

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Efeitos do elevado nível de CO₂ e de elevada temperatura na taxa respiratória do solo cultivado com plantas de *Panicum maximum* Jacq. cv Mombaça em sistemas FACE e T-FACE

Fernanda Tomita Manchon

Monografia apresentada ao Departamento de Biologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

RIBEIRÃO PRETO – SP

2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA

Efeitos do elevado nível de CO₂ e de elevada temperatura na taxa respiratória do solo cultivado com plantas de *Panicum maximum* Jacq. cv Mombaça em sistemas FACE e T-FACE

Fernanda Tomita Manchon

Monografia apresentada ao Departamento de Biologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Martinez y Huamán

RIBEIRÃO PRETO – SP

2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Manchon, Fernanda Tomita

Efeitos do elevado nível de CO₂ e de elevada temperatura na taxa respiratória do solo cultivado com plantas de *Panicum maximum* Jacq. cv Mombaça e *Stylosanthes capitata* Vogel cv. Campo Grande em sistema MiniFACE – Ribeirão Preto, 2013.

37 p.

Monografia apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/USP. Área de concentração: Fisiologia Vegetal.

Orientador: Martinez y Huamán, Carlos Alberto

1. Mudanças climáticas. 2. Respiração do solo. 3. Fluxo de CO₂.
4. Ciclo de carbono 5. Temperatura e umidade do solo

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Inez e Luiz Antônio, os maiores e melhores
professores que eu poderia ter.*

AGRADECIMENTOS

O término de uma fase e a expectativa pelas novas experiências que virão sempre deixam um ar de mistério, insegurança, nostalgia, mas, acima de tudo, gratidão. Aproveito esse momento para agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação pessoal, social, cultural e acadêmica.

Primeiramente, agradeço aos meus pais por todo amor, apoio e esforços dedicados durante toda a minha trajetória.

Agradeço também ao meu irmão, Felipe, pelo amor e amizade mais que preciosos e por todas as conversas, risadas, piadas, brigas, choros, ensinamentos, sempre estando ao meu lado.

Agradeço ao Lucas, pelo companheirismo, amizade e amor compartilhados, por todas as conversas, viagens, e abraços, pela imensa paixão pela vida que me cativa e me faz enxergar o mundo de uma forma maravilhosa.

Obrigada a toda a minha família, pela serenidade e sabedoria dos Tomita e pela energia e descontração dos Manchon, que, com características tão distintas, me ensinaram a beleza das diferenças.

Agradeço ao professor Carlos pela oportunidade e pelos esforços para que todo o projeto desse certo. Agradeço imensamente aos amigos do Laboratório de Fisiologia Vegetal, por todo esse tempo compartilhado, sendo em conversas sérias, conversas bobas ou trabalhos de campo. Em especial, agradeço ao Matheus, por todo conhecimento, paciência e risadas, sendo, além de um grande amigo, um ótimo professor, e à Laís, por todo o trabalho em conjunto e pelas horas que passamos juntas. Valeu, Ros, e Ninfa!

Gostaria de agradecer também aos antigos companheiros do Laboratório de Biologia Molecular e Biossistemática de Plantas, professor Emerson, Lud e Frango, pela experiência e companhia por um bom tempo.

Dizem que os amigos bons são raros, mas eu tenho o prazer de discordar. Agradeço às irmãs que pude escolher, Cupu e Pamonha, pelas madrugadas filosóficas, conversas eternas, baladas, exercícios, enfim, por toda a parceria.

Agradeço também aos meus amados amigos Mestre, Frango, Gugu e Dio, por todos os momentos que passamos juntos. Conversas, risadas, brigas, bares, e as inúmeras horas no seu Zé fizeram de mim uma pessoa melhor, com certeza.

Agradeço à Karla, amiga distante no tempo e no espaço, que apesar da falta de contato por um longo tempo, nunca deixou de ser uma amizade verdadeira.

Agradeço imensamente a todos os amigos que tive a sorte de encontrar nesses tempos de faculdade:

Aos da querida 45ª turma de Biologia, todos fazem parte da minha história, e tenho certeza que temos tudo pra dar certo!

Aos meus veteranos, Mô, Fô, Kapeta, Buzunda, que me mostraram o “lado B” da faculdade.

Aos mais próximos, Piolha, Ity, Juma, Tila, pela amizade carinhosa.

Aos que não são da Biologia, Lau, Beira, Pompom, Xuxu, por todos os momentos de descontração e, claro, todas as conversas sérias que me ensinaram muito.

Agradeço à AAALL por toda a experiência e oportunidade de representar com muito amor a minha faculdade, principalmente, aos que me ensinaram como fazê-lo, Salsas e Cocota, e também ao time de vôlei da Filô, pelos treinos e jogos, altos e baixos, e pela emoção de jogar, sempre.

Agradeço também às amigas e professoras do pole dance, pelos ensinamentos sobre força de vontade e superação de limites.

Agradeço à Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, em especial ao Departamento de Biologia, pelo aprendizado e formação, e a todos os funcionários e docentes que possibilitaram isso.

Agradeço à FAPESP (Processo 08/58075-8) pelo financiamento do trabalho e ao CNPq pela bolsa IC outorgada.

“Pensando bem... ser biólogo não é só cuidar de plantas e animais, ser biólogo é acreditar na imortalidade da natureza e querer preservá-la sempre mais bela. Ser biólogo é ouvir os ruídos da natureza, mas principalmente entendê-los e amenizá-los. É gostar de terra molhada, de mato fechado, de luas, de sol e de chuvas. Ser biólogo é se importar se a natureza sofre. Ser biólogo é aproximar-se de instintos. É perder medos. É ganhar amigos que jamais irão decepcioná-los. Ser biólogo é ter ódio de gaiolas, jaulas e correntes. É perder tempo enorme apreciando voos de gaivotas. É permanecer descobrindo, através da natureza, a si mesmo. Ser biólogo é ter coragem de penetrar num mundo diferente e ser igual. É ser capaz de entender gratidões mudas, mas, sem dúvida nenhuma, as únicas verdadeiras. É adivinhar olhares e lembrar do seu tempo de criança. Ser biólogo é conviver lado a lado com ensinamentos profundos sobre o amor e a vida.”

(Autor desconhecido)

RESUMO

O aumento da concentração atmosférica de CO₂ causa mudanças climáticas globais que afetarão os ecossistemas terrestres em diversos aspectos. O solo é uma das maiores reservas de carbono desses ecossistemas, e alterações na dinâmica do fluxo de CO₂ entre atmosfera e solo podem acarretar efeitos importantes no balanço global decarbono. Dessa forma, como maior representante desse fluxo, a respiração do solo tem recebido muita atenção de pesquisadores, na tentativa de elucidar os mecanismos que influenciam suas repostas às alterações ambientais. Este estudo apresenta os resultados da avaliação da respiração do solo em um experimento em campo, cultivada com a espécie forrageira *Panicum maximum* cv. Mombaça sob condições de elevada concentração de CO₂ (600 ppm) e elevada temperatura (+2°C) em sistema FACE (*Free-air carbon dioxide enrichment*) e T-FACE (*Temperature Free-air Controlled Enhancement*), como forma de se entender as prováveis respostas de pastagens tropicais às mudanças climáticas previstas. Os tratamentos foram: Controle (C), elevado CO₂ (eC), elevada temperatura (eT) e elevado CO₂ + elevada temperatura (eC+eT). As medições foram realizadas em 6 dias e em dois horários diferentes –12h e 18h – durante o experimento que durou 30 dias, sendo duas medições no início e duas no final desse período. Apesar de ter apresentado pequenas diferenças estatísticas (apenas em alguns dias), o aquecimento é um fator que parece influenciar de forma mais consistente na respiração do solo, que mostrou aumento de cerca de 20% apenas no tratamento eT, e 27% no tratamento eC+eT, em relação ao controle. Já a elevada concentração de CO₂ pareceu exercer influências mínimas, diminuindo em 5% a respiração do solo no tratamento eC, em relação ao controle, e aumentando em 5% sob efeito do tratamento eC+eT em relação ao tratamento de eT. Em relação ao controle, efeitos significativos do incremento da biomassa das raízes foi observada no tratamento eC. Por efeito do tratamento eC, maior percentagem de biomassa foi particionada para raízes e caules do que para as folhas. A temperatura e a umidade do solo foram monitoradas continuamente durante o experimento, e apresentaram baixa correlação estatística com a respiração do solo. No entanto, tem-se demonstrado um grau de dependência alto da respiração do solo a esses parâmetros, sendo, então, necessárias maiores investigações para que o processo de respiração do solo e os mecanismos que o influenciam, como a respiração autotrófica das raízes e seu efeito na respiração heterotrófica, sejam elucidados.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	6
2.1 Objetivos Gerais	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3. Material e Métodos	7
3.1 Área experimental	7
3.2 Material vegetal	7
3.3 Condições de cultivo	8
3.4 Tratamentos	8
3.5 Delineamento experimental	10
3.6 Avaliações	11
3.7 Biomassa vegetal	11
3.8 Análise de dados	12
4. Resultados	13
5. Discussão	25
6. Conclusão	30
7. Referências Bibliográficas	31

1. INTRODUÇÃO

A concentração atmosférica global de gás carbônico (CO₂) vem aumentando significativamente nos últimos anos. Até o século XIX, ela se encontrava estabilizada por volta de 280 ppm, quando se deu o início da Revolução Industrial (IPCC, 2007). A partir desse período a concentração desse gás aumentou significativamente chegando a valores atuais em torno de 400 ppm (CO₂Now, 2013). Projeções futuras estimam uma concentração atmosférica acima de 600 ppm até o ano de 2050, podendo ultrapassar 800 ppm no final do século (IPCC, 2007). Esse aumento tem como principais causas ações antrópicas como a mudança no uso da terra e a crescente utilização de combustíveis fósseis, que devolve CO₂ assimilado em épocas passadas à atmosfera.

O CO₂, assim como outros gases presentes na atmosfera (metano, óxido nitroso), é um gás de efeito estufa (GEE) que absorve radiação infravermelha, contribuindo assim para a elevação da temperatura média global (Townsend *et al.*, 2006), bem como mudanças nos padrões de precipitação em muitas regiões do planeta. É previsto um aumento da temperatura média global de cerca de 2 °C até o ano de 2050, podendo ainda ser superior, dependendo de futuros cenários de emissões de GEE's (IPCC, 2007).

A elevada concentração de CO₂ afeta diretamente a fisiologia das plantas em vários aspectos, tanto na redução da condutância estomatal e da transpiração, quanto no aumento da eficiência do uso da água e da luz, até o estímulo à fotossíntese (Drake *et al.*, 1997). Essa condição pode afetar também a produção, morfologia e bioquímica das raízes e a comunidade microbiana do solo, estimulando, assim, a respiração do solo (King *et al.*, 2004).

Altas temperaturas são consideradas um estresse abiótico já bem conhecido para as plantas, provocando alterações em seu crescimento e produtividade. Em associação à elevada concentração de CO₂, tais fatores influenciam de forma direta e indireta uma variedade de processos vegetais, podendo também alterar a dinâmica de processos relacionados ao solo, como as taxas de respiração, tendo um papel muito importante no balanço global de carbono (Chen *et al.*, 2011; Duval *et al.*, 2012; Djukic *et al.*, 2013). Altas temperaturas podem comprometer o estoque de carbono no solo estimulando a atividade microbiana e aumentando tanto a quantidade de tecido vegetal presente,

quanto a quantidade de matéria orgânica decomposta, podendo tornar mais veloz a liberação de CO₂ e CH₄ para a atmosfera por meio da respiração do solo. Emissões crescentes podem, em contrapartida, contribuir para um maior aquecimento global (Commission, 2011).

O solo armazena as maiores quantidades de carbono do ecossistema terrestre, sendo este a sua principal residência por mais tempo. Em um sistema natural em equilíbrio, as plantas retiram água e nutrientes do solo continuamente, utilizando energia solar e CO₂ atmosférico, e por meio das vias fotossintéticas C₃ e C₄, produzem substâncias orgânicas diversas, que são incorporadas ao solo através da queda de folhas, galhos e de exsudatos radiculares. Esse ambiente complexo propicia uma gama de macro, meso e microrganismos, que ao utilizarem as fontes de C e de energia contribuem para a ciclagem dos elementos. Dessa forma, além dos impactos diretos sobre a fauna e flora do planeta, as mudanças climáticas afetarão tanto a parte vegetal presente no solo, quanto os microrganismos. (Figueiredo *et al.*, 2010; Commission, 2011).

