eC) e a combinação eT + eC, em campo, utilizando os sistemas: controle de temperatura ao ar livre (T - FACE) e mini enriquecimento de CO₂ ao ar livre (Mini - FACE). A eT resultou no aumento do acúmulo de S, B, Fe e Mn, na maior eficiência de uso de N, P, K, Mg e B e melhorou a produção de biomassa seca. Além disso, aumentou a biomassa das raízes expostas ao eT e eT + eC na profundidade de 0 - 0, 20 m e de eT+ eC na profundidade de 0 - 0, 40 m. Considerando que as mudanças climáticas ocorrerão de forma simultânea (eT + eC), prevemos que não haverá mudanças na exigência nutricional em condições moderadas de temperatura em *P. maximum*.

Palavras-chave: Aquecimento global, forrageira, biomassa de raiz, eficiência nutricional.

The enrichment of CO₂ and temperature does not induce damage to the accumulation and nutrient use efficiency in *Panicum maximum*

ABSTRACT - It is estimated that in 2050 air temperature and CO₂ concentration will be 2° C and 200 ppm above current values. *Panicum maximum* was cultivated with adequate availability of water and nutrients to verify nutritional aspects due to climate change. The objective of this study was to verify the effects of warming and the increase of CO₂ concentration ([CO₂]) on the accumulation and efficiency of nutrient use and the biomass aboveground and belowground of *P. maximum* in the Mini-FACE system. The plants were exposed to the temperature and concentration of ambient CO₂ (control, C), warming (2 ° C above C, eT), increase of [CO₂] (200 ppm above C- eC) and the combination eT + eC, in the field, using the systems: Temperature free-air enhancement system (T-FACE) and Mini free-air CO₂ enrichment system (Mini FACE). The eT resulted in increased accumulation of S, B, Fe and Mn, in a higher efficiency of use of N, P, K, Mg and B and improved the production of biomass aboveground. Beyond that, the belowground biomass was exposed to eT and eT+eC in depth of 0 to 0.20 m and to eT+ eC in depth of 0 to 0.40 m. Considering that climate changes will occur simultaneously (eT+ eC), we predict that nutritional demand will not change in moderate conditions of temperature.

Keywords: Global warming, forage, biomass belowground, nutritional efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A mudança climática está ocorrendo de forma simultânea, com aumento da temperatura do ar em consequência das emissões dos gases do efeito estufa, em especial do CO₂ (KUMARI et al., 2018; HOUGHTON et al. 2001).

O aumento da temperatura do ar pode causar estresse à produção agrícola em muitos países (SITA et al., 2017; LOBELL et al., 2011). Avaliando as melhores estações de cultivo de arroz, trigo, milho e soja, foram observados efeitos negativos para o trigo e milho, no período de 1980 - 2008, por consequência das adversidades climáticas no campo, e projetam-se para os próximos anos (LOBELL et al., 2011).

O Brasil está localizado geograficamente próximo aos trópicos, e possui condições climáticas e extensas áreas para produção agrícola. A pecuária é uma atividade de destaque, que utiliza, como fonte principal de alimento para o gado, as forrageiras (MARTINEZ, 2014).

O *Panicum maximum* é uma forrageira C4 adaptada às condições edafoclimáticas brasileiras (GOMES, et al. 2011) e sua produção deve aumentar de 10 a 20% até 2025, devido sua alta produção de biomassa.

Em uma pesquisa conduzida no período do inverno, sob o aumento da temperatura (eT) e enriquecimento de CO₂ ([eCO₂]), em *P. maximum*, foi obtido aumento da biomassa de folhas sobre eT e a combinação de eT e eCO₂. Já para a concentração de N foliar, houve aumento sobre CO₂ e a combinação de eT e eCO₂ e reduziu sobre eT (PRADO et al., 2016).

A maioria dos estudos considerando a concentrações de CO₂ atmosférico [CO₂] em condições de campo observaram efeitos controversos na produtividade das culturas (MYERS et al., 2017; BLOMM et al., 2014). Estes variaram de acordo com a espécie (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDIN, 2002; PRADO et al, 2016; JAKOBSEN et al., 2016), estação de cultivo (BLOOM et al., 2014; NOGUCHI et al., 2018) e quantidades de N e água disponíveis (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDIN, 2002; BISHOP et al., 2014).

Um estudo com *Panicum coloratum* e *Cenchrus ciliaries* em condições controladas, variando níveis de N e da [CO₂] foi contatada maior eficiência de uso de nitrogênio apenas para *C. ciliaries* e aumentos de biomassa seca para ambas

espécies. Para *C. ciliares* a maior EUN ocorreu devido a maior biomassa seca e menor concentração na N foliar. Os autores consideraram que o crescimento das forrageiras foi influenciado pelo incremento da $[CO_2]$, que reduziu as taxas de transpiração (RUDMANN; MILHAM; CONROY, 2001).

Em cultivo de *Medicago trincata* (leguminosa) em eCO_2 e crescentes incrementos dos teores de P obtiveram menor teor de P, porém houve aumento na concentração de biomassa da parte aérea, assim como na eficiência de uso (JAKOBSEN et al., 2016).

As forrageiras possuem metabolismo fotossintético do tipo C4, a qual é saturada pela concentração de $[CO_2]$. Portanto, espera-se que o aumento da $[CO_2]$ pouco interfira na capacidade produtiva (MARTINEZ et al., 2015 ; ALLEN; PRASAD, 2004), devido ao mecanismo exclusivo de concentração de $[CO_2]$ nas células da bainha do feixe destas espécies (GHANNOUM et al., 2000). Enquanto que, com incremento de temperatura, poderá aumentar os aspectos nutricionais e a produtividade. No entanto, é possível que o efeito do aumento da temperatura seja ofuscado pelo incremento da $[CO_2]$ (ASSENG et al., 2013).

