

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES

**EFLUXO DE CO₂ SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO E EM ÁREAS
CULTIVADAS COM CENOURA E BETERRABA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa em Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G635e
2013
Gonçalves, Paulo Henrique Lopes, 1975-
Efluxo de CO₂ sob vegetação de cerrado e em
áreas cultivadas com cenoura e beterraba / Paulo
Henrique Lopes Gonçalves. - Viçosa, MG, 2013.
xii, 45f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Flávio Barbosa Justino.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.37-45.

1. Meteorologia agrícola. 2. Carbono. 3. Vegetação.
4. Plantas dos cerrados. 5. Cerrados. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Meteorologia
Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES

**EFLUXO DE CO₂ SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO E EM ÁREAS
CULTIVADAS COM CENOURA E BETERRABA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa em Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2013.



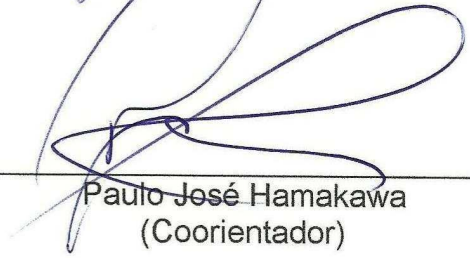
Marcos Antônio Vanderlei Silva



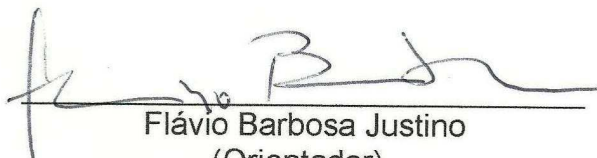
José Maria Nogueira da Costa



Alberto Carvalho Filho



Paulo José Hamakawa
(Coorientador)



Flávio Barbosa Justino
(Orientador)

A minha mãe

DEDICO

À família

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença em todos os momentos de minha vida.

A minha mãe Teresinha de Jesus Pereira Lopes, pelo estímulo, pelo amor e carinho, sempre presente, mesmo distante, com palavras de conforto e força.

A minha família pela ajuda e carinho quando mais precisei.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores Flavio Justino e Paulo Hamakawa, pela orientação e amizade.

Ao professor Alberto Carvalho, pelas sugestões e amizade durante as campanhas de campos.

Ao professor José Maria Nogueira da Costa pela ajuda inicial na carreira acadêmica e nas pesquisas.

Ao professor Luciano Baião pela oportunidade de realizar experimento em Rio Paranaíba.

Ao servidor Antônio Jésus pelo apoio logístico Campus Rio Paranaíba.

Ao Eduardo Sekita e Grupo Sekita, pelo apoio logístico e material.

Aos meus colegas de curso, na pós-graduação em Meteorologia Agrícola pelo apoio e incentivo.

A Graça, secretária da pós, exemplo de competência e eficiência de solucionar nossos problemas.

A todos que em algum instante contribuíram para a minha formação até a realização deste trabalho e formação pessoal, valeu!!!!!!

BIOGRAFIA

PAULO HENRIQUE LOPES GONÇALVES, filho de José Ribamar Lopes Gonçalves e Teresinha de Jesus Pereira Lopes, nasceu em 15 de janeiro de 1975, em Belém, no estado do Pará.

Em abril de 2003, graduou-se em Bacharel em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém, Pará.

A partir de 2003 a 2008, participou de vários projetos de pesquisa na região amazônica como bolsista graduado DTI/CNPq. Dentre os principais foram o Projeto Mangrove Dynamics and Management (MADAM), cooperação bilateral Brasil-Alemanha, na cidade de Bragança-PA. O Project for the Advancement of Networked Science in Amazonia (Pan-Amazonia), projeto interdisciplinar de pesquisa financiado pela Comissão Européia, Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã-PA. Projeto Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica / Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (ESECAFLOR/LBA), FLONA de Caxiuanã-PA. Projeto Condicionamento ao Sequestro de Carbono na Floresta Amazônica (CARBOPARÁ/LBA). Projeto Tropical Ecology, Assessment & Monitoring (TEAM), estudo global multidisciplinar através da parceria entre Museu Emílio Goeldi e Conservação Internacional (CI-Brasil), FLONA de Caxiuanã-PA. Projeto Dinâmica de Clareiras sob Exploração Petrolífera (Rede CTPETRO Amazônia), Urucú-AM.

Em março de 2008, iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Meteorologia Agrícola, no Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), na Universidade Federal de Viçosa (UFV). Titulou como Mestre em julho de 2009, sob a orientação do professor José Maria Nogueira da Costa.

Em agosto de 2009, iniciou o Curso de Doutorado em Meteorologia Agrícola UFV, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2013.

Durante o doutoramento participou como: Coordenador Geral da Associação de Pós-Graduandos (APG/UFV) - Gestão 2011/2012 e 2012-2013. Representante discente da pós-graduação nos máximos conselhos da UFV, CEPE (Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão) e Conselheiro no CONSU (Conselho Universitário), respectivamente, nos períodos de 2012 e 2013. Representante discente no programa de pós-graduação em Meteorologia Agrícola da UFV no período de 2009 a 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Ciclo e dinâmica do carbono.....	4
2.2 Dinâmica do carbono nos biomas.....	6
2.3 Efluxo de CO ₂ em solos agrícolas	9
2.4 O solo no Cerrado	10
2.5 Influência da temperatura nas taxas de respiração do solo.....	11
2.6 Influência da água na respiração do solo	11
2.7 Fase gasosa do solo.....	12
2.8 Fluxo de CO ₂ do solo e respiração do solo.....	13
2.9 Matéria orgânica.....	16
2.10 Metodologias de medida do fluxo de CO ₂ do solo	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Área experimental.....	19
3.2 Dados experimentais	19
3.2.1 Determinação das Variáveis meteorológicas.....	19
3.2.2 Determinação de Efluxo de CO ₂	20
3.2.3 Base e análise de dados.....	22
3.2.4 Clima.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1 Variação dos efluxos de CO ₂ na superfície do solo.....	23
4.2 Influência da temperatura do solo com o efluxos de CO ₂ do solo	32
5. CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estoque global de carbono na vegetação e no solo (profundidade 100 cm).....	7
Tabela 2. Estudos realizados de fluxos de CO ₂ no Brasil.....	15
Tabela 3. Estatística descritiva de efluxos de CO ₂ e temperatura do solo.....	32
Tabela 4. Totais de precipitação pluvial e irrigação no período	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo global de carbono com estoques (em Pg = 1015 g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano ⁻¹). Fonte: Machado, 2005.....	6
Figura 2. Localização da área experimental Sekita (seta verde) e município de Rio Paranaíba (balão vermelho). Fonte: Google Earth	19
Figura 3. Estação meteorológica automática.....	20
Figura 4. Sistema de medições de fluxos de CO ₂ . Fonte: ADC BioScientific....	21
Figura 5. Disposição dos anéis nas parcelas experimentais	21
Figura 6. Variação do efluxo de CO ₂ da superfície do solo da cenoura.....	23
Figura 7. Variação do efluxo de CO ₂ na superfície do solo da beterraba	24
Figura 8. Variação do efluxo de CO ₂ na superfície do solo do cerrado	24
Figura 9. Variação do efluxo de CO ₂ de referência (ref) com dentro da câmara (cam) na superfície do solo da cenoura.....	25
Figura 10. Variação do efluxo de CO ₂ de referência (ref) com dentro da câmara (cam) na superfície do solo da beterraba.	25
Figura 11. Variação do efluxo de CO ₂ de referência (ref) com dentro da câmara (cam) na superfície do solo do cerrado.....	25
Figura 12. Variação do efluxo de CO ₂ na superfície do solo nas lavouras e cerrado.....	26
Figura 13. Efluxo acumulado de CO ₂ no solo	27
Figura 14. Efluxo de carbono no solo	27
Figura 15. Total da precipitação pluvial, irrigação Evapotranspiração da cultura e média dos efluxos de CO ₂ e temperatura na superfície do solo, em áreas de cenoura. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo.	29
Figura 16. Total da precipitação pluvial, irrigação evapotranspiração da cultura e média dos efluxos de CO ₂ e temperatura na superfície do solo, em áreas de beterraba. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo... ..	30
Figura 17. Total da precipitação pluvial e média dos efluxos de CO ₂ e temperatura na superfície do solo, em áreas de cerrado. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo.....	31
Figura 18. Variação do efluxos de CO ₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela da cenoura	33

Figura 19. Variação do efluxos de CO ₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela da beterraba	33
Figura 20. Variação do efluxos de CO ₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela do cerrado	34

RESUMO

GONÇALVES, Paulo Henrique Lopes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Efluxo de CO₂ sob vegetação de cerrado e em áreas cultivadas com cenoura e beterraba.** Orientador: Flávio Barbosa Justino. Coorientadores: Paulo José Hamakawa e Edson Luís Nunes.

O bioma Cerrado possui grande diversidade biológica e está entre os mais importantes ecossistemas florestais do Brasil. Também está entre os com maiores alterações antrópicas. Qualquer sistema florestal e agrícola é composto por componentes físicos (climáticos, edáficos, topográficos entre outros) e componentes biológicos (micro e macroflora e fauna). O bioma Cerrado é o segundo mais importante do Brasil, embora há pouco entendimento sobre o seu funcionamento, particularmente em relação ao ciclo do carbono comparado com sistemas agrícolas. Pesquisas recentes têm demonstrado a importância do carbono no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO₂. Atualmente é fundamental produzir com baixa emissão de carbono sem expandir a fronteira agrícola, principalmente em áreas preservadas. Um dos grandes desafios da atividade agrícola é reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e incrementar a absorção de dióxido de carbono (CO₂) através do sequestro do carbono em ecossistemas. A interdependência entre estes componentes dificulta a compreensão do funcionamento do sistema como um todo. Soma-se a isto o pequeno número de estudos experimentais realizados sobre a quantificação dos efluxos de CO₂ e sua variação temporal associada com variáveis biofísicas que influenciam a magnitude desses efluxos. Diante disto, os objetivos deste trabalho foram: a) Analisar as variações nas fases antes da semeadura, durante e pós-colheita de efluxos de CO₂ na superfície do solo; b) Identificar a relação de dependência das taxas de efluxo de CO₂ na superfície do solo com a precipitação pluvial e temperatura do solo; c) Comparar as estimativas de carbono alocado no solo entre as áreas de cerrado e lavoura de cenoura e beterraba. Os resultados evidenciaram uma variação temporal dos efluxos de CO₂ do solo, tanto nas áreas de lavouras de cenoura e beterraba como nas áreas de cerrado, em resposta à variabilidade observada no regime pluviométrico e da temperatura do solo. As magnitudes dos efluxos de CO₂ variaram de 3,97 a 1,02 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

com média de $2,09 \pm 0,28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em cerrado, cenoura variaram de 2,60 a $0,21 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com média de $0,98 \pm 0,29$ e na beterraba variaram de 3,56 a $0,41 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ com média de $1,96 \pm 0,33$. O carbono alocado no período foi de $2,58 \text{ Mg ha}^{-1}$, $1,51 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $2,48 \text{ Mg ha}^{-1}$ no cerrado, cenoura e beterraba, respectivamente. O estoque de carbono alocado no cerrado foi 53% e 6% maior em comparação que na área de cenoura e beterraba, respectivamente. Entre beterraba e cenoura a diferença foi de 50%. A razão provável da estabilidade do carbono no cerrado é devido a contribuição material orgânico e abundância de serrapilheira.

ABSTRACT

GONÇALVES, Paulo Henrique Lopes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Efflux of CO₂ under savannah vegetation and in areas cultivated with carrot and beet.** Adviser: Flávio Barbosa Justino. Co-advisers: Paulo José Hamakawa and Edson Luís Nunes.

The savannah has great biological diversity and is among the most important forest ecosystems of Brazil. Any forest and agricultural system consists of physical components (climatic, edaphic, topographic, etc.) and biological components (plants and animals). Although the savannah be the second most important in Brazil, there is still little understanding on their operation, particularly in relation to the carbon cycle compared with agricultural systems. Recent research has demonstrated the importance of soil carbon stock as a source and potential sink for CO₂. Note the importance in producing low-carbon without expanding the agricultural frontier, especially in conservation areas. One of the great challenges of agriculture is to reduce the emission of greenhouse gases (GHG) and increase the absorption of carbon dioxide (CO₂) emissions through carbon sequestration in ecosystems. The interdependence of these components hampers the understanding of the functioning of the system as a whole. Added to this the small number of experimental studies on the quantification of CO₂ effluxes and its temporal variation associated with biophysical variables that influence the magnitude of these flows. Given this, the objectives of this work are: a) to analyze the changes in the phases before planting, during and post-harvest CO₂ efflux at the soil surface, b) identify the dependence of CO₂ efflux rates at the soil surface with precipitation rain and soil temperature, c) compare estimates of the soil carbon allocated between the savannah areas and farming. The results show a temporal variation of soil CO₂ effluxes, both in the areas of crops and areas of savannah, in response to the observed seasonality in rainfall, and temperature. The results show a temporal variation of soil CO₂ fluxes, both in the areas of crops and areas of savannah, in response to the observed variability in rainfall and soil temperature. The magnitudes of CO₂ effluxes ranged from 3.97 to 1.02 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and an average of $2.09 \pm 0.28 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ in the savannah, carrots ranged from 2.60 to 0.21 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and an average of 0.98 ± 0.29 and beet ranged from 3.56 to

0.41 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and an average of 1.96 ± 0.33 . Carbon allocated for the period was 2.58 Mg ha^{-1} , 1.51 Mg ha^{-1} and 2.48 Mg ha^{-1} in the savannah, carrots and beets, respectively. The carbon stock in the savannah was allocated 53% and 6% higher compared to the area of carrot and beet, respectively. Among beets and carrots the difference was 50%. The probable reason of the stability of carbon in the savannah is due to the contribution organic material and plenty of litter.

1. INTRODUÇÃO

O avanço do conhecimento sobre o efeito dos ecossistemas naturais e cultivados nos climas regional e global e da magnitude das mudanças de uso da terra, fez com que a capacidade de um ecossistema de emitir e sequestrar carbono crescesse em importância, tornando-se um importante serviço ambiental. Em escala local, os ecossistemas possuem componentes que estocam e trocam carbono entre si e com a atmosfera.

O crescimento da produção agrícola é fundamental para sustentar uma população crescente, sendo essencial para promover o desenvolvimento econômico e redução da pobreza. Segundo estimativa da Organização das Nações Unidas (ONU) (2011) a população mundial chegou ao mês de outubro de 2011 à marca de 7 bilhões de pessoas e segue crescendo em um ritmo jamais visto. Em 2050, este número deve alcançar, segundo estimativas, 9,3 bilhões.

Um dos grandes desafios da atividade agrícola é reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e incrementar a absorção de dióxido de carbono (CO₂) através do, assim denominado, sequestro do carbono em ecossistemas diante dos desafios expostos pelas mudanças climáticas (ONU, 2011).

Mudanças relativamente pequenas na estrutura e/ou na função de florestas podem ter consequências regionais e/ou globais para a biodiversidade, ciclo do carbono, mudanças climáticas e também contribuir de maneira decisiva nas alterações do microclima. Na região do Cerrado, essas mudanças são agravadas pelo intenso desmatamento para a exploração agropecuária, extração de madeiras, e outras atividades antrópicas, que além de modificarem a cobertura florestal nativa, produzem gases de efeito estufa que afetam as propriedades físicas e biológicas da superfície terrestre.