Aumentos e diminuições na quantidade de carbono no solo são importantes fatores para os processos biogeoquímicos globais que influenciam a troca de carbono entre o ambiente terrestre e o atmosférico (King *et al.*, 2004). Essas flutuações de quantidade de carbono do solo estão intimamente relacionadas ao processo de respiração, e devido ao seu importante papel na perda de carbono nos ecossistemas, a respiração tem recebido muita atenção dos pesquisadores (González-Meler *et al.*, 2004, Ryan & Law, 2005).

A respiração do solo é um sinal integrado da complexidade dos processos bióticos e abióticos que ocorrem no solo e, portanto, é um indicador sensível de alterações no ciclo de carbono. Ela pode ser dividida em dois componentes: a respiração heterotrófica resultante da decomposição da matéria orgânica do solo pelos microorganismos, e a respiração autotrófica das raízes e organismos associados, como micorrizas (Chen *et al.*, 2011), e representa um dos maiores fluxos de carbono no ecossistema, contribuindo com cerca de 10% do carbono presente na atmosfera e sendo até 10 vezes maior que o fluxo de carbono provocado pela emissão de gases derivados de combustíveis fósseis (King *et al.*, 2004; Taneva *et al.*, 2006; Taneva & González-Meler, 2011; Vargas *et al.*, 2011; Atarashi-Andoh *et al.*, 2012).

As taxas de respiração do solo variam bastante em escalas temporal e espacial, contudo, os mecanismos envolvidos nessa variabilidade, ainda não são totalmente compreendidos (González-Meler *et al.*, 2004), e pequenas variações na respiração do solo em resposta a alterações ambientais podem influenciar significativamente as concentrações atmosféricas de CO₂, impactando também o clima global.

A quantidade de CO₂ liberada do solo pode ser usada como indicadora da atividade microbiana e do processo de decomposição dos resíduos e da matéria orgânica, uma vez que a emissão de CO₂, na ausência de raízes, é o resultado final do metabolismo energético dos microrganismos. Assim, a taxa com que o carbono fixado pela fotossíntese é oxidado a CO₂ é proporcional à quantidade de organismos participantes das reações de carbono no solo (Tate, 2000; Pulrolnik, 2009). Este processo avalia a atividade geral da biomassa microbiana influenciada pelo clima, pelas propriedades bioquímicas e físicas do solo e pela cobertura vegetal, e a velocidade em que ocorre depende da atuação seletiva dos microrganismos em diferentes substratos, sendo maior quando são substratos mais lábeis e menor quando são mais resistentes à decomposição (Mendes *et al.*, 2009).

O fluxo de CO₂ está intimamente relacionado às características do meio ambiente, sendo diferente em ecossistemas diversos. Altas taxas de fluxo de CO₂ normalmente estão associadas com uma produção primária líquida como aquelas encontradas em ambientes tropicais úmidos, enquanto baixas taxas são observadas em ecossistemas de regiões mais frias (Kim & Verma, 1992). Frequentemente, assume-se que a respiração do solo e seus componentes estão sob controle abiótico em quase todas as escalas (Taneva & González-Meler, 2011).

Os diferentes componentes da respiração do solo podem afetar a capacidade de redução ou armazenamento de CO₂ em ecossistemas, mas atualmente não são conhecidas técnicas específicas para a separação destes componentes (decomposição da matéria orgânica, respiração das raízes e seus simbiontes, respiração de microorganismos, processos fermentativos etc.).

Outro efeito do aquecimento está ligado à arquitetura do solo. Alterações na temperatura e nos padrões de precipitação afetarão a estrutura e acidez do solo, o que influencia a capacidade de absorção e o armazenamento de água no solo, determinante

para a sobrevivência de diversas espécies de seres vivos. A diversidade biológica do solo é extremamente importante no controle de pragas, e quanto maior, melhor o controle biológico. As mudanças climáticas impactarão mais certas espécies do que outras, desequilibrando este ecossistema e comprometendo a habilidade da comunidade do solo em controlar as possíveis pestes (Commission, 2010).

Estudos têm mostrado o desempenho de áreas de pastagem no que concerne à manutenção do carbono armazenado no solo. Há indicações que as pastagens possam atuar como sumidouros de CO₂, provocando um aumento dos estoques de carbono orgânico no solo e reduzindo a quantidade de CO₂ atmosférico (Roscoe *et al.*, 2006; Mendes *et al.*, 2009; Pulrolnik, 2009). Dessa forma, é consenso que, dependendo do uso e manejo, o solo pode atuar como uma fonte de CO₂ para a atmosfera, ou como sumidouro, pelo acúmulo de carbono como matéria orgânica do solo (IPCC, 2001).

Dentro do cenário de mudanças climáticas, o aquecimento global pode provocar a perda de grande quantidade de carbono do solo para a atmosfera, transformando o solo em uma fonte de CO₂ ao invés de sumidouro. O ponto crucial da mudança de fonte para sumidouro é dependente da sensibilidade da respiração do solo em longo prazo, em resposta ao aquecimento global (Melillo *et al.*, 2002).

Alguns estudos recentes têm sugerido que o aumento na respiração do solo pode não persistir se a temperatura continuar a aumentar. Em um experimento de longa duração, Melillo *et al.* (2002) mostraram que o fluxo de CO₂ aumentou 28% nos primeiros seis anos de aquecimento, quando comparado aos solos do tratamento controle, seguidos por decréscimos consideráveis de CO₂ liberado nos anos subsequentes. Contudo, os processos microbiológicos específicos que causam essa resposta ao aquecimento global ainda não foram bem elucidados, sendo que o impacto de altas taxas de CO₂ e elevada temperatura na dinâmica dos fluxos de CO₂ em ecossistemas terrestres depende de uma série de reações e mecanismos complexos que envolvem as várias interações entre solo, microrganismos e planta (Van Groenigen *et al.*, 2003; Amendolara, 2011).

Dessa forma, estudos em campo são necessários e importantes no sentido de elucidar os processos e as respostas do ecossistema a essas novas condições esperadas e sistemas FACE são ideais para esses tipos de estudos, pois permitem uma imposição

bem controlada e replicável de tratamentos atmosféricos em grandes áreas por longos períodos de tempo (King *et al.*, 2004).

Tendo em vista os possíveis efeitos da elevada concentração de CO₂ e da elevada temperatura nos processos biológicos que ocorrem no solo, é possível que a devolução de CO₂ do solo para a atmosfera aumente por meio do estímulo da respiração do solo, dependendo de fatores bióticos e abióticos que devem ser investigados. Nesta pesquisa, a hipótese de trabalho é que a respiração do solo é afetada pelo incremento da temperatura do solo e do elevado nível de CO₂.

Este projeto está vinculado ao Projeto Temático FAPESP – *Research Program on Global Climate Change* (Nº 2008/58075-8): “Experimento miniFACE para analisar os efeitos do elevado CO₂ e do aquecimento sobre a fotossíntese, expressão gênica, bioquímica, crescimento, dinâmica de nutrientes e produtividade de duas espécies forrageiras tropicais contrastantes” sob coordenação do Prof. Carlos Alberto Martinez y Huamán.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo do presente estudo foi determinar o fluxo de CO₂ do solo e investigar a contribuição da respiração do solo cultivado com a espécie forrageira *Panicum maximum* (C4) na devolução do CO₂ assimilado à atmosfera, em condições de elevado CO₂ e elevada temperatura, conforme previsão do IPCC (2007) para a metade deste século, a fim de gerar informações que ajudem a compreender o processo de devolução do carbono desse ecossistema para a atmosfera em ambiente tropical e condições de mudanças climáticas.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar um estudo em campo, com condições próximas às da natureza, sobre a respiração do solo;
- Analisar o efeito da elevada concentração de CO₂ e da elevada temperatura do ar na respiração do solo;
- Verificar a influência dos fatores abióticos, temperatura e umidade do solo, na respiração do solo;
- Verificar a influência da biomassa de raiz no processo de respiração do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental

Esse experimento foi desenvolvido no *campus* Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, em uma área de 2.500 m², com coordenadas correspondentes a 21° 10' 8'' S e 47° 51' 50'' W e altitude média de 580 m² (Figura 1). O clima da região é tropical com estação seca no inverno e chuvosa no verão, sendo classificado como Aw no sistema Köppen, e o solo é do tipo latossolo vermelho distrófico.

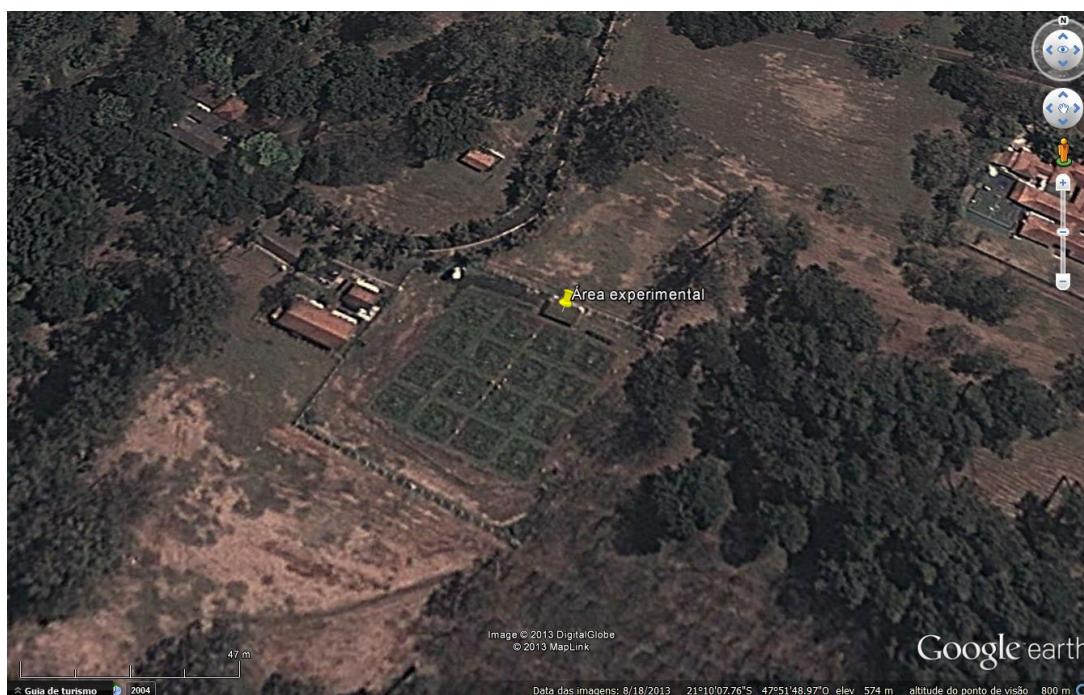


Figura 1. Imagem de satélite da área experimental do projeto (Fonte: Google Earth, 2013).

3.2. Material vegetal

O experimento foi realizado nas parcelas plantadas com *Panicum maximum* Jacq. cv. Mombaça (Poaceae), espécie forrageira gramínea que pertence ao grupo fotossintético C4, subgrupo PCK que utilizam a enzima fosfoenolpiruvato carboxicinase para descarboxilação do oxalacetato.

As gramíneas do gênero *Panicum* são largamente reconhecidas quanto a sua produtividade, qualidade nutricional e exigência em fertilidade dos solos, necessitando de solos de média a alta fertilidade para uma boa produção de forragem (Rosanova, 2008). O capim Mombaça atualmente é uma opção para solos com baixa permeabilidade e sujeitos a alagamentos transitórios (Embrapa, 2008; Montagner *et al.*, 2006). Além disso, ainda apresenta maior potencial de produção de folhas comparado a outros cultivares, o que representa uma melhor adaptação da gramínea ao pastejo ou tolerância ao corte (Embrapa, 2008).

3.3. Condições de cultivo

O experimento foi conduzido em campo aberto seguindo-se as recomendações para o cultivo dessas espécies na região. Análises nutricionais do solo foram feitas previamente e, a partir desses dados, houve a preparação e adubação necessárias inicial com calcário calcinado (2,5 ton/ha) e adubo NPK 8-30-8 (1 ton/ha). A área foi dividida em 16 parcelas de 12 m x 12 m (144 m²), e o plantio realizado ao centro de cada parcela, em áreas de 36 m², para que se mantivesse o mais uniforme possível. O plantio *P. maximum* foi realizado no início do período seco e, portanto, optou-se pela irrigação periódica e homogênea entre as unidades experimentais, com o intuito de manter a umidade do solo o mais uniforme possível em todas as parcelas experimentais.

