

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

**SUCESSÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS EM SISTEMA DE
SEMEADURA DIRETA: IMPLICAÇÕES NA EMISSÃO DE
CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO**

Clariana Valadares Xavier

Engenheira Agrônoma

2018

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

**SUCESSÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS EM SISTEMA DE
SEMEADURA DIRETA: IMPLICAÇÕES NA EMISSÃO DE
CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO**

Clariana Valadares Xavier

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá

Coorientador: Prof. Dr. Daniel De Bortoli Teixeira

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

2018

X1s Xavier, Clariana Valadares
Sucessão e rotação de culturas em sistema de semeadura direta:
implicações na emissão de CO₂ e atributos do solo / Clariana
Valadares Xavier. – – Jaboticabal, 2018
91 p. : il

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Newton La Scala Júnior
Coorientador: José Eduardo Corá
Coorientador: Daniel De Bortoli Teixeira
Banca examinadora: Zigomar Menezes de Souza, Marcílio Vieira
Martins Filho, Teresa Cristina Tarle Pissarra, Ricardo de Oliveira
Bordonal
Bibliografia

1. Atributos do solo. 2. Resíduos da cultura. 3. Respiração do solo.
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.41

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: SUCESSÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS EM SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA:
IMPLICAÇÕES NA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO

AUTORA: CLARIANA VALADARES XAVIER
ORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR
COORDENADOR: JOSÉ EDUARDO CORÁ
COORDENADOR: DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA

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



Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas - Campinas/SP



Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Pesquisador Dr. RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL
CTBE/CNPEM / Campinas/SP



Prof.^a Dr.^a TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 05 de dezembro de 2018

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

CLARIANA VALADARES XAVIER – Nascida dia 05 de fevereiro de 1986 em Ponte Nova-MG, graduou-se Engenheira Agrônoma em janeiro de 2011 na Universidade Federal de Viçosa, MG. Durante o curso de graduação realizou diversos estágios, assim como outras atividades acadêmicas. Em agosto de 2012 iniciou o Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCAV/Unesp), no campus de Jaboticabal-SP, onde foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Ainda na mesma instituição, iniciou seu doutorado em março de 2015, sendo bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Durante sua vida acadêmica realizou diversas atividades como participação em simpósios e congressos, participação em grupos de pesquisa, condução de experimentos e estágio docência, além da publicação de resumos em anais de eventos e artigos científicos em revistas com corpo editorial.

*“Não haverá borboletas se a vida não passar por
longas e silenciosas metamorfoses”.*

Rubem Alves

*Á minha mãe Elizabeth Valadares que é meu amor
maior, minha base e minha inspiração e responsável
por tudo que sou.*

*Aos meus irmãos Clarissa Valadares e José Vinicius
Valadares por estarem sempre apoiando os meus
sonhos e torcendo por minha felicidade.*

DEDICO

*Ao meu companheiro de todos os momentos André
Montani, que esteve ao meu lado nesses anos me
apoando com muito carinho, paciência e amor.*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Sou muito grata por todas às experiências vividas nesta fase que se encerra e só poderia agradecer a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, pela vida, saúde e por guiar cada passo meu e de toda minha família. Por nunca deixar que eu perdesse a fé em dias melhores.

A família Valadares pelo apoio constante nesta caminhada, por ser tão única e ter tanto amor para doar.

A família do André, por todo carinho e apoio nesses anos no Estado de São Paulo.

A todos os amigos e colegas, que estando presentes ou não, sempre torceram pelo meu sucesso e sempre me incentivaram durante essa caminhada.

Ao professor Dr. Newton La Scala Júnior, pela orientação na condução deste estudo, por acreditar e incentivar meus sonhos e objetivos, pela compreensão e por agregar tanto na minha formação pessoal. E à sua família, em especial a Roberta, por ser tão gentil e prestativa.

A Mara Regina Moitinho, minha companheira de trabalho que me ensinou pacientemente tudo que poderia, que sempre esteve disposta a ajudar e a dar uma palavra de apoio e incentivo sempre com muito amor. Sua dedicação profissional e seu conhecimento são inspirações para mim. Este trabalho não seria possível sem o seu auxílio.

Ao Daniel de Bortoli Teixeira, pelo seu apoio, pela grande contribuição no desenvolvimento deste trabalho e pelos conselhos e sugestões.

Ao professor Dr. José Eduardo Corá pela coorientação deste trabalho, além da disponibilidade da área experimental para realização do estudo e do laboratório para realização das análises físicas do solo.

Aos professores membros da Banca de Qualificação: Dr. Gener Tadeu Pereira e Dr. Glauco de Souza Rolim, pela atenção e, principalmente, pelas sugestões e críticas que contribuíram para a qualidade final deste estudo.

Aos amigos e colegas de departamento, Elton da Silva Bicalho, Ricardo de Oliveira Bordonal, Eduardo Barretto de Figueiredo, Fernando Moraes, Elienai Ferreira

da Silva, Risely Ferraz de Almeida, Kamila Cunha de Meneses, Camila Vieira da Silva, Katharine Batista, Deise Nogueira e Miquéias Gomes dos Santos, pessoas especiais que tornaram meus dias mais alegres. Em especial, Gustavo André de Araújo pelos ensinamentos, pela companhia agradável, pelas risadas e “causos” e enorme ajuda sempre que necessário. E à Bruna de Oliveira Silva, por estar disposta a ajudar e pelo apoio em muitas madrugadas frias no campo.

Aos professores do Departamento de Ciências Exatas, que propiciam um ambiente agradável e saudável para o trabalho, além de serem pessoas admiráveis.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Adriana Elisabete Takakura, Vanessa Sayury Souza e Carlos Alberto Santa Capita (Carlão), em especial à Maria José Servidone Trizólio (Zezé), Shirley Aparecida Martineli de Sousa, Norival Ignácio pela atenção, pela amizade e pelo enorme carinho que demonstraram a mim todos esses anos.

Ao professor Everlon Rigobelo pela disponibilidade do laboratório, dos materiais e equipamentos para realização das análises microbiológicas do solo.

Ao Marcelo Barbosa pelo grande auxílio com as análises microbiológicas.

Às funcionárias da seção de Pós-Graduação da FCAV, pelo atendimento e auxílio.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade oferecida.

A comunidade de Jaboticabal, SP, que me presenteou com tantas pessoas especiais que sempre lembrarei com muito carinho.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo FAPESP nº. 2015/26289-2) pelo apoio financeiro para a condução deste estudo, sem o qual seria impossível a realização do projeto e do curso de doutorado.

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

Meu muito obrigada! Sentirei saudades!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	3
1.2.1 Gases de efeito estufa e agricultura	3
1.2.2 Fatores que influenciam a emissão de CO ₂ do solo e estratégias para sua mitigação	4
1.2.3 Sistema de semeadura direta (SSD) com sucessão e rotação de culturas	7
1.2.4 Influência da temperatura e umidade do solo sobre a variação temporal da emissão de CO ₂ sob SSD	10
REFERÊNCIAS	12
CAPÍTULO 2 – SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA COM SUCESSÕES E ROTAÇÃO DE CULTURAS: IMPLICAÇÕES SOBRE A VARIAÇÃO TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO	21
RESUMO	21
ABSTRACT	22
2.1 INTRODUÇÃO	23
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.2.1 Avaliação da FCO ₂ , temperatura e umidade do solo	27
2.2.2 Processamento e análise de dados	29
2.3 RESULTADOS	29
2.4 DISCUSSÃO	41
2.5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	45

CAPÍTULO 3 – EMISSÃO DE CO₂ ASSOCIADA AOS ATRIBUTOS DO SOLO E RESÍDUOS DE CULTURAS SOB SEMEADURA DIRETA NO SUDESTE DO BRASIL	51
RESUMO	51
ABSTRACT	52
3.1 INTRODUÇÃO	53
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	55
3.2.1 Caracterização das áreas em estudo	55
3.2.2 Avaliação da FCO ₂ , temperatura e umidade do solo	58
3.2.3 Determinação dos atributos químicos e físicos do solo	58
3.2.4 Análises microbiológicas	60
3.2.5 Determinação da massa seca e da relação C/N da palhada remanescente das culturas	61
3.2.6 Processamento e análise de dados	62
3.3 RESULTADOS	63
3.3.1 Relações multivariadas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m	63
3.3.2 Relações univariadas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m dos atributos retidos em CP1	68
3.4 DISCUSSÃO	72
3.4.1 Relações de interdependência entre a emissão de CO ₂ e os atributos do solo	72
3.4.2 Camada do solo de 0-0,10 m	72
3.4.3 Camada do solo de 0,10-0,20 m	76
3.5 CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	77
CAPÍTULO 4 – Implicações	83

SUCESSÃO E ROTAÇÃO DE CULTURAS EM SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA: IMPLICAÇÕES NA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO

RESUMO – Em áreas agrícolas, a emissão de CO₂ do solo (FCO₂) é um processo decorrente da interação de diversos fatores, tais como as condições de solo e clima. A adoção das práticas de manejos do solo e da cultura determina a intensidade desse processo. Embora os efeitos das atividades agrícolas sobre a FCO₂ serem reportados em vários estudos, ainda existe uma escassez de trabalhos que avaliem conjuntamente o efeito dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo sob a FCO₂ em sistema de semeadura direta estabelecido por mais de 16 anos. Assim, a hipótese deste estudo baseia-se no fato que às culturas de verão e entressafra em sistema de semeadura direta, ao fornecer diferentes aportes residuais, afetam os atributos do solo refletindo na variabilidade da emissão de CO₂. Objetivou-se quantificar e caracterizar a relação da emissão de CO₂ com os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo, bem como na variação temporal do gás ao final do ano agrícola 2015/2016, em área sob sistema de semeadura direta com rotação de culturas consolidado por mais de 16 anos. Para o estudo foi adotado o delineamento experimental em faixas, com três repetições. Os tratamentos foram constituídos pelos resíduos da colheita de três sequências de culturas de verão (rotação soja-milho, monocultura de milho e monocultura de soja), com cinco culturas de entressafra (milho, sorgo, crotalária, guandu e milheto). Ao final da colheita destas culturas foram avaliadas a FCO₂, a temperatura e a umidade do solo ao longo de um período de 51 dias. Após estas avaliações foram realizadas coletas de solo, na profundidade de 0-0,10 m e 0,10-0,20 m para a determinação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Por meio da análise multivariada observou-se que a caracterização do padrão da FCO₂ e dos demais atributos do solo, em função dos manejos com os resíduos das culturas de verão e de entressafra, difere de acordo com a camada analisada. Na camada de 0,10-0,20 m, não houve diferença entre os manejos estudados; porém, ao avaliar a camada superficial (até 0,10 m), os teores de argila, matéria orgânica, soma de bases, carbono da biomassa microbiana, a atividade enzimática da desidrogenase e amilase, além do grau de humificação da matéria orgânica, contribuíram para caracterizar as diferenças na emissão de CO₂. Desta forma, a variação na emissão é mais influenciada pela microbiota e pelos manejos na camada superficial do solo. Quando analisada a variação temporal da FCO₂, temperatura e umidade do solo, observou-se para a FCO₂ efeito significativo da interação entre o tempo e as sequências das culturas de verão ($F = 1,44$; $p = 0,02$), bem como do tempo com as culturas de entressafra ($F = 2,26$; $p < 0,01$). Para a U_{solo} ($F = 1,83$; $p < 0,01$) e T_{solo} ($F = 1,32$; $p = 0,01$) houve interação tripla entre as sequências das culturas de verão, as culturas de entressafra e ao longo do tempo. A variação temporal da FCO₂ foi relacionada à sua maior sensibilidade às alterações na umidade do solo, independentemente do manejo avaliado. Entretanto, não se observou relação significativa entre a emissão de CO₂ e a temperatura do solo.

Palavras-chave: atributos do solo, resíduos da cultura, respiração do solo

CROP SUCCESSION AND ROTATION IN THE NO-TILLAGE SYSTEM: IMPLICATIONS FOR SOIL CO₂ EMISSION AND SOIL ATTRIBUTES

ABSTRACT – In agricultural areas, soil CO₂ emission (FCO₂) is a process due to the interaction of several factors, such as soil and climate conditions. The adoption of soil and crop management practices determines the intensity of this process. Although the effects of agricultural activities on FCO₂ have been reported in several studies, few of them jointly assess the effect of physical, chemical, and biological soil attributes on FCO₂ under a no-tillage system established for more than 16 years. Thus, the hypothesis of this study is that summer and off-season crops under the no-tillage system, when providing different residual inputs, affect soil attributes, reflecting on FCO₂ variability. The experiment was carried out in strips with three replications. Treatments consisted of crop residues from three summer crop sequences (soybean-corn rotation, corn monoculture, and soybean monoculture) with five off-season crops (corn, sorghum, crotalaria, pigeon pea, and millet). At the end of harvest, FCO₂, soil temperature (T_{soil}), and soil moisture (M_{soil}) were assessed over a period of 51 days. Subsequently, soil samples were collected at depths of 0–0.10 and 0.10–0.20 m for determining the physical, chemical, and biological soil attributes. The multivariate analysis showed that the characterization of the pattern of FCO₂ and other soil attributes, as a function of the management with summer and off-season crop residues, differed according to the analyzed soil layer. In the 0.10-0.20 m layer no difference was observed between the studied treatments. However, the contents of clay, organic matter, the sum of bases, microbial biomass carbon, dehydrogenase and amylase enzyme activity, and the humification index of organic matter in the most superficial soil layer (up to 0.10 m), contributed to characterize the differences in FCO₂. Thus, the variation in FCO₂ is more influenced by microbiota and the management in the most superficial soil layer. When the temporal variation of FCO₂, T_{soil}, and M_{soil} was analyzed, we observed for FCO₂ a significant effect of the interaction between time and summer crop sequences ($F = 1.44$; $p = 0.02$), and time and off-season crops ($F = 2.26$; $p < 0.01$). For M_{soil} ($F = 1.83$; $p < 0.01$) and T_{soil} ($F = 1.32$; $p = 0.01$), a triple interaction was observed between summer crop sequences, off-season crops, and time. The temporal variation of FCO₂ was related to its higher sensitivity to changes in M_{soil} regardless of the assessed management. However, no significant relationship was observed between FCO₂ and T_{soil}. Therefore, management systems under no-tillage are more balanced, i.e. less prone to sudden changes in their physical, chemical, and biological conditions. Thus, the average daily values of FCO₂ tend to be stable, and variations in gas dynamics over time is given only under precipitation conditions and its effect on the soil moisture and pore ratio.

Keywords: crop residues, soil attributes, soil respiration

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 (Capítulo 2). Precipitação (ppt) e temperatura média do ar (°C) durante o período de condução do experimento. As flechas indicam os dias de avaliação da emissão de CO ₂ , temperatura e umidade do solo.	26
Figura 2 (Capítulo 2). Disposição das parcelas constituídas pelas sequências de culturas de verão e pelas culturas de entressafra. Adaptado de Marcelo (2011). ...	26
Figura 3 (Capítulo 2). Sistema LI-8100 (a) interligado à câmara de solos (b), sensor de temperatura (c) e umidade do solo (d) (Moitinho, 2017).	28
Figura 4 (Capítulo 2). Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da emissão de CO ₂ em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.	32
Figura 5 (Capítulo 2). Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da temperatura do solo em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.	35
Figura 6 (Capítulo 2). Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da umidade do solo em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.	37
Figura 7 (Capítulo 2). Regressão linear entre emissão de CO ₂ e a umidade do solo nos manejos com as sequências de verão: MM (a), SM (b) e SS (c).	39
Figura 8 (Capítulo 2). Regressão linear entre emissão de CO ₂ e a umidade do solo nos manejos com as sequências de entressafra: crotalária (a), guandu (b), milheto (c), milho (d) e sorgo (e).	40
Figura 1 (Capítulo 3). Localização da área experimental.	56
Figura 2 (Capítulo 3). Área experimental: constituída das sucessões das sequências das culturas de verão com as culturas de entressafra.	57
Figura 3 (Capítulo 3). Imagens ilustrativas da coleta das amostras de solo para as análises químicas.	59
Figura 4 (Capítulo 3). Coleta das amostras físicas do solo.	60
Figura 5 (Capítulo 3). Imagens ilustrativas da metodologia para a determinação do carbono da biomassa microbiana no solo.	60
Figura 6 (Capítulo 3). Imagens ilustrativas da metodologia para a determinação da atividade enzimática da desidrogenase no solo.	61

Figura 7 (Capítulo 3). Gráfico biplot contendo os atributos do solo e os tratamentos avaliados. FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Macro = macroporosidade do solo; Micro= microporosidade do solo; Dsolo = densidade do solo; Argila = teor de argila; Us = umidade do solo; Ts = temperatura do solo; pH = potencial hidrogeniônico do solo; MOS = teor de matéria orgânica do solo; SB = soma de bases trocáveis no solo; Ca= teor de cálcio no solo; CBM = carbono da biomassa microbiana no solo; COAM = carbono do solo associado aos minerais; Desidrogenase = atividade da desidrogenase no solo; Amilase= atividade da amilase no solo; Hlifs = grau de humificação da matéria orgânica do solo. 65

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 (Capítulo 2). Análise da variância para a emissão de CO ₂ (FCO ₂), temperatura (Tsolo) e umidade do solo (Usolo).	30
Tabela 2 (Capítulo 2). Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de entressafra e dias de avaliação para a emissão de CO ₂ do solo (FCO ₂).	31
Tabela 3 (Capítulo 2). Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de inverno e dias de avaliação para a temperatura do solo (Tsolo).	34
Tabela 4 (Capítulo 2). Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de inverno e dias de avaliação para a umidade do solo (Usolo).	36
Tabela 1 (Capítulo 3). Quantidade de palhada remanescente no solo (t/ha) e relação C/N das palhadas das sequências de verão e culturas de entressafra avaliadas no estudo.	62
Tabela 2 (Capítulo 3). Correlação entre os atributos do solo e os dois primeiros componentes principais (CP1-CP2) na camada de 0-0,10 m.	66
Tabela 3 (Capítulo 3). Correlação entre os atributos do solo e os dois primeiros componentes principais (CP1-CP2) na camada de 0,10-0,20 m.	66
Tabela 4 (Capítulo 3). Emissão média de CO ₂ (FCO ₂), Teor de Argila (Argila), Teor de matéria orgânica (MOS), Soma de bases trocáveis (SB), Carbono da biomassa microbiana (CBM), Atividade da desidrogenase (Desidrogenase), Atividade da amilase (Amilase) e Grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) do solo, nas sequências de verão (SV), e culturas de entressafra (CE) na camada de 0-0,10 m.	69
Tabela 5 (Capítulo 3). Desdobramento da interação entre as sequências de verão e as culturas de entressafra para a FCO ₂	70
Tabela 6 (Capítulo 3). Emissão média de CO ₂ do solo (FCO ₂), Densidade do solo (Dsolo), Teor de argila (Argila), Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e Grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) do solo, nas sequências de verão (SV), e culturas de entressafra (CE) na camada de 0,10-0,20 m.	71

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 INTRODUÇÃO

Diante da constante preocupação com os impactos ambientais oriundos de práticas inadequadas de uso e manejo dos solos, e do crescimento acelerado do setor agrícola – responsáveis por emissões significativas dos gases do efeito estufa (GEE) (Bayer et al., 2006), governos têm estudado formas de reduzir tais emissões sem afetar o crescimento econômico do setor.

As atividades antrópicas afetam significativamente a emissão de CO₂, pois interferem na dinâmica da decomposição do carbono orgânico do solo (Bernoux et al., 2005). Os fatores que aumentam às entradas de C (influxo), e/ou diminuem a respiração (efluxo) favorecem o acúmulo de C no solo. Desta forma, um sistema de manejo que possibilite a adição de resíduos vegetais em conjunto com a retenção de C no solo, torna-se uma prática essencial para aumentar a capacidade de dreno do CO₂ atmosférico e mitigação do aquecimento global (Amado et al., 2001).

A manutenção da cobertura do solo, por meio dos resíduos vegetais, contribui com a conservação da água, favorecendo a infiltração da mesma no solo (Lal, 1986), além do incremento no teor de matéria orgânica do solo (MOS), que leva ao aumento da fertilidade (Sidiras e Pavan, 1985), propiciando a reciclagem de nutrientes no solo (Lopes et al., 1987), por meio do aumento das atividades enzimáticas e do carbono da biomassa microbiana. Além destas vantagens, a rotação de culturas pode aumentar a produtividade e, conseqüentemente, a rentabilidade líquida na propriedade agrícola como um todo (Sodré Filho et al., 2004).

O Plano ABC têm como objetivo estimular a agricultura de baixo carbono, com a adoção de 8,0 milhões de ha de sistema de plantio direto (SPD), contribuindo assim com a mitigação de 16 a 20 milhões de MgCO₂ eq. Em área de expansão, foram plantadas 9,97 milhões de ha utilizando SPD calculados com base nos dados da Plataforma ABC baseados no Censo Agropecuário (2006 e 2017), correspondendo à 125% de alcance da meta, contribuindo com a mitigação de 18,25 milhões MgCO₂ eq, e um alcance de 101% da meta quando utilizados coeficientes definidos no Plano ABC.

Alguns trabalhos têm sido realizados visando investigar o aporte de nutrientes ao solo associado à relação C/N dos resíduos deixados sob a superfície, por diversas rotações de culturas em sistema de semeadura direta (SSD) (Aita e Giacomini, 2003; Giacomini et al., 2003; Teixeira et al., 2011). Estudos também relacionam esta cobertura do solo a menores valores da emissão de CO₂ (Lal, 2015, Paustian et al., 2016).

Sabe-se que a produção de CO₂ no interior do solo é um processo complexo associado às atividades biológicas como a decomposição da matéria orgânica, e controlado pela temperatura e umidade do solo (Epron et al., 2006; Concilio et al., 2009; Ryu et al., 2009).

A MOS atua na ciclagem e na retenção de nutrientes (Six et al., 2006), na limitação ao crescimento microbiano e em sua taxa de respiração (Lal, 2004). Manejos com maior aporte de material, como a rotação de cultura com a manutenção da cobertura do solo (Conceição et al., 2005), influenciam o ciclo do carbono, e consequentemente, às trocas gasosas entre o solo e à atmosfera. Por essa razão, a atuação dos microrganismos é indispensável (Moreira e Siqueira, 2006) para os processos como: o estoque e dinâmica de carbono, e a ciclagem de nutrientes – os quais são liberados durante a decomposição/mineralização do material orgânico.

Já o transporte do CO₂ do interior do solo até a superfície, ocorre por meio de mecanismos de difusão e fluxo de massa, e esses mecanismos variam em função de textura, estrutura e teor de umidade do solo (Ball e Smith, 1991; Kang et al., 2000). Maior porosidade do solo (macroporos) e menor densidade (D_{solo}) facilitam as trocas de gases entre o solo e à atmosfera, favorecendo a respiração e, por conseguinte, aumento nas emissões de CO₂ do solo (Fang et al., 1998; Capeche et al., 2004; Brady et al., 2012).

No entanto, ainda há poucos estudos direcionados sobre as implicações dos sistemas consolidados de semeadura direta na dinâmica da emissão de CO₂ e atributos físicos, químicos e biológicos do solo, bem como na variação temporal do gás CO₂ em função de diferentes aportes residuais de culturas gramíneas e leguminosas.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Gases de efeito estufa e agricultura

Os gases do efeito estufa como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFCs) e vapores d'água são responsáveis por manter a temperatura média do planeta entre 15 a 18 °C. Sem a presença destes gases na atmosfera a temperatura média da Terra seria 30 °C menor, o que inviabilizaria a vida atualmente existente (Smith et al., 2003). Contudo, o incremento da concentração dos GEE na atmosfera tem elevado a temperatura da biosfera terrestre, e consequentemente, contribuído para às mudanças climáticas globais (Forster et al., 2007).

As concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) em 2011, foram de 391 ppm (partes por milhão), 1.803 ppb (partes por bilhão) e 324 ppb, excedendo os níveis pré-industriais (1.750) em cerca de 40%, 150% e 20%, respectivamente (IPCC, 2013).

Apesar do potencial de aquecimento global do N_2O e do CH_4 ser em torno de 298 e 23 vezes maior que o de CO_2 , respectivamente (Cerri et al., 2007), o gás carbônico nos últimos 200 anos é o que mais contribuiu para o efeito estufa adicional em razão da grande quantidade emitida na atmosfera, sendo considerado o mais importante GEE antropogênico (IPCC, 2014). Algumas práticas agrícolas, principalmente aquelas referente às mudanças do uso e manejo dos solos, estão estreitamente relacionadas com essas emissões (Cerri et al., 2007).

A agricultura é apontada mundialmente como uma importante fonte emissora de GEE do solo para à atmosfera, mas também como o setor que será mais afetado, uma vez que as alterações climáticas interferem no regime de chuvas. Mesmo que a quantidade de chuva fique inalterada, com as elevações da temperatura média anual a evapotranspiração será intensificada, o que irá diminuir o teor de umidade presente no solo (IPCC, 2014).

No Brasil, às mudanças no uso da terra respondem por mais de dois terços do total das emissões, e se for considerado os gases emitidos pelo processo de desmatamento, o Brasil sobe da 17ª para à 5ª posição no ranking dos países com as

maiores taxas de emissão (IPCC, 2014). Estima-se que no cenário nacional, 75% das emissões de CO₂ sejam provenientes das atividades agrícolas inadequadas (Cerri et al., 2007).

Existem vários estudos recomendando estratégias para redução da concentração de CO₂ na atmosfera, e consequente mitigação do aquecimento global (Moitinho et al., 2013; Silva-Olaya et al., 2013; Lal, 2015; Bayer et al., 2016; Paustian et al., 2016).