Objetivou-se verificar os efeitos do aquecimento e do incremento da concentração de CO_2 atmosférico sobre o acúmulo e a eficiência de uso de nutrientes, e biomassa seca de *Panicum maximum* em sistema Mini- T- FACE.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de estudo

O estudo foi realizado em uma área experimental da Universidade de São Paulo (USP), Campus de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, durante o período de setembro a dezembro de 2015. Nas coordenadas 21°10'8"S e 47°51'48'O e a 531 m de altitude (Fig 1). O clima da região é classificado como B2rB'4a', mesotérmico úmido com pequena deficiência hídrica, conforme Thornthwaite (1948). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2013).

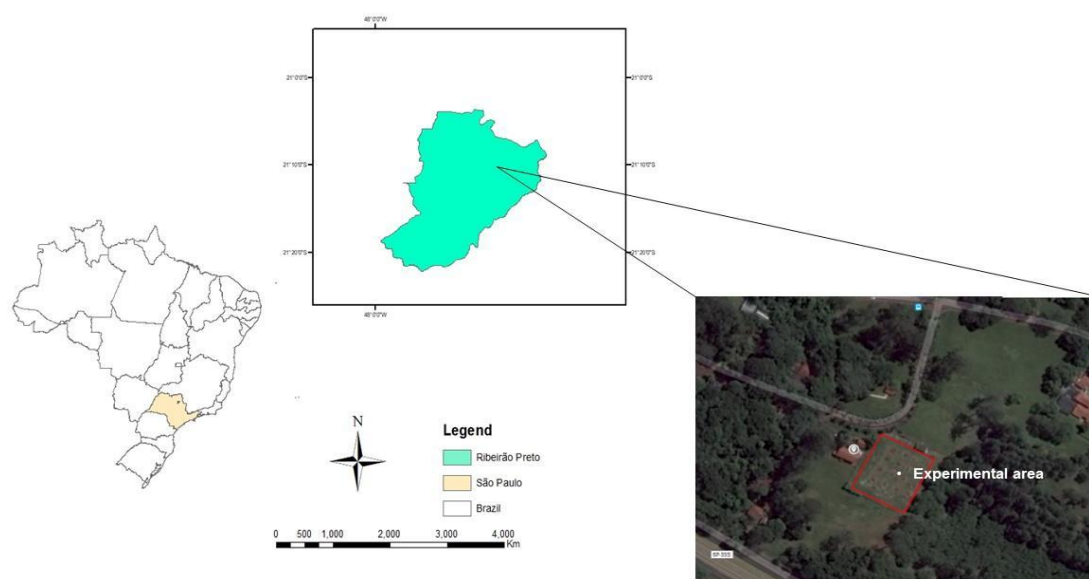


Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

2.2 Preparo do solo e adubação

Realizou-se a amostragem do solo da área, coletando dez subamostras que foram homogeneizadas. Em seguida realizou-se a análise química para fins de fertilidade das amostras de solo (Tabela 1), de acordo com a metodologia descrita por RAIJ e QUAGGIO (1997).

Tabela 1. Resultado da análise química do solo na camada de 0-0,20 m da área experimental. Ribeirão Preto, 2015.

pH	MO ¹	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB ²	CTC ³	V ⁴	B	Cu	Fe	Mn	Zn
CaCl ₂	g dm ⁻³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	mmol _c dm ³	%	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
5,2	23	58	1,7	32,8	8,5	32	42,5	74,5	56,9	0,3	3,6	12,3	16,1	1,7

¹MO= matéria orgânica, ²SB=soma de bases, ³CTC=capacidade de troca catiônica, ⁴V=saturação de bases.

O preparo do solo para o plantio constou do revolvimento do solo e a aplicação a lanço de calcário calcinado (48 % CaO e 16 % MgO – PRNT 124 %), seguido de incorporação com uso de uma moto cultivadora. Realizou-se a fertilização da área a partir dos resultados da análise do solo conforme recomendação de WERNER et al. (1997). Realizou-se a aplicação dos fertilizantes

em área total e incorporou mecanicamente a 10cm de profundidade, utilizando as seguintes fontes: superfosfato simples (18% P_2O_5); cloreto de potássio (60% K_2O); sulfato de zinco (22% Zn); ácido bórico (17% B) e molibdato de sódio (39% Mo).

2.3 Descrição dos tratamentos e plantio

As parcelas foram alocadas em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), em que os tratamentos foram: incremento de temperatura- eT (+ 2°C acima do controle- eT), incremento da $[CO_2]$ - eCO₂ (200 ppm acima do controle), a combinação de eCO₂ + eT e as condições do ambiente- C, com quatro repetições. A forrageira *Panicum maximum* foi semeada a lanço manualmente (1 g m⁻² sementes) (22/09/2015). Aos 30 dias após emergência (17/11/2015) foi realizado um corte de uniformização, aos 0,25 – 0,30 m acima do solo, e com 0,60 m de altura média das plantas visando o manejo de pós-pastejo (PEREIRA; REIS, 2001).

Na área experimental foram instalados os sistemas: de enriquecimento controlado de dióxido de carbono ao ar livre, Mini - FACE (MIGLIETA et al., 2001) e de controle de enriquecimento da temperatura ao ar livre de T- FACE (KIMBALL, et al., 2001). Cada parcela foi delimitada uma da outra em 5 m, sendo que a área útil experimental constou de uma circunferência de 2m de diâmetro (equivalente a 3,14 m²), alocada dentro de cada parcela de 10 m x 10 m de área.

O sistema Mini-Face (tratamento eC) foi instalado em oito circunferências e outras oito mantidas nas condições ambientes, totalizando 16 parcelas. Em cada quatro circunferências destas foram implantadas o sistema T- FACE.