Pesquisas recentes (METCALFE et al., 2007; MEIR et al., 2008; MALHI et al., 2008) demonstraram a importância do carbono (C) no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO₂. A liberação desse C para a atmosfera na forma de CO₂ pode causar sérios impactos no clima. Portanto, práticas de manejo que contribuam para a estabilização e fixação de C no solo são necessárias para diminuir a emissão desses gases e mitigar o efeito estufa.

Segundo Sotta et al. (2004) e Salimon et al. (2004) o fluxo de CO₂ do solo é fortemente correlacionado com a temperatura e umidade do solo. Entretanto, esses autores afirmaram que nem sempre uma função exponencial representa a melhor resposta do fluxo de CO₂ do solo à variação de temperatura. Outros fatores, tais como teor de nutrientes no solo, respiração das raízes, processos microbióticos, matéria orgânica, aeração do solo, porosidade do solo, disponibilidade de água e tipo vegetação podem interferir nas taxas de fluxo de CO₂ do solo.

Há várias hipóteses cientificamente fundamentadas sobre o comportamento dos grandes ciclos naturais do planeta envolvendo carbono, água e nutrientes. No caso do Cerrado, em condições naturais, a vegetação serve como sumidouro de dióxido de carbono (CO₂), retirando o CO₂ da atmosfera e fixando-o em sua biomassa por meio da fotossíntese. Esses grandes sumidouros naturais, segundo Nobre e Nobre (2002), poderiam reduzir sua magnitude no futuro em virtude das mudanças climáticas. Alguns cálculos, no entanto, do balanço de carbono no Cerrado a partir de modelos, excluindo mudanças dos usos da terra, sugerem que a floresta não-perturbada é fonte e não sumidouro de carbono (TIAN, 1998).

Entretanto, com um aumento da temperatura terrestre, esse sumidouro aparente pode saturar e tornar-se fonte, uma vez que um solo mais aquecido pode acelerar a respiração heterotrófica (COX, 2000).

As enormes quantidades de carbono são armazenadas, naturalmente, nas árvores e outras plantas da floresta, assim como no solo sob forma de matéria orgânica. Diferentes usos do solo podem alterar a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) trocado entre a vegetação e a atmosfera. Essa diferença, resultante do desmatamento e da exploração da floresta pelo homem, poderia contribuir para as mudanças climáticas e ambientais em escala regional e global.

O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C) (MACHADO, 2005). Um dos mecanismos para realçar o sequestro de carbono no solo é a conservação de áreas naturais.

Há, portanto, necessidade de aprofundar o entendimento do comportamento biofísico do Cerrado e lavouras, onde há grande carência de informações sobre as interações entre tipo de solo, vegetação e a atmosfera.

Com relação aos efluxos de CO₂ do solo, algumas questões são de interesse e exploradas neste trabalho em detalhes:

1. Qual a magnitude dos efluxos de CO₂ da superfície do solo nas lavouras de beterraba e cenoura comparadas com a vegetação de Cerrado?
2. Como variam efluxos de CO₂ da superfície do solo durante os ciclos das lavouras de beterraba e cenoura e vegetação de Cerrado?
3. Qual a relação de dependência entre o efluxo de CO₂ da superfície do solo nas lavouras de beterraba, cenoura e vegetação de Cerrado com alguns elementos meteorológicos?

Os objetivos deste trabalho são:

1. Comparar as estimativas de carbono alocado no solo entre as áreas de lavoura e na vegetação de Cerrado;
2. Analisar as variações de efluxo de CO₂ na superfície do solo das lavouras nas fases antes do plantio, durante e pós-colheita e na vegetação de Cerrado;
3. Identificar a relação de dependência das taxas de efluxo de CO₂ na superfície do solo com a precipitação pluvial e temperatura do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ciclo e dinâmica do carbono

O carbono é um dos principais elementos para os seres vivos, pois, é o componente básico das moléculas orgânicas. Os teores de carbono total da biomassa variam de 40 a 55% com base na sua matéria seca (MILLER, 1984).

Utilizado primariamente pelos seres vivos está presente no ambiente, combinado ao oxigênio e formando as moléculas de gás carbônico presente na atmosfera ou dissolvidas nas águas dos mares, rios e lagos. O carbono passa a fazer parte da biomassa através do processo da fotossíntese. Os seres fotossintetizantes incorporam o gás carbônico atmosférico, transformando-o em moléculas orgânicas. Isto evidencia a operação de mecanismos altamente concentradores de carbono em determinadas frações da biomassa.

Estes mecanismos concentradores de carbono são representados pelos processos autotróficos da fotossíntese e quimiossíntese, realizados tanto por plantas quanto microrganismos. Deste modo, estes processos representam, numa primeira etapa, uma imobilização do carbono através do CO₂. Por outro lado, o carbono está sendo continuamente devolvido à atmosfera através da oxidação da matéria orgânica, representados pelos processos de respiração e combustão, processos estes denominados de mineralização da matéria orgânica. Assim, os teores de carbono total na atmosfera e da superfície terrestre, dependem de um delicado equilíbrio entre processos de imobilização (redução) e mineralização (oxidação) do carbono (HOUGHTON, 1994) (MILLER, 1984; HEINRICH & HERGT, 1990; SCHUMACHER, 1995).

O equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização do carbono vem sendo alterado desde o século XIX, pós-revolução industrial. Desde aquela época, os teores de CO₂ na atmosfera vêm aumentando, provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis. Parte do CO₂ assim produzido pode ser absorvida pelos oceanos como HCO₃⁻ e/ou fixado na biomassa de plantas. Entretanto, a capacidade tamponante limitada de CO₂ dos oceanos juntamente com o desmatamento sem a devida reposição de culturas, vem criando as condições para o agravamento do “efeito de estufa”, resultando em alterações sazonais na superfície terrestre, devido ao acúmulo crescente de CO₂ e CH₄ na atmosfera (GRACE, 2001). A concentração de gás

carbônico na atmosfera é a grande preocupação dos pesquisadores são de que esse aumento possa provocar mudanças climáticas em nosso planeta, uma vez que o gás carbônico é, do ponto de vista quantitativo, o mais importante gás causador do efeito estufa (HOUGHTON, 1994; NOBRE, 2002).

Outro fator potencializador, na alteração desse processo cíclico natural (fotossíntese, a respiração e a dissolução) do carbono e provavelmente resultando nas mudanças climáticas, é a mudança no uso da terra pelo corte de floresta e queima de biomassa, que tem sido considerada como um sério agravante na liberação de carbono da biosfera para a atmosfera. Existe atualmente um aumento do carbono na atmosfera na forma de CO₂ através de atividades antrópicas. A metade do C permanece na atmosfera, e passa a contribuir efetivamente para o efeito estufa, sendo o restante dissolvido no oceano, ou sequestrado pela atividade fotossintética, ficando retido como biomassa viva ou matéria orgânica do solo (GRACE, 2001).

Na Figura 1 constata-se que o maior compartimento de carbono na Terra é aquele presente no oceano (38000 Pg C), seguido do compartimento nas formações geológicas (5000 Pg C). O carbono das formações geológicas consiste de 4000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural. O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C). O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana como dióxido de carbono em solos aerados ou metano em solos saturados com água. Entretanto, pouco se sabe sobre valores precisos de perdas de carbono do solo para a atmosfera (MACHADO, 2005).

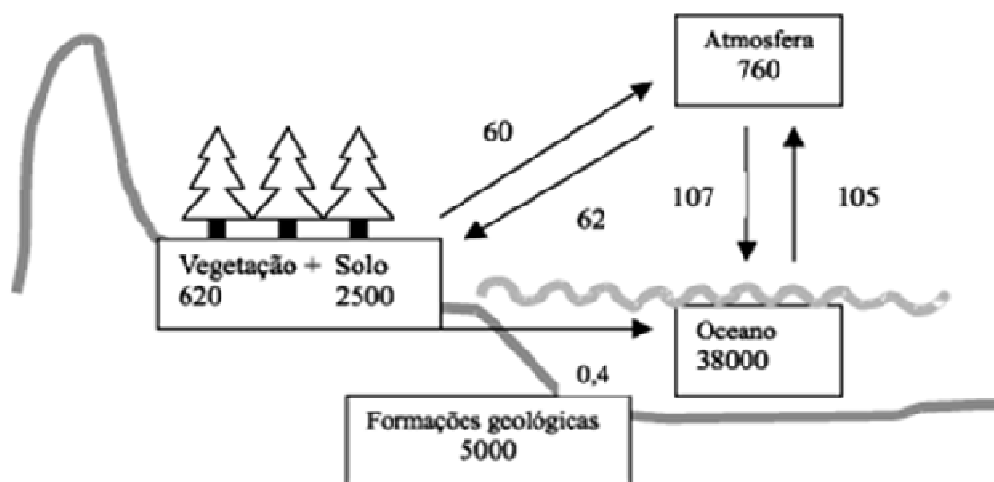


Figura 1. Ciclo global de carbono com estoques (em Pg = 10^{15} g C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano⁻¹)

O sistema climático global e o ciclo do carbono interagem intensamente, e o CO₂ constitui um fator dominante na definição do clima, através do equilíbrio ou desequilíbrio de sua concentração na atmosfera. Desta forma, torna o clima um determinante das características da superfície, pois atua nos processos de formação do solo (processos físicos, químicos e biológicos da superfície do solo), do tipo de vegetação, das feições do relevo e da estrutura de drenagem e ao mesmo tempo a superfície exerce uma marcante influência sobre o clima, pois desenvolve um papel relevante no controle do balanço térmico da atmosfera (MACHADO, 2005).

Segundo Houghton (1994), do carbono existente no ecossistema terrestre nas diversas formas incluindo, os microrganismos, folhas vivas, respiração das raízes, madeira, decomposição da matéria orgânica metade encontra-se nas florestas tropicais. Entretanto, os solos de florestas tropicais têm participação na dinâmica de processos químicos e físicos da atmosfera, uma vez que atuam como fonte ou sumidouro desse gás.

2.2 Dinâmica do carbono nos biomas

Os ecossistemas terrestres que compreendem a vegetação e o solo são considerados atualmente como um grande sumidouro de carbono, especialmente os solos. Há várias maneiras pelas quais o manejo apropriado da biosfera terrestre, particularmente do solo, pode resultar em significativa

redução no aumento dos gases de efeito estufa. Conforme demonstrado na Tabela 1, todos os solos dos diferentes biomas do mundo apresentam maior estoque de carbono que a vegetação, especialmente os solos de floresta boreal (regiões geladas) e os campos das regiões temperadas (ex. pradarias nos EUA e pampas da América do Sul) (MACHADO, 2005).

Tabela 1. Estoque global de carbono na vegetação e no solo (profundidade 100 cm)

Bioma	Área (10 ⁶ Km ²)	Estoques de carbono (Gt de C)		
		Vegetação	solos	Total
Floresta Tropical	17,6	212	216	428
Floresta Temperada	10,4	59	100	159
Floresta Boreal	13,7	88	471	559
Savanas Tropicais	22,5	66	264	330
Campos Temperados	12,5	9	295	304
Desertos e semidesertos	45,5	8	191	199
Tundra	9,5	6	121	127
Pântanos	3,5	15	225	240
Terras agrícolas	16,0	3	128	131
TOTAL	151,2	466	2011	2477

Fonte: Machado (2005)

O Cerrado é um bioma predominantemente savânico, que ocupa dois milhões de km² na região central do Brasil. A ocupação humana vem se intensificando ao longo das últimas décadas e, hoje, é considerada a principal fonte de distúrbios deste bioma. A formação de pastagens plantadas e lavoura comercial são as principais atividades econômicas na região, sendo a primeira a mais significativa em extensão, equivalendo a 25% da área do Cerrado (Klink & Moreira 2002). O Cerrado brasileiro, considerado a maior savana neotropical (CASTRO, 1996), representa uma parcela significativa dos ecossistemas tropicais do planeta e, portanto, tem um papel fundamental no ciclo global do carbono, atuando como grande assimilador e acumulador de carbono. Nas últimas décadas, a substituição de extensas áreas da cobertura original do Cerrado por outros usos, envolvendo desmatamento e queimadas, vem ocorrendo num ritmo acelerado e, certamente, todo este processo de substituição da vegetação tem contribuído para o aumento da quantidade de CO₂ na atmosfera. Poucos estudos relacionados à quantificação da biomassa total no Cerrado comprometem o entendimento do processo de conversão de CO₂ no bioma.

Castro (1996) quantificou o carbono total ao longo do gradiente de vegetação em um Cerrado lato sensu, na Reserva Ecológica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RECOR), DF, e encontrou valores variando de 229,50 t.ha⁻¹ no campo sujo a 293,34 t.ha⁻¹ no cerrado denso. O maior percentual de carbono estava concentrado no solo, seguido pela biomassa de raízes e pela biomassa da parte aérea. Tal fato evidencia uma característica bastante típica dessa vegetação quando comparada às outras formações vegetais tropicais, ou seja, alta proporção de biomassa subterrânea em relação à aérea, o que resulta num elevado quociente entre raiz e parte aérea (HARIDASAN, 2000). Torna-se complexo a estimativa do fluxo de carbono entre o solo e a atmosfera que ocorre principalmente na forma de dióxido de carbono originado da respiração microbiana (heterotrófica), da raiz (autotrófica) (EUSKIRCHEN et al., 2003), ecológica (por exemplo, imigração da fauna e vegetação) e processos físicos (por exemplo, processo de difusão de CO₂). O fluxo de CO₂ no solo depende do tipo do solo, temperatura do solo, umidade do solo, ocorrência de precipitação, taxa de fotossíntese nas plantas e substratos disponível para decomposição no solo (SÁNCHEZ et al., 2003). Por essas razões se tornam necessárias medições de fluxo do CO₂ no solo em vários ecossistemas e em diferentes condições climáticas.

A taxa de transferência do CO₂ do solo para a atmosfera pode ser controlada por cinco fatores: i) pela sua taxa de produção no solo; ii) pelos gradientes de temperatura; iii) por sua concentração na interface solo-atmosfera; iv) pelas propriedades físicas do solo e v) pelas flutuações da pressão atmosférica do ambiente (SOTTA, 1998). Este processo varia muito com a vegetação e tipo de solo (DAVIDSON et al., 2002). Os fluxos são extremamente variáveis no espaço e no tempo, devido à heterogeneidade do sistema e dinâmica dos fatores que os controlam. Embora muito importante o fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera é pouco conhecido em termos de variação sazonal e quantidade respirada nos diferentes tipos de cobertura do solo (MEIR et al., 1996; DAVIDSON et al., 2000).

Diversas pesquisas demonstraram a importância do carbono (C) no solo como estoque, fonte e potencial sumidouro de CO₂, porém o estoque de carbono no solo depende das mudanças no seu uso e das alterações climáticas, podendo estocar ou liberar carbono do solo (POST et al., 1982; SOMBROEK, 1993). A liberação deste C para atmosfera na forma de CO₂

poderá causar impactos sobre o clima; assim práticas de manejo que contribuam para estabilização e fixação de C no solo são necessárias para diminuir a emissão de gases e mitigar o efeito estufa.