1.2.2 Fatores que influenciam a emissão de CO₂ do solo e estratégias para sua mitigação

As principais estratégias para mitigar as emissões de CO₂ baseiam-se na redução das taxas de desmatamento e queimadas, na diminuição da queima de combustíveis fósseis, no manejo adequado do solo e, finalmente, estratégias de maximização do sequestro de carbono no solo (Cerri et al., 2007). Nesta perspectiva, há dois mecanismos que direcionam às estratégias para a redução das emissões de CO₂ do solo: uma relacionada ao desenvolvimento de alternativas de uso da terra que promovam a mitigação de CO₂ (Lal, 2004; Panosso et al., 2009), e a outra ao entendimento dos processos de emissão e absorção por diferentes ecossistemas naturais (Bayer et al., 2006; Six et al., 2006).

Sabe-se que a emissão de CO₂ em solos agrícolas é resultante da interação entre os processos de produção de CO₂ em seu interior e o seu transporte para a atmosfera (Ball e Smith, 1991; Kang et al., 2000), sendo influenciado pelas condições ambientais (Smart e Peñuelas, 2005; La Scala et al., 2006; Ussiri e Lal, 2009; Moitinho et al., 2013; Silva-Olaya et al., 2013), pelas práticas de manejo do solo (Teixeira et al., 2010; La Scala et al., 2012; Silva et al., 2014; Iamaguti et al., 2015) e por sua relação com os atributos do solo (La Scala et al., 2009).

Os fatores associados aos processos físicos e químicos também exercem influência na emissão de CO₂ do solo, sendo eles a densidade do solo (Xu e Qi, 2001), o preenchimento de água nos poros (Smart e Peñuelas, 2005) e o teor de matéria orgânica (Dominy et al., 2002; Kemmitt et al., 2008; Lal, 2009).

Nos poros do solo a concentração de CO₂ é significativamente maior do que na

atmosfera, na ordem de 10 a 100 vezes (Moreira e Siqueira, 2006), sendo assim estudos têm investigado formas de manejo que conservem e incrementem o teor de C no solo (Six et al., 2000; Bayer et al., 2000; Bayer et al., 2006; Campos, 2006; Lal, 2008).

O aumento de carbono no solo acontece quando o balanço entre entradas e saídas deste é positivo (Janzen, 2004). As principais vias de entradas de C no solo, em áreas agrícolas, são decorrentes da deposição de resíduos vegetais e ao uso de fertilizantes minerais e orgânicos no solo (Ajwa e Tabatabai, 1994; Paustian et al., 1997). Já às vias de saídas principais ocorrem por meio da remoção, quando do processo de erosão, lixiviação de C orgânico dissolvido (COD) e da emissão de CO₂ (Davidson e Janssens, 2006). É desejável que para sequestro de C no solo, o aumento deste elemento ocorra sob formas mais estáveis, com baixa taxa de degradação (Lal, 2008).

Sistemas de manejo que possibilitem baixa movimentação do solo representam uma oportunidade a mais de sequestro de quantidades significativas de CO₂, e consequente auxílio na mitigação das emissões de GEE (Bayer et al., 2006; Campos, 2006). Contudo, além da baixa mobilização, o sistema deve propiciar aumento da matéria orgânica do solo, do qual ocasionará o sequestro de carbono, e este só é efetivo quando se incorpora na rotação de culturas, espécies eficientes no processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN), como as espécies para fins de adubação verde. Alguns estudos estimam-se que para cada 10 unidades de carbono sequestrado no solo faz-se necessário imobilizar 1 unidade de nitrogênio, sendo essencial que as espécies de leguminosas com alta FBN sejam utilizadas no sistema para a efetiva disponibilidade de nitrogênio (Six et al., 2000; Bayer et al., 2000; Séguy et al., 2001; Sisti et al., 2004), pois para acumular C torna-se fundamental acumular N.

O potencial destes sistemas conservacionistas em favorecer o aumento do estoque de carbono no solo, quando comparado aos sistemas convencionais, mínimo ou reduzido é abordado em vários estudos sendo relacionado diretamente ao tempo de adoção do sistema, e em geral este incremento é observado nas camadas mais superficiais do solo (Nascimento et al., 2003; De Resende et al., 2006; Razafimbelo et al., 2006; Cerri et al., 2007; Luca et al., 2008; Galdos et al., 2009; Pes, 2009;

Canellas et al., 2010).

A MOS desempenha um papel fundamental na manutenção da capacidade produtiva do solo, visto que atua na taxa de agregação e na dinâmica da água do solo (Roscoe et al., 2006), na ciclagem e na retenção de nutrientes (Six et al., 2006), na limitação ao crescimento microbiano e em sua taxa de respiração (Lal, 2004). Manejos com maior aporte de material orgânico (biomassa), a exemplo do SPD (Gentil, 1995), associado a outras práticas agrícolas, como a rotação de cultura com manutenção da cobertura do solo (Conceição et al., 2005), influenciam o ciclo do carbono, e consequentemente, às trocas gasosas entre o solo e à atmosfera.

Uma grande quantidade do carbono orgânico do solo está presente na MOS (Carvalho et al., 2010). No processo de decomposição da MOS, os microrganismos do solo utilizam o carbono necessário para o metabolismo e o restante é perdido por respiração na forma de CO_2 (Six et al., 2006). Portanto a compreensão dos processos relacionados à dinâmica de produção, estabilização e decomposição da MOS, como a qualidade do carbono orgânico e a biomassa microbiana, torna-se imprescindível para propor estratégias mitigadoras para a emissão de CO_2 do solo.

A comunidade microbiana é um fator-chave na dinâmica da MOS, uma vez que controla a disponibilidade de nutrientes e o acúmulo ou a liberação de carbono no solo. Neste âmbito a relação C/N, por ser fundamental na decomposição da MOS, proporciona informações sobre seu estado de humificação (Luchese et al., 2002; Moreira e Siqueira, 2006). Ou seja, pode-se determinar a intensidade da atividade microbiológica, mediante aos valores dessa relação (Sousa, 2003).

Ao avaliar o efeito simultâneo de atributos físicos e químicos do solo na estabilização da MOS, Lamparter et al. (2009) verificaram que a taxa de mineralização de carbono diminuiu com a redução do pH e com o aumento da relação C/N. Já Wick et al. (2012), ao estudar as relações existentes entre os atributos do solo e FCO_2 , constataram que a matéria orgânica disponível explicou 60% da variabilidade espacial da emissão de CO_2 , uma vez que a emissão foi favorecida pela qualidade do substrato.

A matéria orgânica é importante para a produtividade e qualidade do solo, e seu processo de decomposição é afetado, além da relação C/N, por fatores climáticos assim como pelo tipo de solo e sistemas de manejo adotado. Esta humificação pode

ser avaliada por espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (FIL), uma técnica eficiente em analisar MOS em solos, sem a utilização de tratamentos físico-químicos.

Para Panosso et al. (2011), a matéria orgânica humificada não foi a principal fonte de carbono em FCO₂ em áreas de cana-de-açúcar. O fornecimento de energia utilizado pelos microrganismos estaria relacionado ao carbono lábil nestas áreas, sendo que o incremento do carbono não lábil (aumento de Hlifs) resultaria na redução da FCO₂.

Outros fatores que influenciam na FCO₂ estão relacionados com a diversidade e a dinâmica da microbiota do solo. O carbono associado à biomassa microbiana do solo (CBM) representa a parte viva da MOS (Jenkinson e Ladd, 1981), composto por diversos microrganismos que atuam como agentes de transformação da matéria orgânica do solo, assim como na ciclagem de nutrientes (Wardle, 1992; Barbosa, 2015).

Uma vez que às enzimas no solo são na sua maioria produzidas a partir de microrganismos, a determinação dessas enzimas indica a diversidade funcional da microbiota (Cordeiro et al., 2012). Estas estão relacionadas a importantes funções na ciclagem de nutrientes em ecossistemas, sendo, portanto, um indicador importante da atividade microbiológica do solo, devido a sua sensibilidade as alterações nos substratos oriundos de diferentes agroecossistemas, conforme reportado por outros estudos (Dodor e Tabatabai, 2003; Sanomiya e Nahas, 2004; Guedes, 2013; Barbosa, 2015).

1.2.3 Sistema de semeadura direta (SSD) com sucessão e rotação de culturas

A adoção de práticas conservacionistas, a exemplo do sistema de semeadura direta (SSD), tem por finalidade diminuir e/ou controlar os impactos ambientais causados por manejos inadequados do solo e da cultura, sendo um método eficaz diretamente relacionado a sustentabilidade ambiental e econômica (Costa, 2005; Pes, 2009). A implantação deste sistema vem aumentando significativamente no cenário nacional (Febrapdp, 2012).

O SSD consiste na mínima movimentação do solo, na cobertura vegetal

permanente do solo, na sucessão de culturas durante o ano e na rotação de culturas. Esta última consiste no plantio alternado de diferentes espécies em sequência, em uma mesma área, de acordo com um plano definido. A implantação do sistema de rotação de culturas deve ter objetivos duradouros para que esta integração produza efeitos favoráveis ao sistema, proporcionando melhoria na qualidade do solo - que pode ser observada por meio de indicadores físicos, químicos e biológicos, além de permitir melhor utilização dos insumos agrícolas.

A manutenção da cobertura do solo por meio dos resíduos vegetais favorece a conservação do solo e da água, melhorando sua estrutura, o que contribui com a aeração e a infiltração de água no solo, permitindo assim uma maior penetração das raízes (Lal, 1986), além do incremento no teor de matéria orgânica do solo (MOS), aumento da fertilidade (Sidiras e Pavan, 1985) e redução da erosão hídrica, propiciando a reciclagem de nutrientes no solo (Lopes et al., 1987). Além destas vantagens a rotação de culturas pode aumentar a produtividade e, conseqüentemente, a rentabilidade líquida na propriedade agrícola como um todo (Sodré Filho et al., 2004).

A composição de um sistema eficiente de rotação de culturas inicia-se com a escolha das espécies, deseja-se que às mesmas possuam facilidade de manejo, rápido estabelecimento, elevada produção de matéria seca, sistema radicular profundo e eficiência na ciclagem de nutrientes (Lopes et al., 2004). Além de propiciar melhorias nas propriedades do solo, principalmente no incremento dos teores de carbono orgânico, disponibilizando assim os nutrientes às culturas em sucessão de acordo com suas demandas.

A escolha das espécies vegetais também dependerá das condições climáticas da região, é de fundamental importância que às culturas sequenciais empregadas produzam resíduos em quantidade e qualidade adequadas para proporcionar uma cobertura por maior período de tempo possível (Ceretta et al., 2002). Porém, sabe-se que em condições de clima tropical, a taxa de decomposição dos resíduos é elevada e os teores de carbono orgânico no solo são baixos, por isso é indispensável o conhecimento de sua dinâmica.

Fatores bióticos e abióticos afetam a decomposição dos resíduos orgânicos, a exemplo do teor de matéria orgânica do solo (Dick, 1983), da temperatura (Campbell

et al., 1981), da umidade (Rannels e Waggoner, 1992), da localização dos resíduos (Smith e Sharpley, 1990), da quantidade (Brown e Dickey, 1970) e da qualidade do material adicionado (Palm e Sanchez, 1991), isto ocorre devido a ação desses fatores sobre a atividade decompositora dos microrganismos.

As características químicas do resíduo vegetal também influenciam na decomposição e na mineralização de N e P, destacando-se a relação C/N (Vigil e Kissel, 1988), o teor de N (Janzen e Kucey, 1988) e os teores de lignina e polifenóis (Palm e Sanchez, 1991). Dentre as espécies empregadas na rotação de culturas sob SSD, ressaltam-se às leguminosas pela estreita relação carbono/nitrogênio, o que leva a uma rápida decomposição dos seus resíduos (Giacomini et al., 2003).

Já os resíduos deixados pelas gramíneas decompõem-se mais lentamente e permanecem mais tempo sobre o solo, o que pode ser atribuído a sua relação C/N mais alta e ao alto teor de lignina (Wisniewski e Holtz, 1997). Todavia, no sistema sob SSD, pode ocorrer um fornecimento inadequado de N às plantas, quando comparado ao sistema convencional, em razão da alta relação C/N desses materiais, ocasionando assim menor decomposição dos resíduos culturais e imobilização do N mineral da solução do solo pelos microrganismos (Salet et al., 1997; Amado et al., 2002). Em contrapartida, esses resíduos deixados na superfície do solo pelas gramíneas, devido a sua lenta decomposição, permanecem ali por tempo superior quando comparado às leguminosas, e assim protegem o solo contra o impacto das gotas de chuva, que por sua vez diminuem a erosão (Wisniewski e Holtz, 1997).

A proporção de C e N nos solos se estabiliza a uma relação C/N próxima a dos microrganismos, responsáveis pela ciclagem desses elementos no solo. Estudos apontam correlação positiva entre o C/N do solo com o C/N da microbiota (Booth et al., 2005), uma vez que na composição da biomassa de fungos prevalecem compostos com baixa proporção de N, ao passo que às bactérias são abundantes em proteínas (Kogel-Knabner, 2002).

A relação C/N geralmente em solos agrícolas varia entre 10 e 12 (Anderson e Domsch, 1989), dependendo das formas de manejo adotadas. Alguns trabalhos têm sido realizados a fim de analisar a relação C/N e o acúmulo de nutrientes dos resíduos da cultura deixados sob a superfície do solo (Aita e Giacomini, 2003; Giacomini et al., 2003; Teixeira et al., 2011), assim como a decomposição e a liberação destes

nutrientes por várias rotações de culturas em SSD.

Cabe ressaltar que a adoção do SSD apresenta resultados significativos relacionados ao sequestro de carbono no solo, contudo estes são influenciados pelas condições edafoclimáticas locais (Lal, 2015; Bayer et al., 2016; Paustian et al., 2016).

Ao determinar as emissões de dióxido de carbono e os estoques de carbono orgânico no solo influenciados por sistemas de manejo, em experimentos conduzidos no sul do Brasil num Argissolo Vermelho distrófico típico, Costa et al. (2008) observaram que sistemas como o de semeadura direta associado às culturas com alta adição de resíduos vegetais ricos em C e N, resultam em balanço positivo de C no solo.

Já Corazza et al. (1999), na região do Cerrado, encontraram uma taxa de acúmulo de $1,43 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no SPD adotado por 15 anos. Séguy et al. (2001) em estudos conduzidos sob condições de clima subtropical fresco e úmido também observaram significativas taxas de sequestro de C no solo ($1,3$ a $2,4 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

1.2.4 Influência da temperatura e umidade do solo sobre a variação temporal da emissão de CO₂ sob SSD

As condições edafoclimáticas são relevantes na intensidade da emissão de CO₂ do solo, possibilitando assim variações diárias nas taxas de emissão. A temperatura e a umidade do solo controlam o processo de emissão propiciando efeitos sobre a atividade microbiana e de raízes (Tsai et al., 1992; Schlömer et al., 2013; Xie et al., 2015). Após longo período de seca, os eventos de precipitação contribuem com o aumento da atividade microbiana, ao mesmo tempo em que nas épocas mais úmidas, o excesso de água pode eliminar oxigênio presente no solo, originando uma condição de anaerobiose (Teixeira et al., 2012).

A FCO₂ é afetada pela condição de temperatura e umidade do solo e pelo tipo de manejo adotado. O preparo convencional, devido suas operações de aragem e gradagem, acarretam uma alta atividade microbiana, proporcionando um incremento na taxa respiratória e consequentemente maior liberação de CO₂ do solo. Estes processos por sua vez são regulados pela temperatura e umidade do solo (Sá et al., 2001).

No sistema convencional após o preparo do solo, a presença de resíduos de culturas anteriores é insuficiente, e por isso esse tipo de sistema é passível de grandes variações térmicas diárias nas camadas mais superficiais do solo (Signor et al., 2014). Já em sistemas conservacionistas, a maior cobertura proveniente dos resíduos vegetais remanescentes sob o solo, o comportamento é inverso. Esses resíduos possibilitam a formação de uma barreira física entre o solo e a atmosfera, possibilitando um microclima com condições mais estáveis de temperatura e auxiliando na manutenção da umidade do solo (Ussiri e Lal, 2009).

A quantidade e a distribuição dos resíduos vegetais no solo podem influenciar a temperatura da superfície, sendo que em uma cobertura de aproximadamente 70%, a taxa de evaporação do solo se reduz para cerca de 25% e a temperatura pode ser reduzida em até 4 °C (Tominaga et al., 2002). A temperatura do solo sofre variações diárias e sazonais, principalmente nos horizontes superficiais, o que torna esta variável um dos fatores mais importantes no processo de emissão de CO₂ (Silva-Olaya et al., 2013).

Diversos autores têm investigado que o incremento na emissão de CO₂ correlaciona-se diretamente com o aumento da temperatura do solo (Fang et al., 1998; Ussiri e Lal, 2009; Acreche et al., 2013; Karhu et al., 2014). Tal fato pode ser compreendido em razão da temperatura do solo apresentar variações diárias e sazonais nas camadas superficiais, onde há uma maior concentração da atividade microbiana do solo (Moreira e Siqueira, 2006; Six et al., 2006).

O conteúdo de umidade presente no solo também é um fator de extrema importância para a avaliação da FCO₂. A variável umidade do solo regula os processos de transporte (Ball e Smith, 1991; Kang et al., 2000), produção (Epron et al., 2006; Lal, 2009; Carbonell-Bojollo et al., 2012), e emissão de CO₂ do solo para a atmosfera (Linn e Doran, 1984; La Scala et al., 2006; Schwartz et al., 2010), além do fato que, dependendo do conteúdo de umidade, tais processos podem ser tanto beneficiados quanto inibidos, uma vez que interfere na difusão de gases e na atividade microbiana (Lal, 2001).

Esses efeitos são resultantes principalmente da interação do conteúdo de umidade e do espaço poroso do solo (Ordóñez-Fernández et al., 2008). A umidade e a aeração estão inversamente relacionadas pelo movimento de substituição da água

e do ar. As alterações na constituição do ar do solo regulam o crescimento e a atividade da microbiota, pois o CO₂ e o O₂ são necessários ao seu crescimento (Tsai et al., 1992).

REFERÊNCIAS

Acreche MM, Portocarrero R, Chalco Vera J, Danert C, Valeiro AH (2014) Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech** 16:195-199.

Aita C, Giacomini SJ (2003) Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:601-612.

Ajwa HA, Tabatabai MA (1994) Decomposition of different organic materials in soils. **Biology and Fertility of Soils** 18:175-182.

Amado TJC, Bayer C, Eltz FLF, Brum ACR (2001) Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:189-197.

Amado TJC, Mielniczuk J, Aita C (2002) Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:241-248.

Anderson TH, Domsch KH (1989) Ratios of microbial biomass carbon to total organic-carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry** 21:471-479.

Ball BC, Smith KA (1991) Gas movement. In: Smith KA, Mullins CE (Eds.) **Soils analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekerp, p. 511-549.

Barbosa MA (2015) **Atributos microbiológicos do solo em sistemas de manejo de longa duração**. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Bayer C, Gomes J, Zanatta JA, Vieira FCB, Dieckow J (2016) Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil and Tillage Research** 161:86-94.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J (2006) Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research** 86:237-245.

Bernoux M, Cerri CC, Volkoff B, Carvalho MCS, Feller C, Cerri CEP, Eschenbrenner V, Piccolo MC, Feigl BJ (2005) Gases do efeito estufa e estoque de carbono nos solos: inventário do Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia** 22:235-46.

Booth MS, Stark JM, Rastetter E (2005) Controls on nitrogen cycling in terrestrial ecosystems: A synthetic analysis of literature data. **Ecological Monographs** 75:139-157.

Brady NC, Weil RR (2012) **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. São Paulo: Bookman. 716 p.

Brown PL, Dickey DD (1970) Losses of wheat straw residue under simulated field conditions. **Soil Science Society of America** 34:118-121.

Carbonell-Bojollo RM, Repullo-Ruibérriz MA, Rodríguez-Lizana A, Ordóñez-Fernández R (2012) Influence of soil and climate conditions on CO₂ emissions from agricultural Soils. **Water Air Soil Pollution**, v. 223, p. 3425–3435, 2012.

Campbell CA, Myers RJK, Weier KL (1981) Potentially mineralizable nitrogen, decomposition rates and their relationship to temperature for five Queensland soils. **Australian Journal of Soil Research** 19:323-332.

Campos BC (2006) **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Canellas LP, Busato JG, Dobbs LB, Baldotto MA, Rumjanek VM, Olivares FL (2010) Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science** 61:375-383.

Capeche CL, Macedo JR, Melo AS, Anjos LHC (2004) **Parâmetros técnicos relacionados ao manejo e conservação do solo, água e vegetação perguntas e respostas**. Rio de Janeiro: Embrapa. 16 p. (Comunicado Técnico).

Carvalho JLN, Avanzi JC, Silva MLN, De Mello CR, Cerri CEP (2010) Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:277-290.

Ceretta CA, Basso CJ, Flecha AMT, Pavinato PS, Vieira FCB, Mai MEM (2002) Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:163-171.

Cerri CEP, Sparovek G, Bernoux M, Easterling WE, Melillo JM, Cerri CC (2007) Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola** 64:83-99.

Conceição PC, Amado TJ, Mielniczuk J, Spagnollo E (2005) Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:777-788.

Concilio A, Chen J, Ma S, North M (2009) Precipitation drives interannual variation in summer soil respiration in a Mediterranean-climate, mixed-conifer forest. **Climatic Change** 92:109-122.

Corazza EJ, Silva JE, Resck DVS, Gomes AC (1999) Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:425-432.

Cordeiro MAS, Corá JE, Nahas E (2012) Atributos bioquímicos e químicos do solo rizosférico e não rizosférico de culturas em rotação no sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1794-1803.

Costa FS (2005) **Estoque de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtrópico brasileiro**. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Costa FS, Bayer C, Zanatta JA, Mielniczuk J (2008) Estoques de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:323-332.

Davidson EA, Janssens IA (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature** 440:165-173.

De Resende AS, Xavier RP, De Oliveira OC, Urquiaga S, Alves BJR, Boddey RM (2006) Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugarcane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant Soil** 281:339-351.

Dick WA (1983) Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. **Soil Science Society of America. Journal** 47:102-107.

Dodor DE, Tabatabai MA (2003) Amidohydrolases in soils as affected by cropping systems. **Applied Soil Ecology** 24:73-90.

Dominy CS, Haynes RJ, Van Antwerpen R (2002) Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils** 36:350-356.

Epron D, Bosc A, Bonal D, Freycon V (2006) Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology** 22:565-574.

Fang C, Moncrieff JB, Gholz HL, Clark KL (1998) Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil** 205:135-146.

Febrapdp – Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (2012) **Evolução da área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <febrapdp.org.br>. Acesso em: 2 out. 2012.

Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC, Myhre G (2007) Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Climate Change 2007. **The physical science basis**. New York: Climate Change 2007, p. 129-234.

Galdos MV, Cerri CC, Cerri CEP (2009) Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma** 153:347-352.

Gentil LV (1995) Aspectos econômicos do plantio direto. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, **Anais...** Ponto Grossa: Embrapa-CNPT, p. 09-12.

Giacomini SJ, Aita C, Vendruscolo ERO, Cubilla M, Nicoloso RS, Fries MR (2003) Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:325-334.

Guedes ACTP (2013) **Atividade biológica e enzimática em solo tratado com Cloreto e Sulfato de Bário**. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Iamaguti JL, Moitinho MR, Teixeira DD, Bicalho EDS, Panosso AR, La Scala N Preparo do solo e emissão de CO₂. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental** 19:497-504.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis of Working Group I**. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) **Climate Change 2014: Mitigation**. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

Janzen HH (2004) Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. **Agriculture Ecosystems & Environment** 104:399-417.

Janzen HH, Kucey RMN (1988) Carbon, nitrogen and sulfur mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. **Plant and Soil** 106:35-41.

Jenkinson DS, Ladd JN (1981) Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul EA, Ladd JM (Eds.) **Soil biochemistry**. 3. ed. New York: Marcel Decker, p. 415-471.

Kang S, Kim S, Oh S, Lee D (2000) Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover, and air temperature. **Forest Ecology and Management** 136:173-184.

Karhu K, Auffret MD, Dungait JAJ, Hopkins DW, Prosser JI, Singh BK, Subke J, Wookey PA, Agren GI, Sebastia M, Gouriveau F, Bergkvist G, Meir P, Nottingham AT, Salinas N, Hartley IP (2014) Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature** 513:81-84.

Kemmitt SJ, Lanyon CV, Waite IS, Wen Q, Addiscott TM, Bird NRA, O'Donnell AG, Brookes PC (2008) Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass—a new perspective. **Soil Biology & Biochemistry** 40:61-73.

Kogel-Knabner I (2002) The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry** 34:139-162.

Lal R (1986) Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. **Advances in Soil Science** 5:1-109.

Lal R (2001) World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advance in Agronomy** 71:145-191.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma** 123:122.

Lal R (2008) Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences** 363:815-830.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science** 60:158-169.

Lal R (2015) Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. **Journal of Soil and Water Conservation** 70:329-339.

Lamparter A, Bachmann J, Goebel MO, Woche SK (2009) Carbon mineralization in soil: Impact of wetting–drying, aggregation and water repellency. **Geoderma** 150:324-333.

La Scala N, Bolonhezi D, Pereira GT (2006) Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research** 91:244-248.

La Scala N, De Figueiredo EB, Panosso AR (2012) On the mitigation potential associated with atmospheric CO₂ sequestration and soil carbon accumulation in major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal of Biology** 72:775-785.

La Scala N, Panosso AR, Pereira GT, Paz González A, Miranda JGV (2009) Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics** 23:353-358.

Linn DM, Doran JW (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of American Journal** 48:1267-1272.

Lopes AS, Wiethölter S, Guilherme LRG, Silva CA (2004) **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 110 p.

Lopes PRC, Cogo NP, Levien R (1987) Eficácia relativa de tipos e quantidade de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo na redução da erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 11:71-75.

Luca EF, Feller C, Cerri CC, Barthès B, Chaplot V, Campos DC, Manechini C (2008) Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:789-800.

Luchese EB, Favero LOB, Lenzi E (2002) **Fundamentos da química do solo teoria e prática**. 2. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 159 p.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala N (2013) Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:1720-1728.