3.4. Tratamentos

O experimento foi realizado com plantas de *P. maximum* cultivadas em consórcio e expostas a condições de temperatura ambiente, temperatura elevada em 2°C, concentração ambiente de CO₂ (cerca de 400 ppm) e concentração elevada de CO₂ (600 ppm). Tais valores foram escolhidos a fim de simular condições climáticas previstas para a metade deste século (IPCC, 2007).

O tratamento de elevada temperatura foi propiciado pelo sistema T-FACE (*Temperature Controlled Enhancement*) desenvolvido por Kimball *et al.* (2008), composto por aquecedores de cerâmica infravermelho modelo FTE-1000 (1000W, 240V) suspensos, e o tratamento de elevada concentração de CO₂ foi realizado pelo

sistema MiniFACE, modificação do sistema de injeção sônica de CO₂ puro POPFACE desenhado por Miglietta *et al.* (2001).

Em cada parcela submetida ao tratamento de temperatura elevada foram instalados seis aquecedores de cerâmica em uma estrutura triangular de postes e barras de alumínio com uma angulação que proporcionou a sua disposição circular e a 0,70 m de altura do dossel, buscando maior uniformidade possível do aquecimento e evitando a formação de regiões discretamente mais quentes (*hotspots*). Para monitoramento e controle da temperatura do dossel das plantas, no poste da estrutura de alumínio foi instalado um termômetro infravermelho modelo SI-1H1-L20 (Apogee Instruments, USA), orientado para o norte. O termômetro foi instalado em uma estrutura móvel de alumínio que permite o ajuste de posicionamento em altura e nas direções vertical e horizontal.

A injeção de CO₂ pelo sistema MiniFACE foi realizada por anéis de 2 m de diâmetro, posicionados ao centro do círculo formado pelos aquecedores, inicialmente a 30 cm de altura, sendo que a altura do anel e dos aquecedores acompanharam a altura do dossel das plantas. Dessa forma, todas as avaliações foram feitas nos espaços delimitados pelos anéis de injeção de CO₂. As parcelas controle foram equipadas com a mesma estrutura das tratadas para que a mesma região fosse avaliada. Analisadores de gás Vaisala CARBOCAP modelo GMP 343 (IRGA) (Vaisala, Finlândia) foram instalados ao centro dos anéis MiniFACE a fim de monitorar a concentração de CO₂. Os dados da pressão dentro dos canos de liberação de CO₂, da voltagem da válvula que controla a taxa de liberação do CO₂ e da velocidade do vento, bem como a concentração de CO₂ dentro dos anéis, foram armazenados a cada segundo em computador e controlados automaticamente proporcionando um microambiente constante com a concentração de CO₂ desejada.

Em função de seu efeito sobre as plantas, o tratamento térmico foi mantido por 24 horas, enquanto que o tratamento com elevado nível de CO₂ foi mantido somente durante o período diurno.

3.5. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com 4 blocos e 4 tratamentos, em esquema fatorial cruzado, sendo dois fatores (CO_2 e temperatura) e dois níveis (ambiente e elevado): (1) tratamento controle – concentração de CO_2 e temperatura ambientes (controle); (2) tratamento de elevado CO_2 – concentração de CO_2 em cerca de 600 ppm e temperatura ambiente (eC); (3) tratamento de elevada temperatura – concentração de CO_2 ambiente e temperatura elevada em 2°C (eT); (4) tratamento de elevado CO_2 e elevada temperatura – concentração de CO_2 em cerca de 600 ppm e temperatura elevada em 2°C (eC+eT). Cada tratamento apresentou quatro repetições, totalizando 16 unidades experimentais (parcelas). A Figura 4 mostra a disposição das parcelas e a distribuição dos tratamentos na área experimental.

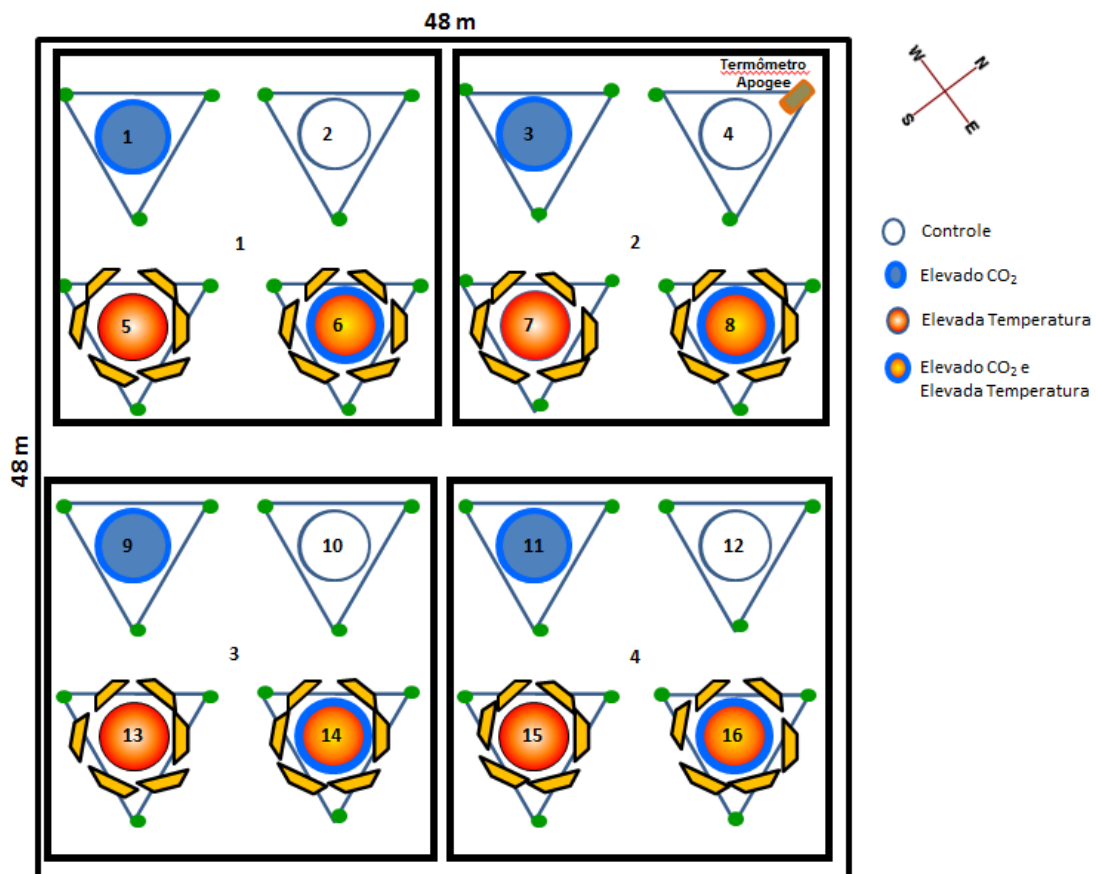


Figura 4. Desenho experimental mostrando as dezesseis unidades experimentais e os quatro tratamentos, com o delineamento de quatro blocos casualizados.

3.6. Avaliações

3.6.1. Respiração do solo

A taxa respiratória do solo foi medida utilizando-se um sistema automatizado medidor de fluxo de CO₂ do solo, modelo LI-8100A (LI-COR, USA) *Automated Soil CO₂ Flux System* (Figura 5), o qual é composto por uma câmara de fechamento automático de 20 cm de diâmetro conectada a um analisador de gases no infravermelho (IRGA), responsável por quantificar a concentração de CO₂ por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho. Um anel de PVC com 20 cm de diâmetro foi colocado em cada parcela, mantendo 5 cm de altura acima e abaixo do solo, onde a câmara era acoplada para a realização das medições.



Figura 5. Sistema automatizado medidor de fluxo de CO₂ do solo, modelo LI-8100A (LI-COR, USA) utilizado neste estudo. (1) Unidade de controle com IRGA; (2) Câmara de medição.

As avaliações foram feitas em seis dias – dia 1: 21/08/2013; dia 2: 22/08/2013; dia 3: 29/08/2013; dia 4: 05/09/2013; dia 5: 12/09/2013; dia 6: 15/09/2013, correspondendo a 1, 2, 8, 15, 22 e 25 dias após o início dos tratamentos – durante o

período do experimento e em dois horários diferentes – 12h e 18h – totalizando doze avaliações. As duas primeiras avaliações foram realizadas nos dois primeiros dias de experimento, a fim de verificar uma possível resposta rápida da respiração do solo aos tratamentos. As outras avaliações foram realizadas semanalmente, sendo que a última avaliação foi realizada alguns dias antes do final do experimento.

O monitoramento diário da umidade e da temperatura do solo foi realizado com sensores de umidade modelo Theta Probe ML2x e de temperatura modelo ST2, conectados a um datalogger DL2e (Delta-T Devices, UK). Outros dados climáticos como temperatura do ar, umidade relativa, radiação e precipitação foram monitorados por sensores específicos e armazenados continuamente por uma estação microclimática automática modelo WS-HP1 conectado ao datalogger DL2e (Delta-T Devices).

3.6.2. Biomassa vegetal

Ao final do experimento (30 dias após os tratamentos) foi realizada a colheita das plantas e analisada a massa seca de seus componentes: folhas, caules e raízes. A massa seca foi obtida após secagem em estufa a 70°C até peso constante.

3.7. Análise de dados

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio dos programas R (R Core Team, 2013) e Origin 6.1. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) de três fatores, testando o efeito dos fatores fixos CO₂, temperatura e bloco, além da interação CO₂ x temperatura, com nível de significância de 10%. Foi realizada a regressão linear da respiração do solo em função de variáveis abióticas, bem como o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, possibilitando a verificação do grau de associação entre duas variáveis.

4. RESULTADOS

As variações da temperatura do dossel das plantas nos diferentes tratamentos são mostradas na figura 6. Podem-se observar grandes flutuações da temperatura entre o período diurno e o período noturno. Em todos os casos, as parcelas aquecidas mostraram uma média térmica 2°C maior que as temperatura das parcelas controle. Isso demonstra o bom desempenho do sistema T-FACE.

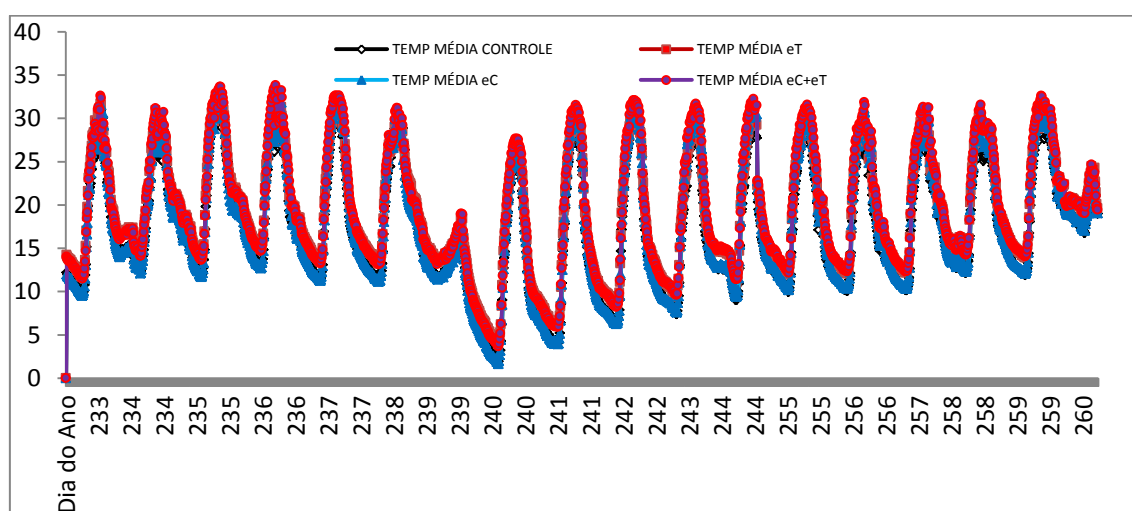


Figura 6. Amostra da variação diária da temperatura do dossel das parcelas dos tratamentos: controle – concentração de CO₂ e temperatura ambiente; tratamento de elevado CO₂ (600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e temperatura ambiente (eC); tratamento de elevada temperatura (+2°C) e concentração de CO₂ ambiente (eT); tratamento de elevado CO₂ e elevada temperatura (eC+eT).