Poucos estudos comparativos foram realizados entre solo de cerrado e culturas agrícolas, sob condições climáticas normais. A agricultura, através de práticas como o desflorestamento, preparo do solo, calagem e irrigação, causa decréscimo no teor de C do solo, decorrente, principalmente, do aumento da taxa de mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) (SCHLESINGER, 1999). Durante a decomposição da MOS, os microrganismos do solo utilizam o C que necessitam para a síntese de biomassa e o restante é perdido pela respiração (SIX et al., 2006).

É importante ressaltar que a agricultura contribui para a redução do CO₂ atmosférico, já que parte do CO₂ é temporariamente removido da atmosfera pela fotossíntese das plantas e pela acumulação do C no solo (HOUGHTON, 2007). O solo é considerado o principal reservatório temporário de C no ecossistema (BRUCE et al., 1999), por apresentar, em média, 4,5 vezes mais C do que a biota e 3,3 vezes mais do que a atmosfera (LAL, 2004), devendo ser considerado um importante componente tanto para o incremento, como para a redução do CO₂ na atmosfera. Neste sentido, os fatores que aumentam as entradas de C e/ou diminuem a respiração do solo, irão favorecer o acúmulo de C, criando um dreno de CO₂ atmosférico (PAUSTIAN et al., 1997; SMITH; CONEN, 2004; WEST; POST, 2002), dentro dos limites impostos pelas condições climáticas e edáficas (FRANK et al., 2006).

Há uma necessidade de aperfeiçoar o entendimento do comportamento biofísico do bioma Cerrado e culturas agrícolas, especialmente na região tropical onde há grande carência de informações sobre as interações entre tipo de solo, vegetação e a atmosfera.

2.3 Efluxo de CO₂ em solos agrícolas

Por ser o solo considerado o maior reservatório de carbono nos agroecossistemas, a liberação de CO₂ para a atmosfera é uma importante parte do ciclo do carbono, constituindo-se num índice bastante útil para caracterizar a diminuição do estoque de carbono total dos sistemas de produção agrícola. Dependendo do grau de distúrbio imposto ao solo, pode-se

aumentar a taxa de decomposição da matéria orgânica que se torna fonte de CO₂ para a atmosfera (FERREIRA, 2005).

Com o aumento na concentração de CO₂ na atmosfera, tem-se buscado enfatizar o armazenamento de CO₂ no solo por meio de mudanças no uso da terra e práticas de manejo que intensifiquem a síntese e aumentem a retenção da matéria orgânica. Diversos estudos têm mostrado que o efluxo de CO₂ superficial do solo varia muito dependendo do sistema de manejo adotado (RESCK, 1996; WAGAI et al., 1998; FOLLET; SCHIMEL, 1989; REICOSKY et al., 1997; REICOSKY, 1997; SCALA JÚNIOR et al., 2001). O revolvimento do solo pode aumentar a respiração e a emissão de CO₂ como foi mostrado em vários estudos (DUGAS et al., 1997; REICOSKY, LINDSTROM, 1993; REICOSKY et al., 1997). Hendrix et al. (1988) observaram que a aração afeta mais o aumento do fluxo momentâneo do que a quantidade de fluxo total medida e que estimativas de fluxo anual sob plantio direto podem até ser maiores que no plantio convencional.

Solos sob preparo convencional, com menores teores de matéria orgânica, podem muitas vezes produzir maiores fluxos de CO₂ em relação ao plantio direto, por causa da biomassa mais ativa (SAFFIGNA et al., 1989); tanto a diferença em acessibilidade ao substrato de carbono como mudanças no metabolismo microbiano podem ser responsáveis por esses resultados, pois a quebra dos agregados disponibiliza carbono orgânico para a decomposição microbiana.

Em um Latossolo Vermelho, argiloso, no Cerrado, foi feito o monitoramento do fluxo de CO₂ em vários agroecossistemas (RESCK et al., 1996), quando foi observado que as maiores produções de CO₂ ocorreram em áreas de pastagens, seguidas pela área sob vegetação nativa de Cerrado; os sistemas de manejo com arado de discos e aivecas e plantio direto ficaram em um grupo intermediário, seguidos de uma área sob Pinus.

2.4 O solo no Cerrado

Os latossolos predominam no Cerrado Brasileiro, estando presentes em 46% da área do bioma. Estes tipos de solo se caracterizam, principalmente, pela baixa fertilidade e alta acidez. Por outro lado, trata-se de solos antigos, profundos, com ótima drenagem e que se assentam em relevos planos ou levemente ondulados. Embora até a década de 1970 o solo do Cerrado tenha

sido considerado praticamente impróprio para o cultivo agrícola, foram principalmente as características deste solo que, com o avanço tecnológico, possibilitaram a expansão agrícola na região abrangida por este bioma. Primeiramente, é possível corrigir a acidez e a baixa fertilidade com o uso adequado de corretivos e de fertilizantes. Além disso, por serem bem drenados, resistentes à compactação e se assentarem em relevos planos, estes solos permitem o uso intensivo da mecanização (Cunha, 1994; Abelson & Rowe, 1987).

2.5 Influência da temperatura nas taxas de respiração do solo

O processo de respiração do solo é fortemente influenciado pelos fatores ambientais como a temperatura e umidade e podem variar de acordo com a estação (DAVIDSON et al., 2000). O fluxo de CO₂ do solo é altamente sensível à mudança de temperatura. Portanto, pequenas mudanças na temperatura da superfície do solo, podem influenciar a magnitude do fluxo de CO₂. Desta forma, se ocorrer um aumento na emissão de CO₂ do solo para a atmosfera, poderá contribuir para um aumento na concentração atmosférica e conseqüentemente nas mudanças globais (KIRSCHBAUM, 1995). Estudos têm mostrado que a taxa de respiração do solo é um indicador de atividade microbiana do solo, aumentando linearmente com a temperatura (SUBKE et al., 2003). Estes trabalhos consideraram que a produção do CO₂ dentro do solo é basicamente um processo bioquímico e responde assim fortemente às variações de temperatura. Isso pode mudar com a idade da matéria orgânica, e também com a disponibilidade de água para as reações bioquímicas relevantes, (FANG e MONCRIEFF, 2001).

2.6 Influência da água na respiração do solo

Os mecanismos da respiração do solo estão associados com as condições de temperatura e conteúdo de água no solo, dependem da variabilidade temporal e espacial destas variáveis, que exercem forte influência no processo de decomposição microbiana. Em estudos sobre emissão de CO₂ encontrou-se relação significativa deste processo com a umidade do solo,

sugerindo que o nível de umidade ótimo para emissão de CO₂ ocorre na capacidade de campo. Entretanto, Howard e Howard (1993) disseram que este teor de água seria prejudicial à atividade aeróbica, que é a maior fonte de CO₂ emitido pelo solo. Segundo Sotta et al. (2004), como nos trópicos as variações de temperatura são relativamente pequenas, e considerando que os solos de floresta tropical apresentam pequena variação na temperatura, esta variável não explicaria a grande variação de fluxo de CO₂ observada. Davidson et al. (2002) observaram que logo após um evento de chuva ocorre um grande aumento do fluxo do CO₂, porque a água quando drenada para o solo força a saída do CO₂ presente nos poros, e após algumas horas, há uma queda brusca no fluxo, que se dá devido a uma camada de proteção que a água faz no solo, evitando assim a emissão do CO₂ para a atmosfera. Esta emissão vai se tornando maior à medida que a água vai evaporando e drenando para o lençol freático, pois assim os poros ficam livres. E há um restabelecimento das condições aeróbicas, proporcionando um ambiente favorável às atividades microbianas do solo.

2.7 Fase gasosa do solo

A fase gasosa, também chamada de ar do solo, é composta principalmente de N₂, O₂, vapor de água e CO₂, com traços de outros gases. Desprezando-se gás traço, pode-se dizer que a fração volumétrica de N₂ é cerca de 80% (a mesma da atmosfera) e que as do CO₂ e O₂ perfazem cerca de 20% (PREVEDELLO, 1996). A fração volumétrica de CO₂ no ar do solo é maior do que os 0,03% da atmosfera. Com o aumento na profundidade do solo, a concentração de CO₂ aumenta e a de O₂ decresce, devido às atividades biológicas (respiração das raízes, das plantas, dos microorganismos e da fauna do solo). O ar do solo está continuamente sujeito a renovação pelas trocas com a atmosfera. Por isso, o ar da camada superficial do solo não difere muito do ar atmosférico, garantindo o arejamento, no espaço poroso não ocupado pela fase líquida, para os processos vitais da biota do solo (LUCHES et al., 2001). O ar do solo pode variar em termos de composição e concentração, tanto no tempo quanto no espaço, dependendo da presença de matéria orgânica, das atividades microbianas, da concentração de raízes, da aeração do solo e das

reações químicas. Mesmo em solos bem aerados, a fase gasosa apresenta uma maior concentração de CO₂ e umidade relativa do que o ar atmosférico.

2.8 Fluxo de CO₂ do solo e respiração do solo

Para se conhecer o movimento de carbono no sistema deve ser feita a quantificação do fluxo de CO₂ do solo, ou seja, a avaliação da exportação gasosa de CO₂ do solo para a atmosfera (FEARNSIDE, 1986). O solo recebe matéria orgânica produzida pela comunidade de plantas e, de diversas maneiras converte a maior parte dela em CO₂ (SINGH e GUPTA, 1977). Outra parte fica retida na matéria orgânica do solo e serve de suprimento (alimento) e energia para os microrganismos do solo. O fluxo de CO₂ do solo incorpora tanto a respiração do solo como a difusão passiva do CO₂, englobando processos biológicos e físico-químicos, e representa as trocas de CO₂ entre compartimentos de um sistema, enquanto a respiração do solo é um processo biológico, sendo a somatória das liberações de CO₂ para a atmosfera, resultante de vários processos que ocorrem na liteira, superfície e camadas mais profundas do solo, incluindo: i) a respiração dos microrganismos (principalmente bactérias e fungos) e da macrofauna; ii) os processos fermentativos, que ocorrem em profundidade sob condições de anaerobiose; iii) e a oxidação química. Todos derivam da decomposição da matéria orgânica e estão ligados à produção primária do sistema (WANNER, 1979; MEDINA, 1980; RAICH, 1983). A medida do fluxo de CO₂ da superfície do solo é provavelmente o método mais amplamente usado, para se estimar a taxa de respiração do solo in situ. No entanto respiração do solo não é sinônimo de fluxo de CO₂ do solo, embora eles sejam frequentemente usados como tal. A respiração do solo é a oxidação da matéria orgânica no solo, e inclui a respiração das raízes e organismos do solo.

O efluxo de CO₂ do solo é a liberação de CO₂ para a atmosfera, e, portanto depende da produção de CO₂ no solo e do processo físico de fluxo de gás para fora do solo. Segundo (DAVIDSON et al., 2002) os solos estocam duas ou três vezes mais carbono do que existe na atmosfera. Entretanto, a liberação de carbono vai depender da velocidade de decomposição da matéria orgânica, que é influenciada por características da vegetação e do clima, pelos gradientes de temperatura e concentração de dióxido de carbono solo-

atmosfera, pelas propriedades físicas do solo, e pelas flutuações de pressão do ambiente (RAICH e SCHLESINGER, 1992; MEIER et al., 1996). Contudo, a maioria do CO₂ produzido no solo é liberada para a atmosfera, assim, o fluxo de CO₂ medido no solo, em relativamente longos períodos, reflete a respiração do solo. A respiração do solo é um dos maiores e mais importantes processos de liberação do carbono em um ecossistema terrestre, podendo ser medida por vários métodos, como o de covariância de vórtices turbulentos que permite medir a respiração do solo no período noturno e o uso de câmaras colocadas sobre o solo que permite uma medida direta da respiração que ocorre dentro das camadas do solo e da serrapilheira (DAVIDSON et al., 2002).

O aumento nas concentrações de CO₂ na atmosfera tem sido ocasionado principalmente pela emissão de carbono a partir da queima de combustíveis fósseis em grande escala, e o aumento dessa concentração de CO₂ atmosférico pode interferir na respiração do solo. Desta maneira afetará os processos fisiológicos dos microrganismos do solo os quais podem inibir ou acelerar o fluxo de CO₂ microbiano que por sua vez diferirá entre diversos microrganismos de solo e seu ambiente (ROBERTS, 2000; BALL e DRAK, 1998; BEKKU et al., 1997). O entendimento do fluxo de CO₂ do solo é a chave para entender a troca do fluxo solo-planta-atmosfera (MEIER et al., 1996; DAVIDSON et al., 2000; CHAMBER et al., 2004), porque o saldo entre a fotossíntese e a respiração total da planta é denominado de assimilação líquida de carbono. Com isso, o conhecimento da respiração total do solo em função de suas variáveis meteorológicas, como a temperatura e umidade de solo, pode esclarecer e quantificar melhor este gás e assim poderá também melhorar modelos de interações.

Sotta et al. (2004) encontrou fluxos bem maiores na floresta primária amazônica em Manaus-AM, 6,40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Dias (2006) encontrou valores de fluxos de 5,64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em Santarém-PA, enquanto Gonçalves (2009) na floresta Amazônica de terra firme encontrou valores de 2,84 e 3,73 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em latossolo amarelo e terra preta. A tabela 2, adaptada de Sotta et al. (2004) apresenta um resumo dos estudos feitos no Brasil em Floresta nativa, Cerrado, transição Pantanal e floresta Amazônica e lavouras agrícolas desde Trumbore et al. (1995) até o presente estudo, destacando-se os valores médios dos fluxos, local, período e metodologia empregada.

Tabela 2. Estudos realizados de fluxos de CO₂ no Brasil

Autor (ano)	Local	Período estudo	Média ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Metodologia
Trumbore et al. (1995)	Paragominá-PA		6,10	IRGA câmara dinâmica
Nunes (2003)	Juruena-MT	Ano inteiro	4,25	IRGA câmara dinâmica
Sotta et al. (2004)	Manaus-AM	Final estação chuvosa	6,40	IRGA câmara dinâmica
Valentine (2004)	Sinop-MT	Ano inteiro	5,30	IRGA câmara dinâmica
Pinto Junior et al. (2006)	Sinop-MT	1 mês	2,88 ± 1,51 8,45 ± 2,92	IRGA câmara dinâmica
Dias (2006)	Santarém-PA	Ano inteiro	5,64	IRGA câmara dinâmica
Panosso (2006)	Jaboticabal-SP	2 meses	1,83 a 2,05	IRGA câmara dinâmica
D'Andrea (2011)	Lavras-MG	1 mês	5,99	IRGA câmara dinâmica
Gonçalves (2008)	Caxiuanã-PA	Ano inteiro	2,84 ± 0,20 (LA) 3,73 ± 0,35 (TP)	IRGA câmara dinâmica
Fernandes (2008)	Rio Verde-GO	Ano inteiro	1,2 0,5 a 1,8 1,6 1,2 1,6	IRGA câmara dinâmica
Pes (2009)	Cruz Alta-RS	Ano inteiro	0,79 (PC) 0,62 (PD)	IRGA câmara dinâmica
Estudo presente	Rio Paranaíba-MG	4 meses	0,98±0,29 1,96±0,33 2,09±0,31	IRGA câmara dinâmica

Fonte: Adaptado de Sotta et al., 2004.

2.9 Matéria orgânica

A decomposição é o processo de despolimerização e de reações oxidativas, pelos quais moléculas relativamente grandes, tais como as poli-aromáticas, carboidratos, lipídios e proteínas, provenientes tanto de dentro das células quanto as livres no ambiente do solo, são convertidas em moléculas menores, mais simples, como os ácidos carboxílicos, aminoácidos e CO₂. Os resíduos adicionados ao solo são primeiramente quebrados até seus componentes orgânicos básicos pelas enzimas extracelulares produzidas pelos organismos heterotróficos.