2.4 Sistema Mini-FACE

O funcionamento do sistema Mini Face é automatizado e a concentração de CO₂ ($[CO_2]$) é monitorada por sensores de $[CO_2]$ (IRGAs) (GTM220, Vaisala, Finlândia), deste modo, um IRGA foi instalado no centro de cada parcela, acoplado por uma barra de alumínio, e conectado a unidade de controle central por meio de um cabo que envia a informação para o painel de controle central. Estas informações são integradas a velocidade do vento através por um anemômetro, que

regula a quantidade a ser fumigada de CO₂, monitorada para 200 ppm acima do controle para os tratamentos eC e eT+eC. O gás [CO₂] utilizado é uma composição constante de carbono isótopo contida em um tanque que é controlado por meio de um regulador de pressão automático (SMC Corporação, Japan, series ITV) (MIGLIETTA et al., 1999).

2.5 Sistema T-FACE

As parcelas com incremento de temperatura são constituídas por oito unidades de distribuição de energia, seis aquecedores infravermelhos, modelo FTE-1000 (1000 W, 240 V), e termômetros infravermelhos. Assim como no sistema Mini-FACE a temperatura ambiente (Ta) medida é lida pelo painel de controle central, que em seguida reflete a quantidade de luz infravermelha (IR lâmpadas) 2°C acima da Ta, por meio dos refletores (KIMBALL; CONLEY; LEWIN, 2012; KIMBALL et al., 2008; KIMBALL et al. 1995).

2.6 Dados climáticos

As temperaturas do dossel e precipitações diárias foram medidas pela estação climática da área experimental, durante os 30 dias de exposição aos tratamentos (DET) (Figura 2).

2.7 Avaliações

As plantas de *P. maximum* foram coletadas pelo método do quadrado, de área de 0,0625 m² e cortadas com tesoura, aos 25 - 30 cm acima do solo. Em seguida, foram lavadas e acondicionadas em sacos de papel, e secadas em estufa com circulação forçada de ar, na temperatura de 65°C até massa constante, para determinação da quantidade de biomassa seca. Posteriormente foram analisados os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn,) utilizando a metodologia de Bataglia et al. (1983).

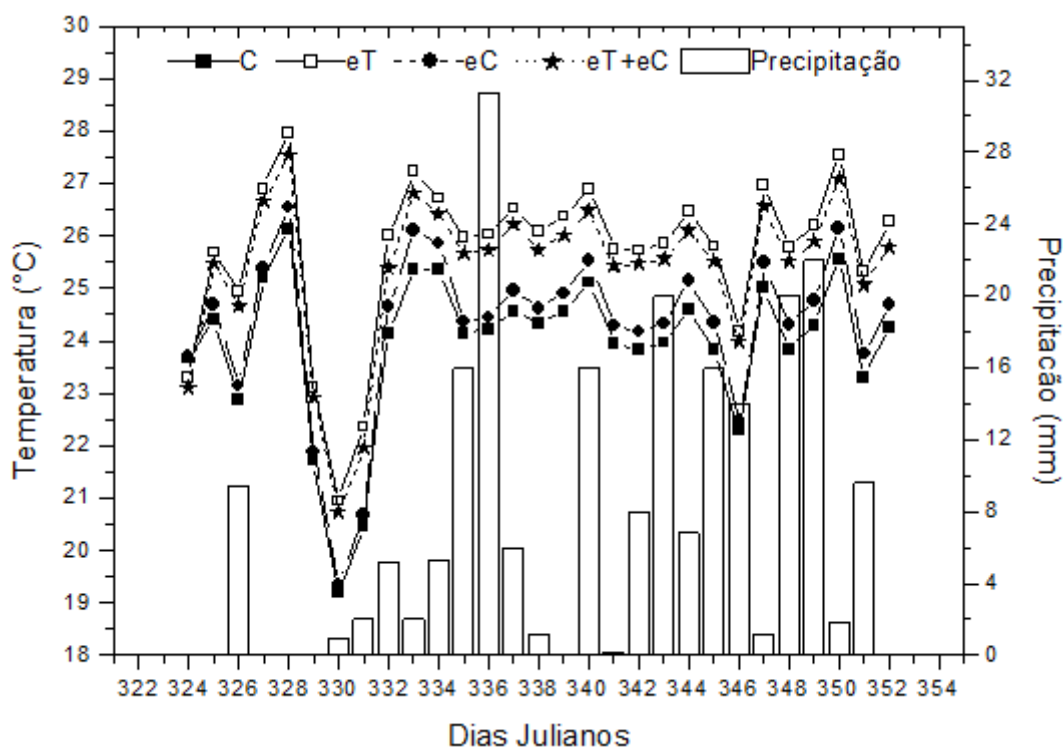


Figura 2. Média diária das temperaturas do dossel por tratamentos: temperatura ambiente (C), incremento de temperatura (eT), incremento de [CO₂] e combinação de eT+eC e precipitação do início da aplicação dos tratamentos (19/11/2015) ao final (19/12/2015), em dias Julianos (USP-Ribeirão Preto/SP, 2015).

Com os teores de nutrientes e a massa seca das plantas, foram calculados o acúmulo e a eficiência de uso para cada nutriente (EUN), pela fórmula (SIDDIQI; GLASS, 1981):

$$EUN = \frac{(\text{matéria seca da parte aérea})^2}{\text{Acúmulo do nutriente da matéria seca da parte aérea}}$$

Para determinação da biomassa seca das raízes, foram realizadas duas amostragens por parcela, utilizando uma sonda de amostragem de solo (Sondaterra, Brasil) com volume de 1908 cm³. As amostras foram retiradas na profundidade de solo de, 0 a 0,20 m e 0,20 – 0,40 m. Cada amostra foi lavada com solução de álcool a 20%, em seguida, as raízes foram separadas com uma peneira 0,5 mm.