A figura 7 mostra a variação da temperatura do solo das parcelas que receberam aquecimento em comparação das parcelas não aquecidas. Pode-se verificar, pela flutuação diurna da temperatura que o solo manteve o padrão de resposta da temperatura do dossel mostrada na figura 6.

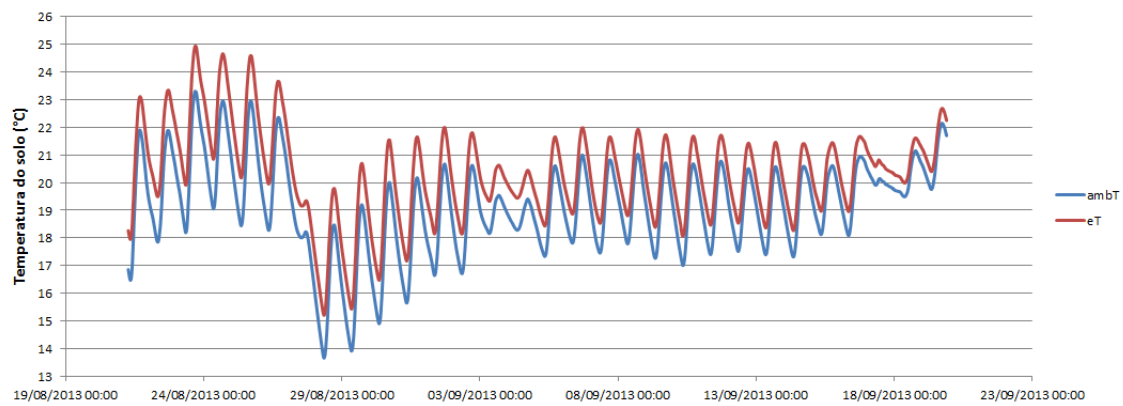


Figura 7. Variação diária da temperatura do solo das parcelas controle (que não receberam tratamento de temperatura elevada, linha azul) e das que receberam aquecimento em 2°C pelo sistema T-FACE (linha vermelha) durante os 30 dias do experimento. Dados coletados a cada hora pela estação microclimática WS-HP1.

Na figura 8 se apresentam os dados da variação diurna e diária da concentração de CO_2 nas parcelas com tratamento elevado de CO_2 . O monitoramento foi realizado com analisadores de gases no infravermelho localizados na altura do dossel das plantas. A injeção de CO_2 foi realizada somente durante o período diurno. Pode-se verificar que durante o período luminoso a concentração de CO_2 se manteve ajustada em torno de $600 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 . Durante o período noturno a variação observada está em função da respiração heterotrófica do solo e das plantas.

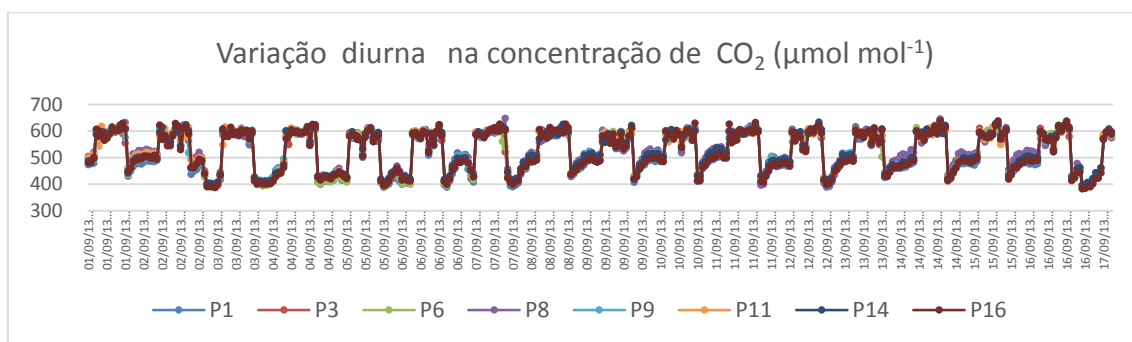


Figura 8. Amostra da variação diurna da concentração de CO_2 das parcelas que receberam tratamento de CO_2 elevado (eC) durante um período de 17 dias do experimento. Dados coletados a cada hora pela unidade automática de controle e monitoramento do sistema FACE. O símbolo P_x indica o numero das parcelas experimentais que receberam o tratamento eC. O setpoint foi de $600 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO_2 .

A figura 9 mostra os valores médios diurnos e noturnos da concentração de CO₂ nas parcelas controle e nas parcelas que receberam injeção de CO₂. O set point de CO₂ foi de 600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, no entanto a média diurna foi de $590 \pm 5 \mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂.

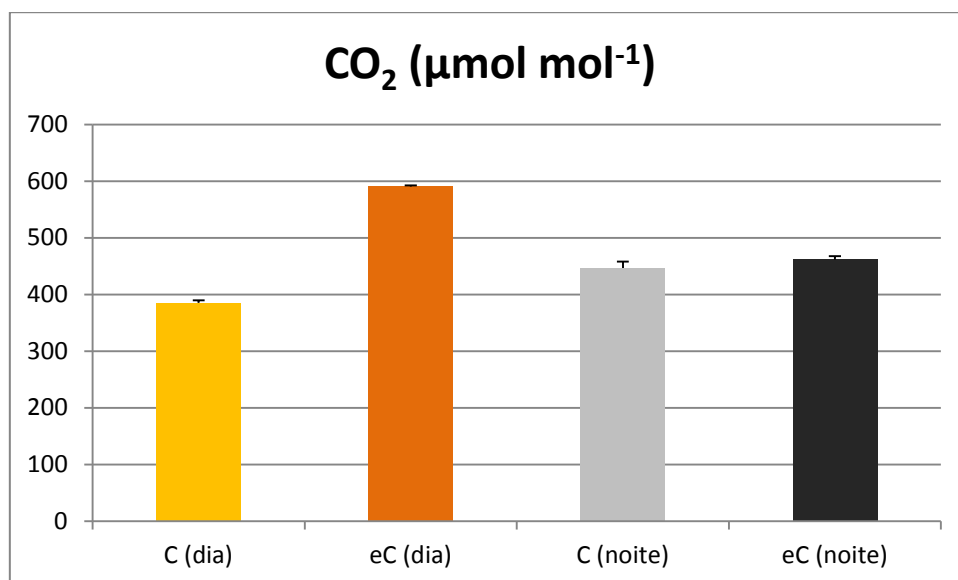


Figura 9. Valores médios da concentração de CO₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) diurna e noturna das parcelas controle e das parcelas que receberam aumento da concentração de CO₂ (eC) ao longo do experimento.

Os dados de respiração, temperatura e umidade do solo coletados nos seis dias de medição durante o experimento são mostrados na figura 10. No período das 18h, a temperatura do solo foi 8,8% maior do que às 12h, e manteve-se entre 18°C e 24°C durante boa parte do experimento, exceto no terceiro dia, quando a temperatura da região diminuiu bastante e o menor valor da temperatura do solo foi 15,8°C. O incremento da temperatura atmosférica em 2°C causou o aumento da temperatura do solo em uma média de 1°C (Figura 7). A umidade do solo foi controlada por regas diárias permanecendo entre 0,4 e 0,55 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ durante todos os dias de medição e não mostrou variação nos diferentes horários em que as medições de respiração do solo foram realizadas.

A respiração do solo apresentou grandes variações nos dias de medição (3,93 – 6,89 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e entre todos os dias de medição, sendo que o menor valor foi

de $0,82 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no primeiro dia e o maior de $7,84 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no terceiro dia (variação de $7,02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Nos dois horários de medição também houve grandes variações, chegando a $5,93 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nas medições realizadas às 12h e $6,89 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ às 18h.

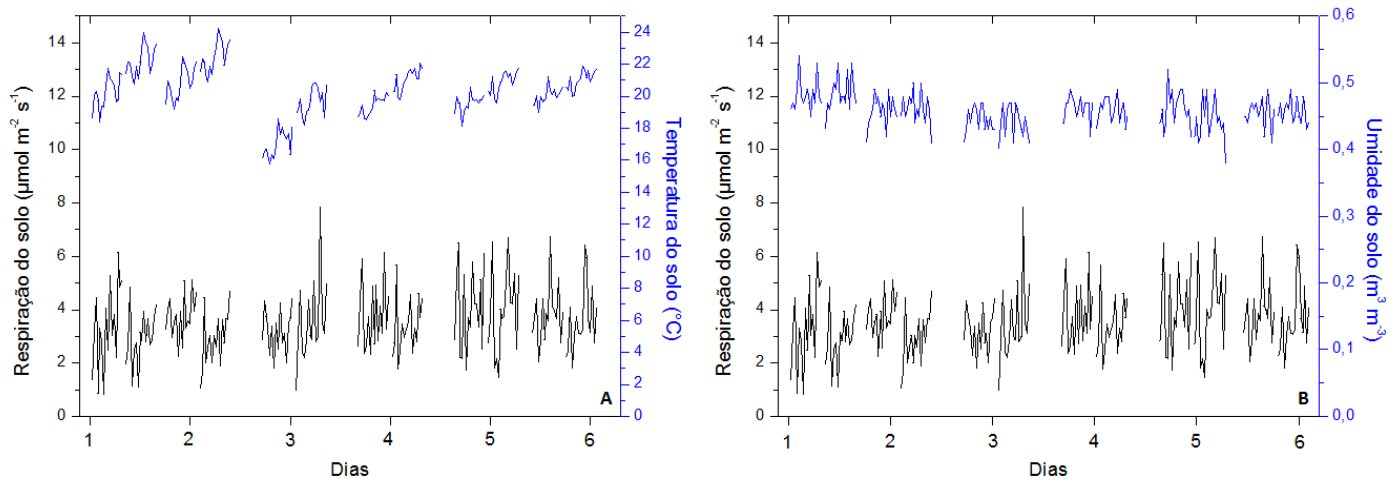


Figura 10. Respiração do solo em todos os dias de medição. Os dias 1, 2, 3, 4, 5 e 6 da figura representam, respectivamente, os dias 1 $^{\circ}$, 2 $^{\circ}$, 8 $^{\circ}$, 15 $^{\circ}$, 22 $^{\circ}$ e 25 $^{\circ}$ do experimento. As linhas azuis representam a temperatura do solo (A) e a umidade do solo (B) nos respectivos dias e horários de medição.

Considerando todas as medições realizadas em cada horário, a respiração do solo foi maior às 12h (8,3%) do que às 18h. Também é possível observar o aumento da respiração do solo ao longo dos dias. Comparando-se o primeiro e o sexto dias de medição, a respiração do solo apresentou aumento de 18,5%. A figura 11 ilustra esses resultados.

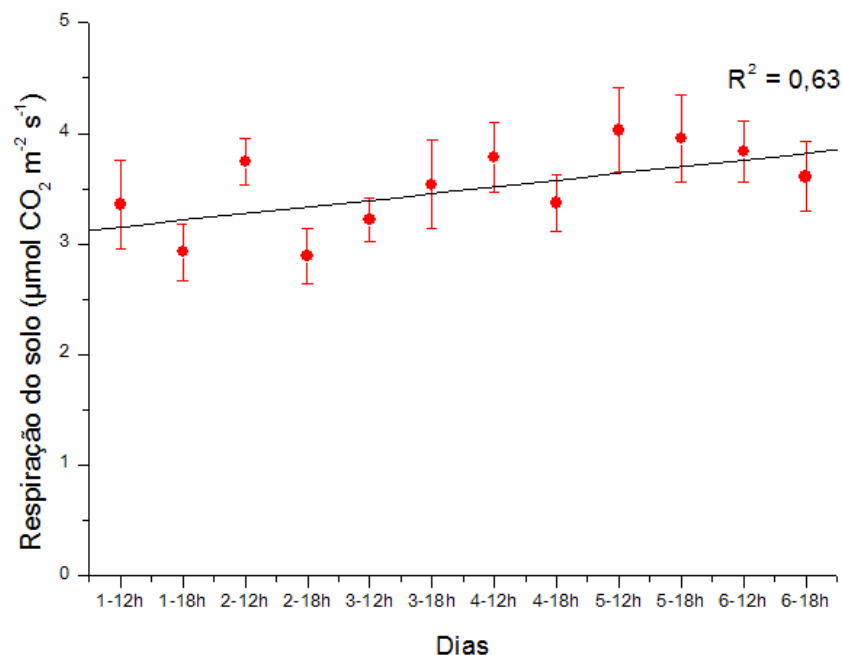


Figura 11. Média $\pm$ erro padrão da respiração do solo de todas as unidades experimentais em todos os dias e em dois horários de medição: 12 e 18 horas. Os dias 1, 2, 3, 4, 5 e 6 da figura representam, respectivamente, os dias 1°, 2°, 8°, 15°, 22° e 25° do experimento. A linha de regressão mostra a tendência de aumento da respiração do solo ao longo do experimento ($n=16$).