Moreira FMS, Siqueira JO **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras 2006. 729 p.

Nascimento JT, Silva IF, Santiago RD, Silva Neto LF (2003) Efeito de leguminosas nas características químicas e matéria orgânica de um solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 7:457-462.

Ordóñez-Fernández R, Carbonell-Bojollo R, González Fernández P, Perea Torres F (2008) Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO₂ en un suelo arcilloso de la vega de Carmona. **Carex** 6:2339-2354.

Palm CA, Sanchez PA (1991) Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. **Soil Biology & Biochemistry** 23:83-88.

Panosso AR, Marques Júnior J, Milori DMBP, Ferraud AS, Barbieri DM, Pereira GT, La Scala N (2011) Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research** 111:190-196.

Panosso AR, Marques Júnior J, Pereira G, La Scala N (2009) Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research** 105:275-282.

Paustian K, Andren O, Janzen HH, Lal R, Smith P, Tian G, Tiessen H, Van Noordwijk M, Woomer PL (1997) Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. **Soil Use and Management** 13:230-244.

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P (2016) Climate-smart soils. **Nature** 532:49-57.

Pes LZ (2009) **Fluxo de gases de efeito estufa em sistemas de preparo do solo e rotação de culturas no planalto do Rio Grande do Sul**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais, Santa Maria.

Rannels NN, Waggoner MG (1992) Nitrogen release from crimson clover in relation to plant growth stage and composition. **Agronomy Journal** 84:424-430.

Razafimbelo T, Barthès B, Larré-Larrouy MC, De Luca EF, Laurent JY, Cerri CC, Feller C (2006) Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystems Environment** 115:285-289.

Roscoe R, Boddey RM, Salton JC (2006) Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: Roscoe R, Mercante FM, Salton JC, editores. (2006) **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas**. Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 304 p.

Ryu S, Concilio A, Chen J, North M, Ma S (2009) Prescribed burning and mechanical effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. **Forest Ecology and Management** 257:1324-1332.

Sá JCM, Cerri CC, Dick WA, Lal R, Venske Filho SP, Piccolo MC, Feigl BE (2001) Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal** 65:1486-1499.

Salet RL, Vargas LK, Anghinoni I, Kochann RA, Denardin JE, Conti E (1997) Por que a disponibilidade de nitrogênio é menor no sistema plantio direto? In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, **Anais...** Passo Fundo: Embrapa-CNPT, p. 297.

Sanomiya LT, Nahas E (2004) Atividade enzimática do solo influenciada pela espécie de planta, adubação fosfatada e calagem. **Científica** 32:75-81.

Schlömer S, Furche M, Dumke I, Poggenburg J, Bahr C, Seeger S, Vidal A, Faber E (2013) A review of continuous soil gas monitoring related to CCS – technical advances and lessons learned. **Applied Geochemistry** 30:148-160.

Schwartz RC, Baumhardt RL, Evett SR (2010) Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil & Tillage Research** 110:221-229.

Séguy L, Bouzinac S, Maronezzi AC (2001) Sistemas de cultivo e dinâmica da matéria orgânica. **Informações Agronômicas** 96:32. (POTAFOS. Encarte Técnico).

Sídiras N, Pavan MA (1985) Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 9:249-254.

Signor D, Pissioni LLM, Cerri CEP (2014) Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. **Bragantia** 73:113-122.

Silva EDF, Moitinho MR, Teixeira DDB, Pereira GT, La Scala N (2014) Soil CO₂ emission associated with liming in area of conversion of orange for sugar cane. **Engenharia Agrícola** 34:885-898.

Silva-Olaya AM, Cerri CEP, La Scala N, Dias CTS, Cerri CC (2013) Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters** 8:1-8.

Sisti CPJ, Sants HP, Kochhann R, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM (2004) Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research** 76:39-58.

Six J, Elliot ET, Paustian K (2000) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology & Biochemistry** 32:2099-2103.

Six J, Frey SD, Thies RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal** 70:555-569.

Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A (2003) Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science** 54:779-791.

Smith SV, Sharpley AN (1990) Soil nitrogen mineralization in the presence of surface and incorporated crop residues. **Agronomy Journal** 82:112-116.

Smart DR, Peñuelas J (2005) Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology** 28:247-57.

Sodré Filho J, Cardoso AN, Carmona R, Carvalho AM (2004) Fitomassa e cobertura do solo de culturas de sucessão ao milho na Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39:327-334.

Sousa SGA (2003) **Produção e Decomposição de Serrapilheira de uma Floresta Ombrófila Mista Aluvial, Rio Barigui, Araucária, PR**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Teixeira DDB, Bicalho ES, Panosso AR, Perillo LI, Iamaguti JL, Pereira GT, La Scala N (2012) Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 36:1466-1475.

Teixeira LG, Lopes A, La Scala N (2010) Temporal variability of soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola** 30:224-231.

Teixeira MB, Perda A, Pereira MG, Pimentel C (2011) Decomposição e Libertação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:867-876.

Tominaga TT, Cássaro FAM, Bacchi OOS, Reichardt K, Oliveira JCM, Timm LC (2002) Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research** 40:605-614.

Tsai SM, Baraibar AVL, Romani VLM (1992) Efeitos de fatores físicos e químicos sobre os microrganismos do solo umidade e aeração. In: Cardoso EJBN, Tsai SM, Neves MCP, editores. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, p. 60-89.

Ussiri AN, Lal R (2009) Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research** 104:39-47.

Vigil MF, Kissel DE (1988) Equations for estimating the amount of nitrogen mineralized from crop residues. **Soil Science Society of America. Journal** 55:757-761.

Wardle DA (1992) A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society** 67:321-358.

Wick AF, Phillips RL, Liebig MA, West M, Lee Daniels W (2012) Linkages between soil micro-site properties and CO₂ and N₂O emissions during a simulated thaw for a northern prairie Mollisol. **Soil, Biology & Biochemistry** 50:118-125.

Wisniewski C, Holtz GP (1997) Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 32:1191-1197.

Xie SP, Deser C, Vecchi GA, Collins M, Delworth TL, Hall A, Watanabe M (2015) Towards predictive understanding of regional climate change. **Nature Climate Change** 5:921-930.

Xu M, Qi Y (2001) Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology** 7:667-677.

CAPÍTULO 2 – SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA COM SUCESSÕES E ROTAÇÃO DE CULTURAS: IMPLICAÇÕES SOBRE A VARIAÇÃO TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂, TEMPERATURA E UMIDADE DO SOLO

RESUMO – A produção, o transporte e conseqüentemente a emissão de CO₂, são influenciadas diretamente pelas condições de temperatura e umidade do solo, e estas por sua vez exibem grande variabilidade ao longo do tempo devido à influência de eventos climáticos, bem como das práticas adotadas de manejo do solo. Diante disto, com o presente estudo objetivou-se investigar o efeito de resíduos de culturas de verão e entressafra sobre a variação temporal da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo sob sistema de semeadura direta, manejado com o mesmo arranjo de culturas por mais de 16 anos. Para atender a este objetivo o delineamento do experimento foi conduzido em faixas com três repetições e os tratamentos foram compostos por: sequências de culturas de verão constituídas pela monocultura de milho (MM); monocultura de soja (SS); cultivos em rotação de soja e milho (SM), e às culturas de inverno foram: milho, milheto, guandu, sorgo granífero e crotalária. Foram conduzidas 16 avaliações compreendidas num período total de 51 dias, sendo avaliadas a emissão de CO₂, a temperatura e a umidade do solo. Para a FCO₂ houve efeito significativo da interação entre o tempo e às sequências das culturas de verão ($F = 1,44$; $p = 0,02$), bem como do tempo com às culturas de entressafra ($F = 2,26$; $p < 0,01$). Para a U_{solo} ($F = 1,83$; $p < 0,01$), e T_{solo} ($F = 1,32$; $p = 0,01$) houve interação tripla entre às sequências das culturas de verão, às culturas de entressafra e ao longo do tempo. Os valores de FCO₂ e U_{solo} foram maiores nos dias 229 e 230 em função das precipitações na área de estudo. Já a temperatura do solo esteve mais associada à temperatura do ar. A relação entre FCO₂ e umidade foi positiva em todos os manejos avaliados, sendo que cerca de 60% da variação da FCO₂ ao longo do período de estudo foi explicada pela variação no conteúdo de água do solo. Os sistemas de manejos em semeadura direta são equilibrados, ou seja, menos propensos a mudanças bruscas em seus atributos do solo, desta forma os valores médios diários da emissão de CO₂ tendem a ser estáveis e as variações na dinâmica do gás ao longo do tempo, é dada somente sob condições de precipitação e seu efeito sobre a relação umidade e poros do solo.

Palavras-chave: resíduos da cultura, respiração do solo, umidade do solo

CHAPTER 2 – NO-TILLAGE SYSTEM WITH CROP SUCCESSION AND ROTATION: IMPLICATIONS ON THE TEMPORAL VARIATION OF SOIL CO₂ EMISSION, SOIL TEMPERATURE, AND SOIL MOISTURE

ABSTRACT – Production, transport, and consequently the emission of CO₂, are directly influenced by soil temperature and soil moisture conditions, exhibiting a high variability over time due to the influence of climate events and soil management practices. The aim of this study was to investigate the effect of summer and off-season crop residues on the temporal variation of soil CO₂ emission (FCO₂), soil temperature (Tsoil), and soil moisture (Msoil) under a no-tillage system managed with the same crop arrangement for more than 15 years. The experiment was conducted in strips with three replications and the treatments were composed of summer crop sequences of corn monoculture, soybean monoculture, and soybean-corn rotation, and off-season crops of corn, millet, pigeon pea, grain sorghum, and crotalaria. Sixteen assessments of FCO₂, Tsoil, and Msoil were carried out over a 51-day period. For FCO₂, a significant effect of the interaction between time and summer crop sequences ($F = 1.44$; $p = 0.02$) and time and off-season crops ($F = 2.26$; $p < 0.01$) was observed. For Msoil ($F = 1.83$; $p < 0.01$) and Tsoil ($F = 1.32$; $p = 0.01$), a triple interaction was observed between summer crop sequences, off-season crops, and time. The values of FCO₂ and Msoil were higher on the days 229 and 230 due to precipitations in the study area. Tsoil, on the other hand, was more associated with air temperature. The relationship between FCO₂ and Msoil was positive in all the assessed management systems, and about 60% of the FCO₂ variation over the study period was explained by the variation in soil water content. Management systems under no-tillage are balanced, i.e. less prone to sudden changes in their soil physical, chemical, and biological attributes. Thus, the average daily values of FCO₂ tend to be stable and variations in gas dynamics over time, is given only under precipitation conditions and its effect on the soil moisture and pore ratio.

Keywords: crop residues, soil moisture, soil respiration

2.1 INTRODUÇÃO

O aumento na concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera é decorrente de diversas atividades antropogênicas. Em 2011, as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) foram de 391 ppm (partes por milhão), 1.803 ppb (partes por bilhão) e 324 ppb, excedendo os níveis pré-industriais (1.750) em cerca de 40%, 150% e 20%, respectivamente (IPCC, 2013).

A contribuição da agricultura na emissão dos gases de efeito estufa está relacionada, principalmente, ao uso de combustíveis fósseis, fertilizantes sintéticos, ao revolvimento do solo e a expansão de novas áreas para produção agrícola (Lal, 2015; Oertel et al., 2016). No Brasil, a maior contribuição do setor agrícola para a emissão destes gases está relacionada com a mudança no uso e manejo do solo com o advento da substituição da vegetação nativa para a agricultura e pecuária, que respondem por mais de dois terços do total das emissões, e tem contribuído para posicionar o país como o 4º maior emissor mundial (Cerri et al., 2007; IPCC, 2014).

A emissão do CO_2 (FCO_2) do solo para atmosfera é um processo complexo e dependente das condições edafoclimáticas locais, e por isso essas são determinantes na sua intensidade, promovendo variações diárias nas taxas de emissão e uma grande variabilidade no espaço e no tempo (La Scala et al. 2009; Panosso et al., 2009).

A temperatura e a umidade do solo influenciam diretamente no processo de emissão de CO_2 . A temperatura do solo é fundamental nesse processo, visto que seu incremento intensifica a decomposição da matéria orgânica, da atividade microbiana e das raízes (Silva-Olaya et al., 2013).

Alguns estudos demonstraram correlação positiva entre a FCO_2 e temperatura do solo (Fang et al., 1998; Ussiri e Lal, 2009; Acreche et al., 2014; Karhu et al., 2014). Esta relação é compreendida pelas variações diárias e sazonais da temperatura do solo, com maior influência nas camadas mais superficiais, ou seja, na região onde a maior taxa de atividade microbiana se encontra (Moreira e Siqueira, 2006; Six et al., 2006).

Outro fator importante no processo de FCO_2 é a umidade do solo, pois a mesma

interfere na dinâmica da respiração do solo, por atuar diretamente na aeração do solo e assim possuir uma estreita relação com os poros do solo (Luo e Zhou, 2006).

O teor de água presente no solo é de extrema relevância para avaliação da emissão de CO₂ do solo, já que interfere na FCO₂ para a atmosfera (Linn e Doran, 1984; La Scala et al., 2006; Schwartz et al., 2010), nos processos de produção (Epron et al., 2006; Lal, 2009; Carbonell-Bojollo et al., 2012), e de transporte (Ball e Smith, 1991; Kang et al., 2000). Além disso, dependendo do teor de água no solo, tais processos podem ser alterados, visto que a umidade influencia na atividade microbiana e na difusão de gases (Lal, 2001). Esses efeitos são decorrentes principalmente da interação do conteúdo da umidade com o espaço poroso do solo (Ordóñez-Fernández et al., 2008).

A manutenção da cobertura do solo por meio dos resíduos vegetais em sistema de semeadura direta (SSD) contribui com a conservação do solo e da água, promovendo principalmente, melhoria em sua estrutura - o que favorece a aeração e a infiltração de água no solo (Lal, 1986). A barreira física (formada pelos resíduos remanescentes da cultura) entre o solo e a atmosfera propicia um microclima com condições mais estáveis de temperatura e auxilia na manutenção da umidade do solo (Ussiri e Lal, 2009).

Os sistemas de semeadura direta são alternativas para o sequestro de quantidades significativas de CO₂, e consequente auxílio na mitigação das emissões de GEE oriundos das atividades agrícolas (Bayer et al., 2006; Campos, 2006), devido ao tipo de cultivo adotado.

No SSD, a prática de rotação de culturas é bastante utilizada, pois nesse tipo de manejo incluem-se plantas de lenta decomposição e com alto potencial de produção de massa seca (gramíneas), assim como às leguminosas que atuam na fixação biológica de nitrogênio (FBN) e possuem decomposição mais rápida (Rosolem et al., 2016; Calonego et al., 2017), atuando diretamente na ciclagem de nutrientes dentro do sistema.

Os ecossistemas equilibrados a exemplo do SSD tendem a apresentar menores taxas de respiração do solo, uma vez que a cobertura vegetal do solo, característica desses sistemas, fornece ao solo resíduos vegetais com diferentes estágios de decomposição e complexidade (Lopes et al., 2013).

A hipótese deste estudo é que a quantidade dos resíduos vegetais das culturas de verão e de entressafra e a relação C/N destes em áreas sob semeadura direta atuam na variação temporal da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo. Diante do exposto, com o presente estudo objetivou-se investigar o efeito de resíduos de culturas de verão e entressafra sobre a variação temporal da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo sob sistema de semeadura direta manejado com o mesmo arranjo de culturas por mais de 16 anos.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Unesp, no município de Jaboticabal, SP. Às coordenadas centrais da área são 21°15'22" S e 48°18'58" O, e a altitude local é de 550 m.

O clima é definido como B_{1r}B'_{4a}, mesotérmico úmido, com pequena deficiência hídrica, de acordo com a classificação de Thornthwaite (1948), com precipitação média anual de 1.424 mm, com períodos de maior concentração entre os meses de outubro a março, e precipitações mais espaçadas, de menores intensidades, de abril a setembro. A temperatura média anual é de 22,2 °C.

A Figura 1 apresenta a precipitação e a temperatura média do ar no período em que foram avaliadas a emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo nas áreas experimentais.

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico, textura argilosa, A moderado, caulínítico, hipoférico (LVe) (Santos et al., 2018) e relevo suave ondulado (3-8%), com 556 g kg⁻¹ de argila, 63 g kg⁻¹ de silte e 381 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-0,20 m.

A área encontra-se sob sistema de semeadura direta desde o ano de 2001 e, anteriormente a implantação desse sistema a mesma foi utilizada para a produção de soja e milho em sistema convencional de preparo do solo por 25 anos.

O local utilizado para a condução do experimento foi um sistema de semeadura direta consolidado a mais de 16 anos, e com rotação de culturas (Figura 2) durante os

meses de julho e agosto de 2016 referente ao ano agrícola de 2015/2016.

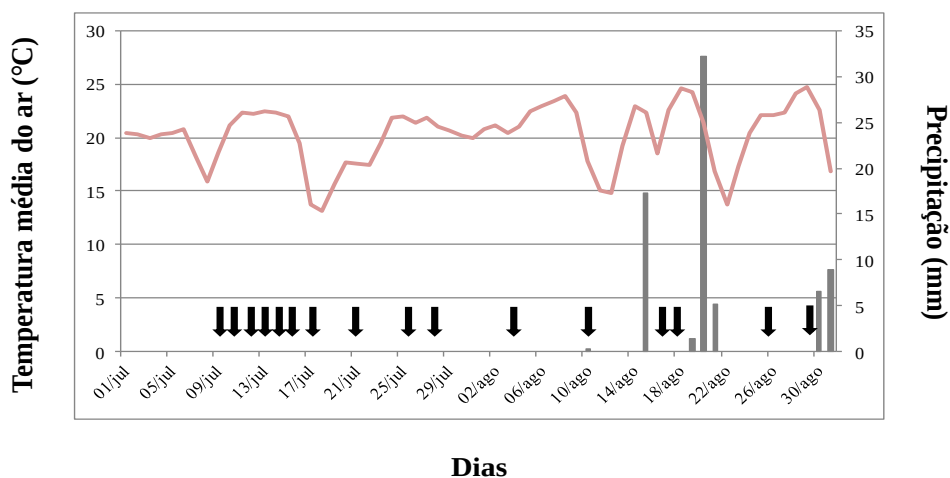


Figura 1. Precipitação (ppt) e temperatura média do ar (°C) durante o período de condução do experimento. As flechas indicam os dias de avaliação da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo.

Às sequências de culturas de verão (SV) constituíram de: monocultura de milho (*Zea mays* L.) no verão; monocultura de soja (*Glycine max* L.) no verão; rotação soja-milho com cultivos intercalados de soja e milho ano a ano. Às culturas de entressafra (CE) foram: milho (*Zea mays* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária (*Crotalaria juncea* L.), semeadas em abril.

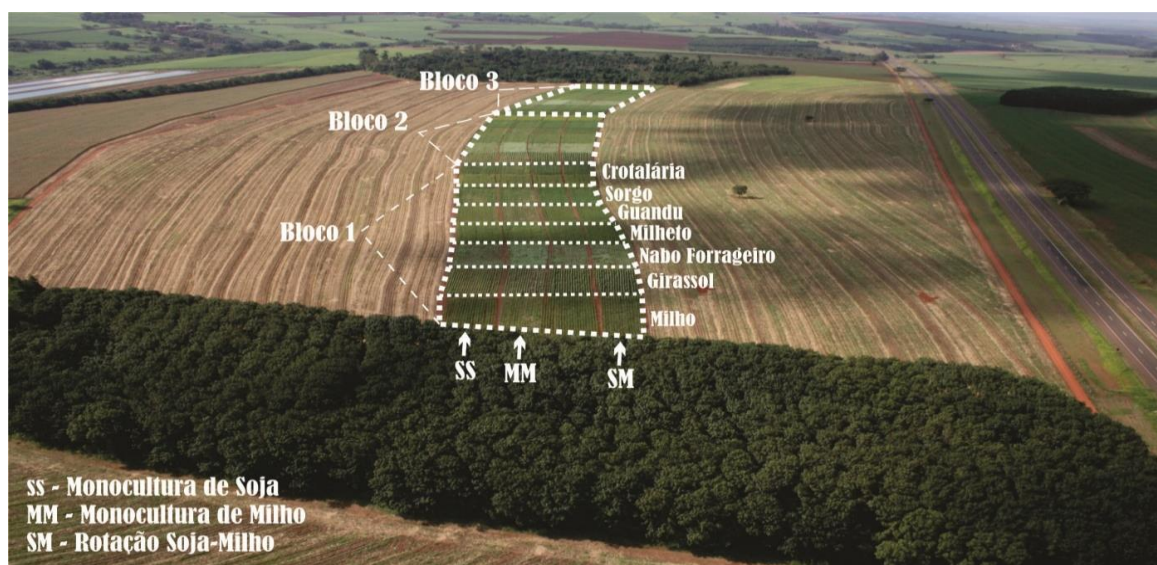


Figura 2. Disposição das parcelas constituídas pelas sequências de culturas de verão e pelas culturas de entressafra. Adaptado de Marcelo (2011).

Os tratamentos consistiram nas combinações das três sequências de culturas de verão com às cinco culturas de inverno, sendo as de verão: a monocultura do milho (MM), a monocultura da soja (SS) e a rotação soja e milho (SM), com cultivos intercalados aos anos, sendo o milho a cultura utilizada quando o estudo foi realizado. Já às culturas de inverno foram constituídas por: milho, milheto, guandu, sorgo granífero e crotalária.

O delineamento experimental foi em faixas, com três repetições. Foram demarcados 2 pontos amostrais, distribuídos de forma aleatória, com distância mínima de 5 m entre os pontos. Para esta marcação foram inseridos no solo colares de PVC (com 10 cm de diâmetro) em cada um dos pontos a uma profundidade de 3 cm.

Nas sequências de verão, a cultura do milho foi implantada com espaçamento de 0,90 m entre linhas (60 mil plantas ha⁻¹). Para este ano foi utilizada a mesma variedade de milho (2B520) em SM e MM. Na sequência com a soja (SS) foi utilizada a variedade S3037 com espaçamento de 45 cm entre linhas (480 mil plantas ha⁻¹).

2.2.1 Avaliação da FCO₂, temperatura e umidade do solo

No período de 10 de julho a 29 de agosto de 2016 (51 dias) foram conduzidos 16 avaliações, correspondente às datas: 10; 11; 12; 13; 14; 15; 18; 21; 26 e 28 de julho de 2016 e 04; 11; 17; 18; 26 e 29 de agosto de 2016, realizadas durante o horário matutino, das 6 às 9 h. Utilizando-se da denominação do dia Juliano, essas datas correspondem a 191, 192, 193, 194, 195, 196, 199, 202, 207, 209, 216, 223, 229, 230, 238 e 241 de 2016.

Para as avaliações da emissão de CO₂ do solo foi utilizado o sistema portátil LI-COR, modelo LI-8100 (Figura 3), que monitorara as variações da concentração de CO₂ no interior da câmara de solos por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho.

A câmara de solos é um sistema fechado com volume interno de 854,2 cm³ e área de contato circular de 83,7 cm², sendo acoplada sobre colares de PVC previamente inseridos em cada um dos pontos amostrais a uma profundidade de 3 cm. O fluxo de CO₂ foi computado em cada ponto por um ajuste da concentração de CO₂ do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após

o seu fechamento (Figuras 3a e 3b). O modo de medida para a determinação da emissão de CO₂ do solo levou 90 segundos em cada um dos pontos e a concentração de CO₂ dentro da câmara foi determinada a cada 2,5 segundos, aproximadamente.

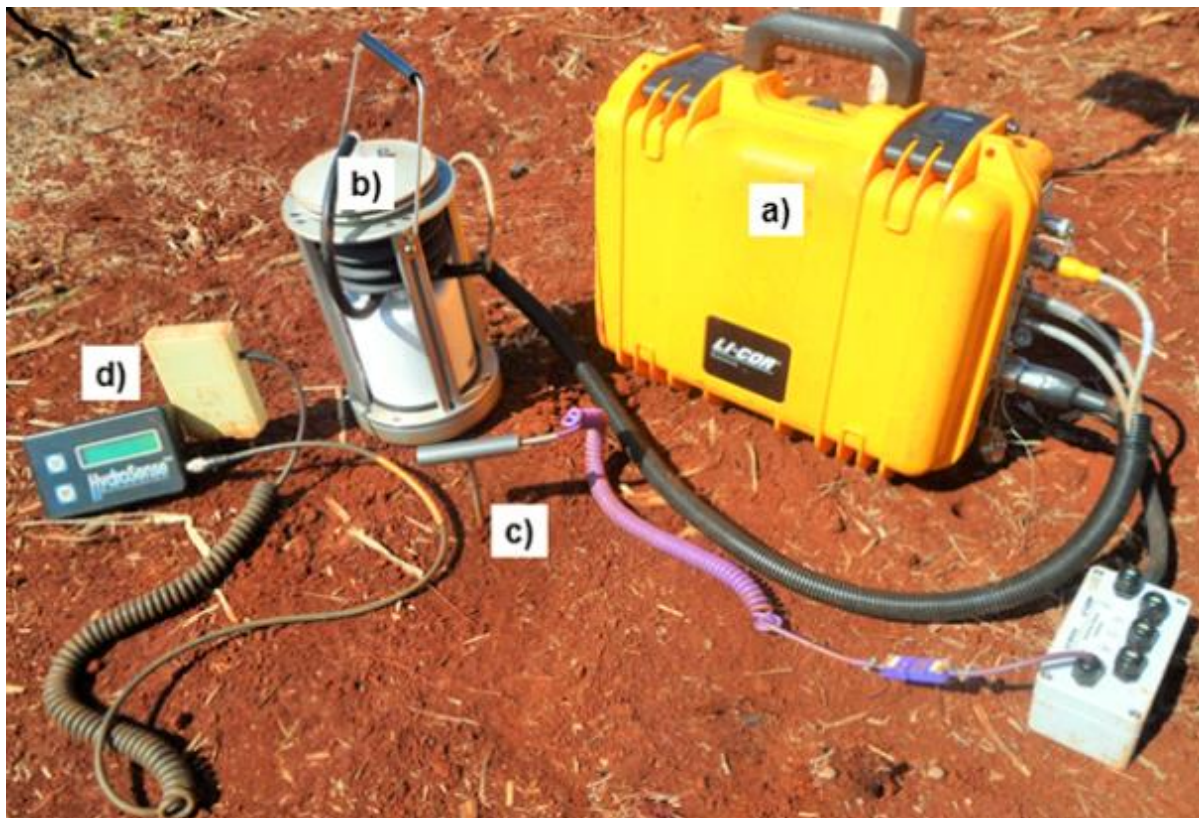


Figura 3. Sistema LI-8100 (a) interligado à câmara de solos (b), sensor de temperatura (c) e umidade do solo (d) (Moitinho, 2017).