A matéria orgânica do solo é proveniente da degradação em vários estágios de resíduos animais e vegetais. Na fração orgânica estão incluídos desde os materiais inalterados ou pouco alterados, isto é, que conservam sua identidade, até aqueles totalmente decompostos, ou seja, que perderam a integridade. Todos os produtos transformados são chamados de húmus (REZENDE, 2004). A camada de liteira é representada pela biomassa aérea da vegetação que permanece no solo até ser fragmentada e decomposta pelos processos físico-químicos e bióticos que ocorrem nesta importante fração do ecossistema.

A liteira é constituída por um grande número de moléculas orgânicas diferentes, associada de diferentes maneiras e intensidades à matriz do solo, e não constitui um estoque homogêneo (ANDERSON, 1992). O acúmulo da matéria orgânica do solo é importante para a manutenção do estoque de carbono, e constitui cerca de duas a três vezes a quantidade de carbono armazenado na atmosfera (GRACE, 2001; POST et al., 1992; ROZENZWEIG e HILLEL, 2000).

O carbono proveniente da vegetação entra no solo através da queda de folheto, do "turnover" das raízes e micorrizas e da exudação de carbono pelas raízes finas. O ganho de carbono é compensado pelas perdas, sob a forma de respiração heterotrófica dos decompositores da liteira e da matéria orgânica do solo (MURTY et al., 2002). A qualidade da matéria orgânica em diferentes tipos de solo é influenciada por fatores como condições hidrotérmicas, composição química da vegetação, composição mineralógica e textura do solo (HOWARD e HOWARD, 1993). O solo depende diretamente do tipo de cobertura vegetal,

que segundo Wagai et al. (1998) tem influencia no microambiente, biomassa microbiana e biomassa de raízes, as quais juntas controlam o fluxo de CO₂.

2.10 Metodologias de medida do fluxo de CO₂ do solo

O fluxo do CO₂ do solo pode ser medido de diversas maneiras, entre elas, armadilhas de álcalis, covariância de vórtices turbulentos e câmaras fechadas que absorvem CO₂ por infravermelho (IRGA); com diferenças na exatidão, na resolução espacial e temporal, e aplicabilidade (JANSSENS et al., 2000). Enquanto o método de covariância de fluxo na atmosfera é amplamente usado para medir a respiração do solo, o uso de câmaras, com analisadores de gás por infravermelho (IRGA), colocadas sobre o solo é o caminho mais direto de medida da respiração que ocorre entre o solo e a camada de serrapilheira.

A exatidão dos métodos que usam as armadilhas de álcalis aos IRGAs para a quantificação do CO₂ foi estudada extensivamente (JANSSENS et al., 2000), com a conclusão geral que as armadilhas de álcalis frequentemente superestimam os fluxos baixos e subestimam os fluxos elevados, mas podem, às vezes, confiantemente ser calibrados para uma escala de fluxos intermediários (DAVIDSON et al., 2002). Janssens et al. (2000) consideraram que fluxo de CO₂ do solo só pode ser medido com exatidão por um sistema que não altere a atividade respiratória do solo, o gradiente de concentração de CO₂, e o movimento do ar próximo à superfície do solo. Também é necessário evitar a diferença de pressão entre o exterior e o interior da câmara (FANG e MONCRIEFF, 2001).

Todas as metodologias atualmente disponíveis apresentam algumas desvantagens, entretanto, não existe padrão ou referência para testar a acurácia. Portanto, consideráveis incertezas caracterizam todos os tipos de medidas (JANSSENS et al., 2000) onde a opção é tentar utilizar uma metodologia que melhor se aproxime das condições e realidade em que o estudo seja feito, possibilitando minimizar efeitos negativos.

O uso de IRGA está se tornando cada vez mais comum entre os métodos para medidas com câmaras de respiração do solo que consiste em câmaras colocadas na superfície do solo para registrar a razão de acúmulo de CO₂ (sistema fechado) ou o fluxo de CO₂ do solo (sistema aberto). O sistema fechado pode ser dinâmico (utilizando analisador de gás por infravermelho) ou

estático (utilizando absorção alcalina – NaOH ou analisador de gás por infravermelho) os quais se caracterizam pela presença ou ausência de fluxo de ar dentro da câmara, podendo ainda ser fixo ou móvel. Se fixo, a câmara permanece acoplada em um mesmo ponto e as medidas são realizadas sempre no mesmo local.

O uso de uma metodologia com câmaras juntamente com o IRGA oferece a vantagem de que os fluxos podem ser medidos rapidamente (tempo= 5 minutos) e de que os numerosos pontos de dados de concentrações do CO₂ podem ser registrados a cada minuto, rendendo um monitoramento quase contínuo das concentrações crescentes do CO₂. Minimizar o tempo que a câmara está sobre o solo minimiza o efeito causado pela alteração do gradiente da concentração do CO₂ dentro do perfil do solo, e entre o solo-atmosfera (DAVIDSON et al., 2002).

O método de IRGA está se tornando cada vez mais comum entre todos os métodos utilizados para medir com câmaras a respiração dos componentes biológicos do solo, porque oferece a vantagem de que os fluxos de CO₂ podem ser medidos rapidamente e os números de leituras podem ser maiores permitindo caracterizar o comportamento e monitoramento das concentrações do CO₂, minimizando o tempo que a câmara esta sobre o solo para tornar mínimo o efeito pela alteração do gradiente de concentração do CO₂ dentro do perfil do solo (JANSSENS et al., 2000).

Porém, problemas no uso de todos os tipos de câmaras incluem a dificuldade de avaliar a variabilidade espacial de fluxos em ecossistemas naturais (RAYMENT, 2000) assim como comparar medidas de fluxo por diferentes sistemas de medidas (DREWITT et al., 2002). Isso porque grandes e sistemáticas diferenças entre os tipos de técnicas de câmaras foram verificadas em vários estudos de comparação metodológicas (BEKKU et al., 1997; FANG e MONCRIEFF, 2001; JANSSENS et al., 2000; DAVIDSON et al., 2002).

Diante dessas questões, torna-se difícil selecionar uma metodologia padrão ou referência para testar sua precisão e assim diversos tipos de medidas são caracterizados por consideráveis incertezas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em áreas pertencentes à empresa de agronegócio Sekita, Figura 2, entre os municípios de São Gotardo e de Rio Paranaíba-MG, latitude de 19°11' S, longitude de 46°14' W e altitude em torno de 1.100 metros.

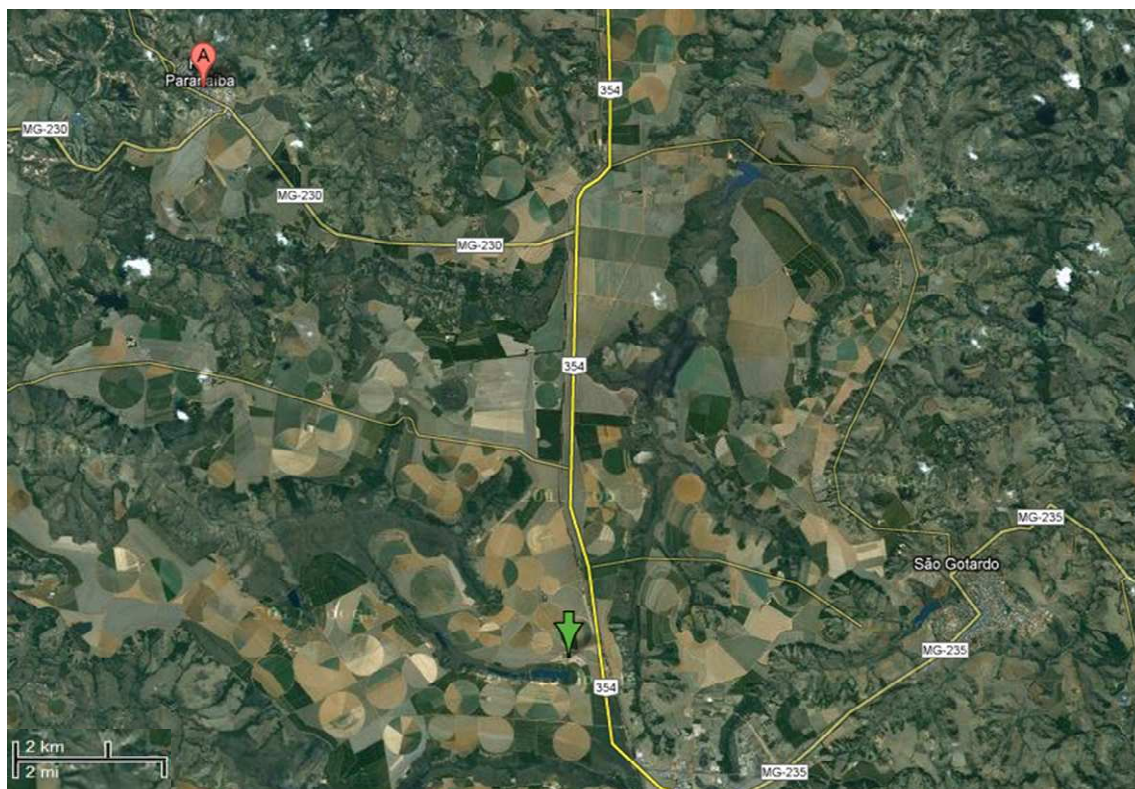


Figura 2. Localização da área experimental Sekita (seta) e município de Rio Paranaíba (circunferência)

3.2 Dados experimentais

3.2.1 Determinação das Variáveis meteorológicas

Foram realizadas medições contínuas, próxima à área agrícola e de Cerrado, sensores de temperatura do ar; umidade relativa do ar; velocidade de vento; direção de vento; pressão atmosférica; precipitação pluvial e radiação solar global.

Estes sensores estão conectados a um armazenamento de dados Vantage Pro2™ (Davis Instruments, Califórnia, USA), instalados em uma torre

meteorológica (Figura 3) localizado no meio da parcela experimental, no qual foram armazenadas as médias dos dados coletados a cada 60 minutos.



Figura 3. Estação meteorológica automática

3.2.2 Determinação de Efluxo de CO₂

A medida do efluxo de CO₂ consiste num sistema fechado dinâmico que absorve o CO₂ proveniente do solo por infravermelho, pelo sensor Infra Red Gas Analyzer (IRGA) LCSD010/S acoplado ao sistema portátil LCPRO+ da empresa ADC BioScientific, Figura 4, captando a amostra diretamente da câmara colocada sobre o solo. Este sistema é o caminho mais direto de medida de respiração que ocorre no solo. A exatidão do método para quantificação dos fluxos de CO₂ foi estudada extensivamente por Janssens et al. (2000) encontrando resultados satisfatórios.

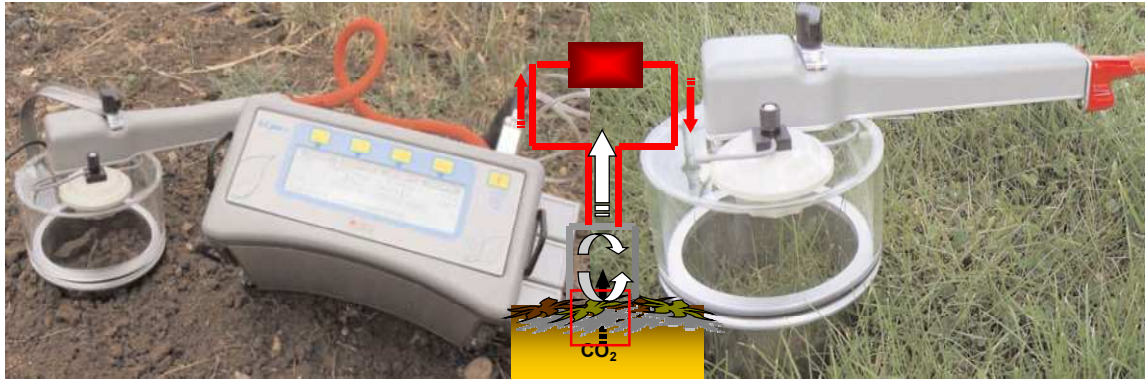


Figura 4. Sistema de medições de fluxos de CO₂

As medidas foram feitas a cada 20 dias em campanhas mensais, antes e durante o desenvolvimento das culturas e no Cerrado. Os canteiros com 1,5 m de largura (Figura 5) será sub-dividido em 5 sub-parcelas, sendo feitas cinco medidas em cada sub-parcela, totalizando vinte medidas.



Figura 5. Disposição dos anéis nas parcelas experimentais

3.2.3 Base e análise de dados

Os dados foram analisados, neste estudo, provenientes de medições durante todo o período do experimento. Essas medidas foram realizadas e coletadas quinzenalmente.

A partir dos dados meteorológicos coletados, foi realizada a análise das variações de sazonalidade média horária, diária e mensal. E o dado de temperatura do solo (°C) foi medido pontualmente, a uma profundidade de 5 cm, em conjunto com a efluxo do solo para verificar e avaliar a influência desse elemento no efluxo de CO₂ na superfície do solo ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Nas análises de efluxo de CO₂ na superfície do solo e balanço de carbono, foi feita análise temporal e confecções de gráficos a partir de uma base de dados, para avaliar a distribuição temporal e a magnitudes dos valores médios dos efluxos de CO₂ e estimar posteriormente o carbono alocado em um hectare por ano.

3.2.4 Clima

O clima da região do Alto Paranaíba, Município de São Gotardo, é classificado como Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen, ou seja, de savana, quente e úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com temperatura média anual entre 22°C e 24°C e máxima podendo ultrapassar 35° C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação dos efluxos de CO₂ na superfície do solo

O efluxo de CO₂ da superfície do solo na área experimental da lavoura de cenoura é apresentado na Figura 6. A variação média, máxima e mínima do efluxo de CO₂ foi de 0,98 ±0,29; 2,60 ±0,45 e 0,21 ±0,20 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente. As maiores magnitudes do efluxo ocorreram na pós colheita (123b), com o valor de 4,41 ±0,27 μmol m⁻² s⁻¹ e menores valores provavelmente devido as chuvas. Os efluxos de CO₂ na superfície do solo em lavoura de beterraba, Figura 7, foram superiores aos efluxos medidos em lavoura de cenoura, provavelmente devido a maior cobertura foliar. O valor da média, máxima e mínima foi de 1,96 ±0,33; 3,53 ±0,48 e 0,41 ±0,32 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente. Enquanto, que no Cerrado, Figura 8, os efluxos de CO₂ média, máxima e mínima foram da ordem de 2,09 ±0,31; 3,97 ±0,47 e 1,02 ±0,12 μmol m⁻² s⁻¹. Esses resultados estão próximos dos valores encontrados por Fernandes (2008), de 0,5 a 1,8 e 0,8 a 1,8 μmol m⁻² s⁻¹ em solo sob vegetação de cerrado e lavouras de soja e milho e de feijão irrigado, respectivamente.

