

ISABEL CRISTINA VINHAL-FREITAS

MATÉRIA ORGÂNICA, FLUXO DE CO₂ E ÍNDICE Q₁₀ EM DOIS LATOSSOLOS
COM TEXTURAS CONTRASTANTES SOB DIFERENTES USOS NO CERRADO

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia – Doutorado, área de
concentração em Solos, para obtenção do título de
“Doutora”.

Orientador

Prof. Dr. Gilberto Fernandes Corrêa

Co-orientador

Prof. Dr. Adão de Siqueira Ferreira

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

ISABEL CRISTINA VINHAL FREITAS

MATÉRIA ORGÂNICA, FLUXO DE CO₂ E ÍNDICE Q₁₀ EM DOIS LATOSSOLOS
COM TEXTURAS CONTRASTANTES SOB DIFERENTES USOS NO CERRADO

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de
Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de
concentração em Solos, para obtenção do título de
“Doutora”.

APROVADA em 21 de fevereiro de 2013.

Dr. Bruno Teixeira Ribeiro	UFU
Dr. Lucas Carvalho Basílio de Azevedo	UFU
Dr. Eduardo de Sá Mendonça	UFES
Dra. Marisa de Cássia Piccolo	CENA/USP

Prof. Dr. Gilberto Fernandes Corrêa
ICIAG-UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

V784m Vinhal-Freitas, Isabel Cristina, 1983-
2013 Matéria orgânica, fluxo de CO₂ e índice Q₁₀ em dois latossolos com texturas contrastantes sob diferentes usos no cerrado / Isabel Cristina Vinhal-Freitas. -- 2013.
91 f.

Orientador: Gilberto Fernandes Corrêa.

Coorientador: Adão de Siqueira Ferreira.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Microorganismos do solo - Teses. 2. Solos - Manejo - Teses. 3. Solo - Uso - Teses. 4. Solos - Bioquímica - Teses. 5. Enzimas - Teses. I. Corrêa, Gilberto Fernandes. II. Ferreira, Adão de Siqueira. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

**"O meu olhar alcança o longe.
Contempla o território que me separa da concretização de meu desejo.
O destino final que o olhar já reconhece como recompensa,
aos pés se oferece como lonjura a ser vencida.
Mas não há pressa que seja capaz de diminuir esta distância.
Estamos sob a prevalência de uma imposição existencial,
regra que ensina, que entre o ser real e o ser desejado,
há o senhorio inevitável do tempo das esperas"**

Pe. Fábio de Melo

À minha avó, meu exemplo de mulher corajosa e batalhadora.

Sem o seu esforço, confiança e investimento,
eu não poderia ser a primeira doutora da família.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre me abençoou nesta vida e que perdoa minhas falhas.

Está claro que todos nós poderíamos fazer uma lista das pessoas que exerceram influência em nossas vidas de modos tão significativos e profundos que são indescritíveis e compartilharam conosco sua sabedoria. Pessoas que, em sua aceitação de nós, assim como em sua recusa em aceitar as partes de nós que sabiam que não tínhamos escolhido, fizeram-nos crescer, ficar de algum modo maiores... É complicado citar nomes... Mas agradeço muito:

À minha avó Jay e aos meus tios Sil e Clau, os quais sempre me apoiaram nesta luta, e sempre ficaram felizes com as minhas vitórias e torceram pelo meu bem maior. Também agradeço aos meus irmãos, os quais espero poder me orgulhar sempre.

Ao meu querido namorado/noivo/amigo Benó, por muito mais do que motivação e segurança, mas pelo apoio em todas as fases do projeto, sendo o responsável por minha permanência no programa de pós-graduação, apesar de todos os percalços pessoais ocorridos neste período. Tive muita vontade de desistir e ele não deixou. Manteve-me firme. Espero um dia conseguir retribuir toda a paciência que teve comigo, tanto pela minha ausência, quanto pelas minhas angústias em relação a este trabalho, pois chorei por vezes pelos dois anos que não consegui me dedicar ao doutorado e também pelo desafio do novo emprego, à 500 km de distância. Além da parte acadêmica, também me mostrou que minhas idéias mais nobres sobre os relacionamentos humanos não têm de ficar no plano dos sonhos, mas podem tornar-se sonhos realizados.