Ao mesmo tempo da avaliação da emissão de CO₂ também se determinou a temperatura e umidade do solo. A temperatura do solo foi monitorada por meio de um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema LI-8100 (Figura 3c). O sensor consiste de uma haste de 20 cm que é inserida no interior do solo, à 5 cm do local onde foram previamente instalados os colares de PVC, para a avaliação da emissão de CO₂ do solo.

Da mesma forma, a umidade do solo foi registrada utilizando-se um aparelho TDR – Time Domain Reflectometry (Hydrusense TM, Campbell Scientific, Austrália), constituído por uma sonda com duas hastes de 12 cm que foram inseridas no interior do solo, perpendicular em relação à superfície, também à 5 cm dos colares de PVC (Figura 3d). O valor da umidade do solo é derivado a partir do tempo que uma corrente

elétrica leva para percorrer a distância de 32 mm de uma haste a outra.

2.2.2 Processamento e análise de dados

A análise da variância foi realizada de acordo com delineamento experimental em faixas, com três repetições, e as observações foram repetidas ao longo do tempo. A comparação das médias diárias da FCO_2 , temperatura e umidade do solo foram realizadas utilizando-se do teste de Scott Knott à 5% de probabilidade. Às análises de regressão linear foram realizadas para se determinar o grau de relacionamento entre as variáveis analisadas.

Todos os procedimentos realizados foram conduzidos no software R (R Core Team, 2017).

2.3 RESULTADOS

Quando realizada a análise da variância de medidas repetidas no tempo, foi observado efeito significativo para a interação tripla entre às sequências das culturas de verão, às culturas de entressafra e os dias de avaliação (tempo) para a U_{solo} ($F = 1,83$; $p < 0,01$), e T_{solo} ($F = 1,32$; $p = 0,01$) (Tabela 1), e o fator fixado para o desdobramento foi o tempo.

Já para a FCO_2 houve efeito significativo da interação entre o tempo e às sequências das culturas de verão ($F = 1,44$; $p = 0,02$), bem como do tempo com às culturas de entressafra ($F = 2,26$; $p < 0,01$) (Tabela 1), indicando que a emissão de CO_2 do solo não apresentou padrão similar de variação ao longo do tempo de estudo quando as manejos foram comparados.

Às médias diárias da emissão de CO_2 do solo na sequência de verão durante o período de estudo variaram de 0,61 a 2,46 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos dias 209 e 229, respectivamente (Tabela 2) ambos na monocultura da soja (SS).

Em função dos dias 229 e 230 observou-se em todos os manejos da sequência de verão os maiores valores médios diários para a FCO_2 ao longo de todo o período de estudo (Tabela 2 e Figura 4b), indicando a influência da precipitação de 17,3 mm

registrada no dia 227 (Figura 4a). Ressalta-se que esse registro de 17,3 mm ocorreu após um período de 33 dias sem precipitações.

Tabela 1. Análise da variância para a emissão de CO₂ (FCO₂), temperatura (Tsolo) e umidade do solo (Usolo).

	FCO ₂		Usolo		Tsolo	
	F	p	F	p	F	p
Bloco	1,76	0,23	8,85	<0,01	6,15	0,02
SV	2,90	0,09	3,03	0,08	0,13	0,97
CE	0,54	0,59	6,84	<0,01	144,45	<0,01
SV × CE	1,00	0,46	1,25	0,32	1,64	0,18
Dia	180,88	<0,01	49,07	<0,01	167,43	<0,01
SV × Dia	1,44	0,02	0,79	0,85	0,68	0,95
CE × Dia	2,26	<0,01	2,05	<0,01	4,45	<0,01
SV × CE × Dia	0,89	0,80	1,83	<0,01	1,32	0,01

*SV = sequências de verão; CE = culturas de entressafra.

No dia 229, o valor médio da FCO₂ observado na monocultura da soja (2,46 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foi 18% maior que os valores encontrados na rotação soja-milho (2,09 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), e 20% maior que na monocultura do milho (2,05 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Tabela 2).

De forma geral, os menores valores médios diários encontrados para a FCO₂ ao longo do período de estudo, tanto para às sequências de verão quanto para às culturas de entressafra, foram observados no intervalo que compreende os dias 199 a 209 (Tabela 2 e Figura 4), coincidindo com a queda dos valores médios da umidade (Tabela 4 e Figura 6) em mesmo período.

Quando analisada às culturas de entressafra, às médias da emissão de CO₂ do solo durante as avaliações em estudo nesses manejos especificamente, variaram de 0,60 a 2,53 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nos dias 209 e 229, no solo sob resíduos da cultura do guandu e da crotalária, respectivamente. O solo sob os resíduos das leguminosas crotalária e guandu e da gramínea sorgo, apresentou maiores valores médios de FCO₂ (2,53; 2,21 e 2,30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente) em relação ao solo sob os resíduos do milheto e milho (2,05; 1,92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente) no dia 229. No dia 230,

observou-se o mesmo comportamento entre às culturas de entressafra estudadas (Tabela 2). Nos demais dias avaliados não se observou diferenças da FCO₂ em relação às culturas de entressafra.

Tabela 2. Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de entressafra e dias de avaliação para a emissão de CO₂ do solo (FCO₂).

Dias Julianos	Emissão de CO ₂ do solo (μmol m ⁻² s ⁻¹)		
	MM*	SM*	SS*
191	0,88 Ad	0,82 Ac	0,87 Ac
192	0,97 Ac	0,94 Ab	0,92 Ac
193	1,08 Ac	0,99 Ab	0,93 Ac
194	0,98 Ac	1,08 Ab	0,97 Ac
195	0,91 Ad	1,04 Ab	1,00 Ac
196	0,87 Ad	0,87 Ac	0,82 Ad
199	0,70 Ae	0,71 Ac	0,70 Ae
202	0,67 Ae	0,79 Ac	0,70 Ae
207	0,68 Ae	0,81 Ac	0,80 Ad
209	0,65 Ae	0,70 Ac	0,61 Ae
216	0,98 Ac	1,05 Ab	1,02 Ac
223	0,85 Ad	0,76 Ac	0,84 Ad
229	2,05 Ba	2,09 Ba	2,46 Aa
230	1,79 Bb	2,06 Aa	2,09 Ab
238	1,11 Ac	1,18 Ab	1,08 Ac
241	0,99 Ac	1,12 Ab	0,98 Ac

Dias Julianos	Emissão de CO ₂ do solo (μmol m ⁻² s ⁻¹)				
	Crotalaria**	Guandu**	Milheto**	Milho**	Sorgo**
191	0,92 Ab	0,82 Ac	0,82 Ab	0,82 Ab	0,91 Ac
192	0,99 Ab	0,93 Ac	0,85 Ab	0,79 Ab	1,15 Ab
193	1,13 Ab	0,97 Ac	0,92 Ab	0,92 Ab	1,05 Ab
194	1,00 Ab	1,19 Ab	0,89 Ab	0,89 Ab	1,08 Ab
195	1,00 Ab	1,21 Ab	0,87 Ab	0,90 Ab	0,93 Ac
196	0,90 Ab	0,86 Ac	0,83 Ab	0,81 Ab	0,86 Ac
199	0,67 Ac	0,73 Ad	0,62 Ab	0,73 Ab	0,77 Ac
202	0,75 Ac	0,76 Ad	0,64 Ab	0,68 Ab	0,77 Ac
207	0,92 Ab	0,74 Ad	0,64 Ab	0,72 Ab	0,78 Ac
209	0,68 Ac	0,60 Ad	0,62 Ab	0,62 Ab	0,72 Ac
216	1,12 Ab	1,05 Ab	1,03 Ab	0,84 Ab	1,03 Ab
223	0,88 Ac	0,74 Ad	0,90 Ab	0,69 Ab	0,87 Ac
229	2,53 Aa	2,21 Aa	2,05 Ba	1,92 Ba	2,30 Aa
230	2,04 Aa	2,18 Aa	1,88 Ba	1,72 Ba	2,07 Aa
238	1,18 Ab	1,20 Ab	1,11 Ab	0,96 Ab	1,17 Ab
241	1,14 Ab	1,00 Ab	0,92 Ab	1,01 Ab	1,08 Ab

*N = 30 observações. **N = 18 observações. Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

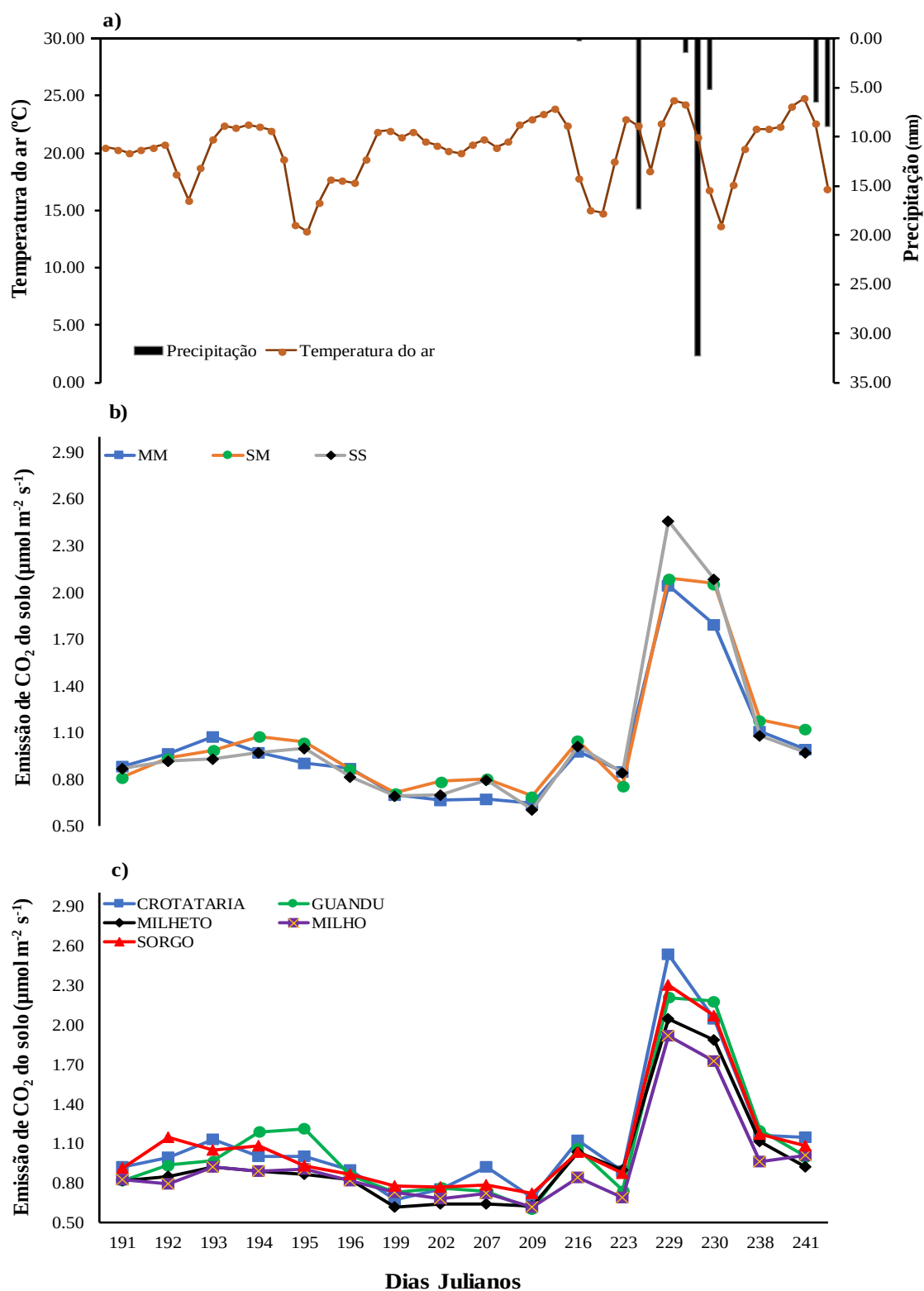


Figura 4. Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da emissão de CO_2 em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.

Após o evento de precipitação, o solo sob resíduo da monocultura de soja apresentou aumento de 193% (dia 229) em relação a emissão de CO₂ da avaliação anterior à chuva (dia 223), enquanto que para rotação soja-milho e monocultura de milho este aumento foi de 175% e 141%, respectivamente, de modo similar, para às culturas de entressafra o solo sob resíduo de crotalária teve aumento de 188%, do guandu de 199%, milheto foi de 128%, milho de 178%, enquanto que para o sorgo foi de 164% (Tabela 2) (Figura 6).

Em geral, em todos os manejos avaliados, após 13 dias do evento de precipitação, os valores de FCO₂ ainda se mantiveram mais elevados em relação aos valores iniciais (dias 191 a 216) do estudo e anteriores ao período de chuva (dia 227), quando os valores médios diários da FCO₂ estavam estabilizados, variando de 0,60 a 1,12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Em relação à temperatura do solo nos manejos com resíduos das sequências de verão, o solo sob resíduos da monocultura da soja (SS) apresentou maior valor médio (20,69 °C), diferindo ($p < 0,05$) daqueles observados no solo sob monocultura do milho (MM) e rotação soja/milho (SM) com 20,10 e 19,93 °C, respectivamente (Tabela 3), ao longo de todo o período experimental.

Comparando-se às sequências de verão, observa-se que o maior valor médio diário de temperatura do solo durante o período analisado (Tabela 3) foi registrado no dia 238, sob MM (21,82 °C) e SM (21,66 °C), seguido pelo SS (22,33 °C).

Ao visualizar a Figura 4 observa-se queda acentuada de até 3,5 °C na temperatura do solo quando comparados os valores médios do dia 196 para o dia 199, tal comportamento possivelmente está relacionada à temperatura mínima do ar obtida no dia da avaliação (4,7 °C), a menor registrada durante todo o período de estudo (Figura 5a). Após esse dia os valores das temperaturas aumentaram gradativamente até o dia 216, com posterior queda entre os dias 223 e 229, demonstrando maiores variações até o final do estudo no dia 241. Comportamento distinto aos observados nos dias iniciais (191-195), nos quais os valores se mantiveram estáveis, oscilando entre 19 a 21 °C.

No entanto, a média de umidade do solo nas sequências de verão, variou de 4,75 a 20,70% nos dias 241 e 230, respectivamente (Tabela 4). Ao longo do período de avaliação, os maiores valores médios da umidade do solo foram registrados no dia

230 sob monocultura da soja. o valor médio de 18,83%, na rotação soja-milho de 20,70% e na monocultura do milho de 20,45%.

De forma geral, os menores valores médios diários encontrados para a Usolo para às sequências de verão foram observados no intervalo que compreende os dias 199 a 223 (Tabela 4 e Figura 6).

Tabela 3. Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de inverno e dias de avaliação para a temperatura do solo (Tsolo).

Dias Julianos	Temperatura do solo (°C)		
	MM*	SM*	SS*
191	19,15 Bf	19,16 Bf	19,79 Af
192	19,87 Be	19,66 Be	20,30 Ae
193	19,92 Be	19,80 Be	20,53 Ad
194	20,58 Bd	20,39 Bd	21,22 Ac
195	20,30 Bd	20,04 Bd	20,76 Ad
196	20,35 Bd	20,09 Bd	20,79 Ad
199	16,84 Bh	16,63 Bh	17,22 Ah
202	18,77 Bg	18,55 Bg	19,42 Ag
207	20,49 Bd	20,29 Bd	21,60 Ab
209	21,01 Bc	20,92 Bc	22,19 Aa
216	21,25 Bb	21,22 Bb	22,07 Aa
223	19,33 Bf	19,09 Bf	19,69 Af
229	19,71 Be	19,50 Be	20,08 Ae
230	21,31 Bb	21,11 Bb	21,73 Ab
238	21,82 Ba	21,66 Ba	22,33 Aa
241	20,87 Bc	20,69 Bc	21,40 Ac

Dias Julianos	Temperatura do solo (°C)				
	Crotalaria**	Guandu**	Milheto**	Milho**	Sorgo**
191	19,44 Ag	19,34 Af	19,25 Ae	19,41 Af	19,41 Ae
192	19,90 Af	19,90 Ae	19,99 Ad	19,97 Ae	19,95 Ad
193	20,02 Af	19,97 Ae	20,11 Ad	20,32 Ad	19,99 Ad
194	20,73 Ad	20,70 Ac	20,57 Ac	20,94 Ac	20,71 Ac
195	20,37 Ae	20,33 Ad	20,23 Ac	20,52 Ad	20,38 Ac
196	20,39 Ae	20,38 Ad	20,38 Ac	20,44 Ad	20,46 Ac
199	16,58 Bh	17,86 Ah	16,43 Bg	16,69 Bh	16,92 Bg
202	19,11 Ag	18,89 Ag	18,81 Af	18,88 Ag	18,88 Af
207	20,81 Ad	20,70 Ac	20,77 Ab	20,92 Ac	20,77 Ac
209	21,27 Ac	21,27 Ab	21,34 Aa	21,53 Ab	21,44 Ab
216	21,67 Ab	21,34 Ab	21,51 Aa	21,56 Ab	21,49 Ab
223	19,31 Ag	19,41 Af	19,36 Ae	19,48 Af	19,30 Ae
229	19,84 Af	19,80 Ae	19,67 Ad	19,66 Af	19,83 Ad
230	21,51 Ab	21,32 Ab	21,21 Aa	21,46 Ab	21,42 Ab
238	22,15 Aa	21,74 Ba	21,65 Ba	22,01 Aa	22,13 Aa
241	21,17 Ac	20,91 Ac	20,87 Ab	20,87 Ac	21,12 Ab

*N = 30 observações. **N = 18 observações. Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

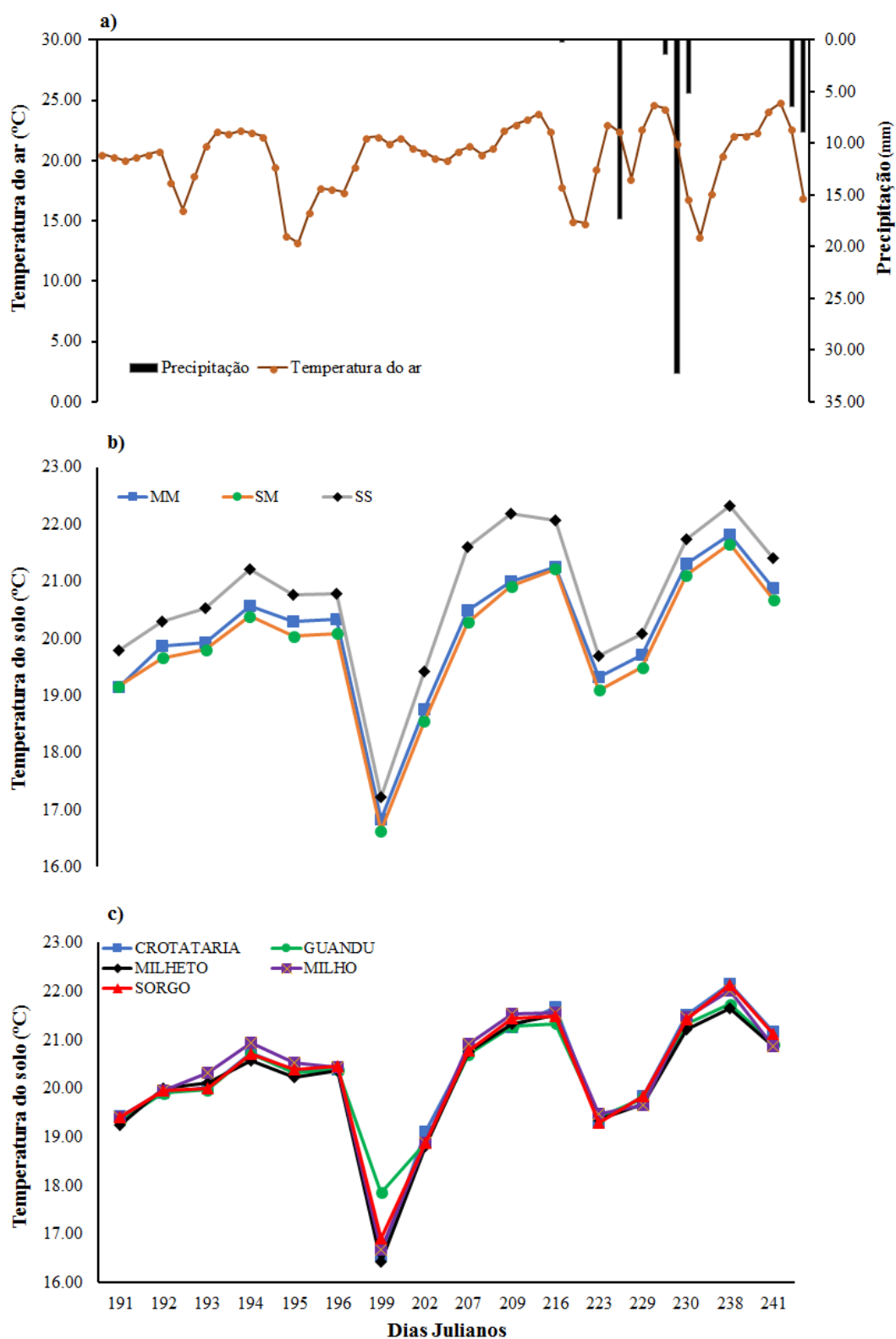


Figura 5. Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da temperatura do solo em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.

Tabela 4. Desdobramento da interação da sequência de verão e dias de avaliação e, culturas de inverno e dias de avaliação para a umidade do solo (Usolo).

Dias Julianos	Umidade do solo (%)		
	MM*	SM*	SS*
191	11,12 Ac	11,32 Ac	9,83 Ac
192	10,10 Ac	9,60 Ac	10,00 Ac
193	9,00 Ac	8,77 Ac	9,13 Ac
194	11,20 Ac	11,27 Ac	10,80 Ac
195	8,62 Ac	8,75 Ac	9,18 Ac
196	9,83 Ac	10,52 Ac	9,52 Ac
199	8,48 Ac	8,40 Ac	8,80 Ac
202	6,50 Ad	7,33 Ac	7,15 Ad
207	8,12 Ac	7,98 Ac	8,12 Ac
209	5,89 Ad	6,08 Ad	5,43 Ad
216	5,30 Ad	4,95 Ad	4,82 Ad
223	6,12 Ad	6,08 Ad	6,17 Ad
229	13,85 Ab	14,22 Ab	12,98 Bb
230	20,45 Aa	20,70 Aa	18,83 Ba
238	15,60 Ab	15,21 Ab	14,27 Ab
241	5,70 Ad	6,13 Ad	4,75 Ad

Dias Julianos	Umidade do solo (%)				
	Crotalaria**	Guandu**	Milheto**	Milho**	Sorgo**
191	10,59 Ac	10,25 Ac	11,58 Ab	10,07 Ac	11,28 Ac
192	9,67 Ad	8,72 Ad	9,83 Ac	10,67 Ac	10,61 Ac
193	8,81 Ad	8,72 Ad	8,56 Ad	9,50 Ac	9,26 Ae
194	11,78 Ac	10,17 Bc	9,83 Bc	12,28 Ab	11,39 Ac
195	8,72 Ad	8,67 Ad	8,56 Ad	9,64 Ac	8,67 Af
196	10,19 Ac	10,08 Ac	10,72 Ac	8,83 Ad	9,94 Ae
199	8,14 Ae	8,67 Ad	8,89 Ad	8,50 Ad	8,61 Af
202	7,33 Ae	6,56 Ae	6,72 Ae	6,92 Ad	7,44 Af
207	7,11 Ae	8,16 Ad	8,42 Ad	8,42 Ad	8,25 Af
209	6,58 Ae	5,39 Ae	5,86 Ae	4,85 Ae	6,33 Ag
216	4,86 Af	5,28 Ae	4,92 Ae	4,44 Ae	5,58 Ag
223	6,61 A	5,75 Ae	5,53 Ae	5,64 Ae	7,08 Af
229	15,06 Ab	14,19 Ab	13,11 Bb	12,22 Bb	13,83 Ac
230	20,61 Ba	22,19 Aa	18,83 Ca	14,50 Da	23,83 Aa
238	14,83 Ab	14,03 Bb	13,39 Bb	15,75 Aa	18,04 Ab
241	5,44 Af	6,06 Ae	5,75 Ae	5,00 Ae	5,39 Ag

*N = 30 observações. **N = 18 observações. Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

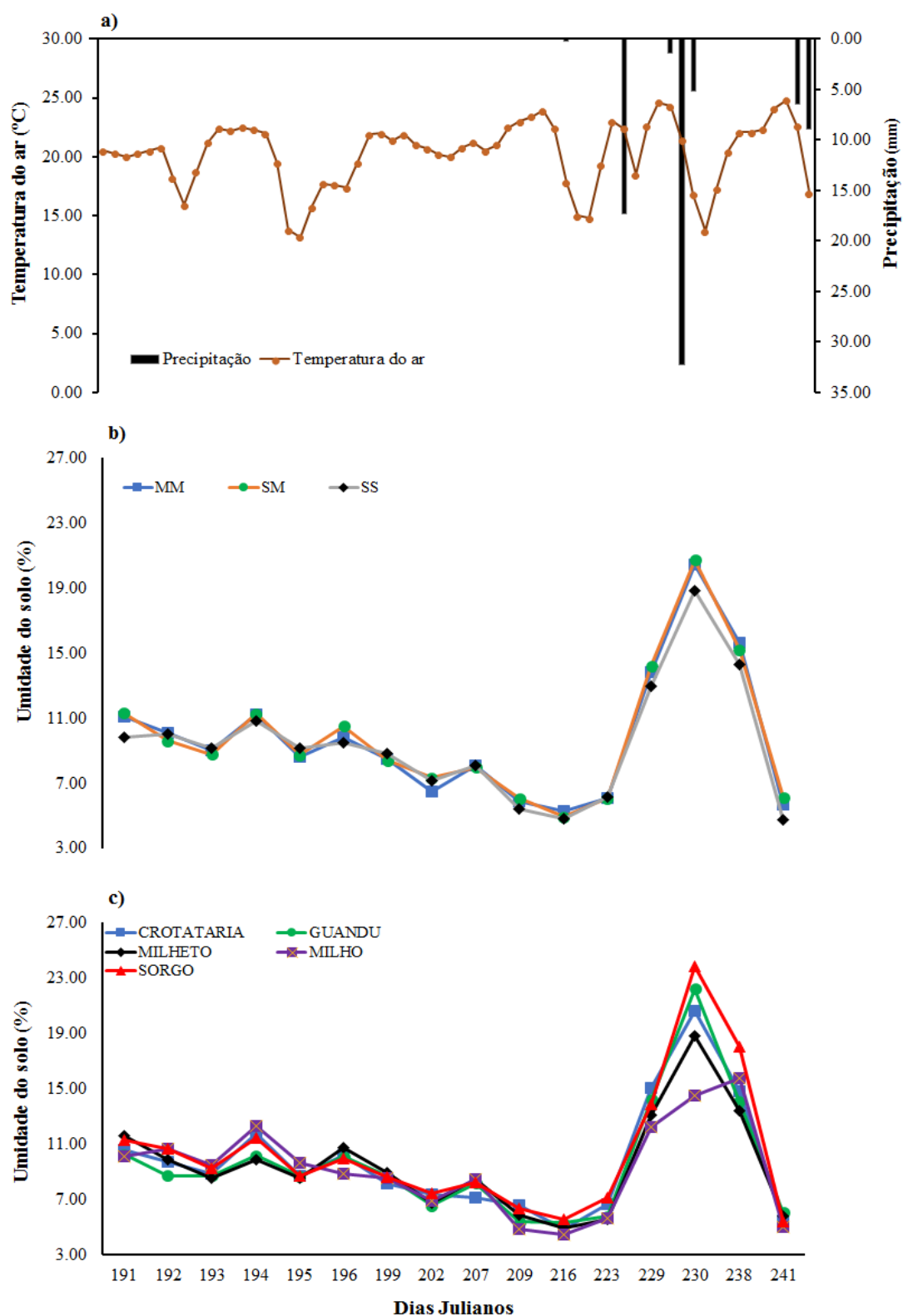


Figura 6. Precipitação e temperatura média do ar (a) e média da umidade do solo em função dos manejos com as sequências de verão (b) e culturas de entressafra (c) ao longo dos dias de avaliação.