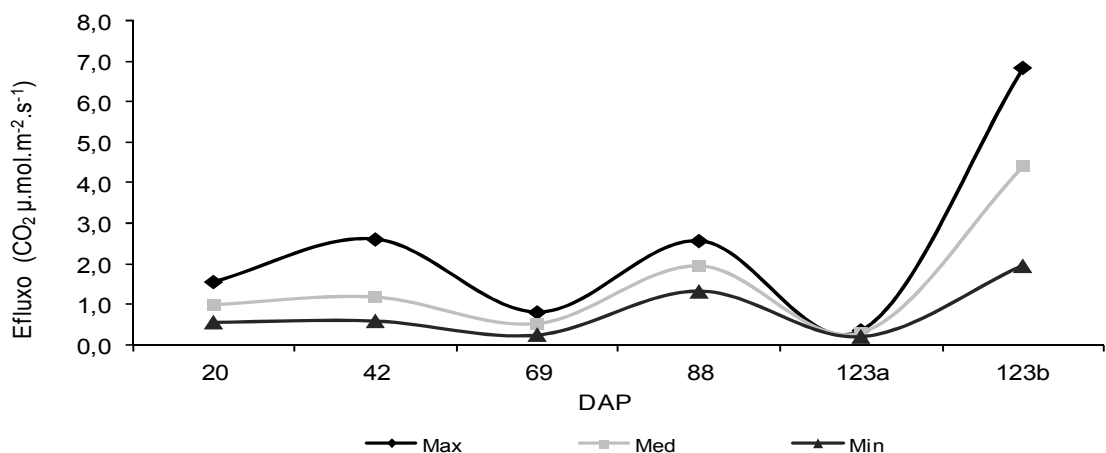


Figura 6. Variação do efluxo de CO₂ da superfície do solo sob cenoura

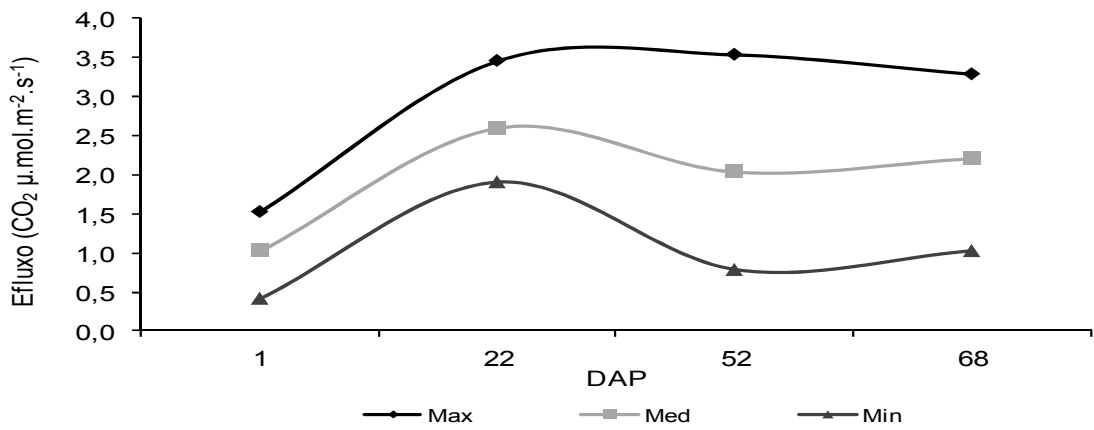


Figura 7. Variação do efluxo de CO₂ na superfície do solo sob beterraba

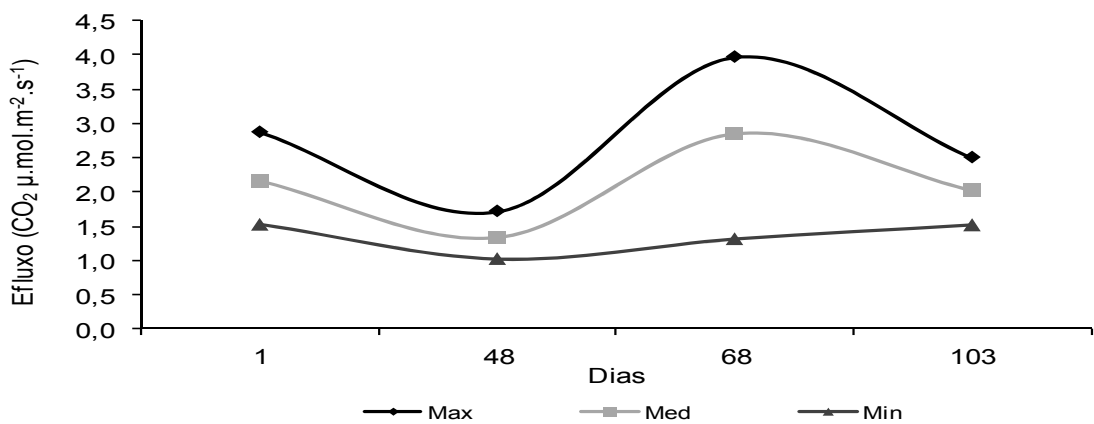


Figura 8. Variação do efluxo de CO₂ na superfície do solo sob cerrado

O CO₂ de referência (ref) na atmosfera e dentro da câmara (cam) superfície do solo é apresentado nas Figuras 9, 10 e 11 na área experimental da lavoura de cenoura, beterraba e cerrado, respectivamente. A variação média, máxima e mínima do CO₂ ref foi de 393; 431 e 353 ppm, respectivamente e CO₂ cam foi de 439; 518 e 393 na área da cenoura. Na beterraba a variação média, máxima e mínima do CO₂ ref foi de 375; 412 e 354 ppm, respectivamente e CO₂ cam foi de 467; 538 e 405. Enquanto, no Cerrado a variação média, máxima e mínima do CO₂ ref foi de 394; 428 e 372 ppm, respectivamente e CO₂ cam foi de 474; 581 e 418 ppm. Observa-se que na cenoura 123 dias após a semeadura, medidas pós-colheita (123b), um aumento considerado da concentração de CO₂ com máxima, média e mínima do CO₂ cam 612; 737 e 498 ppm, devido ao revolvimento do solo.

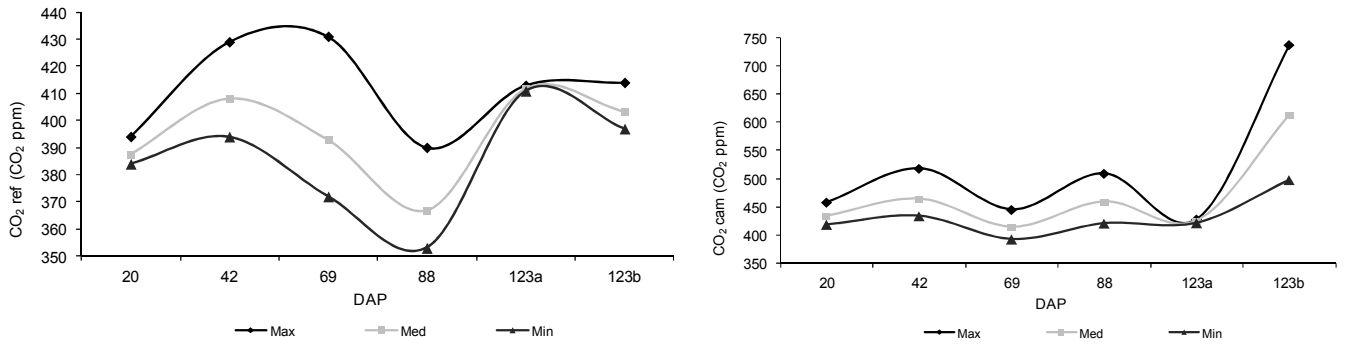


Figura 9. Variação do efluxo de CO₂ de referência (ref) e dentro da câmara (cam) na superfície do solo sob cenoura

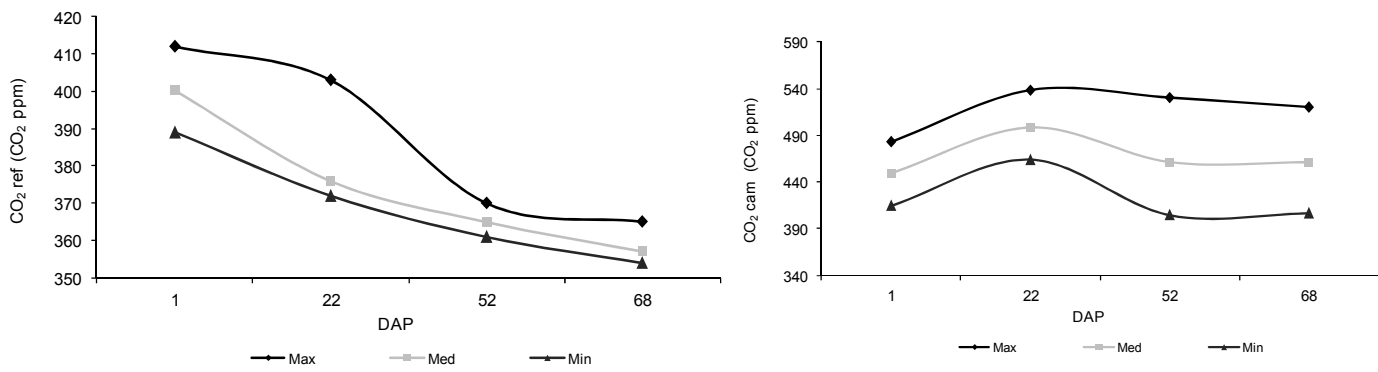


Figura 10. Variação do efluxo de CO₂ de referência (ref) e dentro da câmara (cam) na superfície do solo sob beterraba.

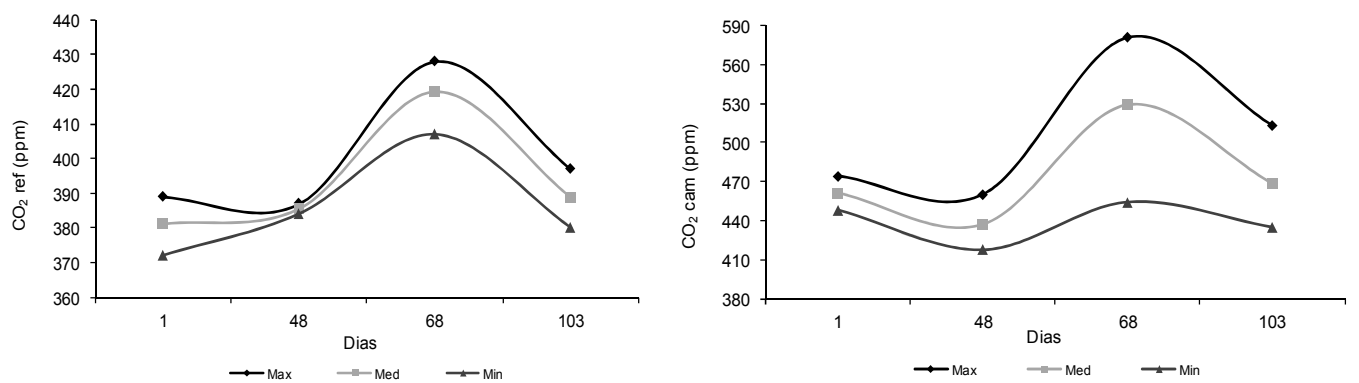


Figura 11. Variação do efluxo de CO₂ de referência (ref) e dentro da câmara (cam) na superfície do solo sob cerrado

Os efluxos das lavouras e Cerrado são apresentados na Figura 12, observa-se no decorrer do desenvolvimento das culturas uma maior oscilação das magnitudes dos efluxos comparado com cerrado, provavelmente devido à influência do manejo e irrigação. E uma menor amplitude no Cerrado por ser uma área sem interferência humana, sendo o fator clima um dos principais influentes durante as estações do ano. Na média o Cerrado teve maior média em relação às lavouras, com 53% de diferença a cenoura e 6% com a beterraba e entre as lavouras a beterraba 50% maior que a cenoura.

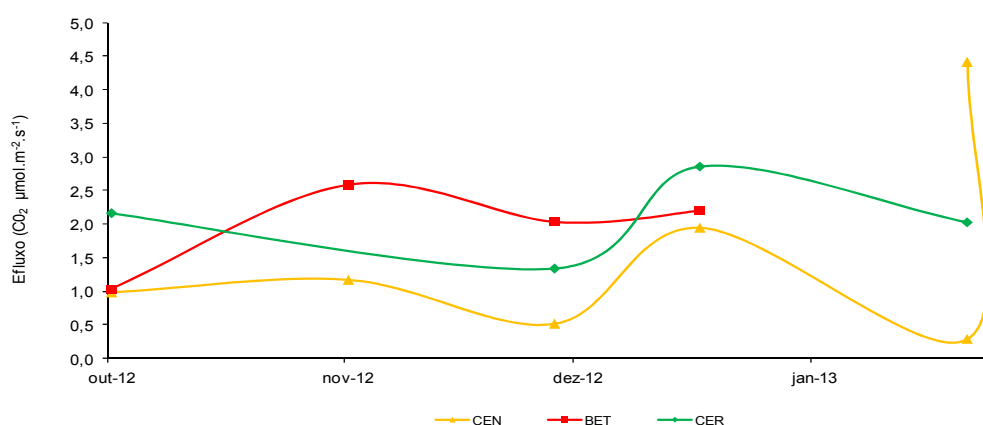


Figura 12. Variação do efluxo de CO₂ na superfície do solo nas lavouras e cerrado

Os efluxos de CO₂ acumulado durante o período de estudo (Figura 13) foi de 9,6; 8,9 e 5,6 t CO₂ ha⁻¹ no cerrado, beterraba e cenoura, respectivamente. Foram encontrados valores iniciais por La Scala Jr et al. (2005) valores entre 4,98 t CO₂ ha⁻¹ em plantio direto e 6,87 t CO₂ ha⁻¹ em plantio convencional. Esses valores são bem menores daqueles obtidos em Cerrado sensu stricto por Ferreira (2002), onde foram estimados fluxos anuais entre 9,01 a 14,2 t CO₂ ha⁻¹. Porém, os ambientes são distintos, em Cerrado sensu stricto prevalece à oxidação que se contrapõe as áreas úmidas, que são um ambiente de redução. Estes solos podem vir serem reservatórios importantes do CO₂ atmosférico.



Figura 13. Efluxo acumulado de CO₂ no solo

Os efluxos de carbono acumulado durante o período de estudo (Figura 14) foi de 2,6; 2,4 e 1,5 t C ha⁻¹ no cerrado, beterraba e cenoura, respectivamente. Foram encontrados valores iniciais por La Scala Jr et al. (2005) valores entre 1,35 t C ha⁻¹ em plantio direto e 1,85 t C ha⁻¹. No cerrado foi encontrado por Esses valores são bem menores daqueles obtidos em Cerrado sensu stricto por Ferreira (2002), onde foram estimados fluxos anuais entre 2,43 a 3,83 t C ha⁻¹.