A respiração do solo apresentou grau de associação muito baixo com a temperatura do solo ($r = 0,112$) e a umidade do solo ($r = -0,093$) durante o experimento, contudo é possível visualizar uma tendência, mesmo que pequena, de uma correlação positiva entre respiração e temperatura (o aumento da temperatura leva ao aumento da respiração) e uma correlação negativa entre respiração e umidade (o aumento da umidade leva à redução da respiração). O grau de associação entre temperatura e umidade do solo também é muito baixo ($r = 0,127$), apresentando ligeira tendência a uma correlação positiva. A figura 12 mostra as análises gráficas do grau de associação entre os parâmetros.

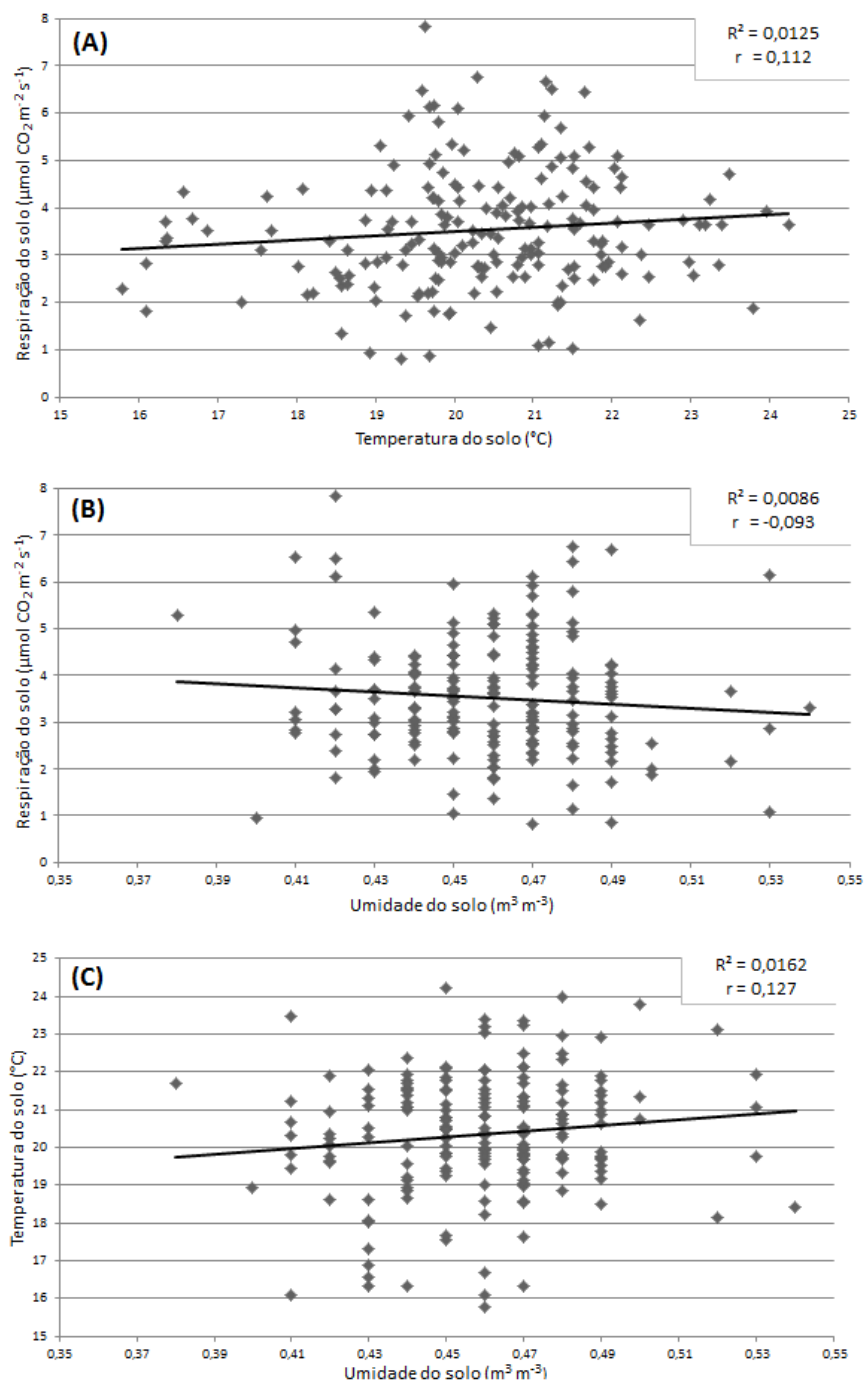


Figura 12. Relação entre (A) respiração e temperatura do solo, (B) respiração e umidade do solo, (C) temperatura e umidade do solo. Os respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2) e de coeficiente de correlação de Pearson (r) aparecem no canto superior direito de cada gráfico.

Nas comparações de respiração do solo nos diferentes tratamentos, a maioria dos dados não apresentou diferença estatística, sendo que o único fator que se mostrou influente foi a temperatura elevada nos dias 1 e 6 às 12h ($p=0,06$) e no dia 6 às 18h ($p=0,02$). Apesar da pouca diferença significativa encontrada, é possível perceber diferenças na respiração do solo nos diferentes tratamentos.

Analisando as médias de respiração do solo de todos os dias e horários medidos, foi encontrada uma redução desse parâmetro no tratamento de elevada concentração de CO_2 (eC) de 5,2% em relação ao controle. Já nos tratamentos de elevada temperatura (eT) e de interação de elevada concentração de CO_2 e elevada temperatura (eC+eT), a respiração do solo teve aumento de 20,6% e 27,1%, respectivamente. Comparando-se ao tratamento eT, a respiração do solo em eC+eT apresentou aumento de 5,4%, indicando ser possível uma pequena contribuição do elevado CO_2 .

A Tabela 1 mostra a média da respiração do solo por dia e horário nos diferentes tratamentos, bem como os dados que apresentaram diferença significativa em teste estatístico. Esses dados foram plotados em gráfico para uma melhor visualização (Figura 13).

Tabela 1. Comparação da respiração do solo nos seis dias de medição, às 12h e às 18h, entre os tratamentos controle, elevada concentração de CO₂ (eC), elevada temperatura (eT) e elevada concentração de CO₂ e temperatura (eC+eT). Os resultados da análise estatística com ANOVA são mostrados na última coluna.

Dia	Horário	Respiração do solo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)				ANOVA
		Controle	eC	eT	eC+eT	
1	12h	2,47 $\pm$ 0,83	2,74 $\pm$ 0,69	3,66 $\pm$ 0,61	4,57 $\pm$ 0,84	$F_T = 4,38 - p = 0,06$
	18h	2,63 $\pm$ 0,79	2,39 $\pm$ 0,45	3,31 $\pm$ 0,29	3,37 $\pm$ 0,36	ns
2	12h	3,65 $\pm$ 0,34	3,38 $\pm$ 0,39	3,63 $\pm$ 0,53	4,30 $\pm$ 0,37	ns
	18h	2,29 $\pm$ 0,74	2,65 $\pm$ 0,24	2,94 $\pm$ 0,43	3,68 $\pm$ 0,39	ns
3	12h	3,56 $\pm$ 0,32	2,75 $\pm$ 0,41	3,15 $\pm$ 0,38	3,41 $\pm$ 0,50	ns
	18h	2,75 $\pm$ 0,78	3,11 $\pm$ 0,45	3,44 $\pm$ 0,55	4,85 $\pm$ 1,07	ns
4	12h	3,82 $\pm$ 0,84	3,40 $\pm$ 0,58	3,66 $\pm$ 0,53	4,25 $\pm$ 0,69	ns
	18h	3,11 $\pm$ 0,88	3,04 $\pm$ 0,21	3,45 $\pm$ 0,45	3,88 $\pm$ 0,41	ns
5	12h	4,21 $\pm$ 1,01	3,23 $\pm$ 0,81	4,40 $\pm$ 0,51	4,27 $\pm$ 0,82	ns
	18h	3,69 $\pm$ 1,02	2,83 $\pm$ 0,61	4,94 $\pm$ 0,64	4,34 $\pm$ 0,66	ns
6	12h	3,32 $\pm$ 0,50	3,51 $\pm$ 0,38	4,62 $\pm$ 0,72	3,88 $\pm$ 0,50	$F_T = 3,55 - p = 0,06$
	18h	2,66 $\pm$ 0,49	3,24 $\pm$ 0,16	4,82 $\pm$ 0,80	3,70 $\pm$ 0,47	$F_T = 7,73 - p = 0,02$

Valores médios $\pm$ erro padrão (n=4). ns = não significativo. F_T = valor F para o fator temperatura. Os fatores CO₂, bloco e interação CO₂xT foram omitidos aqui por não apresentarem significância na ANOVA ($p > 1$).

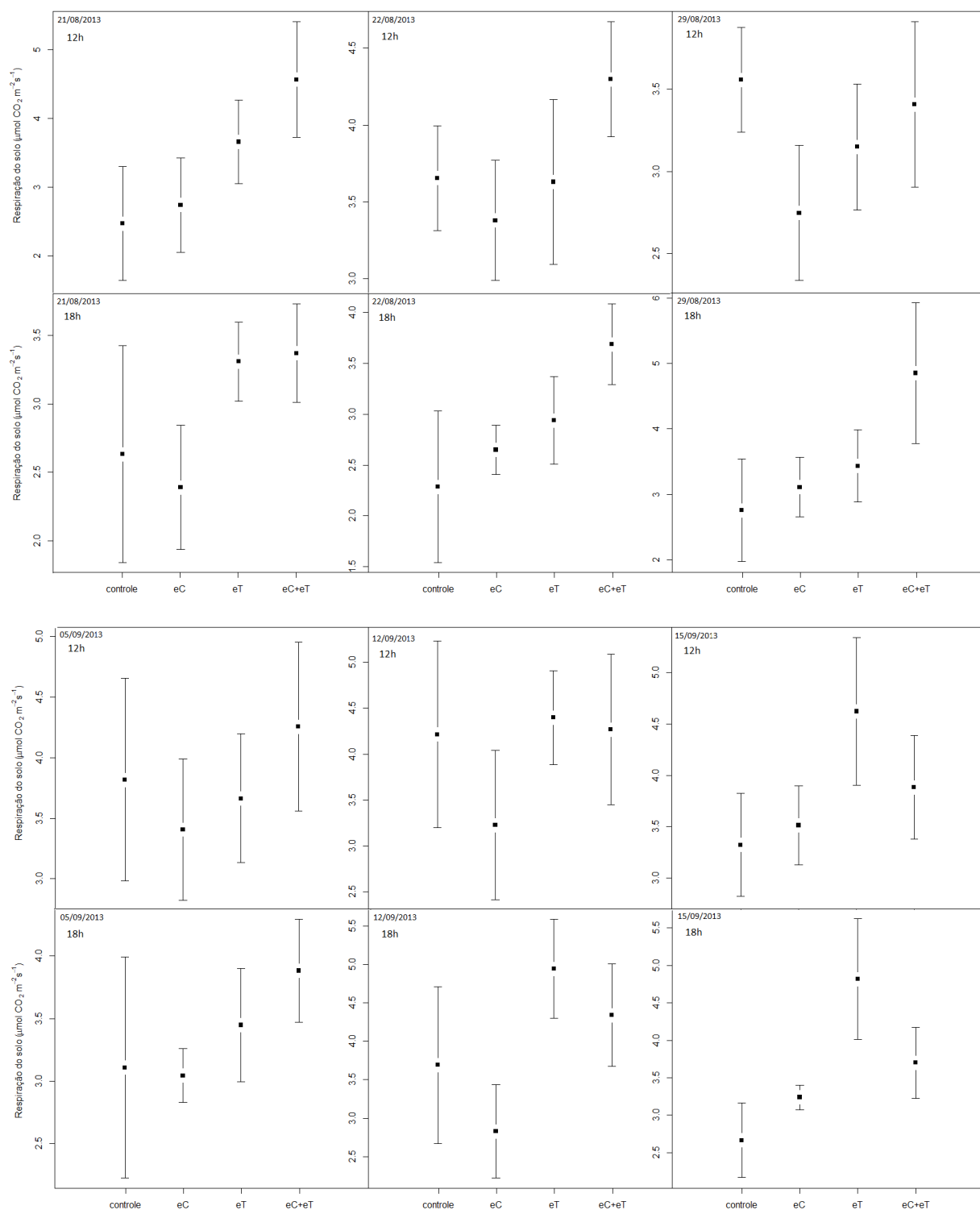


Figura 13. Respiração do solo em função dos tratamentos controle, elevada concentração de CO₂ (eC), elevada temperatura (eT) e elevada concentração de CO₂ e elevada temperatura (eC+eT) nos seis dias de medição, às 12h e às 18h. Média ± erro padrão (n=4).