Ao analisar os valores de umidade do solo sob às culturas de entressafra, observou-se que entre os dias 229 e 230, a umidade do solo sob resíduos do milho e milho apresentou menores valores médios, enquanto que sob guandu apresentou maiores valores. No dia 238, os valores da U_{solo} sob resíduos de milho e guandu foram menores que às demais culturas de entressafra (Tabela 4).

A maior variação da umidade solo foi observada entre os dias 229 e 230 (Figura 6), tal comportamento deve-se ao evento de precipitação ocorrido no dia 227 (Figura 6a). O solo sob resíduo da MM apresentou aumento de 126% no teor de água do solo, para SM foi de 134% e SS de 110%, assim como para às culturas de entressafra o solo sob resíduo de crotalária teve um aumento de 128%, 147% na cultura do guandu, 137% no milho e, 117% no milho, enquanto que para o sorgo foi de 95% no dia 229 em relação a avaliação anterior à chuva (dia 223).

Em todos os manejos estudados, após 13 dias do evento de precipitação (dias 228 a 241), os valores de U_{solo} também se mantiveram mais altos em relação aos valores anteriores a esse evento, quando os mesmos estavam praticamente estabilizados (dias 191 a 216).

A fim de compreender a relação da FCO₂ com a T_{solo} e U_{solo} realizou-se análise de regressão (Figura 7). A FCO₂ não apresentou relação com a T_{solo} em escala temporal ($p > 0,05$). Em adição foram ajustados modelos lineares entre a FCO₂ e a umidade de solo em todos os manejos avaliados no presente estudo, sendo que o valor do coeficiente de determinação (R^2) entre a FCO₂ e a U_{solo} foi maior na sequência de verão SM ($R^2 = 0,58$ $p < 0,001$) (Figura 7b) quando comparado às demais sequências MM ($R^2 = 0,53$ $p < 0,001$) (Figura 7a) e SS ($R^2 = 0,48$ $p < 0,001$) (Figura 7c). Desta forma, pode-se concluir que até 58% da variação da FCO₂ ao longo do período de estudo foi explicada pela variação no conteúdo de água do solo ao longo período experimental, sendo esta relação sempre positiva em todos os manejos avaliados.

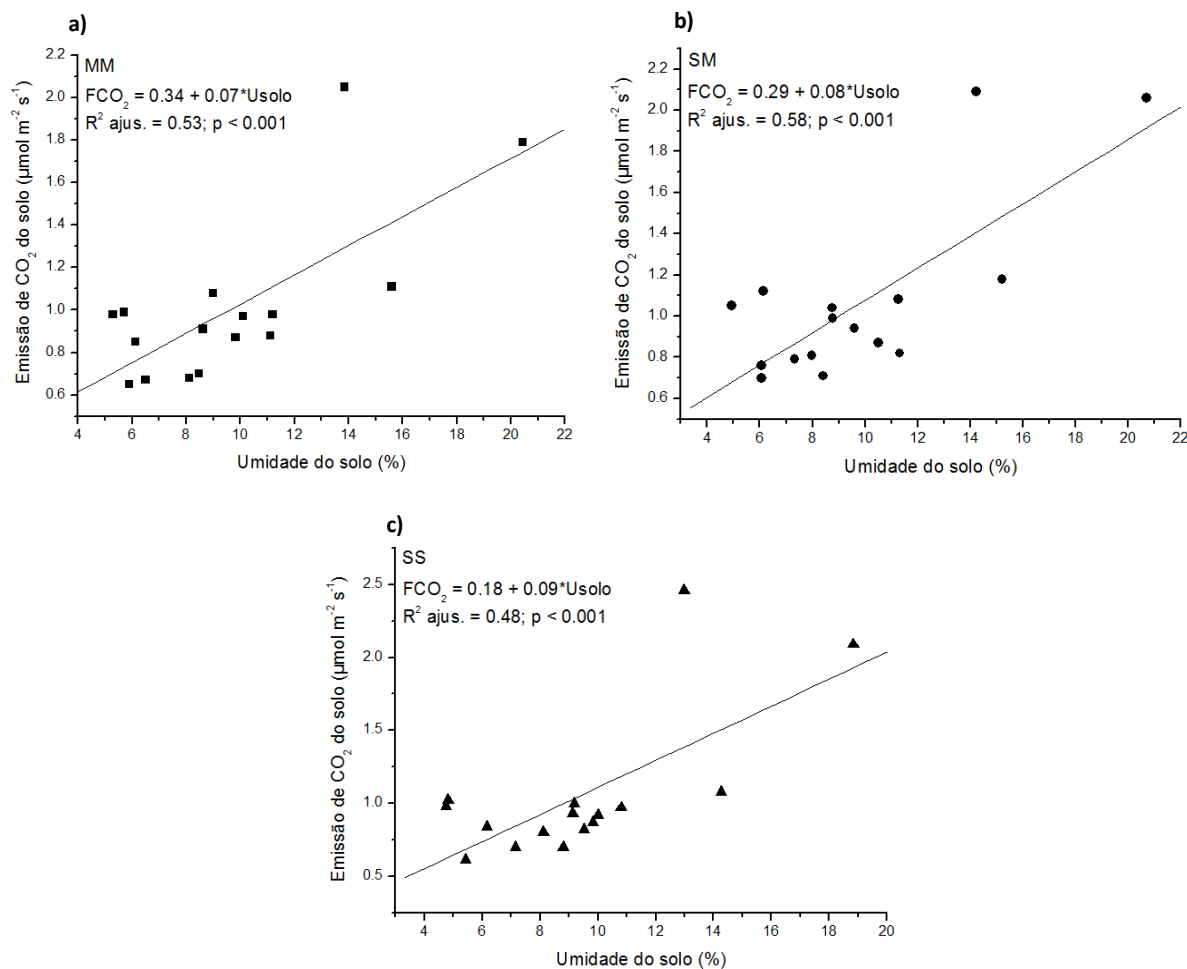


Figura 7. Regressão linear entre emissão de CO₂ e a umidade do solo nos manejos com as sequências de verão: MM (a), SM (b) e SS (c).

Por sua vez para às culturas de entressafra, observou-se entre a FCO₂ e a U_{solo} valores de $R^2 = 0,30$ para o manejo com resíduos do milho (Figura 8d), no milho valores de $R^2 = 0,48$ (Figura 8c), no sorgo $R^2 = 0,50$ (Figura 8e), sendo que na crotalária $R^2 = 0,55$ e no guandu $R^2 = 0,66$ (Figuras 8a e 8b, respectivamente), foram observados os maiores valores do coeficiente de determinação. Portanto, no sistema com resíduos das culturas de entressafra, entre 30 e 66% da variação na dinâmica do gás CO₂ é explicada pela variação na umidade do solo ao longo do período total de 51 dias de avaliação.

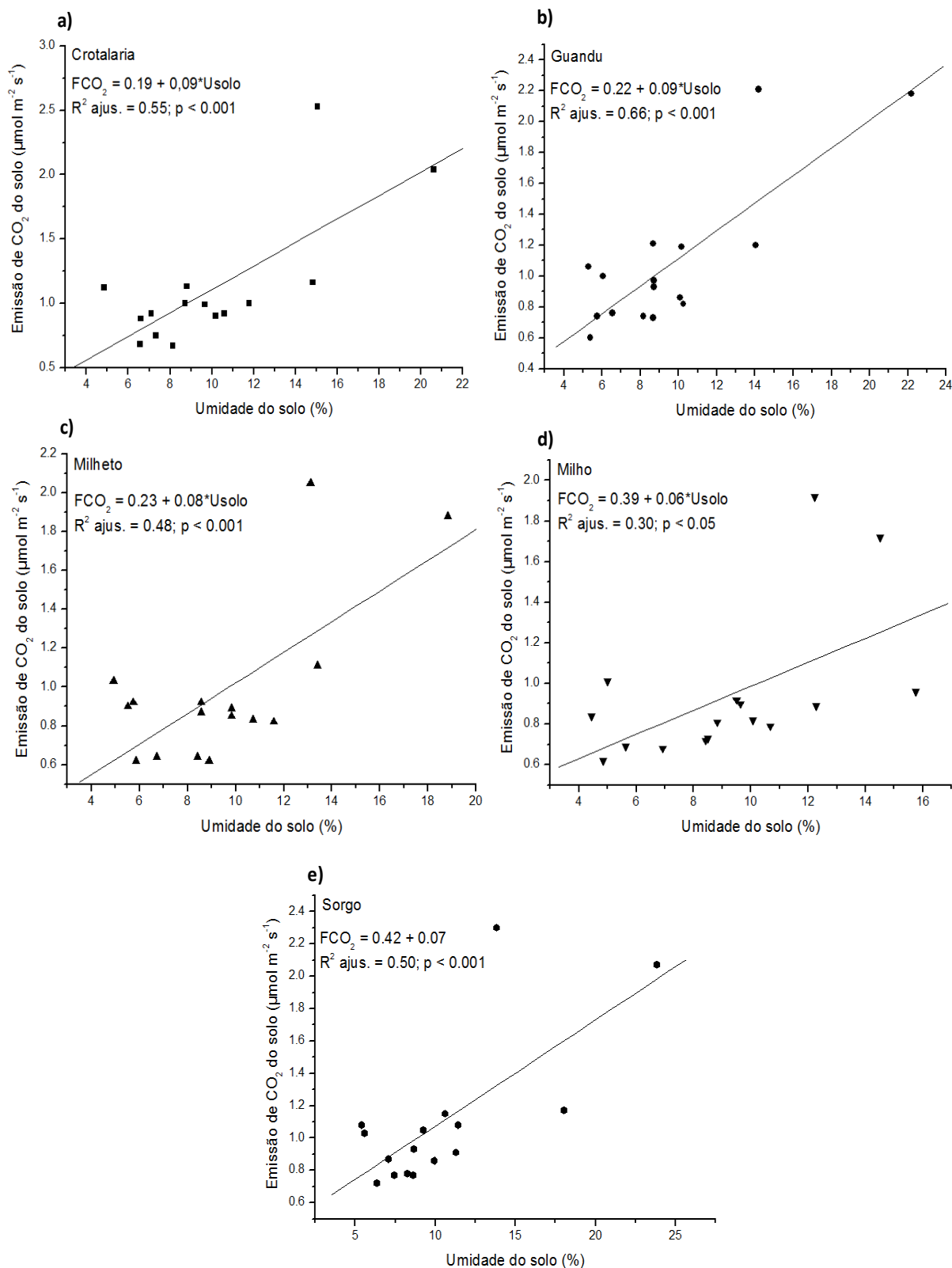


Figura 8. Regressão linear entre emissão de CO₂ e a umidade do solo nos manejos com as sequências de entressafra: crotalária (a), guandu (b), milheto (c), milho (d) e sorgo (e).

2.4 DISCUSSÃO

Às diferenças na emissão de CO_2 e umidade do solo nos dias 229 e 230 em relação aos demais, estão relacionadas ao evento de precipitação registrado. Em estudo similar para avaliar a emissão de CO_2 em SSD, Chavez et al. (2009) também verificaram o aumento da FCO_2 e de umidade do solo após a ocorrência de chuvas.

No presente estudo, a relação positiva entre a umidade do solo e o FCO_2 indica que o conteúdo de água no solo variou dentro de um intervalo em que seu aumento elevou a atividade microbiana, porém, sem limitar a oxigenação do solo necessária para o processo aeróbio resultante na FCO_2 (Moreira e Siqueira; 2006).

A U_{solo} é de suma importância quando avaliamos a FCO_2 , pois a umidade governa os processos de produção (Carbonell-Bojollo et al., 2012), transporte (Kang et al., 2000), e consequentemente a emissão de CO_2 do solo para a atmosfera (Schwartz et al., 2010).

Avaliando a variabilidade temporal e espacial da FCO_2 do solo em áreas de floresta, Schwendenmann et al. (2003) observaram que o conteúdo de água do solo explicou as variações da FCO_2 ao longo do tempo. Contudo, enquanto o presente estudo mostrou um aumento, estes autores verificaram que a FCO_2 diminuiu após às chuvas. A explicação fornecida vem da observação realizada de que o fluxo de CO_2 do solo havia sido afetado nos períodos de elevada umidade, devido à formação de ambiente anaeróbio no solo criado pela expulsão do oxigênio do solo pela intensa precipitação.

No presente estudo, os eventos de precipitação se concentraram ao final do experimento, já que nos meses de junho e julho são períodos de estiagem na região estudada (Figura 6). Em consequência da baixa umidade do solo, logo após a primeira precipitação os poros do solo anteriormente preenchidos por ar foram ocupados por água. Como efeito deste processo pode ocorrer aumento da atividade microbiana, resultando em produção de CO_2 (Moreira e Siqueira, 2006; Brady e Weil, 2012) (Figura 4).

A diminuição da emissão de CO_2 no dia 238 (Tabela 2) logo após um acúmulo de cerca de 40 mm de precipitação no intervalo de três dias (Figura 6), pode estar relacionada com a menor oxigenação proporcionada pela saturação do solo por água

uma vez que, mesmo em períodos curtos, eventos de precipitação podem preencher os poros do solo por água, dificultando o suprimento de oxigênio para o interior do solo, e propiciando assim um ambiente anaeróbico que irá suspender a produção de CO_2 pelos microrganismos, conforme já mencionado.

Após 13 dias do evento de precipitação (228-241), os valores de FCO_2 e U_{solo} permanecerem elevados em relação aos dias anteriores ao evento, tal fato pode estar relacionado ao tipo de manejo adotado. Sabe-se que em SSD há uma melhor estruturação do solo, como o maior incremento na matéria orgânica, aumentando a estabilidade de agregados (Matos et al., 2008). Cabe ressaltar também que os valores de densidade do solo são mais elevados quando comparados com os do preparo convencional (Vieira e Muzilli, 1984; Corrêa, 1985).

No presente estudo considera-se que esta estrutura mais densa do solo devido ao manejo ($\text{SM} = 1,5 \text{ g/dm}^3$; $\text{MM} = 1,48 \text{ g/dm}^3$; $\text{SS} = 1,47 \text{ g/dm}^3$; crotalaria = $1,46 \text{ g/dm}^3$; guandu = $1,48 \text{ g/dm}^3$; milheto = $1,50 \text{ g/dm}^3$; milho = $1,52 \text{ g/dm}^3$ e sorgo $1,50 \text{ g/dm}^3$) associada a palhada presente no solo, pode afetar a velocidade da infiltração da água, e consequentemente interferir no período de efeito da precipitação sobre a FCO_2 e umidade do solo.

Em sistemas convencionais de manejo com o preparo do solo, estudos têm mostrado que também há um significativo aumento na emissão de CO_2 com evento de precipitação, porém após curto período a atividade microbiana do solo tende a normalizar-se e até mesmo diminuir com o solo ainda úmido, ocasionado uma queda brusca da FCO_2 (Varella et al., 2004; Moitinho et al., 2015), resultados contrários ao observados neste estudo.

Para Zanchi et al. (2003), a possível explicação para esta queda brusca na FCO_2 , é a camada selante de proteção da água no solo criando um ambiente anaeróbico, evitando assim a emissão de CO_2 . Os autores acreditam que à medida que ocorre a evaporação da água há um incremento na emissão, pois os poros ficam livres e ocorre um reestabelecimento da atividade aeróbia microbiana.

Entretanto, as variações da FCO_2 após esses eventos de precipitações podem estar também associadas à influência de outros fatores, além do crescimento microbiano e da retenção de água no solo, como por exemplo, a porosidade e o teor de matéria orgânica do solo (Xu e Qi, 2001; Panosso et al., 2009).

Os maiores valores de FCO_2 na monocultura da soja nos dias 229 e 230 (Tabela 2), em relação à monocultura do milho podem estar atribuídos ao sistema de manejo adotado. A quantidade de palhada remanescente do manejo SS ($1,32 \text{ t ha}^{-1}$) foi o menor encontrado em relação ao MM ($1,53 \text{ t ha}^{-1}$) e SM ($1,38 \text{ t ha}^{-1}$). A manutenção dos resíduos sob o solo influencia significativamente na dinâmica das emissões de CO_2 , conforme estudos similares conduzidos por Moitinho et al. (2015) e Tavares et al. (2015) em áreas manejadas sob resíduos da cultura da cana-de-açúcar.

A relação C/N da palhada encontrada na sequência de verão SS (51,2), também foi inferior quando comparado aos sistemas MM (89,24) e SM (80,48). Vários estudos reportam que maiores valores da relação C/N resultam em menores taxas de degradação do carbono orgânico (Longdoz et al., 2000; Norby et al., 2001; Vesterdal et al., 2008), refletindo assim na dinâmica da respiração do solo (Khomik et al., 2006; Dorodnikov et al., 2011).

Para às culturas de entressafra, os menores valores de FCO_2 foram verificados no solo sob resíduos de milheto e milho, também nos dias 229 e 230 (Tabela 2). Ainda que a quantidade de palhada residual do milheto ($1,31 \text{ t ha}^{-1}$) e do milho ($1,29 \text{ t ha}^{-1}$) apresente valores mais baixos que às outras culturas estudadas, a relação C/N pode compensar tal fato, já que os valores mais altos encontrados foram nesses resíduos.

As grandes variações da umidade do solo na SV e na CE também ocorreram após o evento chuvoso do dia 227 (Figura 6) (Tabela 4), conforme já mencionado. Além da presença da chuva, essas variações podem estar associadas à quantidade e ao tipo de resíduo remanescente no solo. A menor U_{solo} verificada na sequência SS nos dias 229 e 230 pode ser justificada pela menor presença de resíduos remanescentes nesse sistema. Resíduos vegetais deixados sobre a superfície do solo favorecem a diminuição da temperatura e amplitude térmica do solo, em decorrência do isolamento térmico promovido pelos resíduos vegetais. Como efeito, tem-se menor evaporação da água na superfície do solo, com consequente manutenção da umidade do solo, quando se compara manejos que eliminam os restos vegetais das culturas (Ussiri e Lal, 2009).

Esse comportamento é esperado, uma vez que as alterações na umidade do solo influenciam na dinâmica do gás carbônico (Kang et al., 2003), justificando a relevância dessa variável para a FCO_2 . Além do mais, a U_{solo} apresenta grande

variação espaço-temporal e uma relação direta com as condições climáticas locais (Panosso et al., 2009).

Em trabalho com a presença da palhada da cana-de-açúcar, em um mesmo tipo de solo, Moitinho et al. (2015) verificaram uma correlação linear, positiva e significativa ($r = 0,66$; $p < 0,05$), entre às médias diárias da FCO_2 e Usolo , assim como observado neste estudo. Já em trabalho com preparo do solo (sistema convencional), Souza et al. (2016) verificaram também a regressão linear significativa entre as emissões de CO_2 do solo e a umidade do solo no ($R^2 = 0,79$, $p < 0,01$), porém observa-se que os valores são diferentes. Isto pode estar associado ao tipo de sistema adotado e às características específicas de cada, como a melhor estrutura e maior agregação do solo presente no sistema de semeadura direta.

A Tsolo , assim como a Usolo também é uma variável dependente do clima e afeta diretamente a FCO_2 (Davidson et al., 2000; Teixeira et al., 2010; Silva-Olaya et al., 2013). O efeito na redução da Tsolo proporcionado pelos resíduos vegetais deixados na superfície do solo pelas culturas é um fator regulamentador da emissão de CO_2 , já que a atividade microbiana é acelerada com aumentos na temperatura do solo e, conseqüentemente, a taxa de mineralização do carbono é maior (Ussiri e Lal, 2009).

A maior temperatura do solo observada sob SS deve estar associada a menor quantidade de resíduos vegetais remanescente sob essa sequência ($1,32 \text{ t ha}^{-1}$), quando comparada às demais sequências de culturas de verão (Tabela 3).

A distribuição dos resíduos vegetais interfere na variação espaço-temporal da FCO_2 , conforme reportado por Panosso (2011), ao verificar que a distribuição mais homogênea na área de cana crua (palhada remanescente sob o solo) em um Latossolo Vermelho, necessita de número menor de pontos para caracterizar o comportamento da emissão nesse sistema, quando comparado ao sistema de cana queimada.

De forma geral, no presente estudo, a distribuição dos resíduos da SV e CE não foram tão homogêneas. Tal distribuição pode explicar a influência da temperatura do ar na Tsolo , já que no dia 199 registrou-se a menor temperatura do ar no período de estudo ($4,7^\circ\text{C}$). Houve uma queda de aproximadamente $3,5^\circ\text{C}$ na temperatura do solo em todos os manejos, exceto na cultura do guandu, cuja queda foi de $2,5^\circ\text{C}$.

Sabe-se que a temperatura do solo é considerada como um dos principais fatores influenciadores na dinâmica da emissão de CO₂ do solo (Graf et al., 2012). O fato da temperatura não se correlacionar à FCO₂, no presente estudo, pode ser compreendido, uma vez que, sua covariação com a umidade do solo pode mascarar a correlação temporal entre a respiração e a temperatura do solo (Herbst et al., 2009).

Neste sentido, alguns autores reportam que um problema adicional em se modelar o fluxo de CO₂ com a temperatura e a umidade do solo, decorre do fato de que essas podem covariar, dificultando separar os seus efeitos sobre a emissão de CO₂ do solo (Davidson et al., 2000; Schwendenmann et al., 2003; Savva et al., 2013).

Adicionalmente, no presente estudo, a temperatura do solo esteve mais associada à temperatura do ar do que à FCO₂ em escala temporal, o que explica a baixa correlação.

Ao se avaliar a dinâmica temporal da emissão de CO₂, além da influência direta da temperatura e umidade deve-se levar em consideração o manejo do solo, pois o efeito das variantes climáticas sobre a FCO₂ dependerá também das condições desse solo, o que torna complexa a caracterização do padrão da emissão do gás CO₂.

2.5 CONCLUSÕES

A variação na dinâmica da FCO₂ ao longo do período de estudo é explicada pela variação na umidade do solo, independentemente do manejo avaliado. Entretanto, não há relação significativa entre a emissão de CO₂ e a temperatura do solo.

REFERÊNCIAS

Acreche MM, Portocarrero R, Chalco Vera J, Danert C, Valeiro AH (2014) Greenhouse gas emissions from green-harvested sugarcane with and without post-harvest burning in Tucumán. **Sugar Tech** 16:195-199.

Ball BC, Smith KA (1991) Gas movement. In: Smith KA, Mullins CE (Eds.) **Soils analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekerp, p. 511-549.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J (2006) Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research** 86:237-245.

Brady NC, Weil RR (2012) **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. São Paulo: Bookman.

Calonego JC, Raphael JP, Rigon JP, Oliveira Neto L, Rosolem CA (2017) Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy** 85:31-37.