Ao professor Dr. Gilberto Corrêa, que foi muito além de um orientador, mas sempre um bom amigo, em toda a correria vivida. Por ter compreendido que o assunto que escolhi era o que eu queria fazer, e aceitou ser meu orientador. Ao professor Adão, por despertar o meu interesse pela pesquisa desde a época do mestrado e pela grande ajuda nos artigos. Agradeço a esses grandes profissionais pela confiança e colaboração em momentos críticos. Contribuíram sempre levantando questões, me apresentando respostas, e me deixando livre para conduzir o trabalho.

Agradeço imensamente aos técnicos Manoel, Gilda, Marinho e Eduardo, os quais ajudaram muito desde o mestrado! Ao funcionário Marco Aurélio, por sempre ser prestativo e aos secretários da pós-graduação: Eduardo e Cida, pelo apoio.

Aos pesquisadores e professores Dr. Bruno Ribeiro, Dr. Hamilton Serón e Dra. Regina Lana, por aceitarem participar da minha banca de qualificação. Aos pesquisadores e professores Dr. Lucas Azevedo, Dra. Marisa Piccolo, Dr. Eduardo Sá Mendonça e Dr. Renato Passos, por

aceitarem participar da banca de defesa da tese de doutorado, e por colaborarem com a construção deste trabalho.

Aos bolsistas de IC e AT, Alberto e Ingrid. Em especial aos bolsistas de IC, Danilo e Filipe, que sempre ajudaram com boa vontade e ótimo humor, fazendo tudo com cuidado e bem feito. À Suéllen E., pela ajuda nos cálculos e discussões sobre o Q_{10} . À orientada de TCC Fernanda Nayara, Eng. Agrônoma pela UNEMAT, que viajou mais de 1000 km com o único objetivo de estagiar conosco na UFU, além da ajuda nas análises. Ao aluno de mestrado, Fernando, sempre amigo.

Aos amigos da pós que foram muito importantes no começo de minha iniciação científica e também em minha vida pessoal: Dalcimar W., Alcione S., Juliana G., Patrícia S., Reinaldo S., Ricardo L.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e aos meus chefes, que me propiciaram a oportunidade de finalização da tese (Dr. Filipe, Dr. Chang, Dra. Luciana), me concedendo o direito a uma licença para terminar esse ciclo. A todos os grandes amigos que fiz na EMBRAPA Sede, da Coordenadoria de Propriedade Intelectual, principalmente Sibelle, Denise, Janaína, Fabíola, Marcelo e Fábio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por fornecer recursos financeiros e bolsas de iniciação científica (IC) e de apoio técnico (AT) para a possibilidade de execução deste projeto (Edital 21/2010 – “Pesquisas sobre Mudanças Climáticas no Estado de Minas Gerais” - APQ 00284-11).

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), um agradecimento todo especial, o qual vai além da possibilidade da minha participação no Programa de Pós-Graduação no Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG). O agradecimento se estende à oportunidade de ter feito graduação e mestrado também. Afinal, foram 11 anos nesta Universidade, que foi minha segunda casa, senão na maioria dos momentos, a primeira. Nela eu cresci pessoalmente e profissionalmente. Entrei uma adolescente sem experiência, e saí uma adulta profissionalmente realizada. Por meio desta universidade, obtive grandes chances em minha vida: me graduei em um ótimo curso, cursei um mestrado que me ensinou e me fez tomar o gosto pela pesquisa, e fiz um doutorado que considerei um aprendizado para a vida. Fui bem preparada por esta universidade e pelos professores, técnicos e todos os profissionais envolvidos. Em decorrência disso, no primeiro ano de meu doutorado, passei em um concurso público que sempre foi o meu sonho! Nem sempre o que fiz foi perfeito. Bem longe disso... Mas sinto que, apesar de tudo, consegui finalizar essa etapa e estou muito feliz.

A todos que de alguma forma contribuíram...