2.8 Análise dos dados

Foi realizado o teste de análise de variância, após determinadas às médias, realizou-se o teste de comparações múltiplas de Least significant difference – LSD, com um nível de significância de 5%. Os dados foram analisados pelo software Agrostat (BARBOSA; MALDONADO Jr, 2015).

3. RESULTADOS

3.1 Acúmulo e eficiência de uso dos macronutrientes

Não houve aumento dos acúmulos dos macronutrientes na parte aérea do *P. maximum*, em exposição os tratamentos, aquecimento (eT), incremento da concentração de CO₂ (eC) e a combinação eT+eC (eT+eC), exceto para o enxofre (S). Houve aumento no acúmulo do S exposto a eT em comparação com o tratamento controle (C), apesar deste não diferir do eC e eT+eC (Fig. 3 A). Houve diferença significativa para eficiência de uso do N (EUN) e de P (EUP). Os aumentos da EUN e EUP foram significativos em: eT e eT + eC, respectivamente. De maneira geral houve maior EU de K e Mg em eT, apesar de não diferirem dos tratamentos eC e eT + eC, e estes não diferirem no C. Não houve diferença na EU de Ca e S entre os tratamentos (Fig.3 B).

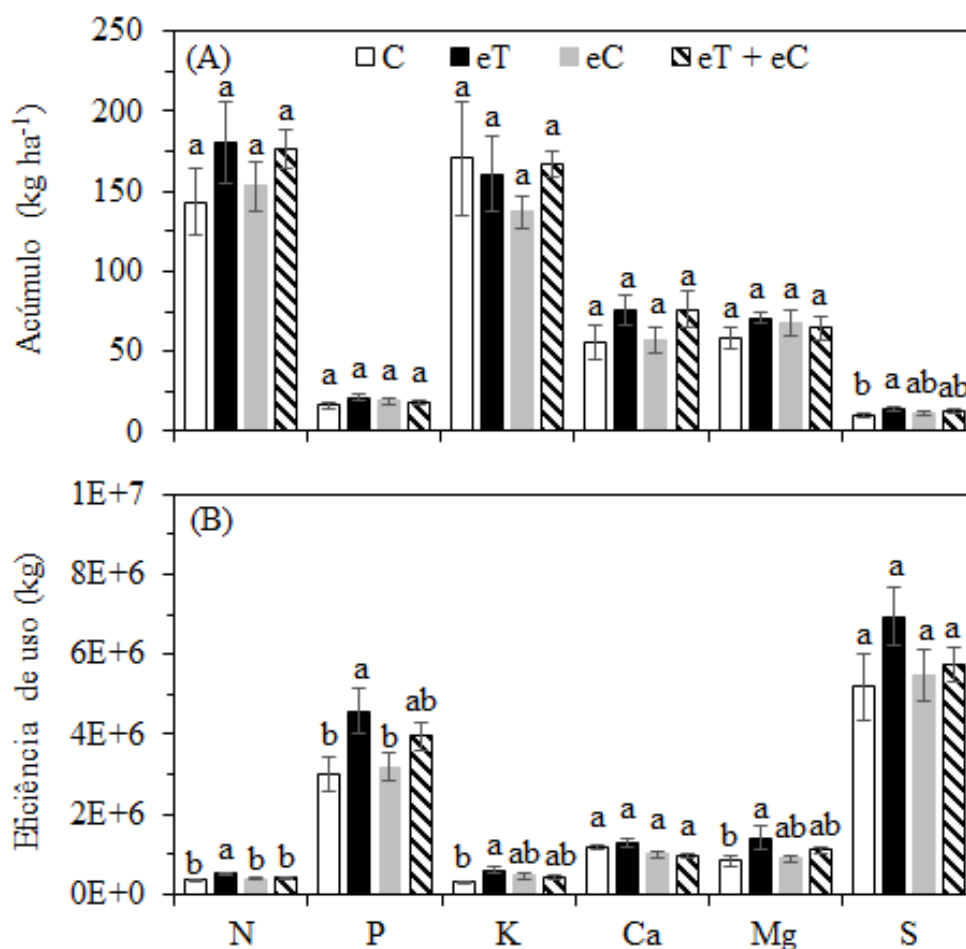


Figura 3. Acúmulo e eficiência de uso dos macronutrientes na parte aérea do *Panicum maximum*, em função dos tratamentos com temperatura e concentração de CO₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2 °C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT+ eC. As plotagens são as médias observadas de 4 repetições e os erros-padrão. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos para cada nutriente, a 5% de probabilidade.

3.2 Acúmulo e eficiência de uso dos micronutrientes

No tratamento eT, houve o maior acúmulo de B, Fe e Mn, em relação ao controle (C). Porém, o acúmulo desses micronutrientes não diferiram dos tratamentos eC e eC + eT, e esses não diferiram em relação ao C. O acúmulo de Cu e de Zn não diferiram entre os tratamentos (Fig 4 A). Para eficiência de uso dos micronutrientes, apenas o B foi favorecido sob eT (Fig 4 B).