Campos BC (2006) **Dinâmica do carbono em Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Carbonell-Bojollo RM, Repullo-Ruibérriz MA, Rodríguez-Lizana A, Ordóñez-Fernández R (2012) Influence of soil and climate conditions on CO₂ emissions from agricultural Soils. **Water Air Soil Pollution**, v. 223, p. 3425–3435, 2012.

Cerri CEP, Sparovek G, Bernoux M, Easterling WE, Melillo JM, Cerri CC (2007) Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola** 64:83-99.

Chavez LF, Amado TJC, Bayer C, La Scala N, Escobar LF, Fiorin JE, Campos BHC (2009) Carbon dioxide efflux in a rhodic hapludox as affected by tillage systems in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:325-334.

Corrêa JC (1985) Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 20:1317-1322.

Davidson EA, Verchot LV, Cattânio H, Ackerman IL, Carvalho EM (2000) Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazônia. **Biogeochemistry** 48:53-69.

Dorodnikov M, Kuzyakov Y, Fangmeier A, Wiesenberger GLB (2011) C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric CO₂: Turnover vs. Stabilization. **Soil Biology and Biochemistry** 43:579-589.

Epron D, Bosc A, Bonal D, Freycon V (2006) Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology** 22:565-574.

Fang C, Moncrieff JB, Gholz HL, Clark KL (1998) Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil** 205:135-146.

Graf A, Herbst M, Weihermüller L, Huisman JA, Prolingheuer N, Bornemann L, Vereecken H (2012) Analyzing spatiotemporal variability of heterotrophic soil respiration at the field scale using orthogonal functions. **Geoderma** 181-182:91-101.

Herbst M, Prolingheuer N, Graf A, Huisman JA, Weihrmüller L, Vandeborghet J (2009) Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. **Vadose Zone Journal** 8:762-771.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis** of Working Group I. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) **Climate Change 2014: Mitigation**. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

Kang S, Kim S, Oh S, Lee D (2000) Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover, and air temperature. **Forest Ecology and Management** 136:173-184.

Kang S, Doh S, Lee D, Lee D, Jin VL, Kimball J (2003) Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology** 9:1427-1437.

Karhu K, Auffret MD, Dungait JAJ, Hopkins DW, Prosser JI, Singh BK, Subke J, Wookey PA, Agren GI, Sebastia M, Gouriveau F, Bergkvist G, Meir P, Nottingham AT, Salinas N, Hartley IP (2014) Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature** 513:81-84.

Khomik M, Arain MA, McCaughey JH (2006) Temporal and spatial variability of soil respiration in a boreal mixedwood forest. **Agricultural and Forest Meteorology** 140:244-256.

Lal R (1986) Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. **Advances in Soil Science** 5:1-109.

Lal R (2001) World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy** 71:145-191.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science** 60:158-169.

Lal R (2015) Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. **Journal of Soil and Water Conservation** 70:329-339.

La Scala N, Bolonhezi D, Pereira GT (2006) Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research** 91:244-248.

La Scala N, Panosso AR, Pereira GT, Paz González A, Miranda JGV (2009) Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics** 23:353-358.

Linn DM, Doran JW (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of American Journal** 48:1267-1272.

Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M (2000) Soil CO₂ efflux measurements in a mixed Forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. **Global Change Biology** 6:907-917.

Lopes AAC, Sousa DMG, Chaer G, Reis Júnior FB, Goedert WJ, Mendes IC (2013) Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal** 77:461-472.

Luo YQ, Zhou XH (2006) **Soil respiration and the environment**. San Diego: Academic Press, 328 p.

Marcelo AV (2011) **Decomposição de resíduos vegetais de culturas de entressafra em sistema de semeadura direta e efeitos nos atributos químicos de um Latossolo e na produtividade de soja e milho**. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Matos ES, Mendonça ES, Leite LFC, Galvão JCC (2008) Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 43:1221-1230.

Moitinho MR (2017) **Variabilidade da emissão de CO₂ do solo sob diferentes manejos em áreas de cana-de-açúcar**. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, Teixeira DDB, Ferraudo AS, La Scala N (2015) On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil and Tillage Research** 148:127-132.

Moreira FMS, Siqueira JO (2006) **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras.

Norby RJ, Cotrufo MF, Ineson P, O'Neill EG, Canadell JG (2001) Elevated CO₂, litter chemistry, and decomposition: a synthesis. **Oecologia** 127:153-165.

Oertel C, Matschulla J, Zurbach K, Zimmermann F, Erasmí S (2016) Greenhouse gas emissions from soils-A review. **Chemie der Erde – Geochemistry** 76:327-352.

Ordóñez-Fernández R, Carbonell-Bojollo R, González Fernández P, Perea Torres F (2008) Influencia de la climatología y el manejo del suelo en las emisiones de CO₂ en un suelo arcilloso de la vega de Carmona. **Carex** 6:2339-2354.

Panosso AR, Marques Júnior J, Milori DMBP, Ferraudo AS, Barbieri DM, Pereira GT, La Scala N (2011) Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research** 111:190-196.

Panosso AR, Marques Júnior J, Pereira G, La Scala N (2009) Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research** 105:275-282.

R Development Core Team (2017) **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2018.

Rosolem CA, Li Y, Garcia RA (2016) Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management** 32:495-503.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 590 p.

Savva SC, Lamnisos D, Kafatos AG (2013) Predicting cardiometabolic risk: waist-to-height ratio or BMI. A meta-analysis. **Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity** 6:403-419.

Schwartz RC, Baumhardt RL, Evett SR (2010) Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil & Tillage Research** 110:221-229.

Schwendenmann L, Veldkamp E, Brenes T, O'Brien JJ, Mackensen J (2003) Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry** 64:111-128.

Silva-Olaya AM, Cerri CEP, La Scala N, Dias CTS, Cerri CC (2013) Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters** 8:1-8.

Six J, Frey SD, Thies RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal** 70:555-569.

Tavares RLM, Farhate CVV, Souza ZM, La Scala N, Torres JLR, Campos MCC (2015) Emission of CO₂ and soil microbial activity in sugarcane management systems. **African Journal of Agricultural Research** 10:975-982.

Teixeira LG, Lopes A, La Scala N (2010) Temporal variability of soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola** 30:224-231.

Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review** 38:55-94.

Ussiri AN, Lal R (2009) Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research** 104:39-47.

Varella RF, Bustamante MMC, Pinto AS, Kisselle KW, Santos RV, Burke RA, Zepp RG, Viana LT (2004) Soil fluxes of CO₂, CO, NO and N₂O an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications** 14:221-231.

Vesterdal L, Schmidt IK, Callesen I, Nilsson LO, Gundersen P (2008) Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. **Forest Ecology and Management** 255:35-48.

Vieira MJ, Muzilli O (1984) Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 19:873-882.

Xu M, Qi Y (2001) Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology** 7:667-677.

Zanchi FB, Rocha HR, Kruijt B, Cardoso FL, Deus JA, Aguiar LJG (2003) Medição do efluxo de CO₂ do solo: monitoramento com câmaras automáticas sobre floresta e pastagem em Rondônia. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, Anais... Fortaleza: SEB, p. 631-632.

CAPÍTULO 3 – EMISSÃO DE CO₂ ASSOCIADA AOS ATRIBUTOS DO SOLO E RESÍDUOS DE CULTURAS SOB SEMEADURA DIRETA NO SUDESTE DO BRASIL

RESUMO – No presente estudo objetivou-se quantificar e caracterizar a relação da emissão de CO₂ com os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo, ao final do ano agrícola 2015/2016, em área sob sistema de semeadura direta com rotação de culturas consolidado por mais de 16 anos. Às sequências de culturas de verão foram constituídas pela monocultura de milho; monocultura de soja; cultivos em rotação de soja e milho. Às culturas de entressafra foram: milho, milheto, quando, sorgo granífero e crotalária. Foram conduzidas 16 avaliações sob a palhada remanescente oriunda da combinação das sequências de verão com às culturas de entressafra, compreendidas num período total de 51 dias, sendo avaliadas a emissão de CO₂ (FCO₂), a temperatura e a umidade do solo. Ao final dessas foram avaliados os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. O delineamento experimental foi em faixas, com três repetições. Por meio da análise multivariada observou-se que a caracterização do padrão da FCO₂ e dos demais atributos do solo em função dos manejos com os resíduos das culturas de verão e de entressafra, difere de acordo com a camada analisada. Na camada de 0,10-0,20 m não houve diferença entre os manejos estudados; porém, ao avaliar a camada mais superficial (até 0,10 m), os teores de argila, matéria orgânica, soma de bases, carbono da biomassa microbiana, atividade enzimática da desidrogenase e amilase, além do grau de humificação da matéria orgânica, contribuíram para caracterizar às diferenças na emissão de CO₂. Desta forma, a variação na emissão é mais influenciada pela microbiota e pelos manejos na camada mais superficial do solo. Na camada de 0-0,10 m, os atributos do solo relacionados com a produção exercem mais influência na dinâmica da FCO₂; já na camada subsuperficial, os atributos relacionados ao transporte gasoso passam a ser um fator tão importante quanto a produção na variação da emissão de CO₂ nos manejos avaliados.

Palavras-chave: análise multivariada, enzimas do solo, gramíneas, leguminosas, manejo conservacionista, palhada, respiração do solo

CHAPTER 3 – CO₂ EMISSION ASSOCIATED WITH SOIL ATTRIBUTES AND CROP RESIDUES UNDER A NO-TILLAGE IN SOUTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT – This study aimed to quantify and characterize the relationship between soil CO₂ emission (FCO₂) and soil physical, chemical, and microbiological attributes at the end of the agricultural year in an area under a no-tillage system with crop rotation for more than 16 years. Summer crop sequences consisted of corn monoculture, soybean monoculture, and soybean-corn rotation. Off-season crops were corn, millet, pigeon pea, grain sorghum, and crotalaria. Sixteen assessments of FCO₂, soil temperature, and soil moisture were carried out on the remaining straw resulting from the combination of summer sequences and off-season crops over a 51-day period. Subsequently, soil physical, chemical, and microbiological attributes were assessed in the 0–0.10 and 0.10–0.20 m layers. The experimental design was in strips with three replications. The multivariate analysis showed that the characterization of the pattern of FCO₂ and other soil attributes as a function of the management with summer and off-season crop residues, differed according to the analyzed soil layer. In the 0.10–0.20 m layer no difference was observed between the studied treatments. However, the contents of clay, organic matter, the sum of bases, microbial biomass carbon, dehydrogenase and amylase enzyme activity, and the humification index of organic matter in the most superficial soil layer (up to 0.10 m) contributed to characterize the differences in FCO₂. In the 0–0.10 m layer, the soil attributes related to CO₂ production had more influence on FCO₂ dynamics. On the other hand, in the subsurface layer, the attributes related to gas transport become factors as important as the production in the variation of FCO₂ in the assessed management systems.

Keywords: conservationist management, grasses, legumes, multivariate analysis, soil enzymes, soil respiration, straw

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil desempenha um papel relevante na produção de alimentos, visto que é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de importantes *commodities* agrícolas. Uma produção agrícola que visa sustentabilidade econômica, ambiental e social são os desafios atuais da agricultura mundial (FAO, 2017). A contribuição da agricultura para a emissão dos gases de efeito estufa (GEE) no cenário brasileiro, está principalmente relacionada ao uso e manejo da terra, sendo que as atividades agrícolas respondem por mais de dois terços do total destas emissões (IPCC, 2014).

No solo, a concentração de CO₂ é significativamente maior do que na atmosfera, na ordem de 10 a 100 vezes (Moreira e Siqueira, 2006); sendo assim, estudos têm investigado formas de manejo que conservem e incrementem o teor de carbono no solo (Smith et al., 2014; Paustian et al., 2016).

O aumento de carbono no solo ocorre quando o balanço entre às entradas e saídas deste é positivo (Janzen, 2004). As principais vias de entrada de carbono no solo em áreas agrícolas, são decorrentes da deposição de resíduos vegetais e do uso de fertilizantes orgânicos no solo (Paul et al., 2013). Já as principais vias de saída ocorrem por meio da remoção dos resíduos, no processo de erosão, lixiviação de carbono orgânico dissolvido e perda do carbono na forma de CO₂ (C-CO₂) (Davidson e Janssens, 2006). Neste contexto, sistemas de manejo que possibilitem a baixa movimentação do solo, como o sistema de semeadura direta (SSD), são alternativas para mitigar as emissões de GEE oriundas das atividades agrícolas (Lal, 2015; Bayer et al., 2016; Paustian et al., 2016).

O SSD ocupa 32 milhões de hectares no Brasil, sendo que a proposta do governo brasileiro é a ampliação de sua utilização em mais 8 milhões de hectares até o ano de 2020 (Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação – Febrapdp, 2015), ocupando aproximadamente 120 milhões de hectares em todo o território mundial (FAO, 2017).

A matéria orgânica do solo (MOS) está diretamente relacionada aciclagem, na retenção de nutrientes e na formação e estabilidade dos agregados do solo, com consequente efeito na dinâmica da água e do ar do solo (aeração), na resistência do solo à penetração, na taxa de metabolismo e crescimento microbiano (Rosolem et al.,

2016; Calonego et al., 2017).

Do carbono presente no solo em sua forma orgânica, uma parte considerável encontra-se na MOS (Carvalho et al., 2010). Durante a decomposição da MOS, os microrganismos utilizam o carbono de que necessitam para seu metabolismo, e o restante é perdido por respiração na forma de CO₂ (Six et al., 2006).

Às enzimas presentes no solo, por sua vez, são importantes indicadores da diversidade funcional da comunidade microbiana. Essas podem ser encontradas dentro de células microbianas, bem como extracelularmente no solo, ligadas a minerais de argila e a substâncias húmicas (Cordeiro et al., 2012). O aumento da população microbiana na camada superficial do solo em determinados sistemas, pode ser explicado pelas melhores condições para o desenvolvimento desses microrganismos, como por exemplo uma maior disponibilidade de matéria orgânica do solo.

Portanto, as emissões de CO₂ oriundas do solo estão associadas com a decomposição dos resíduos vegetais, a taxa metabólica dos microrganismos e à respiração das raízes, além da oxidação da matéria orgânica (Bronick e Lal, 2005; Reicosky et al., 2005), sendo assim, afetada pelo sistema de manejo do solo.

Na manutenção do sistema de semeadura direta, é essencial que o esquema de rotação de culturas promova a manutenção permanente de uma quantidade mínima de palhada na superfície do solo. A rotação de culturas, devido a seus resíduos vegetais, influencia na dinâmica do carbono do solo com relação às entradas e saídas e, conseqüentemente, no estoque (Zotarelli et al., 2012; Laudicina et al., 2014), proporcionando variação no aporte do carbono fotossintetizado ao solo, interferindo também na ciclagem do carbono e nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Para que às práticas de manejo sejam eficientes em sequestrar carbono a quantidade de matéria orgânica deve ser suficiente no sistema, visto que esta atua na dinâmica de carbono em resposta à decomposição contínua da matéria orgânica do solo (Lal, 2001).

Dentre as espécies empregadas na rotação de culturas sob SSD, destacam-se às leguminosas, pela baixa relação carbono/nitrogênio (C/N), o que leva a uma rápida decomposição (Giacomini et al., 2003). A escolha da leguminosa a ser implantada no SSD é de extrema importância, tanto para diminuir às entradas de fertilizante sintético

quanto para a maximização no sequestro de carbono no solo (Bayer et al., 2000; Six et al., 2002). Os resíduos oriundos das gramíneas decompõem-se mais lentamente e permanecem mais tempo sobre o solo, isto pode ser atribuído a sua relação C/N mais alta (Wisniewski e Holtz, 1997). Estas plantas são consideradas importantes condicionadoras das qualidades física, química e biológica do solo (Rosolem et al., 2016; Calonego et al., 2017).

Às culturas de entressafra devem ser escolhidas de acordo com a produção de matéria seca com elevadas concentrações de nutrientes, proporcionando assim a cobertura do solo e a reciclagem de nutrientes. Já às sequências de verão adotadas no SSD devem apresentar características favoráveis tanto à proteção do solo, proporcionadas principalmente por resíduos de gramíneas, quanto pelo aporte de nutrientes propiciados pelas leguminosas, devido aos resíduos vegetais diferentes na superfície do solo (Almeida et al., 2008).

Em face do exposto, a hipótese deste estudo é que a quantidade dos resíduos vegetais das culturas de verão e de entressafra e a relação C/N destes em áreas sob semeadura direta, atuam de formas diferentes sobre a estrutura física, os atributos químicos e a atividade microbiológica do solo, influenciando na dinâmica da emissão de CO₂ do solo. Assim, neste estudo objetivou-se quantificar e caracterizar a relação da emissão de CO₂ com os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo, ao final do ano agrícola, em área sob sistema de semeadura direta com sucessão e rotação de culturas consolidado por mais de 16 anos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização das áreas em estudo

O estudo foi conduzido no município de Jaboticabal-SP, Sudeste do Brasil. As coordenadas centrais da área são 21°15'22" S e 48°18'58" O, e a altitude local é de 550 m (Figura 1).

O clima é definido como B_{1r}B'_{4a}, mesotérmico úmido, com pequena deficiência hídrica de acordo com a classificação de Thornthwaite (1948), precipitação média

anual de 1.424 mm (períodos de maior concentração entre os meses de outubro a março), e precipitações mais espaçadas, de menores intensidades, de abril a setembro. A temperatura média anual é de 22,2 °C.

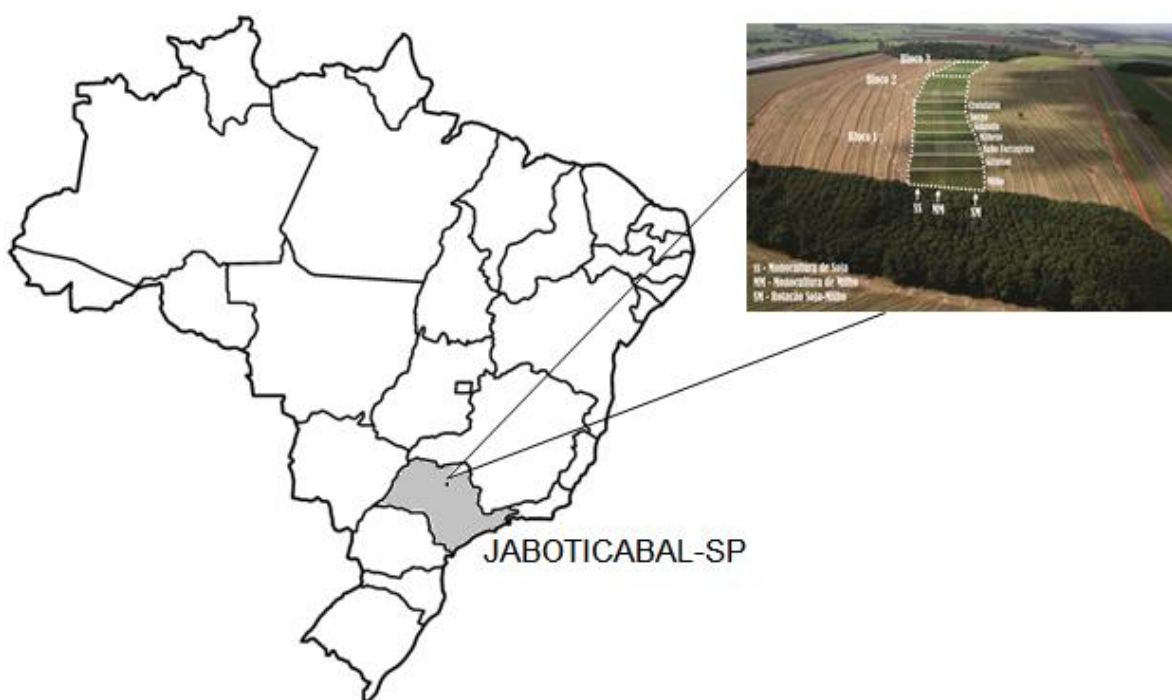


Figura 1. Localização da área experimental.

O solo da área experimental foi classificado segundo Santos et al. (2018) como Latossolo Vermelho eutrófico, textura argilosa, A moderado, caulínítico, hipoférrico (LVe) e relevo suave ondulado (3-8%), com 556 g kg⁻¹ de argila, 63 g kg⁻¹ de silte e 381 g kg⁻¹ de areia na camada de 0-0,20 m.

A área utilizada possui sistema de semeadura direta e com rotação de culturas, implantado em 2001. O estudo foi realizado entre os meses de julho e agosto de 2016, referente ao ano agrícola de 2015/2016.

Antes da instalação do experimento os atributos químicos do solo para camada de 0-0,20 m foram: pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) = 5,0; Carbono orgânico = 11 g kg⁻¹; P (resina) = 13 mg dm⁻³; K = 4,1, Ca = 15, Mg = 9, acidez potencial = 34 e CTC = 62,1, 15 em mmolc dm⁻³; saturação por bases = 45%. Para implantação do SSD foram realizadas operações de subsolagem à 40 cm de profundidade e de calagem para elevação da saturação por bases do solo para 70%. Também foram realizadas

operações de aração e gradagem para incorporação do calcário com PRNT de 100%, aplicado na dose de 1,5 Mg ha⁻¹.

Os tratamentos consistiram em combinações de três sequências de culturas de verão com cinco culturas de entressafra. Às sequências de culturas de verão foram: monocultura de milho (*Zea mays* L.); monocultura de soja (*Glycine max* L.); rotação soja-milho com cultivos intercalados de soja e milho ano a ano, sendo o milho a cultura utilizada quando o estudo foi realizado.

Às culturas de entressafra foram: milho (*Zea mays* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária (*Crotalaria juncea* L.), semeadas em março/abril de cada ano agrícola.

Os tratamentos foram distribuídos no delineamento experimental em faixas, com três repetições. Foram demarcados 2 pontos amostrais para a área útil, distribuídos de forma aleatória, com distância mínima de 5 m entre os pontos. Para esta marcação foram inseridos no solo colares de PVC (com 10 cm de diâmetro) em cada ponto amostral, a uma profundidade de 3 cm (Figura 2).

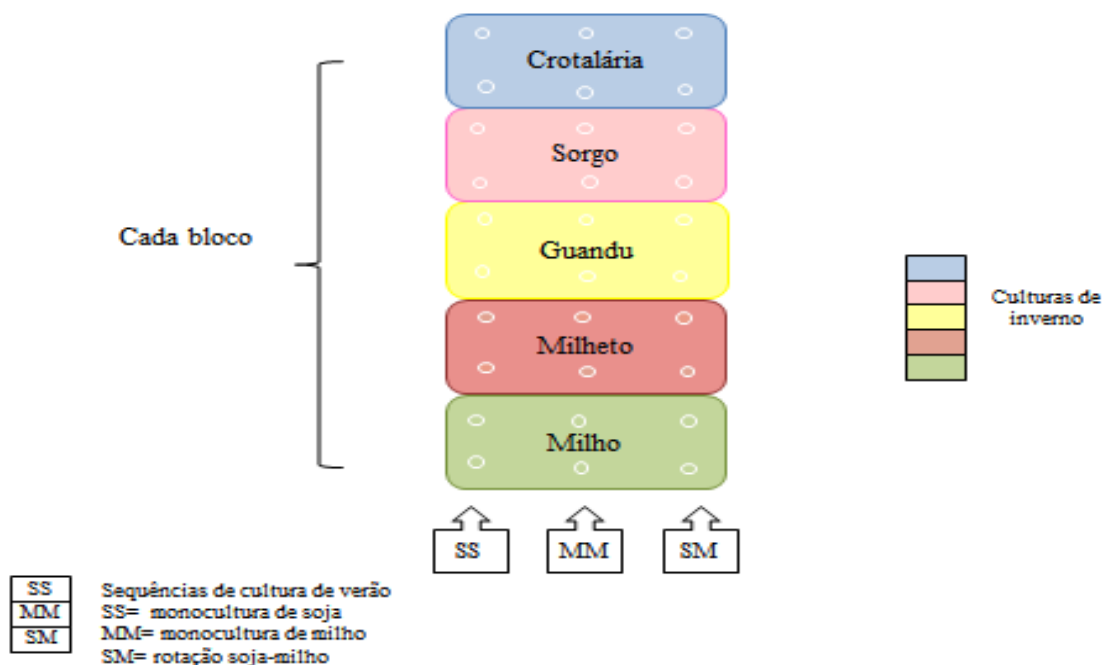


Figura 2. Área experimental: constituída das sucessões das sequências das culturas de verão com as culturas de entressafra.

Nas sequências de verão, a cultura do milho foi implantada com espaçamento de 90 cm entre linhas (60 mil plantas ha^{-1}). Para este ano foi utilizada a mesma variedade de milho (2B520) em SM e MM. Na sequência com a soja (SS) foi utilizada a variedade S3037 com espaçamento de 45 cm entre linhas (480 mil plantas ha^{-1}).

Foi realizada adubação de plantio de 400 kg ha^{-1} da formula NPK 8-28-16 para às áreas com milho e 300 kg ha^{-1} da NPK 4-20-20 para área com monocultivo de soja, a adubação de cobertura do milho foi feita com 300 kg ha^{-1} da formula NPK 20-00-20 para SM e MM no momento em que a planta encontrava-se com seis folhas desdobradas.

Para às culturas de entressafra a adubação de cobertura só é realizada quando necessária.

3.2.2 Avaliação da FCO₂, temperatura e umidade do solo

Foram conduzidas 16 avaliações, entre os dias 10 de julho de 2016 e 29 de agosto de 2016, realizadas durante o horário matutino, das 6 às 9 h. Para a emissão de CO₂ do solo, foi utilizado o sistema portátil LI-COR, modelo LI-8100, que monitora às variações da concentração de CO₂ no interior da câmara de solos, por meio de espectroscopia de absorção óptica, na região espectral do infravermelho. O tempo de medição para a determinação da emissão de CO₂ do solo levou 90 segundos em cada um dos pontos, e a concentração de CO₂ dentro da câmara foi determinada a cada 2,5 segundos. Ao mesmo tempo da avaliação da emissão de CO₂, foram também determinadas a temperatura e a umidade do solo.