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

	Pág.
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 OBJETIVOS	6
REFERÊNCIAS	7
CAPÍTULO I	
IMPLICAÇÕES DA TEXTURA E DO SISTEMA DE USO DO SOLO NA FRAÇÃO ORGÂNICA E NOS INDICADORES BIOQUÍMICOS EM AGROECOSSISTEMAS NO CERRADO	
	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34
CAPÍTULO II	
MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO₂ EM FUNÇÃO DA UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS NO CERRADO	
	39
RESUMO	40
ABSTRACT	41
1 INTRODUÇÃO	42
2 MATERIAL E MÉTODOS	44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4 CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

CAPÍTULO III	Pág.
SENSIBILIDADE DA RESPIRAÇÃO DO SOLO (Q_{10}) EM AGROECOSSISTEMAS EM CONDIÇÕES DE CAMPO E LABORATÓRIO	65
RESUMO	66
ABSTRACT	67
1 INTRODUÇÃO	68
2 MATERIAL E MÉTODOS	71
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4 CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I	Pág.
Tabela 1. Caracterização dos sistemas de uso do solo estudados e histórico resumido	16
Tabela 2. Atributos químicos de Latossolos sob diferentes sistemas de uso do solo com texturas contrastantes, na camada de 0-10 cm (n=4, ± desvio padrão)	20
Tabela 3. Distribuição (valores médios) e relação da fração orgânica em Latossolos de texturas muito argilosa e média sob sistemas de uso do solo na camada de 0-10 cm (n=4; ± desvio padrão)	21
Tabela 4. Correlação de Pearson entre características de solos com textura muito argilosa e textura média (Latosolo Vermelho distrófico típico), com diferentes coberturas vegetais (cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado), n=72	30
CAPÍTULO II	Pág.
Tabela 1. Localização das áreas de estudo e caracterização físico/química ¹ (0-10 cm) dos Latossolos estudados (n=4)	48
Tabela 2. Fluxos médios de emissão de CO ₂ do solo (E, μmol m ⁻² s ⁻¹), temperatura do solo (Ts, °C, 0-10 cm) e umidade do solo (Us, %) estacional nos agroecossistemas avaliados em solo muito argiloso (AR) e de textura média (TM)	52
Tabela 3. Equações ajustadas para a emissão de CO ₂ do solo (E) e a umidade do solo (Us)	53
Tabela 4. Equações de regressão para a emissão de CO ₂ do solo (E), influenciada pela temperatura (Ts, °C, 0-10 cm) e a umidade (Us, %, 0-10 cm) do solo, e coeficientes de determinação (R ²)	57
CAPÍTULO III	Pág.
Tabela 1. Sensibilidade à temperatura (Q ₁₀) dos solos com diferentes texturas em agroecossistemas no Cerrado, fator 'a' modelado da função exponencial proposta por van't Hoff, e energia de ativação calculada pela equação proposta por Arrhenius. Os dados de Rs e Ts foram medidos durante o ano de 2012 (Figuras 1 e 2)	79
Tabela 2. Sensibilidade à temperatura (Q ₁₀) dos solos com diferentes texturas em agroecossistemas no Cerrado, fator 'a' modelado pela função exponencial proposta por van't Hoff, e energia de ativação calculada pela equação proposta por Arrhenius. Os dados de Rs e Ts foram medidos durante o ano de 2012 (Figuras 1 e 2)	84