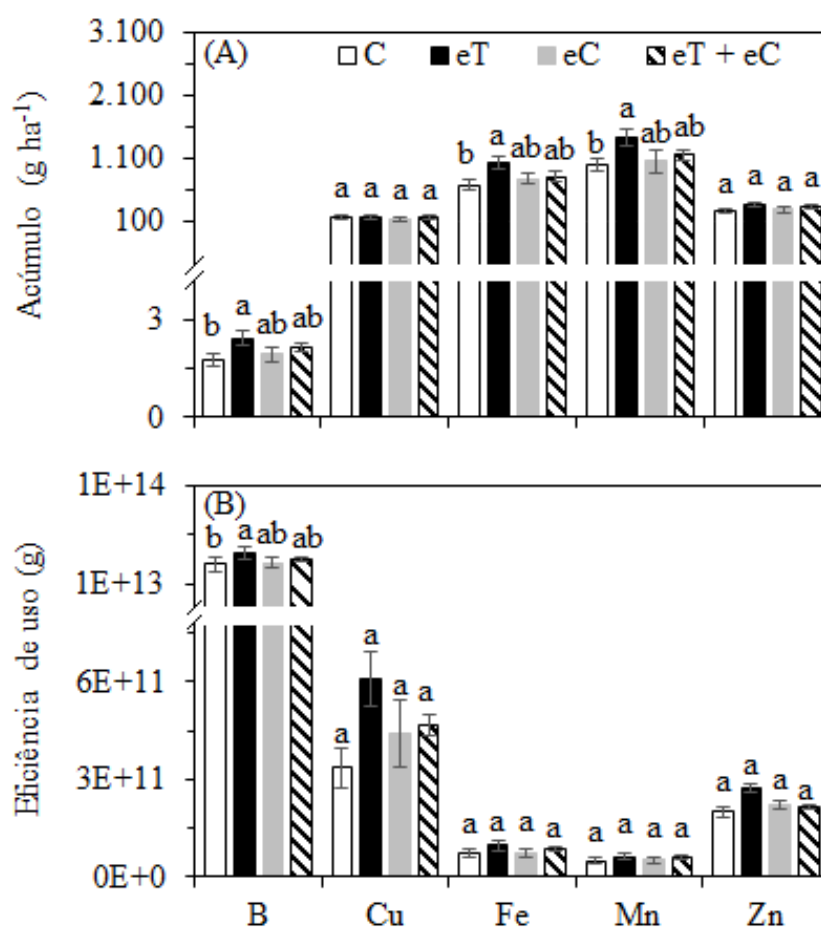


Figura 4. Acúmulo e eficiência de uso dos micronutrientes na parte aérea do *Panicum maximum*, em função dos tratamentos com temperatura e concentração de CO₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2°C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC. As plotagens são as médias observadas de 4 repetições e os erros-padrão. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos para cada nutriente, a 5% de probabilidade.

3.3 Produção de biomassa seca da planta

A produção de biomassa seca da parte aérea aumentou com o tratamento eT, que não diferiu dos tratamentos eC e eT + eC, apesar destes não diferirem do C (Fig. 5).

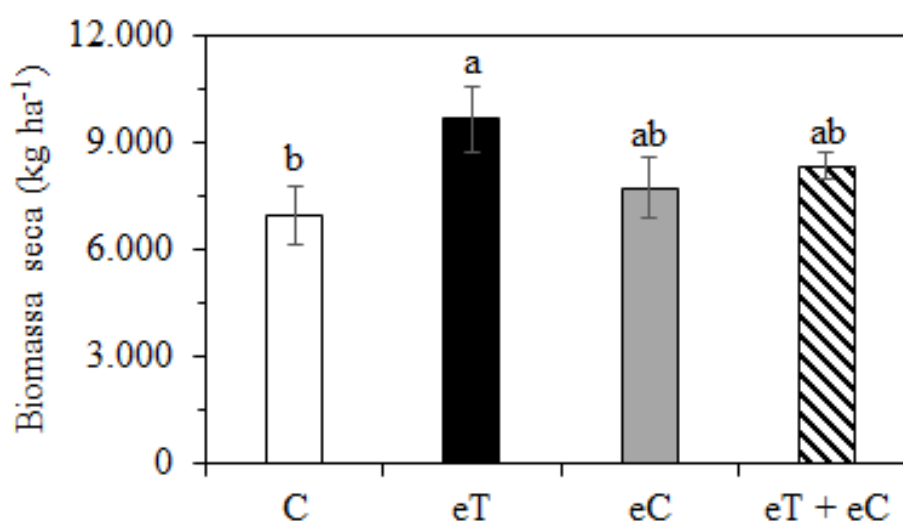


Figura 5. Biomassa seca da parte aérea do *Panicum maximum*, em função dos tratamentos temperatura e concentração de CO₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2°C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC. As plotagens são as médias observadas de 4 repetições e os erros-padrão. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos a 5% de probabilidade.

3.4 Produção de biomassa seca das raízes

Houve efeito significativo para biomassa seca das raízes expostas aos tratamentos eT e eT + eCO₂, apesar do tratamento eT não diferir dos tratamentos eC e C, na profundidade de 0,20 m. Já na profundidade de 0,40 m houve efeito significativo em eT + eC (Fig.6).

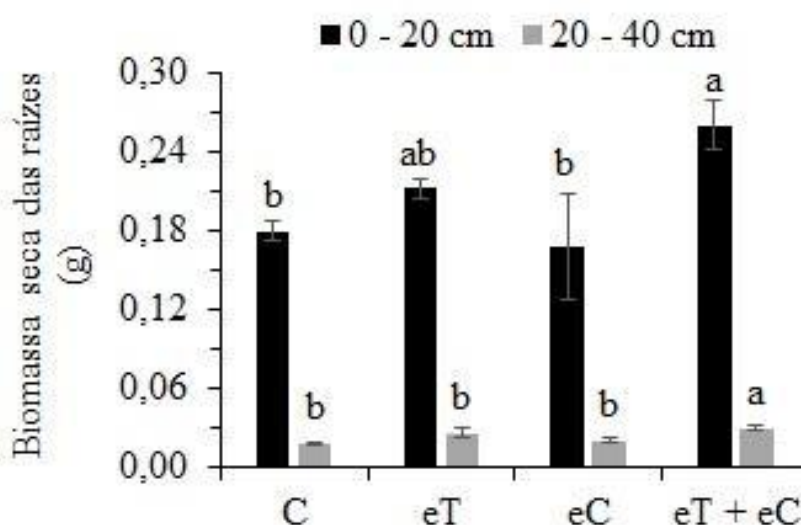


Figura 6. Biomassa seca de raiz do *Panicum maximum* em duas camadas 0-20 e 20-40 cm de profundidade em função dos tratamentos temperatura e concentração de CO₂ ambiente (controle, C), aquecimento do dossel (2 °C acima do controle, eT), aumento da concentração de CO₂ no dossel (600 ppm, eC) e eT + eC. As plotagens são as médias observadas de 4 repetições e os erros-padrão. A mesma letra indica que não houve diferença entre os tratamentos a 5% de probabilidade.