A temperatura do solo (Ts) foi monitorada por meio de um sensor de temperatura, que é parte integrante do sistema LI-8100. Da mesma forma, a umidade do solo (Us) foi registrada utilizando-se de um aparelho TDR – Time Domain Reflectometry (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália).

3.2.3 Determinação dos atributos químicos e físicos do solo

A amostragem do solo foi realizada após o término das avaliações da FCO₂, temperatura e umidade do solo. Nos 90 pontos marcados por meio da inserção prévia

de colares de PVC, foram coletadas 90 amostras simples deformadas e indeformadas, totalizando 180 amostras coletadas na camada de 0-0,10 m, e outras 90 amostras simples deformadas e indeformadas, totalizando também 180 amostras coletadas na camada de 0,10-0,20 m (Figura 3).

Às amostras de solo foram coletadas com auxílio de um trado tipo holandês. Após a coleta, estas foram secas, destorroadas e peneiradas (na peneira de 2 mm) e foram submetidas as seguintes análises químicas: pH, determinação do teor de matéria orgânica (MOS), disponibilidade de P (resina) e teores de K, Ca, Mg e H+Al (Raij et al., 2001), cálculo da soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions do solo (CTC).



Figura 3. Imagens ilustrativas da coleta das amostras de solo para as análises químicas.

O grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) foi determinado por meio da fluorescência induzida por laser (Milori et al., 2006). Já a técnica do fracionamento físico da matéria orgânica (COAM) foi conduzida conforme Cambardella e Elliott (1992), e a análise granulométrica (areia, silte e argila) foi determinada por meio da metodologia da Embrapa (2017). Nas amostras indeformadas obtidas por anéis volumétricos (0,05 m de diâmetro x 0,05 m altura) foram realizadas as seguintes análises físicas: densidade do solo (D_{solo}), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro) e volume total de poros, conforme Embrapa (2017) (Figura 4).



Figura 4. Coleta das amostras físicas do solo.

3.2.4 Análises microbiológicas

Para as análises microbiológicas, utilizaram-se às amostras simples deformadas do solo. O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado por meio do método de irradiação-extração proposto por Islam e Weil (1998), adaptado por Barbosa (2015). A capacidade de retenção de água (CRA) foi ajustada para 100%, uma vez que ensaios prévios com o solo à 70% da CRA não foram suficientes para promover o rompimento celular, conforme sugere o método (Figura 5).



Figura 5. Imagens ilustrativas da metodologia para a determinação do carbono da biomassa microbiana no solo.

A atividade da enzima desidrogenase no solo foi determinada segundo Casida et al. (1964), e a atividade enzimática da amilase, segundo Somogyi (1952) e Cole (1977) (Figura 6).

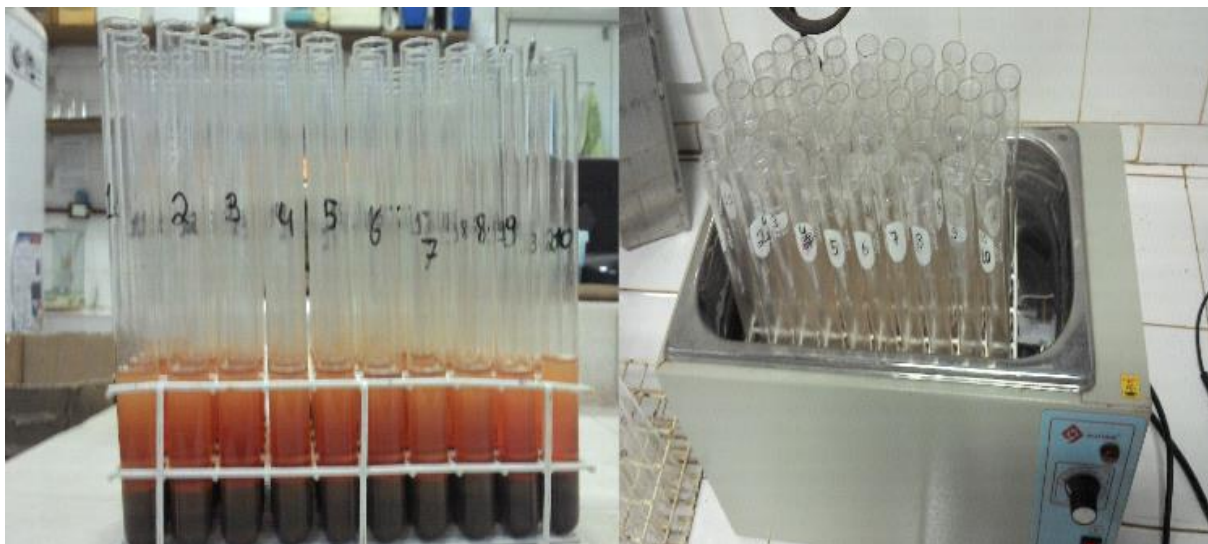


Figura 6. Imagens ilustrativas da metodologia para a determinação da atividade enzimática da desidrogenase no solo.

3.2.5 Determinação da massa seca e da relação C/N da palhada remanescente das culturas

O material remanescente em cada sistema avaliado foi amostrado no dia 9 de julho de 2016, de uma área representativa de 1 m², sendo coletada uma amostra por parcela experimental, totalizando 3 amostras para cada manejo avaliado.

Os resíduos foram acondicionados em sacos de papel e levados à estufa com circulação forçada de ar na temperatura de 65 °C até atingir peso constante, para posterior determinação da massa seca. Em seguida o material foi triturado em moinho tipo Wiley e submetido à determinação de carbono (Tedesco et al., 1995) e nitrogênio (Bataglia et al., 1983) (Tabela 1).

Tabela 1. Quantidade de palhada remanescente no solo (t/ha) e relação C/N das palhadas das sequências de verão e culturas de entressafra avaliadas no estudo.

Quantidade de palhada remanescente no solo (t/ha)						
Sequências de culturas de verão (SV)	Culturas de entressafra (CE)					
	Crotalária	Guandu	Milheto	Milho	Sorgo	Média
MM	1,3	1,71	1,05	1,61	1,98	1,53
SM	1,48	1,05	1,87	1,01	1,51	1,38
SS	1,41	1,48	1,01	1,25	1,47	1,32
Média	1,39	1,41	1,31	1,29	1,65	
F (SV)	0,17					
F (CE)	0,25					
F (SV*CE)	0,95					
CV% (SV)	56					
CV% (CE)	35					

Relação C/N das palhadas						
Sequências de culturas de verão (SV)	Culturas de entressafra (CE)					
	Crotalária	Guandu	Milheto	Milho	Sorgo	Média
MM	83,5	81,3	109,1	102,1	70,2	89,2
SM	84,3	76,3	91,5	74,5	75,8	80,4
SS	51,1	53,9	53,7	55,2	42,1	51,2
Média	72,9	70,5	84,7	77,2	62,7	
F (SV)	164,42					
F (CE)	1,01					
F (SV*CE)	0,37					
CV% (SV)	8					
CV% (CE)	33					

N = 3. MM= monocultura de milho; SM= rotação de soja e milho; SS= monocultura de soja.

3.2.6 Processamento e análise de dados

Inicialmente, a FCO₂ e os atributos do solo foram submetidos às análises exploratórias multivariadas de componentes principais. Esta análise teve como objetivo reduzir o número de variáveis e visualizar os atributos que melhor interagem com a emissão de CO₂ do solo. Desta forma, dentre os 30 atributos (FCO₂; Ts; Us; volume total de poros; porosidade livre de água; Macro; Micro; Dsolo; densidade de partículas; teor de areia, argila e silte; pH; teor de P, K, Ca, Mg e H⁺ Al; MOS; SB; V%; estoque de C e de N; atividade da respiração microbiana; CBM; quociente

metabólico do solo; atividade enzimática da desidrogenase e amilase; Hlifs e Coam) avaliados, foram selecionados para análise somente 16 (FCO₂; Ts; Us; Macro; Micro; Dsolo; teor de argila; pH; teor de Ca; MOS; SB; CBM; atividade enzimática da desidrogenase e amilase; Hlifs e Coam). Além do critério de não colinearidade, foram considerados para interpretação somente os atributos que apresentaram coeficientes com valor absoluto acima de 0,50.

Os autovetores (componentes principais) são novas variáveis, gerados por combinações lineares das variáveis originais, construídos com os autovalores da matriz de covariância (Hair et al., 2005). Para a interpretação do significado de cada componente principal, foram utilizados o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes das funções lineares, como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Após padronização dos dados (média nula e variância unitária), às análises foram processadas no programa Statistica 7.0 (StatSoft. Inc. Tulsa, OK, EUA). Foram considerados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), cujos autovalores foram superiores à unidade, conforme o critério estabelecido por Kaiser (1958).

Ao final, quando definidas as variáveis que ficaram retidas no mesmo componente principal que a FCO₂ em função das duas camadas em estudo, foi realizada a ANOVA para cada variável original e considerando o delineamento experimental utilizado, sendo três tratamentos constituídos pelos resíduos das culturas de verão e cinco tratamentos constituídos pelas palhadas residuais das culturas de entressafra. Essas análises foram processadas no software R (R Development Core Team, 2017).

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Relações multivariadas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m

Quando avaliado os dados da camada de 0-0,10 m (Figura 7a), o primeiro componente principal (CP1) representou 55%, e o segundo componente principal

(CP2) representou 21% da variância total dos dados originais (Tabela 2). Desta forma, juntos, CP1 e CP2, explicaram 76% da variância original.

O processo contido em CP1 é o mais importante para o estudo, pois é derivado do maior autovalor e possui o maior percentual de explicação (55%). Dentre os 13 atributos do solo selecionados pela análise 8 ficaram retidos em CP1, no qual os atributos que mais contribuíram nesse componente por ordem de relevância foram representados por: MOS (-0,90), Hlifs (0,84), SB (-0,78), Argila (-0,77), CBM (-0,77), FCO₂ (-0,68), Amilase (-0,67) e Desidrogenase (-0,65) (Tabela 2). Os atributos com mesmo sinal estão diretamente associados entre si, e de sinais contrários estão inversamente associados.

De acordo com as relações entre os atributos o componente principal CP1 foi caracterizado como o processo associado à produção de CO₂ no interior do solo. Com exceção de Hlifs, os atributos retidos em CP1 estão todos projetados para a mesma direção das amostras provenientes dos manejos com as leguminosas crotalária e guandu (entressafra) e as sequências de verão: monocultura de milho (MM), rotação soja-milho (SM) e monocultura de soja (SS) (Figura 7a), indicando que o solo manejado com as leguminosas na entressafra, independentemente da cultura de verão, resulta na maior quantidade de MOS, SB, Argila, CBM, FCO₂, atividades da Amilase e Desidrogenase e menor Hlifs, quando comparado aos demais manejos em estudo.

Ainda em relação a camada de 0-0,10 m, em CP2, também por ordem de relevância, ficaram retidos os atributos: pH (-0,89), Dsolo (-0,81), Micro (-0,79), Ts (-0,68) e Us (0,62) (Figura 2a e Tabela 2). De acordo com os sinais, pH, Dsolo, Micro e Ts (mesmo sinal negativo) estão diretamente associados entre si, porém inversamente associados a Us (sinal positivo) (Tabela 2).

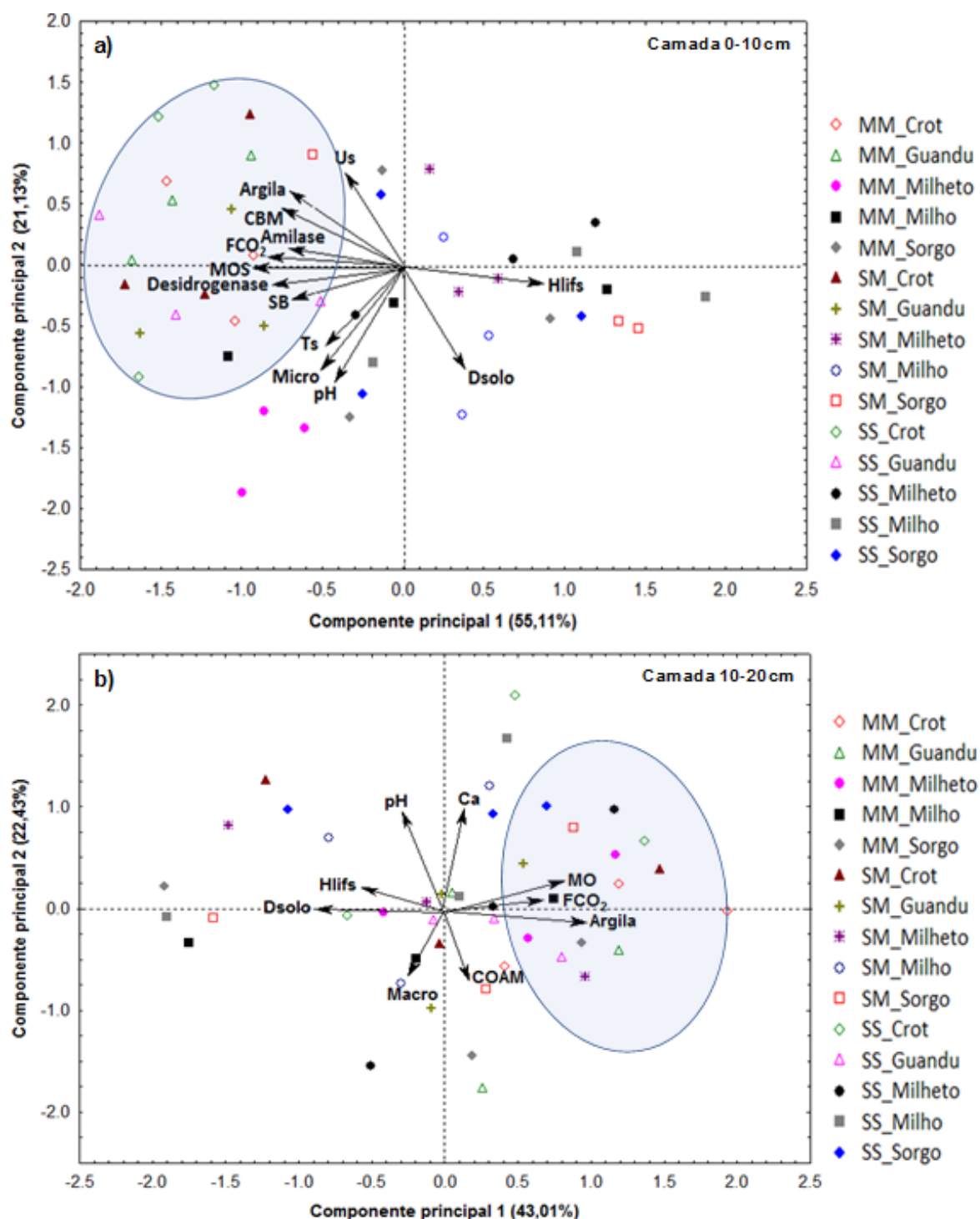


Figura 7. Gráfico biplot contendo os atributos do solo e os tratamentos avaliados. FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Macro = macroporosidade do solo; Micro= microporosidade do solo; Dsolo = densidade do solo; Argila = teor de argila; Us = umidade do solo; Ts = temperatura do solo; pH = potencial hidrogeniônico do solo; MOS = teor de matéria orgânica do solo; SB = soma de bases trocáveis no solo; Ca= teor de cálcio no solo; CBM = carbono da biomassa microbiana no solo; COAM = carbono do solo associado aos minerais; Desidrogenase = atividade da desidrogenase no solo; Amilase= atividade da amilase no solo; Hlifs = grau de humificação da matéria orgânica do solo.

Tabela 2. Correlação entre os atributos do solo e os dois primeiros componentes principais (CP1-CP2) na camada de 0-0,10 m.

Componentes principais	CP1	CP2
Variância explicada (%)	55,11*	21,13*
Correlações		
FCO ₂	-0,68	-0,06
Us	-0,22	0,62
Ts	-0,29	-0,68
Micro	-0,41	-0,79
Dsolo	0,37	-0,81
Argila	-0,77	0,48
pH	-0,35	-0,89
MOS	-0,90	-0,01
SB	-0,78	-0,22
CBM	-0,77	0,22
Desidrogenase	-0,65	-0,17
Amilase	-0,67	-0,05
Hlifs	0,84	-0,21
Interpretação de CP1	Produção de CO₂ do solo	

* Valor referente à porcentagem da variação do conjunto original dos dados retida pelos respectivos componentes principais. Correlações em negrito (>0,60 em valor absoluto) foram consideradas na interpretação do componente principal. FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Us = umidade do solo; Ts = temperatura do solo; Micro = microporosidade do solo; Dsolo = densidade do solo; Argila = teor de argila; pH = potencial hidrogeniônico do solo; MOS = teor de matéria orgânica do solo; SB = soma de bases trocáveis no solo; CBM = carbono da biomassa microbiana no solo; Desidrogenase= atividade da desidrogenase no solo; Amilase = atividade da amilase no solo, Hlifs= grau de humificação da matéria orgânica do solo.

Tabela 3. Correlação entre os atributos do solo e os dois primeiros componentes principais (CP1-CP2) na camada de 0,10-0,20 m.

Componentes principais	CP1	CP2
Variância explicada (%)	43,01*	22,43*
Correlações		
FCO ₂	0,59	0,18
Macro	-0,20	-0,52
Dsolo	-0,85	0,08
Argila	0,95	0,07
pH	-0,23	0,88
Ca	0,25	0,96
MOS	0,76	0,33
Hlifs	-0,55	0,18
COAM	0,20	-0,55
Interpretação de CP1	Produção e transporte de CO₂ do solo	

* Valor referente à porcentagem da variação do conjunto original dos dados retida pelos respectivos componentes principais. Correlações em negrito (>0,50 em valor absoluto) foram consideradas na interpretação do componente principal. FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Macro = macroporosidade do solo; Micro = microporosidade do solo; Dsolo = densidade do solo; Areia= teor de areia; Argila = teor de argila; pH = potencial hidrogeniônico do solo; Ca= teor de cálcio no solo; MOS = teor de matéria orgânica do solo; Hlifs= grau de humificação da matéria orgânica do solo; COAM= carbono do solo associado aos minerais.

Considerando que os componentes são ortogonais entre si (não correlacionados), os processos que ocorrem em CP1 agem independentes do processo que ocorre em CP2; ou seja, no presente estudo, quando avaliada a camada mais superficial do solo, o pH, a densidade e a microporosidade do solo, bem como a temperatura e a umidade não estão relacionados as variações no processo de emissão de CO₂ do solo, observadas devido aos sistemas de manejo estudados nesse trabalho. Por este motivo serão discutidas somente as relações em CP1, uma vez que a FCO₂ ficou retida neste componente, em ambas as camadas do solo avaliadas.

Diferentemente, quando analisada a camada de 0,10-0,20 m (Figura 7b) não foi possível observar um padrão, ou seja, a identificação de características que pudessem estar associadas aos manejos e, assim, permitir distingui-los em função dos atributos avaliados no presente estudo.

Para a camada de 0,10-0,20 m, o CP1 representou 43%, e o CP2 representou 22% da variância total dos dados originais, explicando, juntos, 65% da variância original (Figura 2b). Em CP1, ficaram retidos os atributos: Argila (0,95), MOS (0,76), FCO₂ (0,59), Dsolo (-0,85) e Hlifs (-0,55) (Figura 7b e Tabela 3). Já em CP2, por ordem de relevância, ficaram retidos os atributos: Ca (0,96), pH (0,88), COAM (-0,55) e Macro (-0,52) (Figura 7b e Tabela 3). De acordo com os sinais (mesmo sinal positivo), Ca e pH estão diretamente associados, e inversamente associados a COAM e a Macro (sinal negativo) (Tabela 3).

Os atributos: FCO₂, Argila e MOS, em CP1, estão projetados para a mesma direção das amostras provenientes dos manejos com as leguminosas crotalária e guandu, e com as gramíneas milho e sorgo (entressafra) e MM, SM e SS (verão) (Figura 7b). A dispersão das amostras provenientes desses manejos indica a inexistência de um padrão que possa ser caracterizado em função dos atributos avaliados, tanto quando analisados os atributos localizados à direita (FCO₂, Argila e MOS) quanto à esquerda (Dsolo e Hlifs) de CP1 (Tabela 3). Assim, as relações em CP1, na camada de 0,10-0,20 m, indicam que nesta camada o componente 1 pode ser interpretado a partir dos processos relacionados à produção e ao transporte de CO₂ do solo.

3.3.2 Relações univariadas nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m dos atributos retidos em CP1

Para a camada de 0-0,10 m, o teor de argila, a soma de bases trocáveis e o CBM não apresentaram efeito significativo quando analisadas a interação sequências de verão (SV) versus culturas de entressafra (CE), e tiveram o mesmo comportamento quando analisados isoladamente SV e CE (Tabela 4). Para a FCO_2 houve efeito significativo da interação entre às sequências de verão e culturas de entressafra ($F = 1,78$; $p = 0,09$) (Tabela 4), indicando que a dinâmica da emissão do CO_2 do solo é influenciada pelo efeito combinado entre esses dois aportes residuais.

Tabela 4. Emissão média de CO₂ (FCO₂), Teor de Argila (Argila), Teor de matéria orgânica (MOS), Soma de bases trocáveis (SB), Carbono da biomassa microbiana (CBM), Atividade da desidrogenase (Desidrogenase), Atividade da amilase (Amilase) e Grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) do solo, nas sequências de verão (SV), e culturas de entressafra (CE) na camada de 0-0,10 m.

Sequências de verão (SV)*	FCO ₂	Argila	MOS	SB	CBM	Desidrogenase	Amilase	Hlifs
	(μmol m ⁻² s ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mmolc dm ⁻³)	(mg g ⁻¹ de C no solo)	(mg TPF g ⁻¹ solo seco 24 h ⁻¹)	(μg de glicose tubo ⁻¹)	(u.a.)
Monocultura Milho (MM)	1,04	558,86 a	24,38 a	31,88 a	55,95 a	52,18 b	25,23 a	6112,15 a
Rotação Soja/Milho (SM)	1,07	560,62 a	24,80 a	34,53 a	44,43 a	57,21 ab	26,20 a	5498,13 a
Monocultura Soja (SS)	1,06	551,04 a	23,83 a	37,07 a	54,26 a	62,56 a	31,64 a	6184,62 a
F (blocos)	1,92(0,26)	12,29(0,01)	52,13(0,001)	7,12(0,05)	2,27(0,22)	0,61(0,59)	0,18(0,84)	19,97(0,001)
F (sequências de verão)	0,77(0,52)	0,49(0,65)	0,17(0,85)	1,48(0,33)	0,63(0,58)	67,90(0,001)	1,81(0,28)	0,41(0,69)
CV (%)	15	9	12	32	33	4	15	14
Culturas de entressafra (CE)**	FCO ₂	Argila	MOS	SB	CBM	Desidrogenase	Amilase	Hlifs
	(μmol m ⁻² s ⁻¹)	(g/kg)	(g kg ⁻¹)	(mmolc dm ⁻³)	(mg g ⁻¹ de C no solo)	(mg TPF g ⁻¹ solo seco 24 h ⁻¹)	(μg de glicose tubo ⁻¹)	(u.a.)
Crotalária	1,24	566,70 a	27,86 a	36,24 a	56,95 a	68,57 a	42,00 a	5201,14 b
Guandu	1,18	567,32 a	28,02 a	32,27 a	61,77 a	69,82 a	26,29 ab	5381,42 ab
Milheto	0,93	552,67 a	22,97 b	38,24 a	55,19 a	47,34 a	27,70 ab	6334,47 ab
Milho	0,89	521,00 a	21,61 b	31,21 a	37,48 a	57,70 a	26,65 ab	6106,27 ab
Sorgo	1,05	576,51 a	21,22 b	34,41 a	46,33 a	42,95 a	15,81 b	6634,67 a
F (culturas de entressafra)	3,74(0,06)	0,64(0,65)	6,04(0,02)	1,59(0,27)	1,14(0,40)	0,31(0,86)	3,48(0,06)	3,07(0,08)
CV (%)	19	20	13	28	52	35	24	13
F (SV x CE)	1,78(0,09)	0,92(0,50)	1,05(0,41)	0,95(0,49)	1,64(0,13)	0,67(0,71)	1,40(0,22)	0,97(0,47)
CV (%)	15	12	12	17	41	11	17	11

* N = 30; ** N = 18. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

No desdobramento dessa interação, observou-se que dentro das sequências MM e SM não há diferença entre os aportes oriundos das culturas de entressafra em relação ao FCO_2 , e dentro da sequência SS, as leguminosas (crotalária e guandu) não diferiram entre si. Nas gramíneas o sorgo diferiu do milheto e do milho, mas o milho e o milheto não diferiram (Tabela 5).

Tabela 5. Desdobramento da interação entre as sequências de verão e as culturas de entressafra para a FCO_2 .

Culturas de entressafra (CE)	FCO_2					
	Sequências de verão (SV)					
	Monocultura Milho (MM)		Rotação Soja/Milho (SM)		Monocultura soja (SS)	
Crotalária	1,08	Aa	1,03	Aa	1,11	ABa
Guandu	1,06	Aa	1,05	Aa	1,02	ABCa
Milheto	0,91	Aa	0,95	Aa	0,93	BCa
Milho	0,91	Aa	0,91	Aa	0,85	Ca
Sorgo	0,89	Ab	1,12	Aa	1,20	Aa

Médias seguidas pela mesma maiúscula nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Já a MOS diferiu ($p < 0,10$) somente em relação às culturas de entressafra, os maiores valores foram no solo sob os resíduos das culturas de leguminosas quando comparadas às gramíneas. Ao comparar os valores médios da matéria orgânica, o solo sob resíduo da crotalária ($27,86 \text{ g kg}^{-1}$) apresentou 29% mais matéria orgânica que o solo sob o resíduo da cultura do milho ($21,61 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 4).