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I		Pág.
Figura 1. Localização das áreas de estudo, Triângulo Mineiro, MG, Brasil. LAd: Latossolo Amarelo distrófico típico; LAw: Latossolo Amarelo ácrico típico		15
Figura 2. Efeito do uso e manejo quanto ao carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS) aos 10 dias de incubação, e o quociente metabólico (qCO_2) em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliadas em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição. A linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos		24
Figura 3. Atividades das enzimas hidrolíticas extracelulares, β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliadas em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição, a linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos		27
Figura 4. Atividade da enzima urease, e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliados em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição, a linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos		28
Figura 5. Análise de componentes principais e ordenação espacial das áreas analisadas conforme a textura do solo, utilizando características químicas e bioquímicas das variáveis da tabela 4. CP: componente principal; LAw: Latossolo Amarelo ácrico típico; LAd: Latossolo Amarelo distrófico típico		32
CAPÍTULO II		Pág.
Figura 1. Precipitação média anual de 1976 a 2011 e do ano de 2012, na região do Triângulo Mineiro, segundo dados meteorológicos da Fazenda Bom Jardim, no município de Uberlândia		45
Figura 2. Emissão de CO_2 do solo, temperatura do ar (Tar, °C), temperatura do solo (Ts, °C) e na umidade do solo (Us, %, 0-10 cm), durante o ano de 2012 (monitorado de janeiro a dezembro, a cada 15 dias), nos agroecossistemas em solo muito argiloso e de textura média. As barras indicam o desvio padrão (n=12)		50
Figura 3. Emissão de CO_2 do solo, temperatura do solo (Ts, °C, 0-10 cm) e umidade do solo (W, %, 0-10 cm), em solo de textura muito argilosa (a) e textura média (b). n=913.....		56

CAPÍTULO III

Figura 1. Precipitação diária no ano de 2012 e variação da temperatura média mensal do ar	72
Figura 2. Média estacional da temperatura do solo nos agroecossistemas avaliados durante o ano de 2012. CA: cana-de-açúcar, PA: pastagem e CE: Cerrado; AR: solo de textura muito argilosa e TM: solo de textura média. As barras indicam o desvio-padrão (n = 6)	75
Figura 3. Modelos exponenciais (van't Hoff, 1898) para a respiração do solo (R_s) em função da temperatura do solo (T_s , 0-10 cm), para cada área analisada. O coeficiente $b(T)$ foi utilizado para o cálculo do Q_{10} . **, significativo a $P < 0,001$. Cana-de-açúcar: n= 313 ; pastagem: n=300 e Cerrado: n=300	76
Figura 4. Logaritmo neperiano da respiração do solo ($\ln \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) expresso em relação à temperatura absoluta ($1/T$) em Kelvin (K), ajustado à equação linear, para cada agroecossistema analisado. O coeficiente $a(T)$ foi utilizado para o cálculo da energia de ativação e determinação do valor de Q_{10} conforme Arrhenius (1889). **, significativo a $P < 0,001$; cana-de-açúcar: n= 313; pastagem: n=300 e Cerrado: n=300	78
Figura 5. Atividade microbiana acumulada ao final de 31 dias de incubação nos agroecossistemas avaliados durante o ano de 2012. CA: cana-de-açúcar, PA: pastagem e CE: Cerrado; AR: solo de textura muito argilosa e TM: solo de textura média. As barras indicam o desvio-padrão (n = 8)	81
Figura 6. Respiração microbiana do solo vs. temperatura de incubação, com umidade a 60% cc, para três agroecossistemas em solo muito argiloso (A, C) e solo de textura média (B, D). As funções exponenciais (van't Hoff, 1898) foram ajustadas (A e B) e as lineares (C e D) (Arrhenius, 1889) foram aplicadas para o cálculo do Q_{10} do solo. **, $P < 0,001$; * $P < 0,05$	83
Figura 7. Relações entre valores de Q_{10} estimados para medidas em campo durante 12 meses no ano de 2012 e valores de Q_{10} estimados por incubação em laboratório por 31 dias, e o coeficiente 'a' ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $\mu\text{mol C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$)	85

RESUMO

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Matéria orgânica, fluxo de CO₂ e índice Q₁₀ em dois Latossolos com texturas contrastantes sob diferentes usos no Cerrado.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. 91p. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.¹