4 DISCUSSÃO

Os acúmulos dos macronutrientes, exceto o S, expostos ao incremento de CO₂ ([eCO₂]) e aquecimento (eT) em *P. maximum* não ocorreram durante os 30 dias de exposição aos tratamentos devido às condições favoráveis do clima. O cultivo esteve sobre temperaturas médias entre 24 e 26°C, respectivamente, em condições de temperatura ambiente (C) e eT, podendo esta espécie tolerar até 35°C, sem danos ao crescimento (JANK et al, 2010). Esta é uma possível explicação para o não acúmulo dos demais nutrientes exposto eT.

Verificamos que, houve um aumento para produção de biomassa seca da parte aérea com o tratamento eT comparado com o tratamento controle (C) (Fig. 5), concordando com o aumento da eficiência de uso dos nutrientes N, P, K, Mg e B expostos a eT (Fig. 3B e 4B). Assim, a conversão de N, P, K, Mg e B expostos a eT favoreceram o crescimento das plantas, pois aumentou a produção de biomassa seca da parte aérea de *P. maximum*.

O aumento do acúmulo de S pode ser explicado por sua função estrutural orgânica nas plantas, componente de aminoácidos essenciais (cistina e metionina) (PRADO, et al, 2015). Pode este nutriente ter sido requerido para o crescimento das folhas e perfilhos, após o manejo do corte.

Poucos estudos foram abordados sobre os efeitos combinados do aumento da temperatura e da $[CO_2]$, para os aspectos nutricionais. Pois a maioria avaliaram os aspectos fotossintéticos e alguns parâmetros de crescimento, em sistema de exposição ao incremento de CO_2 ao ar livre- FACE. O N foi mais abordado em estudos FACE, por sua relação com o carbono, para mineralização. Em condições de $[eCO_2]$ em um ecossistema, aumenta a demanda de N para acompanhar o crescimento das plantas (LUO et al., 2008).

Em estudo realizado com a mesma espécie e nas mesmas condições do presente estudo, durante o inverno, não houve correlação do conteúdo de N nas folhas com a biomassa seca. O conteúdo de N aumentou em função do aumento da $[CO_2]$ e diminuição do acúmulo de N em função do aumento da temperatura. No entanto, a biomassa seca aumentou em eT e eT+e CO_2 (PRADO et al., 2016), indicando que o acúmulo de nutrientes pelo *P. maximum*, em função das modificações climáticas, seja dependente das condições climáticas da estação do ano (SILVA, 2013).

Possivelmente, o não efeito sob $[eCO_2]$ em *P. maximum* está relacionado com o mecanismo de absorção de CO_2 , pela enzima, Fosfoenol piruvato carboxilase (PEP-case) e pela compartimentação entre as células do mesófilo e da bainha do feixe vascular em espécies C4 (GHANNOUM et al. 2001). Este mecanismo é eficiente na utilização de CO_2 , mesmo que este esteja em baixas concentrações no ambiente (HATCH, 1987; CHRISTINE; OSBORNE, 2014). O aumento na $[CO_2]$ nas folhas de *Panicum miliaceum* e *Panicum maximum* não alteraram a taxa fotossintética e a biomassa seca das folhas em condições de água e nutrientes suficientes (ZISKA et al., 1999).

Em condições adequadas de água e de N no solo, em cultivo de sorgo, foi observado aumento de 3% na produção de biomassa (RILLING et al., 2001), contra os 32% observados, em média, para as espécies C3 estudadas, sob aumento da $[CO_2]$ em sistema FACE (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDIN, 2002). O incremento da

[CO₂] (550 ppm) acima da [CO₂] ambiente verificou-se aumento da biomassa seca em cultivos de sorgo e milho, exceto em condições de seca (KIMBALL, 2016). Também após 50 semanas de exposição a 750 ppm de [CO₂], a biomassa de cana de açúcar aumentou 40% (SOUZA et al., 2008).

Os efeitos em experimentos FACE são variáveis de acordo com a espécie (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDIN, 2002; JAKOBSEN et al., 2016) estação de cultivo (BLOOM et al., 2014; NOGUCHI et al., 2018) e quantidades de N e água disponíveis (KIMBALL; KOBAYASHI; BINDIN, 2002; BISHOP et al., 2014).

Neste estudo, o cultivo de *P. maximum* estava em condições de temperatura e umidade favoráveis ao seu crescimento, por isso não houve maior acúmulo dos nutrientes, em exposição aos tratamentos, durante o período avaliado.

Desta forma, não pode ser constatado o efeito amenizador da [eCO₂] com o aumento da temperatura (eT+eC) incremento da concentração de CO₂ (eT + eC), pois não ocorreu temperaturas altas neste período de estudo, como observado por Prado et al. (2016).

A temperatura alta, normalmente, diminui a fotossíntese e aumenta a transpiração e a respiração (LAZA et al., 2015; QADERI et al., 2012). Laza et al. (2015) verificou que este aumento resulta em redução na biomassa vegetal e na produtividade, diferente do verificado neste estudo.