Os dados de respiração do solo apresentaram grande variação nos diferentes dias e horários de medição, como já visto anteriormente. Sendo assim, gráficos de regressão auxiliaram a visualização do comportamento da respiração do solo ao longo do experimento nos diferentes tratamentos (Figura 11). Ao longo do experimento, a respiração do solo se manteve mais ou menos constante, já no tratamento eC houve aumento leve, e no tratamento eT o aumento foi mais pronunciado (Figura 14).

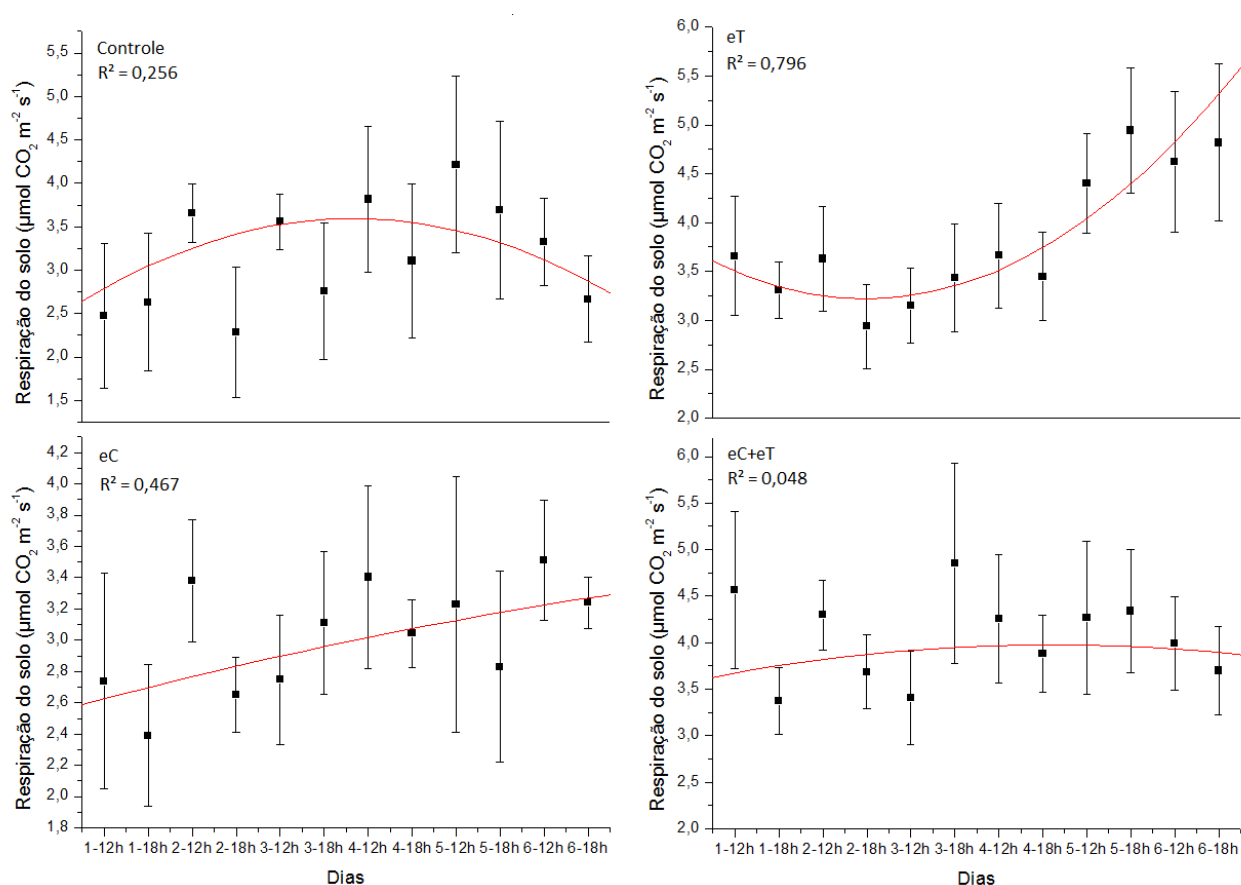


Figura 14. Respiração do solo em cada um dos tratamentos: controle, elevada concentração de CO₂ (eC), elevada temperatura (eT) e elevada concentração de CO₂ e elevada temperatura (eC+eT) nos seis dias de medição, às 12h e às 18h. Os dias 1, 2, 3, 4, 5 e 6 da figura representam, respectivamente, os dias 1º, 2º, 8º, 15º, 22º e 25º do experimento. Os pontos representam as médias e as barras, o erro padrão (n=4). Valor R² representa o ajuste dos dados ao modelo de regressão (linha vermelha).

Nos tratamentos eT e eC+eT, a temperatura do solo foi 6,5% e 4,2%, respectivamente, maior se comparada ao controle. No tratamento eC, a temperatura do solo foi praticamente igual ao controle. A umidade do solo apresentou uma variação de $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ entre os tratamentos (Figura 15).

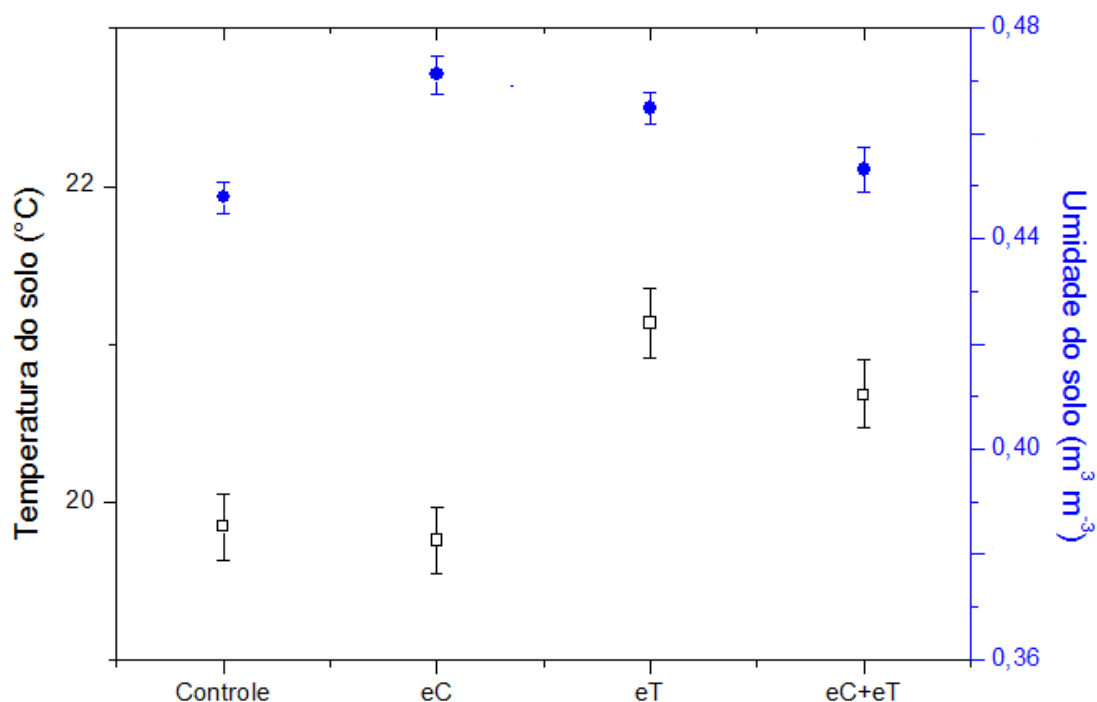


Figura 15. Média da temperatura (preto) e da umidade (azul) do solo nos tratamentos controle, elevada concentração de CO_2 (eC), elevada temperatura (eT) e elevada concentração de CO_2 e elevada temperatura (eC+eT) de todos os dias e horários de medição. As barras representam o erro padrão ($n=48$).

Os dados de biomassa vegetal coletados ao final do experimento, em relação ao controle, aumento da biomassa de raiz em 61%, 46% e 53% nos tratamentos eC, eT e eC+eT, respectivamente (Figura 16). A biomassa da parte aérea (caule e folhas) foi muito mais representativa da biomassa total, como pode-se observar na figura 15. A análise estatística mostrou que apenas o fator elevado CO_2 isolado teve efeitos significativos no aumento da biomassa de raiz ($p = 0,1$). Por efeito do tratamento eC,

maior porcentagem de biomassa foi particionada para as raízes e caules e menor para folhas, em relação ao controle (Figura 17).

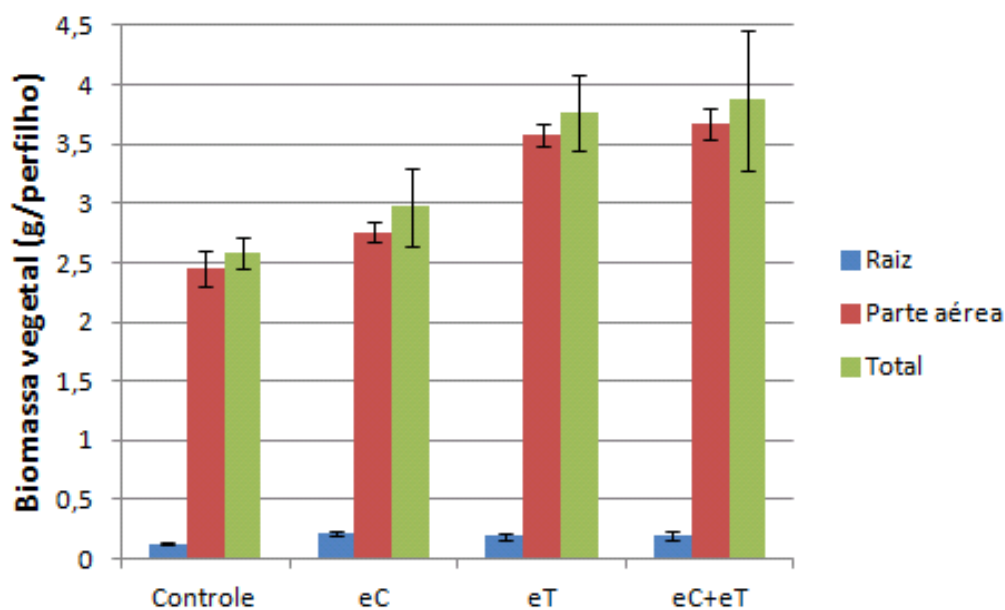


Figura 13. Média $\pm$ erro padrão da biomassa vegetal de raiz (azul), parte aérea – caule e folhas (vermelho) e total – caule, folhas e raiz (verde).

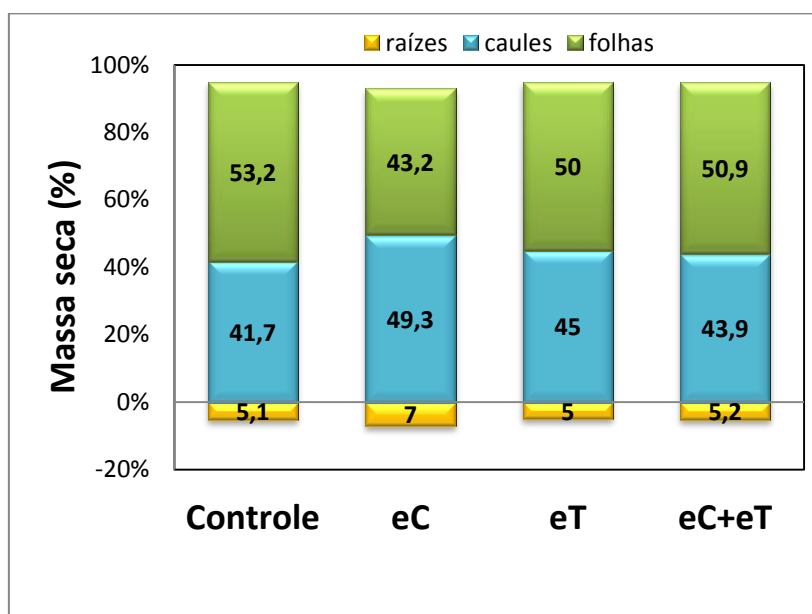


Figura 17. Partição de biomassa em plantas de *Panicum maximum* Jacq. Cv Mombaça crescidas em ambientes controle (C), elevado CO₂ (eC), elevada temperatura (eT) e combinação de elevado CO₂ + elevada temperatura (eC+eT).