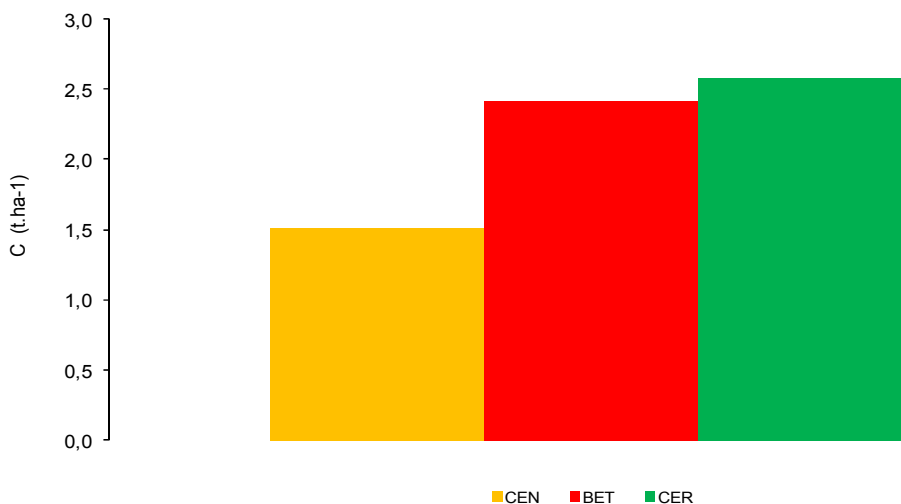
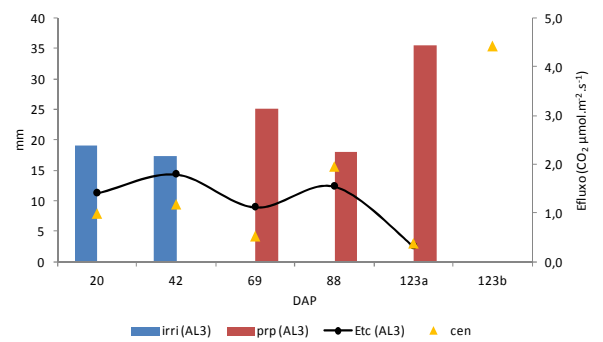
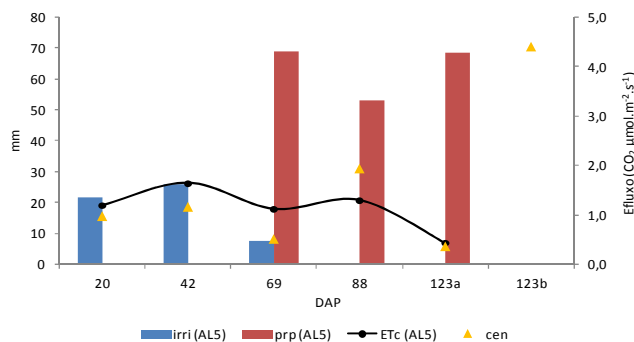
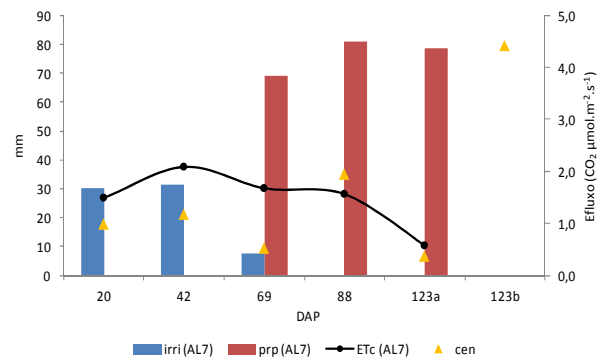
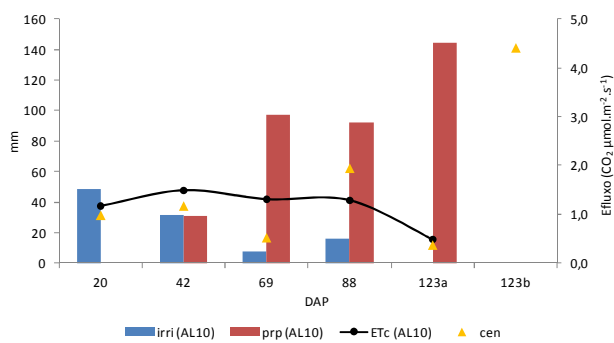


Figura 14. Efluxo de carbono no solo

A figura 15 apresenta a variação total precipitação pluvial (prp), irrigação (irr), evapotranspiração da cultura (ETc) e média da temperatura do solo (ts) e

dos efluxos de CO₂ na área de cenoura (cen) com dez a um dia antecedentes as leituras de efluxo de CO₂. Os maiores influência das variáveis meteorológicas e agrometeorológica nos efluxos de CO₂ do solo ocorreram nos dias três e um dia antecedentes as leituras. Observa-se diminuição nos efluxos de CO₂ e ETC com maior acumulado de chuva. A temperatura do solo não teve muita variação durante período de desenvolvimento da lavoura. Porém, antes da colheita (123a), e pós-colheita (123b) ficou evidente a influência da temperatura do solo no efluxo de CO₂.



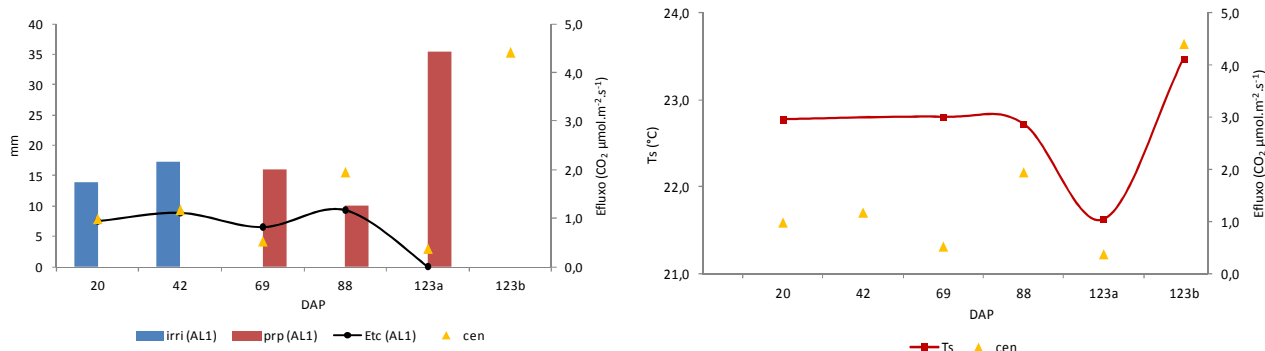
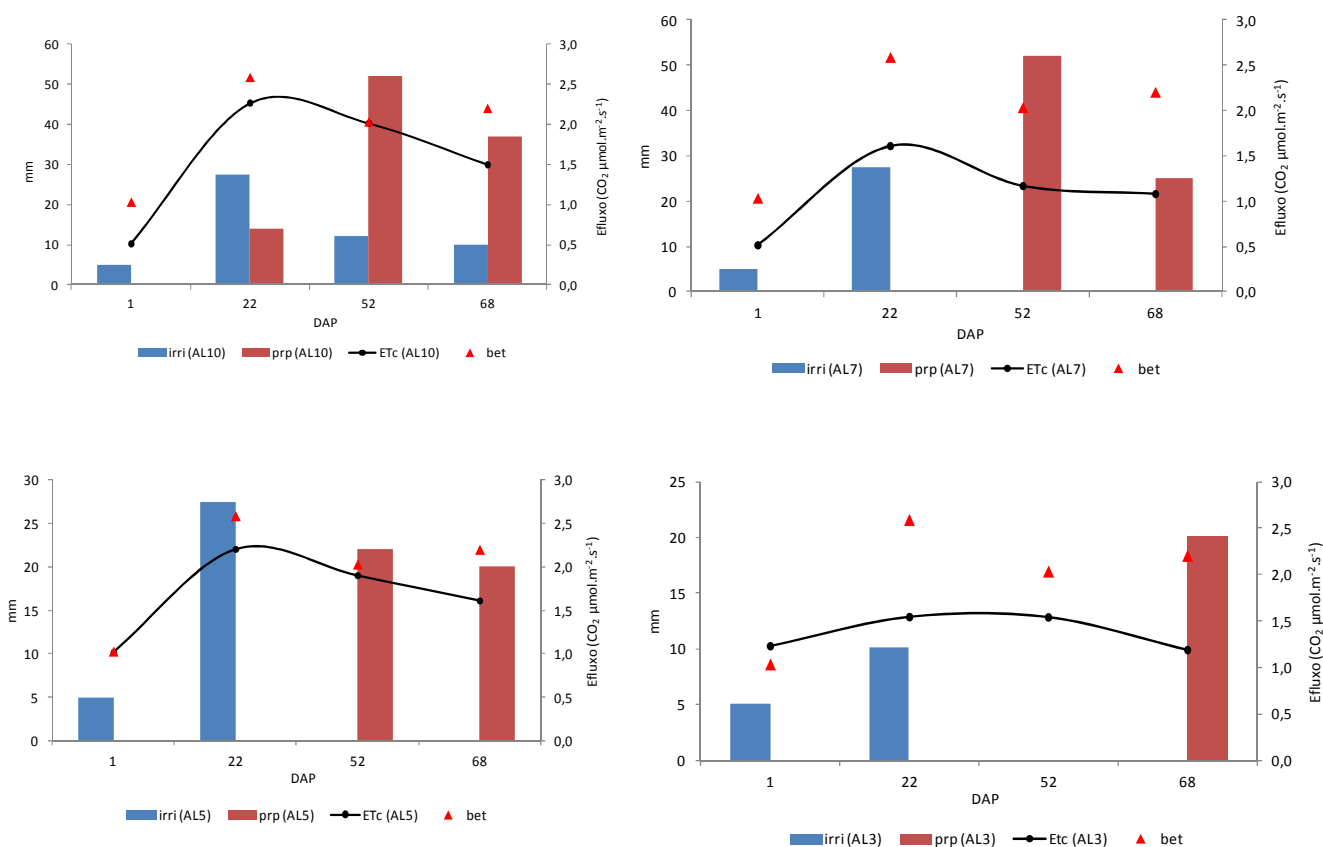


Figura 15. Total da precipitação pluvial, irrigação Evapotranspiração da cultura e média dos efluxos de CO_2 e temperatura na superfície do solo, em áreas de cenoura. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo.

Observa-se que na beterraba, Figura 16, nos dias de irrigação antecedente das leituras de efluxo de CO_2 do solo, as magnitudes dos efluxos elevam-se na maioria das leituras. A temperatura do solo teve maior influência nos efluxos de CO_2 com tendência de aumentar as magnitudes do efluxos.



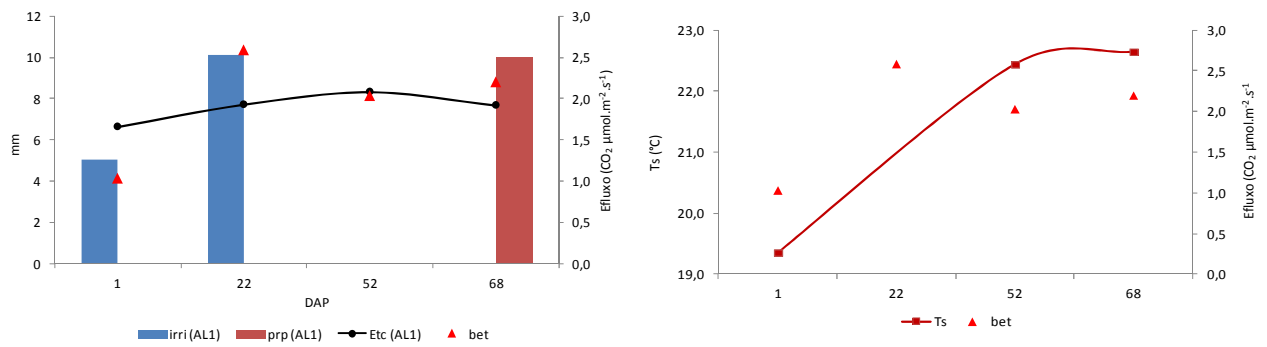
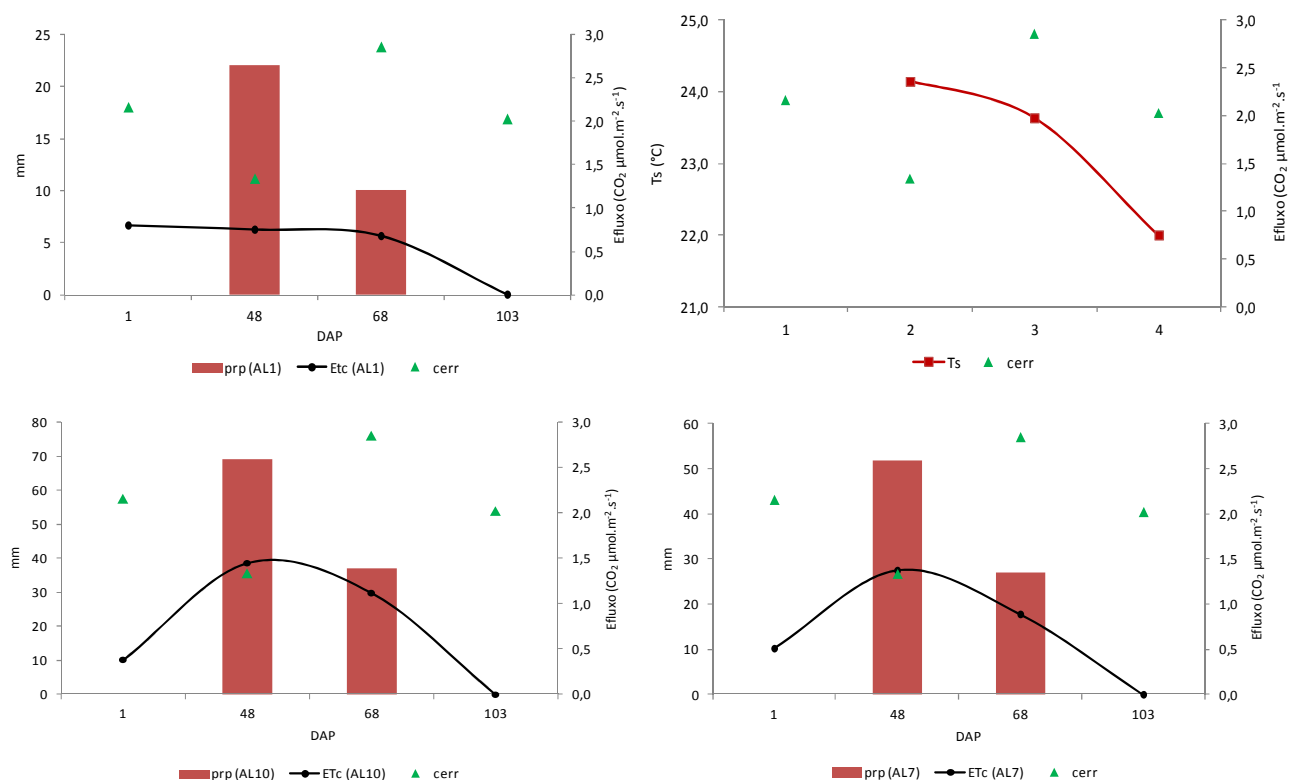


Figura 16. Total da precipitação pluvial, irrigação evapotranspiração da cultura e média dos efluxos de CO₂ e temperatura na superfície do solo, em áreas de beterraba. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo.

Observa-se que no ambiente Cerrado, Figura 17, no dia maior acumulado de chuva antecedente das leituras de efluxo de CO₂ do solo, a magnitude do efluxo diminui abruptamente no Cerrado e após, no decorrer da estação verão apresenta um ligeiro aumento, devido a uma maior deposição de serrapilheira, e com as primeiras chuvas elevam-se a atividade microbiana no solo. Em condições tropicais, no Cerrado, é comum no decorrer de cada ano, a intensificação da deposição de material orgânico na estação outono/inverno devido ao aumento do componente foliar. Enquanto, nas lavouras agrícolas é inversamente, pós tem menos serrapilheira.