O efeito do eT foi observado na biomassa seca das raízes de *P. maximum* na profundidade de 0, 20 m. O incremento de 2°C acima da temperatura ambiente também foi verificado em combinação com eC (eT+ eC) para as duas profundidades, 0 – 0,20 m e 0 – 0, 40 m. Acredita-se que o [eCO₂] melhorou a concentração de carbono no solo. Trueman e Gonzalez Meler (2005) estudaram mudas de *Populus deltoides*, crescidas em três níveis de [CO₂], e constataram que houve maior acúmulo de matéria orgânica do solo, que resultou em aumento da produção de raízes finas e acelerou a taxa de renovação da raiz.

5 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas estão ocorrendo de forma simultânea, prevemos que não haverá mudanças no acúmulo, na eficiência de uso de nutrientes e na produção

de biomassa seca. Entretanto, este efeito foi constatado para biomassa de raízes de *Panicum maximum*.

REFERÊNCIAS

ASSENS, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J. W.; HATFIELD, J. L.; RUANE, A. C.; BOOTE, K. J.; THORBURN, P. J.; RÖTTER, R. P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P. K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A. J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L. A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R. C.; KERSEBAUM, K. C.; MÜLLER, C.; NARESH KUMAR, S.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J. E.; OSBORNE, T. M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M. A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J.W.; WILLIAMS, J. R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 827–832, 2013.

BLOMM, A. J.; BURGER, M.; K#, B. A.; Pinter P. J. Jr. Nitrate assimilation is inhibited by elevated CO₂ in field-grown wheat. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 477 – 480, 2014.

BARBOSA, O.; MALDONATO W. Jr. Sistemas para análises estatísticas de ensaios agrônômicos (AgroEstat). Jaboticabal: Gráfica multipress Ltda, 2015. Vi, 396p.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLAM, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico. 1983. 48 p. (IAC. Boletim Técnico, 78).

BISHOP, K. A.; LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A. How seasonal temperature or water inputs affect the relative response of C3 crops to elevated [CO₂]: a global analysis of open top chamber and free air CO₂ enrichment studies. **Food and Energy Security**, v. 3, p. 33-45, 2014.

EMBRAPA. Relatório de Avaliação dos impactos das tecnologias geradas pela Embrapa Gado de Corte - Capim Mombaça. (2014). Embrapa Gado de Corte, Mato Grosso.

GHANNOUM, O.; VON CAEMMERER, S.; ZISKZ, L. H; CONROY, J. P. The growth response of C₄ plants to rising atmospheric CO₂ partial pressure: a reassessment. **Plant, Cell and Environment**, v. 23, n. 9, p. 931 – 942, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00609.x>>.

GOMES, R. A.; LEMPP, B.; JANK, L.; CARPEJANI, G. C.; MORAIS, M. Características anatômicas e morfofisiológicas de lâminas foliares de genótipos de

Panicum maximum. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 2, p. 205-211, 2011.

HOUGHTON, R. A.; LAWRENCE, K. T.; HACKLER, J. L. et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, v. 7, p. 731 – 746, 2001.

IPCC. 2014. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. In: Field CB, Barros VR, DokkenDJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White L, editors. Part A: global and sectoral aspects. Working Group II contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2014. p. 1132.

JAKOBSEN, I.; SMITH, S. E.; SMITH, F. A.; WATTS-WILLIAMS, S. J.; CLAUSEN, S. S.; GRØNLUND M. Plant growth responses to elevated atmospheric CO₂ are increased by phosphorus sufficiency but not by arbuscula mycorrhizas. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, n. 21, p. 6173–6186, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erw383>>.

JANK, L.; MARTUSCELLO, J. A.; EUCLIDES, V. P. B.; VALEE, Do C. B.; RESENDE, R. M. S. *Panicum maximum*. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A. (Ed.). **Plantas forrageiras**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2010, p. 166 - 196.

LAZA, M. R. C.; SAKAI, H.; CHENG, W. G.; TOKIDA, T.; PENG, S.; HASEGAWA, T. Differential response of rice plants to high night temperatures imposed at varying developmental phases. **Agronomy Forest Meteorological**, v. 209, p. 69 –77, 2015.

LOBELL, D. B.; TORNEY, A.; FIELD, C. B. California perennial crops in a changing climate. **Climate Change**, v.109, p. 355 – 363, 2011.

KIMBALL, B. A. Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N, and temperature. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 31, p. 36 – 43, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.03.006>>.

KIMBALL, B. A.; CONLEY, M. M.; LEWIN. K. F. Performance and Energy Costs Associated with Scaling Matthew M. Infrared Heater Arrays for Warming Field Plots from 1 to 100 M. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1, p. 247 – 65, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-011-0518-5>>.

KIMBALL, B. A.; PINTER, P. J.; GARCIA, R. L.; La MORTE, R. L.; WALL, G. W.; HUNSAKER, D. J.; WECHSUNG, G.; WECHSUNG, F.; KARTSCHALL, T.; Productivity and water use of wheat under free-air [CO₂] enrichment. **Global Change Biology**, v.1, p.429-442, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00041.x>>.

KIMBALL, B. A; CONLEY, M. M.; WANG, S.; LIN, X. LUO, C. MORGAN, J. et al. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. **Glob Chang Biol**, v. 14, p. 309 – 320, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01486.x>>.

KIMBALL, B.A.; KOBAYASHI, K.; BINDI, M. Responses of agricultural crops to free-air [CO₂] enrichment. **Advances in Agronomy**, v.77, p.293 - 368, 2002.

KUMARI, M.; VERMA, S. C.; SHWETA Climate change and vegetable crops cultivation: A review. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, v. 88, n. 2, p. 167-174, 2018.