5. DISCUSSÃO

Sumariamente, o tratamento de elevada temperatura atmosférica causou um aumento consistente na temperatura do solo, que, por sua vez, estimulou a respiração do solo. Apesar de ter sido verificada uma redução desse parâmetro no tratamento de elevado CO₂ em relação ao controle, foi encontrada uma ligeira tendência de aumento ao longo do tempo. Já no tratamento de elevado CO₂ e elevada temperatura foram encontrados os maiores valores de respiração do solo, sendo que apresentou tendências mínimas de redução ou aumento ao longo do experimento. Em relação à biomassa vegetal, os dois fatores – elevado CO₂ e de elevada temperatura – estimularam o crescimento das raízes.

O aumento da respiração do solo em resposta a elevadas temperaturas em sido demonstrado em diversos estudos (Oechel *et al.*, 2000; Luo *et al.*, 2001; Kirschbaum, 2004). Alguns autores estimam que o aumento de 10°C na temperatura faz os valores de respiração do solo dobrar (Palmer-Winkler *et al.*, 1996; Kätterer *et al.*, 1998), ou até quadruplicar (Emmet *et al.*, 2004). Muitos autores também demonstraram aumento da respiração do solo em resposta à elevada concentração de CO₂ (King *et al.*, 2004; Trueman & Gonzàlez-Meler, 2005; Pregitzer *et al.*, 2008; Taneva & Gonzàlez Meler, 2011). No entanto, alguns estudos têm encontrado aumentos muito mais expressivos do que os observados aqui. Trueman & Gonzàlez-Meler (2005) encontraram taxas de respiração do solo 61% maiores com o dobro da concentração de CO₂, e 111% maiores com o triplo em cultivo de planta C3. King *et al.* (2004) analisou quatro experimentos FACE em ecossistemas florestais temperados e encontrou taxas de respiração do solo de quatro a cinco vezes maior em condições de elevado CO₂ anualmente, resposta que persistiu pelos seis anos de experimento.

Os componentes da respiração do solo – respiração das raízes e dos microorganismos – contribuem de maneiras diferentes à respiração total do solo (Tian *et al.*, 2011). Portanto, as respostas desses componentes aos diversos fatores ambientais a que são expostos são de grande importância para a dinâmica do processo como um todo.

O aumento da biomassa de raízes foi verificado tanto em condições de elevada temperatura, que agem aumentando o período de crescimento das plantas (Luo *et al.*,

2001), quanto em condições de elevado CO₂, que estimula o processo fotossintético e, consequentemente, o crescimento vegetal (González-Meler *et al.*, 2004). Uma maior biomassa de raízes tem o potencial de aumentar a respiração autotrófica do solo (King *et al.*, 2001; Pregitzer *et al.*, 2008; Tian *et al.*, 2011). Taxas de respiração em solos superficiais são maiores que em solos mais profundos, principalmente em condições de elevado CO₂, devido à maior biomassa de raízes finas (Taneva & González-Meler, 2008). Isso pode explicar, em grande parte, o aumento da respiração do solo nesse experimento. O efeito conjunto desses fatores, apesar de não ser estatisticamente significativo, parece potencializar essas respostas de crescimento vegetal. Chen *et al.* (2011) encontrou maiores taxas de respiração autotrófica em condições de elevado CO₂ e elevada temperatura mostrando que tanto o efeito do CO₂ na biomassa das raízes, quanto o estímulo da temperatura nas reações do processo de respiração exercem grande influência na respiração total do solo.

A composição da comunidade vegetal e o estágio de desenvolvimento também parecem ter um importante papel nessa resposta, sendo que raízes de plantas novas podem respirar até quatro vezes mais do que de plantas mais velhas (King *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2011; Levy-Varon *et al.*, 2012). Em pastagens, a biomassa de raízes finas costuma ser maior do que em ecossistemas florestais, principalmente, pela presença de gramíneas, sendo um dos fatores de maior importância para a respiração do solo (Kepler *et al.*, 1990). Além disso, o experimento se deu concomitante ao período inicial de desenvolvimento de *P. maximum*. Dessa forma, é provável que a respiração autotrófica das raízes nesse experimento realmente seja bastante representativa da respiração total do solo, e explique o aumento observado.

De acordo com a teoria cinética, as reações químicas e bioquímicas apresentam maiores taxas conforme a temperatura aumenta, chegando a um ponto de temperatura ótima, no qual outros fatores se tornam limitantes. (Davidson & Janssens, 2006). Assim, é esperado que o aquecimento global, até certo ponto, estimule a respiração heterotrófica do solo, pelo aumento da taxa de decomposição de matéria orgânica pelos microorganismos, e produza um *feedback* positivo no aumento da concentração atmosférica de CO₂ (Melillo *et al.*, 2002; Chapin *et al.*, 2009; Suseela *et al.*, 2012). Em experimento em campo, Briones *et al.* (2004) estimaram que a cada 10°C a mais na temperatura atmosférica, a respiração heterotrófica do solo pode dobrar. Balser & Wixon (2009) mostraram que, com a mesma biomassa da comunidade microbiana, a

respiração do solo em ambiente subártico foi menor do que em ambientes tropicais quando expostos à mesma temperatura, sugerindo que há diferenças no metabolismo basal das comunidades microbianas em resposta à temperatura. Chen *et al.* (2011) encontrou valores de respiração heterotrófica maiores em condições de elevado CO₂, provavelmente, devido à maior disponibilidade de carbono orgânico para decomposição (maior biomassa de raízes).

Taneva & González-Meler (2011) perceberam maior contribuição da respiração heterotrófica na respiração total do solo. Contudo, foi verificado que a atividade de crescimento de raízes pode estar correlacionada à progressão sazonal da temperatura (King *et al.*, 2001), sendo assim, a sazonalidade da respiração do solo, que é normalmente atribuída ao aumento da atividade heterotrófica em resposta ao aquecimento, podem ser confundida com o crescimento das raízes (Hanson *et al.*, 2000). É provável que a respiração heterotrófica tenha exercido grande influência na respiração do solo nesse experimento, porém, análises específicas sobre a comunidade microbiana são necessárias a fim de se obter informações sobre a contribuição desse componente.

As variações diurnas na taxa respiratória do solo podem estar associadas às contribuições de cada componente da respiração do solo, que apresentam padrões de resposta distintos uns dos outros (Taneva & González-Meler, 2011). O padrão diurno da respiração das raízes é associado ao ciclo fotossintético da planta, e independe da temperatura (Kuzakov & Cheng, 2001). Sendo assim, os valores mais altos de respiração do solo encontrados às 12h, provavelmente, estão associados às maiores taxas fotossintéticas e metabólicas das plantas que ocorrem nesse horário.

A proporção de componentes autotróficos e heterotróficos do solo também pode interferir na variação da sensibilidade da respiração à temperatura e umidade (Larcher, 2006). Variações individuais de seus componentes nem sempre levam a variações mensuráveis na respiração total do solo (Taneva & González-Meler, 2011). Sendo assim, experimentos controlados para quantificar os efeitos de fatores únicos ou combinados (como temperatura, umidade, biomassa e resposta das raízes e da atividade microbiana) na respiração do solo sob múltiplas condições ambientais são necessários para se definir acuradamente os mecanismos que alteram a respiração do solo (Chen *et al.*, 2011).

Os experimentos que verificaram aumento da respiração do solo devido à elevada temperatura ou elevada concentração de CO₂, normalmente, demonstraram que os valores retornaram aos iniciais depois de certo tempo (Oechel *et al.*, 2000; Luo *et al.*, 2001; Kirschbaum, 2004; Taneva & González-Meler, 2008), indicando uma aclimação dos componentes da respiração às novas condições (Wood *et al.*, 2012). Existe a possibilidade de os microorganismos apresentarem aclimação bioquímica à temperatura elevada, produzindo enzimas com maiores limiares de temperatura, mostrando, assim, um aumento inicial na respiração induzido pela temperatura, seguido pelo retorno aos valores iniciais (Bradford *et al.*, 2008). Há, também, estudos que mostram apenas respostas em curto prazo da respiração do solo à temperaturas elevadas. Luo *et al.* (2001) afirmam que um decaimento na sensibilidade do solo à temperatura pode ser devido à diversos fatores, como a redução da produção vegetal, menores taxas respiratórias da raiz, e também devido ao fato do solo estar mais seco, reduzindo o enraizamento e a atividade microbológica. A respiração do solo também apresenta grandes variações sazonais. Taneva & González-Meler (2011) encontraram maiores taxas respiratórias do solo nas estações mais quentes do ano. Porém, os trinta dias de experimento e os seis de avaliação da respiração do solo não representam padrões diários e sazonais acurados, e não geram informações suficientes para que esses efeitos sejam discutidos.

Outro fator abiótico que está intimamente ligado à reserva de carbono no solo, à comunidade microbiana, à dinâmica destes elementos no solo e, conseqüentemente, à respiração do solo é a umidade. Muitos estudos envolvendo a relação entre a umidade e as respirações do solo foram e vêm sendo realizados, no entanto há diferentes resultados na literatura, indicando uma inconsistência entre os dados e o quão difícil é entender a relação entre esses dois fatores.

Níveis baixos de umidade no solo podem afetar a disponibilidade de oxigênio e a difusão de enzimas extracelulares e carbono solúvel, diminuindo o substrato para reações de decomposição, limitando a respiração heterotrófica (Raich & Schelsinger, 1992; Emmet *et al.*, 2004; Davidson & Janssens, 2006; Chen *et al.*, 2011). A temperatura pode também reduzir a decomposição microbiana via efeitos indiretos na disponibilidade de água no solo (Borken *et al.*, 2006). Apesar de a umidade também influenciar a respiração autotrófica, as raízes podem retirar água de camadas mais profundas do solo, mantendo suas funções (Chen *et al.*, 2011).

Níveis moderados a altos de umidade do solo podem suprimir a respiração do solo pela saturação dos poros por água, limitando a difusão do CO₂ para fora do solo e a de O₂ para dentro (Hirano *et al.*, 2003; Davidson & Janssens, 2006; Ruehr *et al.*, 2010). Gabriel & Kellman (2011) mostram uma baixa relação entre umidade e respiração do solo e concluem que apenas níveis extremos de umidade afetam a respiração do solo. Como o presente experimento teve os níveis de umidade controlados por rega, não é seguro presumir os efeitos desse parâmetro na respiração do solo, mas é possível que os níveis de umidade tenham interferido nas respostas da respiração do solo aos tratamentos.

6. CONCLUSÃO

No presente estudo, a respiração do solo sofreu efeito da elevada concentração de CO₂ e da elevada temperatura atmosféricas, apresentando níveis mais altos quando cultivado com espécies forrageiras sob essas condições. A biomassa de raiz respondeu de maneira semelhante, apresentando maior crescimento. É muito provável que o aumento da respiração do solo esteja relacionado ao aumento da biomassa de raiz. Sendo assim, é possível que as mudanças climáticas globais previstas para a metade deste século afetem a dinâmica de trocas gasosas entre o solo de pastagens tropicais e a atmosfera pelo aumento dos níveis de respiração do solo.