Para a atividade enzimática da desidrogenase, observaram-se diferenças significativas quando analisadas às sequências de verão (SV) (Tabela 4). Os menores valores da desidrogenase foram encontrados no solo sob a sequência de monocultura de milho ($52,18 \text{ mg TPF g}^{-1}$ solo seco 24 h^{-1}), quando comparados a monocultura de soja ($62,56 \text{ mg TPF g}^{-1}$ solo seco 24 h^{-1}).

Em relação a atividade enzimática da amilase, observou-se diferença significativa quando analisadas às culturas de entressafra (CE) (Tabela 4). Os solos sob os resíduos das culturas da crotalária ($42 \text{ } \mu\text{g}$ de glicose tubo $^{-1}$) apresentaram valores mais elevados da atividade dessa enzima que o solo sob às culturas do sorgo ($15,81 \text{ } \mu\text{g}$ de glicose tubo $^{-1}$). O grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) foi 28%

menor no solo sob resíduos da crotalaria (5201,14 u.a.) quando comparado ao solo sob resíduos do sorgo (6634,67 u.a.).

Já na camada de 0,10-0,20 m verificou-se que o teor de argila, a densidade do solo e a Hlifs, quando analisados a interação SV × CE, e isoladamente, às sequências de verão (SV) e às culturas de entressafra (CE) não apresentaram efeito significativo ($p > 0,10$) (Tabela 6).

Tabela 6. Emissão média de CO₂ do solo (FCO₂), Densidade do solo (Dsolo), Teor de argila (Argila), Teor de matéria orgânica do solo (MOS) e Grau de humificação da matéria orgânica (Hlifs) do solo, nas sequências de verão (SV), e culturas de entressafra (CE) na camada de 0,10-0,20 m.

Sequências de verão (SV)*	FCO ₂	Dsolo	Argila	MOS	Hlifs
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	(g/dm ³)	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(u.a)
Monocultura Milho (MM)	1,04	1,48 a	555,37 a	18,21 a	7715,00 a
Rotação Soja/Milho (SM)	1,07	1,51 a	555,13 a	16,99 b	8408,18 a
Monocultura Soja (SS)	1,06	1,47 a	570,07 a	18,62 a	7470,80 a
F (blocos)	1,92(0,26)	1,74(0,29)	1,33(0,36)	0,49(0,65)	3,55(0,13)
F (sequências de verão)	0,77(0,52)	1,87(0,27)	2,24(0,22)	12,36(0,02)	3,50(0,13)
CV (%)	15	5	6	7	18
Culturas de entressafra (CE)**	FCO ₂	Dsolo	Argila	MOS	Hlifs
	($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	(g/dm ³)	(g/kg)	(g kg ⁻¹)	(u.a)
Crotalaria	1,24	1,46 a	588,78 a	18,53 a	7422,25 a
Guandu	1,18	1,48 a	579,22 a	17,56 a	7715,40 a
Milheto	0,93	1,50 a	558,94 a	17,68 a	7760,27 a
Milho	0,89	1,52 a	529,00 a	17,45 a	8175,05 a
Sorgo	1,05	1,50 a	545,00 a	18,48 a	8250,33 a
F (culturas de entressafra)	3,74(0,06)	0,13(0,97)	0,26(0,89)	0,16(0,95)	1,33(0,34)
CV (%)	19	19	36	35	16
F (SV x CI)	1,78(0,09)	0,46(0,88)	0,50(0,85)	1,21(0,31)	1,62(0,14)
CV (%)	15	4	4	13	13

* N = 30; ** N = 18. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 10% de probabilidade.

Em relação à matéria orgânica do solo, também não houve diferenças significativas em relação às culturas de entressafra, diferindo-se apenas em relação às sequências de verão (Tabela 6). Os teores de MOS foram maiores no solo sob resíduos da sequência de monocultura de soja (18,62 g kg⁻¹) e do milho (18,21 g kg⁻¹), quando comparados ao solo sob a rotação de soja-milho (16,99 g kg⁻¹).

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Relações de interdependência entre a emissão de CO₂ e os atributos do solo

A diferença na emissão de CO₂ e dos demais atributos do solo em função dos manejos com os resíduos das culturas de verão e entressafra, foi específica para cada camada estudada. Tal fato pode estar relacionado a maior expressão da atividade microbiana do solo na camada superficial (0-0,10 m).

Segundo alguns autores, o sistema de semeadura direta aumenta os teores de carbono orgânico do solo nas camadas mais superficiais, influenciado pelo sistema radicular de cada cultura; desta forma, as maiores alterações na dinâmica do carbono, em relação à distribuição, adições e perdas, ocorrem nas camadas superficiais do solo (Bayer et al., 2004; Carmo et al., 2012). No entanto, para outros autores, este mesmo sistema pode aumentar os valores de carbono devido ao tempo de sua implantação em todas às camadas analisadas (Santos et al., 2001; Chimento e Amaducci, 2015).

3.4.2 Camada do solo de 0-0,10 m

Devido aos atributos retidos em CP1 e suas respectivas relações (Figura 2a e Tabela 2), esse componente pode ser interpretado como relacionado ao processo de produção de CO₂ no solo, e que resultará em maiores ou menores valores da FCO₂ dependendo do manejo adotado. A produção de CO₂ no interior do solo é um processo bioquímico relacionado à atividade biológica, como a respiração de raízes e a decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana, influenciada pela temperatura, umidade e estado nutricional do solo (Epron et al., 2006; Concilio et al., 2009).

A MOS, que apresentou associação direta com a FCO₂ (Tabela 2), é indispensável para o entendimento da dinâmica da FCO₂, visto que esta atua na retenção de nutrientes (Six et al., 2006), na limitação do crescimento microbiano e em sua taxa de respiração (Lal, 2004). O sistema de semeadura direta com rotação de culturas e da manutenção da cobertura do solo propicia maior aporte de material

orgânico, influenciando o ciclo do carbono e, conseqüentemente, às trocas gasosas entre o solo e à atmosfera.

Wick et al. (2012), ao avaliar as relações existentes entre os atributos do solo e a emissão de CO₂, verificaram que a matéria orgânica disponível explicou 60% da variabilidade espacial da emissão de CO₂, sendo está favorecida pela qualidade do substrato. Em um Latossolo-Vermelho, Moitinho et al. (2015) também observaram correlação positiva entre a FCO₂ e a MOS.

A relação direta entre a soma de bases trocáveis e a FCO₂ (Tabela 2) é compreensível, uma vez que a SB está associada à fertilidade do solo e, conseqüentemente, a maior disponibilidade de nutrientes para a atividade microbiana do solo e à liberação de CO₂, conforme reportado pelos autores Epron et al. (2006), Lal (2009) e Moitinho (2017).

O teor de argila do solo também apresentou correlação direta com a FCO₂ (Tabela 2). O acúmulo de carbono orgânico como resultado da interação positiva entre as partículas de argila e a MOS, é comumente reportado na literatura para solos argilosos (Christensen, 2000). O incremento do teor de carbono orgânico no solo resulta no aumento do fornecimento de energia para o metabolismo da biomassa microbiana, ocasionando maior liberação de CO₂ para a atmosfera.

Contudo, resultados contrários foram encontrados por La Scala et al. (2000), que verificaram modelos de relação negativa entre a FCO₂ e o teor de argila do solo. Segundo os autores, os resultados sugerem uma relação complexa entre os minerais de argila e à atividade microbiana do solo, já que a argila pode promover proteção física ao adsorver moléculas orgânicas em sua superfície, protegendo o carbono orgânico da ação microbiana e impedindo a mineralização da matéria orgânica do solo (Dominy et al., 2002).

O carbono, associado à biomassa microbiana do solo (CBM), representa a parte viva da matéria orgânica do solo (Jenkinson e Ladd, 1981). Sendo composto por diversos microrganismos que atuam como agentes de transformação da MOS, assim como na ciclagem de nutrientes (Wardle, 1992; Barbosa, 2015), corrobora a associação direta entre o CBM, a MOS e a FCO₂ (Tabela 2). O CBM do solo responde rapidamente às pequenas alterações na matéria orgânica decorrente de mudanças nas condições ambientais e no manejo do solo (Yang et al., 2016).

Moitinho (2017), estudando a emissão de CO₂ do solo sob diferentes manejos em áreas de cana-de-açúcar, verificou que a emissão possui estreita relação com a dinâmica da microbiota do solo e correlação positiva com o CBM, corroborando com o presente estudo.

A determinação das enzimas do solo indica a diversidade funcional da microbiota (Cordeiro et al., 2012). Dentre elas, a atividade da amilase, que está relacionada ao ciclo biológico do carbono (Guedes, 2013), é essencial nos processos de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, na disponibilização de nutrientes ao solo (Barbosa, 2015). Portanto, existe uma relação direta entre a MOS e à atividade enzimática da amilase do solo, o que pode ser um indicador importante devido a sua sensibilidade às alterações nos substratos oriundos de diferentes sistemas, conforme reportado por outros estudos (Guedes, 2013; Barbosa, 2015).

A FCO₂ e a atividade enzimática da desidrogenase também apresentaram associação direta entre si (Tabela 2). A atividade enzimática da desidrogenase está correlacionada à atividade metabólica intracelular, refletindo no crescimento microbiano, e associada à fração ativa da comunidade microbiana do solo (Tan et al., 2008). Conforme relatado por Moitinho (2017), em estudo sobre os atributos microbiológicos em duas áreas distintas, a atividade enzimática da desidrogenase foi maior na área que apresentou maior FCO₂.

A relação negativa entre Hlifs e FCO₂ (Tabela 2), pode estar associada ao carbono orgânico elevado na fração lábil e ao maior consumo pelos microrganismos do solo, devido à sua maior labilidade, sendo que o aumento do carbono lábil (diminuição de Hlifs) resultaria no aumento da FCO₂, corroborando os resultados obtidos por Panosso et al. (2011), sugerindo que a matéria orgânica humificada não é a principal fonte de carbono na FCO₂.

Ao estudarem o grau da humificação da matéria orgânica de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo, Favoretto et al. (2008) constataram que o aporte de matéria orgânica fresca, na superfície do solo em sistema de semeadura direta, ocasiona diluição da matéria orgânica mais humificada, resultando em altos teores de carbono e em baixo grau de humificação da matéria orgânica.

Em adição, analisando-se a FCO₂, a combinação dos resíduos vegetais remanescentes (SV × CE) interfere na dinâmica do gás e as diferentes composições

C/N das culturas podem explicar este comportamento, já que esta atua diretamente na velocidade de decomposição destes resíduos vegetais. Os maiores valores de FCO₂ encontrados na cultura do sorgo (entressafra) dentro da monocultura da soja (sequência de verão) pode estar relacionado ao menor valor médio da relação C/N (42,1) (Tabela 1). Esta baixa relação, favorece uma decomposição mais rápida e uma maior atividade microbiana, favorecendo assim a emissão de CO₂.

Para matéria orgânica do solo (Tabela 4), os maiores valores desse atributo foram observados no solo sob os resíduos das culturas leguminosas. Embora tenham sido observados valores semelhantes da quantidade de palhada e da relação C/N entre estas culturas de entressafra (Tabela 1) nas sequências de verão, tal resultado pode ser explicado pelos menores valores das relações C/N dessas culturas: crotalária (72,96) e guandu (70,5) (Tabela 1).

A relação C/N é um importante índice que permite avaliar o grau de evolução da MOS, da atividade biológica do solo e da capacidade de produzir formas nitrogenadas assimiláveis. Vários estudos reportam que maiores valores da relação C/N resultam em menores taxas de degradação do carbono orgânico (Vesterdal et al., 2008), refletindo assim a dinâmica da respiração do solo (Dorodnikov et al., 2011).

Os menores valores da desidrogenase encontrados no solo sob a sequência da monocultura de milho, quando comparados à monocultura de soja, podem estar associados às relações C/N das sequências de verão estudadas (Tabela 1), uma vez que, no solo sob a monocultura de soja, a relação C/N (51,2) foi menor que nos demais manejos. A menor relação C/N, com maior oferta de MOS, devido a uma decomposição mais rápida, resulta em uma maior respiração da microbiota e, portanto, maior FCO₂.

Já os maiores valores da amilase na cultura da crotalária em relação ao sorgo, indicam maiores quantidades de carboidratos nas leguminosas em relação às gramíneas, visto que os valores da relação C/N de ambas são diferentes. Ao analisar Hlifs, espera-se que as relações C/N mais altas tenham maior grau de humificação da matéria orgânica, como pode ser observado ao comparar às culturas do sorgo e crotalária.

3.4.3 Camada do solo de 0,10-0,20 m

A partir das associações em CP1, esse componente foi interpretado como o processo que está ocorrendo no solo, relacionado à produção e ao transporte de CO_2 , e que resultará em maiores ou menores valores da FCO_2 nos manejos avaliados.

O transporte do CO_2 do interior do solo até a superfície ocorre por meio dos mecanismos de difusão e de fluxo de massa, e esses mecanismos variam em função de textura, estrutura e teor de umidade do solo (Ball e Smith, 1991; Kang et al., 2000). A relação inversa entre a densidade do solo e à FCO_2 pode ser explicada, já que a menor densidade (D_{solo}) facilita às trocas de gases entre o solo e a atmosfera, favorecendo a respiração e, por conseguinte, o aumento nas emissões de CO_2 do solo (Brady e Weil, 2012; Teixeira et al., 2013).

A D_{solo} e a porosidade influenciam na oxigenação e no transporte de CO_2 do solo para a atmosfera (Tabela 3), favorecendo assim a atividade microbiológica e o aumento da FCO_2 (Epron et al., 2006). Em alguns estudos também foram observadas correlações negativas entre a FCO_2 e a D_{solo} , ressaltando a importância da porosidade do solo para a atividade microbiana e para às trocas gasosas (Epron et al., 2006; Panosso et al., 2011; Moitinho, 2017).

A matéria orgânica do solo (Tabela 6) é influenciada por alguns fatores, dentre eles a relação C/N do substrato. Na rotação soja-milho a relação C/N (80,48) foi maior que a encontrada na monocultura da soja (51,20) (Tabela 1). Uma maior relação C/N propicia decomposição mais lenta e, portanto, menores taxas de degradação do carbono orgânico, resultando também na menor oferta de MOS no sistema.

3.5 CONCLUSÕES

A variação na emissão de CO_2 é mais influenciada pela microbiota e pelos manejos na camada mais superficial do solo. Na camada de 0-0,10 m, os atributos do solo relacionados com a produção exercem mais influência na dinâmica da FCO_2 ; já na camada subsuperficial, os atributos relacionados ao transporte passam a ser um fator tão importante quanto à produção na variação da emissão de CO_2 nos manejos

avaliados.

Os teores de argila, matéria orgânica, soma de bases, carbono da biomassa microbiana, atividade enzimática da desidrogenase e amilase, além do grau de humificação da matéria orgânica, contribuem para caracterizar o processo de emissão de CO₂ em solos manejados com resíduos de culturas de entressafra, sendo importantes indicadores da dinâmica do gás CO₂ em sistema de semeadura direta.

REFERÊNCIAS

- Almeida VP, Alves MC, Silva EC, Oliveira SA (2008) Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo Vermelho de Cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1227-1237.
- Ball BC, Smith KA (1991) Gas movement. In: Smith KA, Mullins CE, editores. **Soils analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekerp, p. 511-549.
- Bayer C, Gomes J, Zanatta JA, Vieira FCB, Dieckow J (2016) Mitigating greenhouse gas emissions from a subtropical Ultisol by using long-term no-tillage in combination with legume cover crops. **Soil and Tillage Research** 161:86-94.
- Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A (2004) Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39:677-683.
- Bayer C, Mielniczuk J, Martin-Neto L (2000) Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 24:599-607.
- Barbosa MA (2015) **Atributos microbiológicos do solo em sistemas de manejo de longa duração**. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.
- Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo.
- Brady NC, Weil RR (2012) **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. São Paulo: Bookman.
- Bronick CJ, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. **Geoderma** 124:3-22.

Calonego JC, Raphael JP, Rigon JP, Oliveira Neto L, Rosolem CA (2017) Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy** 85:31-37.

Cambardella CA, Elliott ET (1992) Participate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal** 56:777-783.

Carmo FF, Figueiredo CC, Ramos MLG, Vivaldi J, Araújo LG (2012) Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio com gramíneas. **Bioscience Journal** 28:420-431.

Carvalho JLN, Avanzi JC, Silva MLN, De Mello CR, Cerri CEP (2010) Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:277-290.

Casida L, Klein D, Santoro T (1964) Soil dehydrogenase activity. **Soil Science** 98:371-376.

Chimento, C, Amaducci, S (2015) Characterization of fine root system and potential contribution to soil organic carbon of six perennial bioenergy crops. **Biomass and Bioenergy** 83:116-122.

Christensen BT (2000) Organic matter in soil: structure, function and turnover. In: Christensen BT, editor. **Plant production**. Tjele: Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Center Foulum.

Cole MA (1977) Lead inhibition of enzyme synthesis in soil. **Applied and Environmental Microbiology** 33:262-268.

Concilio A, Chen J, Ma S, North M (2009) Precipitation drives interannual variation in summer soil respiration in a Mediterranean-climate, mixed-conifer forest. **Climatic Change** 92:109-122.

Cordeiro MAS, Corá JE, Nahas E (2012) Atributos bioquímicos e químicos do solo rizosférico e não rizosférico de culturas em rotação no sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 36:1794-1803.

Davidson EA, Janssens IA (2006) Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature** 440:165-173.

Dominy CS, Haynes RJ, Van Antwerpen R (2002) Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils** 36:350-356.

Dorodnikov M, Kuzyakov Y, Fangmeier A, Wiesenberger GLB (2011) C and N in soil organic matter density fractions under elevated atmospheric CO₂: Turnover vs. Stabilization. **Soil Biology and Biochemistry** 43:579-589.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017) **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Epron D, Bosc A, Bonal D, Freycon V (2006) Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology** 22:565-574.

FAO – Food and Agriculture Organization (2017) **Production: crops**. Disponível em: <www.faostat.org>. Acesso em: 13 nov 2017.

Favoretto CM, Gonçalves D, Milori DMBP, Rosa JA, Leite WC, Brinatti AM, Saab SC (1996) Determination of humification degree of organic matter of an oxisol and of its organo-mineral fractions. **Química Nova** 31:1994-1996.

Febrapdp – Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação (2015) **Plantio direto: a tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira**. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu.

Giacomini SJ, Aita C, Vendruscolo ERO, Cubilla M, Nicoloso RS, Fries MR (2003) Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:325-334.

Guedes ACTP (2013) **Atividade biológica e enzimática em solo tratado com Cloreto e Sulfato de Bário**. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE, Tatham RL (2005) **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) **Climate Change 2014: Mitigation**. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

Islam KR, Weil RR (1998) Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils** 27:408-416.

Janzen HH (2004) Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. **Agriculture Ecosystems & Environment** 104:399-417.

Jenkinson DS, Ladd JN (1981) Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul EA, Ladd JM (Eds.) **Soil biochemistry**. 3. ed. New York: Marcel Decker, p. 415-471.

Kaiser HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika** 23:187-200.

Kang S, Kim S, Oh S, Lee D (2000) Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover, and air temperature. **Forest Ecology and Management** 136:173-184.

Lal R (2001) World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advance in Agronomy** 71:145-191.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma** 123:122.

Lal R (2009) Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science** 60:158-169.

Lal R (2015) Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. **Journal of Soil and Water Conservation** 70:329-339.

La Scala N, Marques Júnior J, Pereira GT, Corá JE (2000) Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32:1469-1473.

Laudicina VA, Novara A, Gristina L, Badalucco L (2014) Soil carbon dynamics as affected by long-term contrasting cropping systems and tillages under semiarid Mediterranean climate. **Applied Soil Ecology** 73:140-147.

Milori DMBP, Galeti, HVA, Martin-Neto L, Dieckow J, González-Pérez M, Bayer C, Salton J (2006) Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal** 70:57-63.

Moitinho MR (2017) **Variabilidade da emissão de CO₂ do solo sob diferentes manejos em áreas de cana-de-açúcar**. 145 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, Teixeira DDB, Ferraudo AS, La Scala N (2015) On the spatial and temporal dependence of CO₂ emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum* spp.) production. **Soil and Tillage Research** 148:127-132.

Moreira FMS, Siqueira JO (2006) **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras.

Panosso AR, Marques Júnior J, Milori DMBP, Ferraudo AS, Barbieri DM, Pereira GT, La Scala N (2011) Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under slash-and-burn and green harvest. **Soil and Tillage Research** 111:190-196.

Paul BK, Vanlauwe B, Ayuke F, Gassner A, Hoogmoed M, Hurisso TT, Koala S, Lelei D, Ndabamenye T, Six J, Pulleman MM (2013) Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 164:14-22.

Paustian K, Lehmann J, Ogle S, Reay D, Robertson GP, Smith P (2016) Climate-smart soils. **Nature** 532:49-57.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JÁ (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico.

Reicosky DC, Lindstrom MJ, Schumacher TE, Lobb DE, Malo DD (2005) Tillage-induced CO₂ loss across an eroded landscape. **Soil and Tillage Research** 81:183-194.

R Development Core Team (2017) **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing; 2018.

Rosolem CA, Li Y, Garcia RA (2016) Soil carbon as affected by cover crops under no-till under tropical climate. **Soil Use and Management** 32:495-503.

Santos HP, Fontaneli RS, Tomm GO (2001) Efeito de sistemas de produção de grãos e de pastagens sob plantio direto sobre o nível de fertilidade do solo após cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 25:645-653.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 590 p.

Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil** 241:155-176.

Six J, Frey SD, Thies RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal** 70:555-569.

Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA, Haberl H, Harper R, House J, Jafari M, Masera O, Mbow C, Ravindranath NH, Rice CW, Abad CR, Romanovskaya A, Sperling F, Tubiello FN, Bolwig, S (2014) **Agriculture, forestry and other land use (AFOLU)**. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University Press: Cambridge, p. 811-922.

Somogyi M (1952) Notes on sugar determination. **Journal of Biological Chemistry** 195:19-23.

Tan X, Chang SX, Kabzems R (2008) Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. **Biology and Fertility of Soils** 44:471-479.

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Wolkweiss SJ (1995) **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Teixeira DDB, Bicalho ES, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, La Scala N (2013) Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola** 70:195-203.

Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review** 38:55-94.

Vesterdal L, Schmidt IK, Callesen I, Nilsson LO, Gundersen P (2008) Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. **Forest Ecology and Management** 255:35-48.

Wardle DA (1992) A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society** 67:321-358.

Wick AF, Phillips RL, Liebig MA, West M, Lee Daniels W (2012) Linkages between soil micro-site properties and CO₂ and N₂O emissions during a simulated thaw for a northern prairie Mollisol. **Soil, Biology & Biochemistry** 50:118-125.

Wisniewski C, Holtz GP (1997) Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 32:1191-1197.

Yang N, Zou D, Yang M, Lin Z (2016) Variations in soil microbial biomass carbon and soil dissolved organic carbon in the re-vegetation of hilly slopes with purple soil. **PLoS One** 11:e0166536.

Zotarelli L, Zatorre NP, Boddey RM, Urquiaga S, Jantalia CP, Franchini JC, Alves BJ (2012) Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research** 132:185-195.

CAPÍTULO 4 – Implicações

A demanda cada vez mais crescente por alimentos, devido ao aumento da população mundial, traz à tona uma preocupação constante sobre a utilização dos recursos naturais e a expansão de novas áreas agrícolas. Em vista disso, há maior conscientização sobre os sistemas de manejos que visam à sustentabilidade.

Sistemas conservacionistas cada vez mais utilizados no Brasil, têm por finalidade minimizar os problemas ambientais causados por manejos inadequados do solo e da cultura, sendo atualmente um método eficiente em relação às questões ambientais e também econômicas, quando comparado aos sistemas convencionais.

Esta prática conservacionista é considerada como fundamental para mitigação de emissão de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂, já que o incremento deste gás possui, além das consequências maléficas já conhecidas relacionadas à alteração no clima, a perda de carbono para a atmosfera (C-CO₂), representando assim grande ameaça para o solo.

Neste cenário, o sistema de semeadura direta com sucessões e rotações de culturas propicia melhores condições para os atributos químicos e microbiológicos do solo. No entanto, ainda há diferenças entre os atributos do solo e consequentemente na emissão de CO₂, nos tipos de manejos adotados.

Com este estudo observou-se que existe maior variação na emissão de CO₂ na camada mais superficial do solo e que os atributos edáficos relacionados com o processo de produção de CO₂, a exemplo da matéria orgânica e da atividade enzimática dos microrganismos do solo, exercem mais influência na dinâmica do gás do que os atributos físicos relacionados ao transporte. Ainda pode-se ressaltar que ao longo do tempo a variação na emissão de CO₂ do solo é mais estável quando avaliada em manejos conservacionistas, sendo que as maiores variações foram observadas somente após eventos de precipitação, indicando sua maior sensibilidade às alterações na umidade do solo, independentemente do manejo avaliado.

Outro fator importante a se destacar é que a relação C/N da palhada remanescente possibilitou a compreensão da dinâmica da emissão de CO₂. A menor relação C/N encontrada na monocultura da soja e uma decomposição mais rápida destes resíduos, favorece maior emissão de CO₂ devido ao maior fornecimento de

matéria orgânica para a microbiota do solo.

Em suma, estratégias como o manejo do solo sob semeadura direta podem ser consideradas muito eficientes, pois independente dos resíduos gerados pelas diversas culturas empregadas sob este sistema, o mesmo contribui significativamente para a redução da emissão de CO₂ do solo, auxiliando na mitigação de gases de efeito estufa.

Para futuros trabalhos, análises como às microbiológicas - que permitam identificar os tipos de microrganismos do solo, e às físicas de agregação do solo podem ser realizadas para melhor discussão na produção e transporte da emissão de CO₂.