MYERS, S. S.; SMITH, M. R.; GUTH, S.; GOLDEN, C. D.; VAITLA, B.; MUELLER, N. D.; DANGOUR, A. D.; HUYBERS, P. Climate Change and Global Food Systems: Potential Impacts on Food Security and Undernutrition. **Annual. Review of Public Health**, v. 38, p. 259–77, 2017.

MARTINEZ, C. A.; DE OLIVEIRA, E. A. D.; MELLO, T. R. P.; ALZATE-MARIN, A. L. Respostas das plantas ao incremento atmosférico de dióxido de carbono e da temperatura. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. especial VI (SMUD), p. 635-650, 2015.

MARTINEZ, C. A, BIANCONI, M.; SILVA, L. APPROBATO, A. LEMOS, M. SANTOS, L.; CURTARELLI, L.; RODRIGUES, A.; MELLO, T.; MANCHON, F. Moderate warming increases PSII performance, antioxidant scavenging systems and biomass production in *Stylosanthes capitata* Vogel. **Environ Exp Bot**, v. 102, p. 58 – 67, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.02.001>>.

MIGLIETTA, F.; HOOSBEEK, M. R., FOOT, J.; GIGON, F.; HASSINEN, A.; HEIJMANS, M.; PERESSOTTI, A. ; SAARINEN, T.; BREEMEN, van N.; WALLÉN, B. Spatial and Temporal Performance of the Mini FACE (Free Air CO₂ Enrichment) System on Bog Ecosystems. **Environmental monitoring and assessment**, 1999, v. 66, n. 2, p. 107–127.

MIGLIETTA, F.; PERESSOTTI, A., VACCARI, F. P.; ZALDEI, A.; ANGELIS, P. De; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. Free-air [CO₂] enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. **New Phytologist**, v. 150, v. 2, p. 465-476, 2001. Disponível em:< <https://doi.org/10.1080/01904167.2014.983116>>.

NOGUCHI, K.; TSUNODA, T.; MIYAGI, A.; KAWAI-YAMADA, M.; SUGIURA, D.; MIYAZAWA, S. I.; TOKIDA, T.; USUI, Y.; NAKAMURA, H.; SAKAI, H.; HASEGAWA, T. Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on Respiratory Rates in Mature Leaves of Two Rice Cultivars Grown at a Free-Air CO₂ Enrichment Site and Analyses of the Underlying Mechanisms. **Plant and Cell Physiology**, v. 59, n. 3, p. 637-649, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/pcp/pcy017>>.

PEREIRA, J. R.; REIS, R. A. Produção de silage pré-secada com forrageiras temperadas e tropicais. In: Simpósio sobre produção e utilização de forragens

conservadas, Maringá, 2001. **Anais...**Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2001. p. 64.

PRADO, C. H. B. A.; BORTOLIN, L. H. G. C.; CASTRO, E.; MARTINEZ, C. A. Leaf Dynamics of *Panicum maximum* under Future Climatic Changes. PLoS One, v. 11, n. 2, p. e0149620, 2016.

PRASAD, V. P. V.; KUMAR, S.; GAUR, P. M.; FAROOQ, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Rillig, M. C., Wright, S. F., Kimball, B. A., Pinter, P. J., Jr., Wall, G. W., Adam, N. R., LaMorte, R. L., Ottman, M. J., Leavitt, S. W., Matthias, A. D., Thompson, T. L., Williams, D. G., and Brooks, T. J. Elevated carbon dioxide (free-air carbon dioxide enrichment, FACE) and irrigation effects on water stable aggregates in a Sorghum field: a possible role for arbuscular mycorrhizal fungi. **Global Change Biol.** v. 7, p. 333 - 337, 2001.

QADERI M.; KUREPIN, L.; REID D. Effects of temperature and watering regime on growth, gas exchange and abscisic acid content of canola (*Brassica napus*) seedlings. **Environmental Exposition Botanic**, v. 75, p.107–113, 2012.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análises de solos para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 31 p. (Boletim Técnico, 81).

RUDMANN, S. G.; MILHAM, P. J.; CONROY, J. P. Influence of high CO₂ partial pressure on nitrogen use efficiency of the C₄ grasses *Panicum coloratum* and *Cenchrus ciliaris*. **Annals Botanic**. v. 88, p. 571–577, 2001.

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos .3 ed. Brasília, DF : Embrapa, 353 p. 2013.

SITA, K.; SEHGAL, A.; HANUMANTHA, B. Rao; RAMAKRISHNAN, N. M N.; VARA, SOUZA, de A. P.; GASPAR, M.; SILVA, da E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOVSKY, A. J.; NISHIYAMA, Jr M. Y.; SANTOS, dos R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell & Environment**, v. 31, p. 1116 - 1127, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01822.x>>.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289-302, 1981.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, p.55 - 94, 1948.

TRUEMAN, R. J.; GONZALEZ_MELER, M. A. Accelerated belowground C cycling in a managed agriforest ecosystem exposed to elevated carbon dioxide concentrations. **Global change biology**, v. 11, p. 1258 – 1271, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00984.x>>

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H.; ANDRADE, N.O.; QUAGGIO, J.A. Forrageiras. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

Em uma das simulações climáticas futuras previstas pelo IPCC (IPCC, 2014), que a combinação do aumento da temperatura em 2 °C e da concentração atmosférica de CO₂ para 600 ppm, nós observamos que, o *Stylosanthes capitata* acumula maiores quantidades N, P, K, Ca e S, aumente a eficiência de uso de N, Ca, Mg e S, podendo tornar-se mais produtiva.

Para *Panicum maximum* não haverá mudanças no acúmulo, na eficiência de uso de nutrientes e na produção de biomassa seca diante das mudanças climáticas ocorrendo de forma simultânea. Entretanto, este efeito foi constatado para biomassa de raízes.