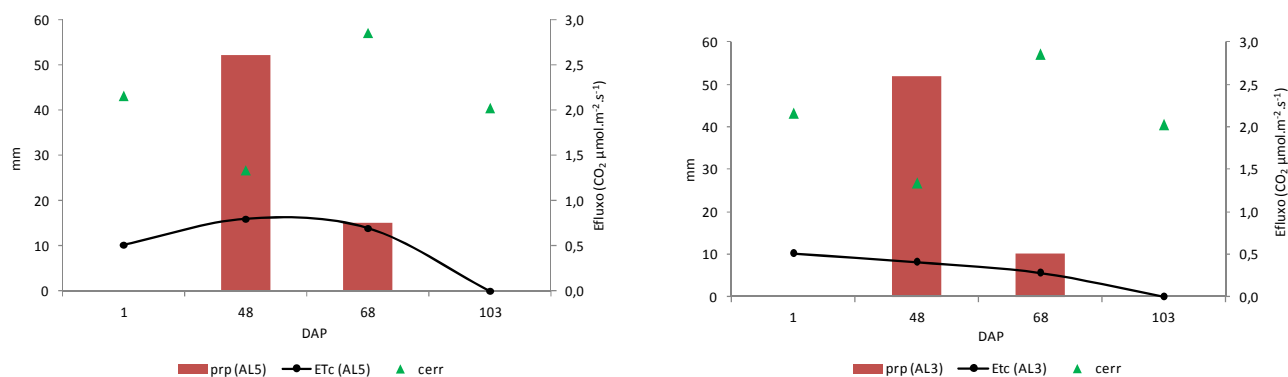


Figura 17. Total da precipitação pluvial e média dos efluxos de CO₂ e temperatura na superfície do solo, em áreas de cerrado. Antecedentes acumulados para 10, 7, 5, 3 e 1 dia as leituras efluxo.

Na tabela 3 é apresentado um resumo estatístico dos resultados de efluxos de CO₂ e temperatura do solo em área de Cerrado e lavouras. Os fluxos de CO₂ do solo no cerrado variaram de 3,97 a 1,02 μmol m⁻² s⁻¹, enquanto na cenoura a variação foi de 2,60 a 0,21 μmol m⁻² s⁻¹ e na beterraba foi de 2,58 a 1,03 μmol m⁻² s⁻¹. A amplitude dos efluxos de CO₂ foi da ordem de 2,95; 2,39 e 1,55 μmol m⁻² s⁻¹, Cerrado, cenoura e beterraba, respectivamente, ficando evidente a grande sazonalidade desses fluxos em ambas as áreas experimentais. O coeficiente de variação (CV) mostra que quanto menor seu valor maior será a homogeneidade dos dados, sendo o CV para Cerrado foi de 29,7%, cenoura de 65,7% e beterraba 33,8%, evidenciando uma maior variação na cenoura. O maior valor de desvio padrão (DP) foi na beterraba 0,66 μmol m⁻² s⁻¹, enquanto para cenoura e Cerrado foi de 0,64 e 0,62 μmol m⁻² s⁻¹, respectivamente. A temperatura do solo teve um maior CV na beterraba com 9% e desvio padrão 1,8 μmol m⁻² s⁻¹. O menor erro padrão (EP) foi na cenoura com 0,3 μmol m⁻² s⁻¹.

Tabela 3. Estatística descritiva de efluxos de CO₂ e temperatura do solo.

Estatística	Efluxos CO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)		Temperatura do solo (°C)	
	Cerrado	Cenoura/Beterraba	Cerrado	Cenoura/Beterraba
Média	2,09	0,98/1,96	23,3	22,5/21,5
Máximo	3,97	2,60/2,58	24,1	22,8/22,7
Mínimo	1,02	0,21/1,03	22,0	21,6/19,4
EP (±)	0,28	0,29/0,30	0,6	0,3/1,1
DP	0,62	0,64/0,66	1,1	0,6/1,8
CV (%)	29,7	65,7/33,8	5	3/9

Um resumo dos totais de precipitação pluvial e irrigação estão apresentados na tabela 4. Observou-se a precipitação pluvial de 791,4; 378,5 e 504,5 mm na área de cenoura, beterraba e cerrado. Verifica-se uma grande variabilidade espacial do regime de precipitação na região. A irrigação foi da ordem de 230,7 mm na cenoura e 150,5 mm na beterraba o maior volume foi na lavoura da cenoura devido o ciclo da cenoura ser 120 dias e da beterraba 90 dias.

Tabela 4. Totais de precipitação pluvial e irrigação no período

Mês	Precipitação pluvial (mm)		irrigação (mm)	
	Cerrado e beterraba	Cenoura	Cenoura	Beterraba
outubro	53,5	54	115	86
novembro	274	316	20,5	29,9
dezembro	51	202	55,3	34,6
janeiro	128	219,4	39,9	

4.2 Influência da temperatura do solo com o efluxos de CO₂ do solo

Na literatura encontram-se vários estudos em diferentes ecossistemas, que mencionam a dependência do fluxo de CO₂ com a temperatura do solo; entre eles Raich et al. (1992), Lloyd & Taylor (1994), Meier et al. (1996), Xu e Qi (2001), Fang e Moncrieff (2001) e Sotta et al. (2004). A variação média dos efluxos de CO₂ do solo e da temperatura está apresentada nas Figuras 18 a

20, para um dia de céu claro e sem chuva e irrigação antecedente a leitura. Estão bem evidenciadas a dependência das variações de temperatura do solo.

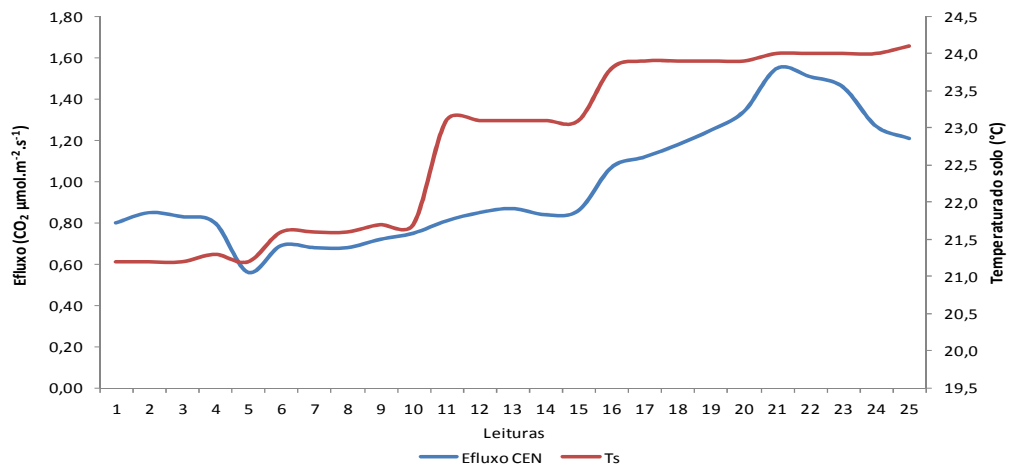


Figura 18. Variação do efluxos de CO₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela da cenoura

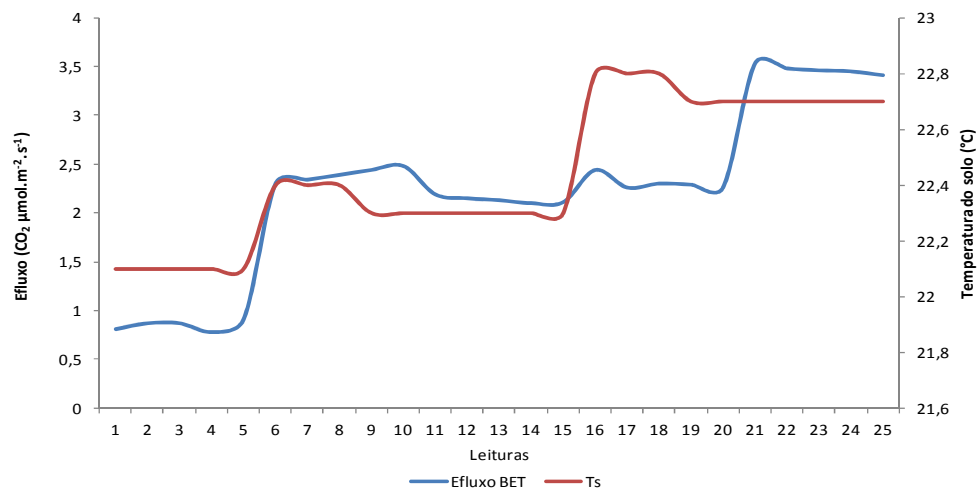


Figura 19. Variação do efluxos de CO₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela da beterraba

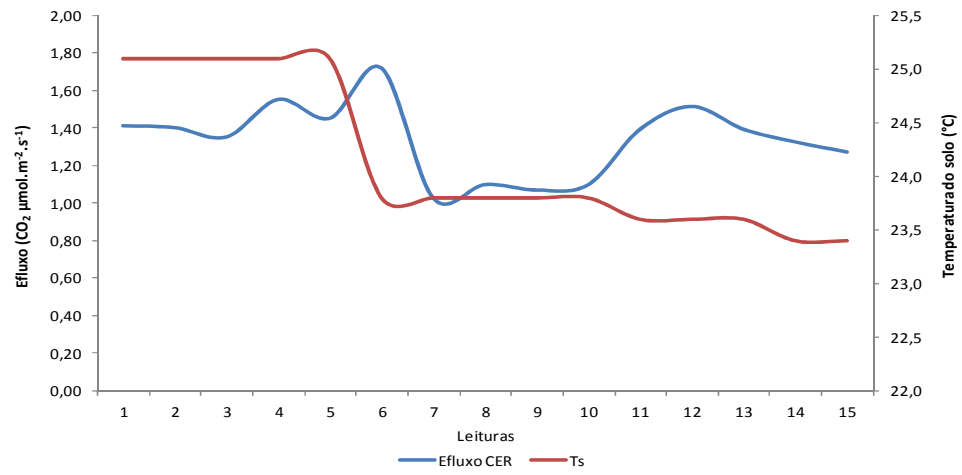


Figura 20. Variação do efluxos de CO₂ e temperatura do solo em um dia de céu claro na parcela do cerrado

5. CONCLUSÕES

Tratando-se de um estudo pioneiro sobre medições de efluxos de CO₂ entre as lavouras de ciclo anual cenoura e beterraba e vegetação de Cerrado, na região do Alto Paranaíba, estado de Minas Gerais, os resultados são fundamentais para se conhecer o balanço de carbono da cultura numa escala diária e sua relação com as condições ambientais.

As maiores magnitudes dos fluxos de CO₂ do solo, de um modo geral, ocorreram no Cerrado em relação às lavouras, devido a fatores de maior decomposição da matéria orgânica no solo. A maior variabilidade do efluxo ocorreu na lavoura da cenoura antes e pós colheita, devido o revolvimento do solo.

Os resultados desse trabalho indicam uma maior alocação de C ao longo do período estudado no Cerrado em comparação com as lavouras.

REFERÊNCIAS

- ABELSON, P. H.; ROWE, J. W. (1987). A New Agricultural Frontier. New York, Science, v. 235, n.4795, mar.1987, p. 1450-1451.
- ANDERSON, J.M. Responses of soils to climate-change. Advances in Ecological Research, Washignton, v.22, p.163-210, May 1992.
- BALL, A.S.; DRAKE, B.G. Stimulation of soil respiration by carbon dioxide enrichment of marsh vegetation. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v.30, n.8-9, p.1203-1205, Aug 1998.
- BASSO, L.F.C; KIMURA, H. Ecosystema terra preta - recriar o que já foi criado A terra preta dos índios da Amazônia. Rev. Ciênc. Admin., Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 230-250, dez. 2008.
- BEKKU, Y.; KOIZUMI, H.; OIKAWA, T.; IWAKI, H. Examination of four methods for measuring soil respiration. Applied Soil Ecology, Belfield, v.5, n.3, p.247-254, June 1997. Brasília, IPEA, 204p.
- BRUCE, J. P. et al. Carbon sequestration in soils. Journal of Soil and Water Conservation, v. 5, p. 382-389, 1999.
- CASTRO, E. A. Biomass, nutrient pools and response to fire in the Brazilian Cerrado. 1996. 118f. (MS Thesis) Oregon State University, Corvallis, 1996.
- CHAMBERS, J.Q.; TRIBUZY, E. S.; TOLEDO, L.C.; CRISPIM, B. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; ARAUJO, A.C.; KRUIJT, B.; NOBRE, A.D.; TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: partitioning of sources and low carbon use efficiency. Ecological Applications, Washington, v.14, n.4, p. S72-S88, Aug. 2004.
- COUTINHO, L. M. e LAMBERTI, A. Respiração edáfica e produtividade primária numa comunidade Amazônica de mata de terra-firme. Ciência e Cultura, 23, 411–419. 1971.
- COX, P.M.; BETTS, R. A.; JONES, C.D.; SPALL, S.A.; TOTTERDELL, I.J. Acceleration of Global Warming Due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model. *Nature* 408: p. 184-187, 2000.
- CUNHA, A. S. Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos cerrados. (Coord.) 1994.
- D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamento de eucalipto floresta. Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 407-422, abr./jun. 2011.

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D.A.; CURTIS, P.S.; DAVIDSON, E. A.; TRUMBORE, S. E.; AMUNDSON, R. Biogeochemistry. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, London, v. 408, n. 6814, p. 789-790, Dec. 2000.

DIAS, J. D. Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de florestas nativa da Amazônia. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 87 p. 2006.

DREWITT, G. B.; BLACK, T. A.; NESIC, Z.; HUMPHREYS, E. R.; JORK, E. M.; SWANSON, R.; ETHIER, G. J.; GRIFFIS, T.; MORGENSTERN, K. Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, New York, v.110, p.299-317, 2002.

DUGAS, W. A.; REIKOSKI, D. C.; KINIRY, J. R. Chamber and micrometeorological measurements of CO₂ and H₂O fluxes for three C₄ grasses. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 113-133, 1997.

ELLSWORTH, D. S.; HANSON, P. J.; LAW, B. E.; LUO, Y.; PREGITZER, K. S.; RANDOLPH, J.C.; ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, San Andreans, v.113, n.1/4, p.39-51, Dec. 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cenoura/Abertura.html>>. Acesso em: 13 jun. 2013.

EUSKIRCHEN, E.S.; CHEN, J.; GUSTAFSON, E.J.; MA, S., Soil respiration at dominant patch types within a managed northern Wisconsin landscape. *Ecosystems*. v.6, p. 595–607. 2003.

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v.33, n.2, p.155-165, Feb. 2001.

FEARNSIDE, P. M. Brazil Amazon Forest and the global carbon problem - reply. *Interciência*, Rio de Janeiro. v.11, n.2, p.58-64, mar / abr. 1986.

FERNANDES, Érika Barretto. Emissões de CO₂, NO_x e N₂O em solos sob diferentes cultivos na região do cerrado. 2008. 151 f., il. Tese (Doutorado em Ecologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Medidas do fluxo de CO₂ do solo pelos métodos da absorção alcalina e analisador de gás infravermelho em diferentes sistemas de manejo no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.

FERREIRA, E. A. B.; MEIRELLES, M. L.; FRANCO, A. C.; SANTOS, J. L. M. Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO₂ em solos sob Campo Limpo Úmido no Cerrado. In: Simpósio Nacional do Cerrado, 9, 2008, Brasília. Anais. Brasília, Embrapa-CPAC, 2008.