A introdução de sistemas agrícolas no Cerrado, com o uso intensivo do solo causa impactos nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, acarretando rápida degradação e desbalanço nos processos biológicos e ciclagem de nutrientes. A textura do solo e a sazonalidade também interferem nesses processos. Os objetivos deste trabalho foram determinar as alterações causadas no metabolismo do solo em agroecossistemas sobre Latossolos de diferentes texturas, avaliar os efeitos da sazonalidade na atividade microbiana e no fluxo de CO₂ com a aplicação de modelos, e avaliar a sensibilidade da respiração do solo em função do aumento da temperatura. A fração orgânica, a biomassa microbiana e as enzimas extracelulares (β -glicosidase, urease, fosfatase ácida e FDA) foram avaliadas. A respiração do solo, a temperatura do solo e a umidade gravimétrica do solo foram avaliadas em campo quinzenalmente, no ano de 2012. A precipitação pluviométrica e temperatura do ar também foram monitoradas. Bioensaios em laboratório foram realizados para determinação do C-CO₂ liberado por incubação estática com temperaturas induzidas de 20, 25 e 30°C. Modelos lineares, quadráticos e exponenciais foram aplicados com o intuito de modelar como o fator umidade do solo e a combinação de umidade e temperatura na emissão de CO₂. Para determinação do índice Q₁₀, as funções de Arrhenius e van't Hoff foram aplicadas para avaliar a sensibilidade da respiração e da atividade da microbiota em relação ao aumento da temperatura do solo. O sistema de uso influenciou na resposta bioquímica do solo, sendo o Cerrado nativo o sistema que apresentou os maiores valores para a fração orgânica do solo, biomassa microbiana e atividades enzimáticas, comparado ao solo da pastagem e da cana-de-açúcar. A emissão de CO₂ apresentou maiores valores na estação chuvosa e declínio na estação seca, independente da textura do solo. Os modelos envolvendo temperatura e umidade do solo explicaram melhor as variações da Rs no solo de textura média, especialmente na área de pastagem. Não houve diferenças no ajuste das equações de Arrhenius e van't Hoff, sendo os parâmetros da equação dependentes do sistema de uso e textura do solo. O índice Q₁₀ foi significativamente afetado pelo sistema de uso e textura do solo, sendo os menores valores obtidos nas áreas de cana-de-açúcar.

Termos de indexação: Fração orgânica, Enzimas do solo, Emissão de CO₂, Temperatura do solo, Umidade do solo, Modelagem da respiração do solo.

¹ Orientador: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Orientador) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU (Co-orientador).

ABSTRACT

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Organic matter, CO₂ flux and Q₁₀ index in two Typic Acrustox with contrastant soil textures under different uses at savanna.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. 91p. Thesis (Doctorate in Agronomy/ Soil Science) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.²

The different land use systems at Cerrado, with intensive use of land, brought direct consequences in relation to the chemical, physical and biological soil properties. The impacts of land use are rapid degradation and imbalance in the biological processes and nutrient cycling. Soil texture and seasonality can interfere in these processes. The objectives of this study were to determine the changes in the biochemical soil microorganism's metabolism in different agroecosystems in Oxisol of different textures, to evaluate the effects of seasonality on microbial activity and modeling CO₂ efflux, and evaluate the sensitivity of soil microbes as a function of warming. The organic fraction, microbial biomass and extracellular enzymes (β -glucosidase, urease, acid phosphatase and FDA) were evaluated. Soil respiration, soil temperature and gravimetric soil moisture were assessed for 12 months in 2012. The precipitation and air temperature were also monitored. Laboratory bioassays were conducted to determine the C-CO₂ released by static incubation with temperatures of 20, 25 and 30°C. Linear, quadratic and exponential models were applied to analyse how soil moisture influences at soil respiration. The soil temperature and soil moisture combination was modelled. Arrhenius and van't Hoff equations were applied to evaluate the sensitivity of respiration and microbial activity in relation to soil temperature. The land use system influenced at biochemical response of the soil, and the native Cerrado showed the highest values for the organic fraction of the soil, microbial biomass and enzyme activities compared to grassland and sugarcane. The CO₂ emission showed no statistical differences only in relation to agroecosystem evaluated, regardless of soil texture, with higher values in the rainy season and declined at dry season. The models involving temperature and soil moisture better explained the soil respiration variations in sandy-clayey-loam soil, especially in the area of grassland. There were no differences in the adjustment of the Arrhenius and van't Hoff's equation parameters, being dependent on the land use and soil texture. Q₁₀ index was significantly affected by land use and soil texture, with the lowest values obtained in the areas of sugarcane.