Para que se tenha um melhor entendimento sobre o padrão de respiração do solo ao longo do tempo, experimentos com maior número de amostras e maior tempo de duração são necessários. Estudos específicos sobre a comunidade microbiana também são imprescindíveis para elucidar a dinâmica da contribuição dos componentes da respiração do solo nas alterações causadas pelos efeitos das mudanças climáticas. Esses dados, juntamente à dados de assimilação de carbono pela comunidade vegetal, tornarão mais claro o processo de devolução de CO₂ para a atmosfera em condições futuras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATARASHI-ANDOH, M.; KOARASHI, J.; ISHIZUKA, S.; HIRAI, K. 2012. Seasonal patterns and control factors of CO₂ effluxes from surface litter, soil organic carbon, and root-derived carbon estimated using radiocarbon signatures. *Agricultural and Forest Meteorology* 152: 149-158.
- AMENDOLARA, T. 2011. Soil Microorganisms and Global Climate Change. <http://www.goucher.edu/academics/verge/past-issues/verge-8/amendolara>.
- BALSER, T. C. & WIXON, D. L. 2009. Investigating biological control over soil carbon temperature sensitivity. *Global Change Biology* 12: 2935-2949.
- BORKEN, W.; SAVAGE, K.; DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E. 2006. Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil. *Global Change Biology* 12: 177-193.
- BRADFORD, M. A.; DAVIES, C. A.; MADDOX, T. R.; MELILLO, J. M.; MOHAN, J. E.; REYNOLDS, J. F.; TRESEDER, K. K.; WALLENSTEIN, M. D. 2008. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature. *Ecology Letters* 11: 1316-1327.
- BRIONES, M. J. I.; POSKITT, J., OSTLE, N. 2004. Influence of warming and enchytraeid activities on soil CO₂ and CH₄ fluxes. *Soil Biology & Biochemistry* 36: 1851-1859.
- BUCHMAN, N.; KAO, W.; EHRLINGER, J. 1997. Influence of stand structure on carbon-13 of vegetation, soils, and canopy air within deciduous and evergreen forests in Utah, United States. *Oecologia* 110: 109-119.
- CHAPIN, F. S.; MCFARLAND, J.; MCGUIRE, D.; EUSKIRCHEN, E. S.; RUESS, R. W.; KIELLAND, K. 2009. The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences. *Journal of Ecology* 97: 840-850.

- CHEN, X.; POST, W. M.; NORBY, R. J.; CLASSEN, A. T. 2011. Modeling soil respiration and variations in source components using a multi-factor global climate change experiment. *Climatic Change* 107: 459-480.
- COMMISSION, E. 2010. The factory of life. Why soil biodiversity is so important. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities: 22.
- COMMISSION, E. 2011. Soil: the hidden part of the climate cycle. Luxembourg: Publications Office of the European Union: 20.
- DAVIDSON, E. A. & JANSSENS, I. A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440: 165-173.
- DJUKIC, I.; ZEHETNER, F.; WATZINGER, A.; HORACEK, M.; GERZABEK, M. H. 2013. *In situ* carbon turnover dynamics and the role of soil microorganisms therein: a climate warming study in an Alpine ecosystem. *FEMS Microbiology Ecology* 83: 112-124.
- DRAKE, B. G.; GONZÁLEZ-MELER, M. A.; LONG, S. P. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? *Annu. Rev. Physiol. Plant Mol. Biol.* 48: 609-639.
- DUVAL, B. D.; BLANKINSHIP, J. C.; DIJKSTRA, P.; HUNGATE, B. A. 2012. CO₂ effects on plant nutrient concentration depend on plant functional group and available nitrogen: a meta-analysis. *Plant Ecology* 213: 505-521.
- EMBRAPA, 2008. Crescimento inicial em capim Mombaça sob influência de diferentes níveis de sombreamento. Documentos ISSN 1517-8498. Dezembro/2008. 258. Seropédica, RJ.
- EMBRAPA. 2010. Estilosantes Campo Grande: leguminosa forrageira recomendada para solos arenosos do Acre. Rio Branco, AC. Junho, 2010. ISSN 0100-9915.
- EMMET, B. A., BEIER, C., ESTIARTE, M., TIETEMA, A., KRISTENSEN, H. L., WILLIAMS, D., PEÑUELAS, J., SCHMIDT, I., SOWERBY, A. 2004. The response of soil processes to climate change: results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient. *Ecosystems* 7: 625-637.

- FIGUEIREDO, M. V. B.; BURITY, H. A.; OLIVEIRA, J. P. O.; SANTOS, C. E. R. S.; STAMFORD, N. P. 2010. *Biotecnologia aplicada à agricultura, textos de apoio e protocolos experimentais.* Brasília: Empraba Agrobiologia.
- GABRIEL, C. E. & KELLMAN, L. 2011. Examining moisture and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition in a temperate coniferous forest soil. *Biogeosciences Discuss.* 8: 1369-1409.
- GONZÁLEZ-MELER, M. A.; TANEVA, L.; TRUEMAN, R. J. 2004. Plant respiration and elevated CO₂ concentration: cellular responses and global significance. *Annals of Botany* 94: 647–656.
- HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C. T.; ANDREWS, J. A. 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48:115-146.
- HIRANO, T.; KIM, H.; TANAKA, Y. 2003. Long-term half-hourly measurement of soil CO₂ concentrations and soil respiration in a temperate deciduous forest. *Journal of Geophysical Research* 108(D20), 4631, doi: 10.1029/2003JD003766, 2003.
- HOLLAND, E. A.; NEFF, J. C.; TOWNSEND, A. R.; MCKEOWN, B. 2000. Uncertainties in the temperature sensitivity of decomposition in tropical and subtropical ecosystems: implications for models. *Global Biogeochemical Cycles* 14: 1137-1151.
- IPCC. 2001. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fifteenth Session, San José, Costa Rica.
- IPCC. Climate Change. 2007. Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report, Geneva, 36 p.
- KÄTTERER, T., REICHSTEIN, M., ANDREN, O., LOMANDER, A. 1998. Temperature dependence of organic matter decomposition: A critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils* 27: 258–262.

- KEPLER, S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; CHONÈ, T.; LUIZÃO, F.; EDUARDO, B. P. 1990. Respiração do solo: comparação entre áreas com mata natural, mata recém-queimada e pastagem, na Amazônia Central. *Geochim. Brasil*. 4(2): 111-118.
- KIM, J. & VERMA, S. B. 1992. Soil surface CO₂ flux in a Minnesota Peatland. *Biogeochemistry* 18: 37-51.
- KIMBALL, B.A.; CONLEY, M. M.; WANG, S.; LIN, X.; LUO, C.; MORGAN, J.; SMITH, D. 2008. Infrared heater arrays for warming ecosystem field plots. *Global Change Biology* 14: 309-320.
- KING, J. S.; PREGITZER, K. S.; ZAK, D. R.; SOBER, J.; ISEBRANDS, J. G.; DICKSON, R. E.; HENDREY, G. R.; KARNOSKY, D. F. 2001. Fine-root biomass and fluxes of soil carbon in young stands of paper birch and trembling aspens as affected by elevated atmospheric CO₂ and tropospheric O₃. *Oecologia* 128: 237-250.
- KING, J.S.; HANSON, P. J.; BERNHARDT, E.; DEANGELI, P.; NORBY, R. J.; PREGITZER, K. S. 2004. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from four forest FACE experiments. *Global Change Biology* 10: 1027-1042.
- KIRSCHBAUM, M. U. F. 2004. Soil respiration under prolonged soil warming: are reductions caused by acclimation or substrate loss? *Global Change Biology* 10: 1870-1877.
- KUZYAKOV, Y. & CHENG, W. 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1915-1925.
- LARCHER, W. 2006. *Ecofisiologia Vegetal*. RiMa - São Carlos: 550p.
- LEVY-VARON, J. H.; SCHUSTER, W. S. F.; GRIFFIN, K. L. 2012. The autotrophic contribution to soil respiration in a northern temperate deciduous forest and its response to disturbance. *Oecologia* 169: 211-220.

- LUO, Y. Q.; WAN, S. Q.; HUI, D.; WALLACE, L. L. 2001. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature* 413: 622-625.
- MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; ABER, J. D.; NEWKIRK, K.; LUX, H.; BOWLES, F. P.; CATRICALA, C.; AHRENS, T.; MORRISSEAU, S. 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. *Science* 298: 2173-2176.
- MENDES, I. D. C., HUNGRIA, M.; REIS-JÚNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; MERCANTE, F. M.; ZILLI J. E. 2009. Bioindicadores para Avaliação da Qualidade dos Solos Tropicais: utopia ou realidade? Documentos/Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, ISSN 1517-5111, ISSN, 246: 2176-5081.
- MIGLIETTA, F.; PERESSOTTI, A.; VACARI, F. P.; ZALDEI, A.; DE ANGELIS, P.; MUGNOZZA, G. S. 2001. Free air CO₂ enrichment (FACE) of a poplar plantation: the POPFACE fumigation system. *New Phytologist* 150: 4665-476.
- MONTAGNER, D. B.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; SILVA, S. C.; VALLE, C. B.; SILVEIRA, M. C. T.; PENA, K. S.; ZANINE, A. M.; SILVA, W. L.; FONSECA, D. M. 2006. Caracterização morfogênica de gramíneas dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 43. João Pessoa.
- OECHEL, W. C.; VOURLITIS, G. L.; HASTINGS, S. J.; ZULUETA, R. C.; HINZMAN, L.; KANE, D. 2000. Acclimatation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Artic in response to decadal climate warming. *Nature* 406: 978-981.
- PALMER-WINKLER, J., CHERRY, R. S., SCHLESINGER, W. H. 1996. The Q10 relationship of microbial respiration in a temperate forest soil. *Soil Biology Biochemistry* 28: 1067–1072.
- PREGITZER, K. S.; BURTON, A. J.; KING, J. S.; ZAK, D. R. 2008. Soil respiration, root biomass, and root turnover following long-term exposure of northern forests to elevated atmospheric CO₂ and tropospheric O₃. *New Phytologist* 180: 153-161.

- PULROLNIK, K. 2009. Transformações do carbono no solo. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF: 36.
- R CORE TEAM. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- RAICH, J. W. & SCHLESINGER, W. H. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Chemical and Physical Meteorology* 44B: 81-99.
- ROSANOVA, C. 2008. Estabelecimento de pastagens de cultivares de *Panicum maximum* Jacq. em consórcio com sorgo forrageiro, sob fontes de fósforo, no Cerrado Tocantinense. Dissertação de mestrado. 58 p.
- ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; MENDES, I. C.; REIS-JÚNIOR, F. B., SANTOS, J. C. F.; HUNGRIA, M. 2006. Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica. Dinâmica da matéria orgânica do solo sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares - Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS: 163-198.
- RUEHR, N. K.; KNOHL, A.; BUCHMANN, N. 2010. Environmental variables controlling soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland. *Biogeochemistry* 98: 153-170.
- RYAN, M. G. & LAW B. E. 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry* 73: 3-27.
- SUSEELA, V.; CONANT, R. T.; WALLENSTEIN, M. D.; DUKES, J. S. 2012. Effects of soil moisture on the temperature sensitivity of heterotrophic respiration vary seasonally in an old-field climate change experiment. *Global Change Biology* 18: 336-348.
- TANEVA, L.; PIPPEN, J. S.; SCHLESINGER, W. H.; GONZÁLEZ-MELER. 2006. The turnover of carbon pools contributing to soil CO₂ and soil respiration in a temperate forest exposed to elevated CO₂ concentration. *Global Change Biology* 12: 983-994.

- TANEVA, L. & GONZÁLEZ-MELER, M. A. 2008. Decomposition kinetics of soil carbon of different age from a forest exposed to 8 years of elevated atmospheric CO₂ concentration. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 2670-2677.
- TANEVA, L. & GONZÁLEZ-MELER, M. A. 2011. Distinct patterns in the diurnal and seasonal variability in four components of soil respiration in a temperate forest under free-air CO₂ enrichment. *Biogeosciences Discussions* 8: 2875-2911.
- TATE, R. L. 2000. Soil microbiology. 2 ed. New York: John Wiley: 508.
- TIAN, D.; WANG, G.; PENG, Y.; YAN, W.; FANG, X.; ZHU, F.; CHEN, X. 2011. Contribution of autotrophic and heterotrophic respiration to soil CO₂ efflux in Chinese fir plantations. *Australian Journal of Botany* 59: 26-31.
- TRUEMAN, R. J. & GONZÁLEZ-MELER, M. A. 2005. Accelerated belowground C cycling in a managed agriforest ecosystem exposed to elevated carbon dioxide concentrations. *Global Change Biology* 11:1258-1271.
- TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. 2006. Fundamentos em Ecologia. 2ªed. Artmed, Porto Alegre.
- VAN GROENIGEN, K. J.; SIZ, J.; HARRIS, D.; BLUM, H.; VAN KESSEL, C. 2003. Soil ¹³C-¹⁵N dynamics in an N₂-fixing clover system under long-term exposure to elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology* 9: 1751-1762.
- WOOD, T. E.; CAVALERI, M. A.; REED, S. C. 2012. Tropical forest carbon balance in a warmer world: a critical review spanning microbial- to ecosystem-scale processes. *Biological Reviews* 87: 912-927.
- CO₂NOW. 2013. <http://co2now.org/> (acessado em outubro de 2013).