FERNANDES, E.B. Emissões de CO₂, NO_x e N₂O em solos sob diferentes cultivos na região do cerrado. Tese (Doutorado em Ecologia) Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008, 138p.

FOLLET, R. F.; SCHIMEL, D. S. Effect of tillage practices on microbial biomass dynamics. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 53, p. 1091-1096, 1989.

FRANK, A. B.; LIEBIG, M. A.; TANAKA, D. L. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. Soil Till. Res., v. 89, p. 78-85, 2006.

FROST, P; MEDINA, E.; MENAUT, JC; SOLBRIG, O; SWIFT, M & WALKER, B. Responses of savannas to stress and disturbance - A proposal for a collaborative program of research. Biology International - Special Issue - 10. . (eds.) (1985).

GLASER, B.; BALASHOV, E.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. Organic Geochemistry 31: p. 669-678, 2000.

GLASER, B.; HAUMAIER, L.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. The Terra Preta phenomenon - a model for sustainable agriculture in the humid tropics. Naturwissenschaften 88: p. 37-41, 2001.

GONÇALVES, P. H. L. Influência de variáveis biofísicas nas taxas de respiração de solos em floresta tropical da amazônia oriental. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 2009, 43p.

GRACE, J. Carbon cycle. Encyclopedia of Biodiversity, New York, v.1, p. 69-629, Mar. 2001.

GRACE, J. Understanding and managing the global carbon cycle. Journal of Ecology, New Delhi, v. 92, n. 2, p. 189-202, Apr. 2004.

GRACE, J., MALHI, Y., LLOYD, J., MCINTYRE, MIRANDA, A.C., MEIR, P. and H.S. MIRANDA, The use of eddy covariance to infer the net carbondioxide uptake of Brazilian rain forest, Global Change Biol., 2, 209-218, 1996.

HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do Cerrado. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2000.

- HEINRICH, D.; HERGT, M. Dtv-Atlas zur Oekologie. Muenchen:Deutscher Taschenbuch Verrlag. 286p. 1990.
- HENDRIX, P. F.; HAN, C. R.; GROFFMAN, P. M. Soil respiration in conventional and no-tillage agroecosystemas under different winter cover crop rotations. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v. 12, p. 135-148, 1988.
- HOUGHTON, R. A. Climate change: state of the art (2001-2007). Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 35, p. 313-347, 2007.
- HOUGHTON, R.A. Forest and the global carbon cycle: current storage and emission. In: WORKSHOP EMISSÃO VERSOS SEQÜESTRO UMA NOVA OPORTUNIDADE DE NEGOCIO PARA O BRASIL, 1994, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Ed. Campus, p.12 - 13. 1994.
- HOWARD, D.M.; HOWARD, P.J. A. Relationships between CO₂ evolution, moisture-content and temperature for a range of soil types. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, v. 25, n. 11, p.1537-1546, Nov. 1993.
- JANSSENS, I.A.; KOWALSKI, A.S.; LONGDOZ, B.; CEULEMANS, R. Assessing forest soil CO₂ efflux: an in situ comparison of four techniques. Tree Physiology, Berkeley, v.20, n.1, p.23-32, Jan. 2000.
- KERN, D.C. et al. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. . In: LEHMANN, J. et al. Dark earths: origin, properties, management. Amsterdam: Kluwer Academic , chap. 4. 2003.
- KERN, D.C. Geoquímica e pedogeoquímica de sítios arqueológicos com terra preta na floresta nacional de Caxiuanã (Portel-Pa). Tese de Doutorado. Centro de Geociencias, Universidade Federal do Para Belem, p. 124, 1996.
- KERN, D.C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T.E.; FRAZÃO, F.J.L.; SOMBROEK, W.; MYERS, T. P.; NEVES, E. G. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: J. Lehmann, D.C. Kern, B. Glaser, & W.I. Woods (eds) Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. p. 51-75, 2003a.
- KIRSCHBAUM, M. U. F. The temperature-dependence of soil organic-matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic-C storage. Soil Biology & Biochemistry, Oxford, 27, n. 6, p. 753-760, June 1995.
- KLINK, C. A. & MOREIRA, A. G. Past and Current Human Occupation, and Land Use. In: Oliveira, P.S. & Marquis, R. J., eds. The Cerrados of Brazil. Columbia University Press, New York. pp. 69-88. 2002.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, v. 304, p. 1623-1626, 2004.

LA SCALA Jr., N.; LOPES, A.; PANOSSO, A.R.; CAMARA, F.T. & PEREIRA, G.T. Soil CO₂ efflux following Rotary tillage of a tropical soil. *Soil Till. Res.*, 84:233-235, 2005.

LLOYD, J. e TAYLOR, A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315–323. 1994.

LUCHESE, E.B; FAVERO, L.O.B.; LENZI, E. Fundamentos da química do solo. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 182 p. 2001.

MACHADO, Pedro L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, V. 28, N. 2, p. 329-334, 2005.

MALHI Y.; WOOD, D.; BAKER, T.R.; et al. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests, *Global Change Biology* 12 (7): p. 1107-1138, 2006.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment* 22: p. 715-740. 1999.

MALHI, Y.; GRACE, J.. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide *TREE*, v. 15, n. 8, August 2000.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5860): p. 169-172. 2008.

MARTINS, F.R. e MATTHES, L.A.F. Respiração edáfica e nutrientes na Amazônia (Região de Manaus): floresta arenícola, campinarana e campina. *Acta Amazonica*, 8, 233–244. 1978.

MEDINA, E.; KLINGE, H.; JORDAN, C.F. Soil respiration in Amazonian rain forests in the Rio Negro Basin. *Flora*, 170, 240–250. 1980.

MEIR, P.; GRACE, J.; MIRANDA, A.C.; LLOYD, J. Soil respiration in a rainforest in Amazônia and cerrado in central Brazil. In: GASH, J.H.C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J.M.; VICTORIA, R. L. (Eds.). *Amazonian deforest and climate*. Wiley, Chichester. p. 319-330, 1996.

MEIR, P.; METCALFE, D.B.; COSTA, A.C.L.; FISHER, R.A. The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. *Philosophical Transactions the Royal Society B*. 363, 1849–1855 doi:10.1098/rstb.2007.0021. 2008.

METCALFE, D.B., MEIR, P., ARAGÃO, L.E.O.C., MALHI, Y., da COSTA, A. C. L., BRAGA, A.; GONÇALVES, P. H. L.; de ATHAYDES, J.; de ALMEIDA, S. S.; WILLIAMS, M. Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon. *Journal of Geophysical Research*, 112 (G04001), 2007.

MILLER, H.G. Dynamics of nutrient cycling in plantation ecosystems. In: BOWEN, G.D., NAMBIAR, E.K.S. *Nutrition of plantation forests*. Academic Press. London. p. 53-78. 516 p. 1984.

MORAES, J. C.; COSTA, J. de P. R.; ROCHA, E. J. P.; SILVA, I. M. O. Estudos hidrometeorológicos na bacia do rio Caxiuanã. In: Lisboa, P. L. B. (org). *Caxiuanã*. CNPQ/Museu Paraense Emilio Goeldi, Belém, p.85-95. 1997.

MOSCOVICH, F.A. Modelos de crecimiento y producción forestal. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estacion Experimental Agropecuaria Monte Carlo (EEA) Informe tecnico n. 55, p. 42, 2004.

MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; MCMURTRIE, R. E.; MCGILVRAY, A. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. *Global Change Biology*, Oxon, v.8, n.2, p.105-123, Feb. 2002.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P.; SHUKLA, J. Regional climate change and amazonian deforestation model. *Journal of Climate* vol. 4 , p. 957 – 988. 1991.

NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D.. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. *Estudos avançados*, São Paulo, v. 16, n. 45, Aug. 2002 . doi: 10.1590/S0103-40142002000200006.

NUNES, P.C. Influência do efluxo de CO₂ do solo na produção de forragem numa pastagem extensiva e num sistema agrosilvopastoril. Dissertação (Mestrado em Ciências Agricultura Tropical) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 68 p. 2003.

ONU. Disponível: <http://www.onu.org.br/populacao-mundial-deve-atingir-96-bilhoes-em-2050-diz-novo-relatorio-da-onu/>> Acesso em: 13 jun. 2013.

PANOSSO, A. R.; Variabilidade espacial da emissão de co₂, temperatura e umidade em latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistemas de colheita manual com queima e mecanizada. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Estadual de São Paulo, UNESP. Jaboticabal, SP, 2006, 53p.

PAUSTIAN, K. et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use and Management*, v. 13, p. 230-244, 1997.

PES, L. Z. Emissões de dióxido de carbono durante a implantação de culturas em dois sistemas de preparo em latossolo vermelho do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2012, 123p.

PES, L. Z. Fluxo de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do rio grande do sul. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2009, 91p.

PHILLIPS, O. L ; ARAGÃO, L.E.O.C.; et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323: 1344-1347. 2009.

PHILLIPS, O., BAKER, T.R. 2002. Rainfor Field Manual. Disponível em: <<http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/rainfor/projdocs.html>>. Acesso em: 07 abr. 2009.

PHILLIPS, O.L., MALHI, Y.; HIGUCHI, N.; LAURANCE, W. F.; NÚÑEZ, P. V.; VÁSQUEZ, R.M.; LAURANCE, S. G.; FERREIRA, L.V.; STERN, V.; BROWN, S. e GRACE, J. Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 282 (5388): 439-442, 1998.

PINTO JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L. Estimativa de Q10 por meio do efluxo de CO₂ no solo na estação seca numa floresta tropical de transição amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3a, 117-121, 2006.

POST, W.M.; Emanuel, W.R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159, 1982.

PREVEDELLO, C. L. Física do solo com problemas resolvidos. Curitiba: Salesward-Discovery, 446p.1996.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biochemical Cycles*. v. 9, p. 23-36, 1995.

RAICH, J.W. Effects of forest conversion on the carbon budget of a tropical soil. *Biotropica*, Malden, v.15, n.3, p.177-184, Oct 1983.

RAICH, J.W; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration relationship to vegetation and climate. *Tellus*, Copenhagen, v.44B, p.81-99, June 1992.

RAYMENT, M.B. Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux. *European Journal of Soil Science*, New Delhi, v. 51, p.107–110, Apr. 2000.

REZENDE, M. O. O. A importância da matéria orgânica do solo no ciclo do carbono. (parte I – O ciclo do carbono na natureza e a qualidade do solo do ponto de vista químico). Disponível em: www.unb.br/iq/enqamb/aimportanciadoC.pdf. Acesso em: 08 abr. 2009.

REICOSKY, D.C. Tillage-induced CO₂ emission from soil. Nutrient cycling in agroecosystems, v. 49, p. 273-285, 1997.

REICOSKY, D. C. Tillage methods and carbon dioxide loss: fall versus spring tillage. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. A. Management of carbon sequestration in soil. New York: CRC Press, 1997. p.99-111.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced carbon dioxide loss from different cropping systems. Soil & Tillage Research, v. 41, p. 105-118, 1997.

REICOSKY, D.C.; LINDSTROM M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. Agronomy Journal, v. 85, p. 1237-1243, 1993.

RESCK, D.V.S. Manejo de solos e sustentabilidade dos sistemas agrossilvipastoris na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1., 1996, Brasília, DF. Biodiversidade e produção sustentável de alimentos e fibras nos Cerrados: anais / Biodiversity and sustainable production of food and fibers in the tropical savannas: proceedings. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1996. p.81-89.

ROBERTS, J.M. Effects of temperature on soil respiration: a brief overview. Wallingford: Center for Ecology and Hydrology, 45 p. 2000.

ROSENZWEIG, C.; HIELLEL, D. Soil and global climate change: challenge and opportunities. Soil Science, New York, v.165, p. 47-56, 2000.

SAFFIGNA, P.G.; POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C; THOMAS, G.A. Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter in na Australian vertisol. Soil Biology & Biochemistry, v. 21, p. 759-765, 1989.

SALIMON, C. I.; DAVIDSON, E. A.; VICTORIA, R. L.; MELO, A. W. F. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. Global Change Biology. v.10, p.833-843, doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00776.x, 2004.

SÁNCHEZ, M.L.; OZORES, M.I.; LÓPEZ, M.J.; COLLE, R.; de TORRE, B.; GARCÍA, M.A.; PÉREZ, I. Soil CO₂ fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. Agricultural and Forest Meteorology. v.118. 85-95. 2003.

SCALA JÚNIOR, N. La; LOPES, A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil. Soil & Tillage Research, v. 62, p.163-166, 2001.

- SCHLESINGER, W. H. Carbon sequestration in soils. *Science*, v. 284, p. 2095, 1999.
- SCHUMACHER, M.V. Naehrstoffkreislauf in verschiedenen Bestaeden von *Eucalyptus saligna* (Smith), *Eucalyptus dunnii* (Maiden) und *Eucalyptus globulus* (Labillardière) in Rio Grande do Sul, Brasilien. 1995. 167f. Tese (Doutorado em Ecologia e Nutrição Florestal) - Universität für Bodenkultur, Wien, 1995.
- SEKITA. <<http://www.sekita.com.br/>> Acesso em: 10 jul. 2013.
- SINGH, J.S.; GUPTA, S.R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *Botanical Review*, New York, v.43, n.4, p.499-528, Aug. 1977.
- SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 70, p. 555-569, 2006.
- SMITH, K. A.; CONEN, F. Impacts of land management on fluxes of trace greenhouse gases. *Soil Use and Management*, v. 20, p. 255-263, 2004.
- SOMBROEK W.G.; Nachtergaele F.O. & Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio* 22: 417-426. 1993.
- SOTTA, E.D. Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central. Dissertação de (Mestrado em Ciências Florestais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 1998. 150p.
- SOTTA, E.D.; MEIER, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in central Amazon. *Global Change Biology*. v. 10, p. 601-617, 2004.
- SOUZA, J. S. Dinâmica espacial e temporal do fluxo de CO₂ do solo de terra firme na Amazônia Central. Dissertação (Mestrado em Biologia Tropical e Recursos Naturais) - Instituto de Pesquisa na Amazônia - INPA, Manaus, 64 p. 2004.
- SUBKE, J.A.; REICHSTEIN, M.; TENHUNEN, J.D. Explaining temporal variation in soil CO₂ efflux in a mature spruce forest in Southern Germany. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v.35, n.11, p.1467-1483, Nov. 2003.
- TIAN, H. Q.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D. W. Effect of Interannual Climate Variability on Carbon Storage in Amazonian Ecosystems, *Nature*, 396: p. 664-667, 1998.
- VALENTINI, C.M.A. Efluxo de CO₂ do solo de uma área de floresta de transição no noroeste de Mato Grosso. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 82 p. 2004.

WAGAI, R.; BRYE, K. R.; GOWER, S. T.; NORMAN, J. M.; BUNDY, L. G. Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 30, p. 1501-1509, 1998.

WANNER, H. Soil respiration, litter fall and productivity of tropical vegetation types. *Ecology*, Washington, v. 48, p. 652-653, Oct. 1979.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 66, p. 1930-1946, 2002.

WOFSY, S.C.; HARRISS, R.C, KAPLAN, W.A. Carbon dioxide in the atmosphere over the Amazon basin. *Journal of Geophysical Research*, 93, 1377–1387. 1988.

XU, M; QI, Y. Spatial and seasonal variations of Q(10) determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles* 15: 687-696. 2001.