Index terms: Organic fraction, Soil enzyme, CO₂ efflux, Soil temperature, Soil moisture, Soil CO₂ modelling.

² Guidance comitee: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Major professor) and Adão de Siqueira Ferreira – UFU.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A respiração do solo tem um importante papel no funcionamento do sistema terrestre e particular contribuição no fluxo de CO₂ na interface solo-atmosfera. Desde que a mudança climática se tornou um dos principais desafios enfrentados pelos pesquisadores, a mensuração e avaliação de atributos químicos, físicos e bioquímicos do solo tornaram-se necessários na avaliação do funcionamento dos ecossistemas terrestres.

Os fluxos de carbono nas regiões tropicais são maiores do que em regiões temperadas (LUO; ZHOU, 2006). As regiões tropicais possuem menor tempo de residência da matéria orgânica do solo (MOS), com uma decomposição relativamente rápida. Além disso, as mudanças no uso do solo e o aquecimento global são responsáveis por perdas de carbono (C), principalmente em regiões tropicais (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Solos que não foram perturbados retém C em microagregados estáveis, mantendo essa condição por milhares de anos, a menos que as condições ambientais e a estrutura do solo sejam alteradas. As práticas de manejo quebram os agregados do solo, expondo a matéria orgânica protegida do ataque microbiano, acelerando a decomposição e as perdas de carbono pela respiração para a atmosfera (RICHEY et al., 2002). Entretanto, as perdas de C no solo podem ser diminuídas adotando-se algumas práticas de manejo, como o plantio direto, mínimo distúrbio à estrutura, irrigação eficiente, plantas de cobertura para formação de palhada de alta relação C:N, adubação orgânica, práticas agrosilvipastoris, entre outras.

Como a MOS não é um estoque homogêneo, Anderson (1992) divide a MOS em frações ativas que são constituídas pela biomassa microbiana do solo, e as lentas e passivas são mais estáveis física e quimicamente, por serem caracterizadas por formarem compostos estruturais mais resistentes ao ataque da microfauna edáfica, definidos basicamente pelas propriedades do solo. O conteúdo de argila atua como importante determinante na estabilização da MOS, e o conteúdo de C no solo geralmente está correlacionado ao teor de argila. A incorporação física da MOS dentro dos agregados de argila resulta na proteção dos polímeros orgânicos do ataque enzimático (ANDERSON, 1992).

No solo, as moléculas de CO₂ são resultado da respiração das raízes das plantas, da atividade de micro-organismos decompositores da matéria orgânica,

incluindo a mesofauna. O CO₂ produzido é um co-produto do metabolismo dos organismos que oxidam os compostos orgânicos para a obtenção e captura de energia para a manutenção, crescimento e reprodução. Os fungos e as bactérias são os principais grupos de micro-organismos no solo que sintetizam enzimas responsáveis pela decomposição e mineralização da MOS (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Assim, as atividades enzimáticas tornam-se essenciais para a avaliação dos processos metabólicos e funcionamento dos ecossistemas. Apesar de a medida do CO₂ refletir o processo final de oxidação da matéria orgânica, muitos fatores interferem na respiração do solo e, conseqüentemente, na emissão de CO₂ à atmosfera, tais como a textura e porosidade do solo, temperatura, precipitação e/ou infiltração de água.

Avaliar os atributos biológicos e bioquímicos do solo é importante para o monitoramento de alterações decorrentes do uso agrícola. As enzimas do solo regem os principais processos da mineralização da MOS, as emissões de gases de efeito estufa, considerando a atual preocupação sobre as mudanças climáticas na dinâmica da MOS (KIRSHBAUM, 2004; KNORR et al., 2005). As enzimas extracelulares são as mais importantes na biodegradação das macromoléculas orgânicas do solo e sofrem grande influência das propriedades do solo que interferem na acessibilidade do substrato para o ataque enzimático, como conteúdo de água, argila e colóides orgânicos. As enzimas são muito sensíveis às mudanças no solo, como adubação, vegetação, rotação de culturas, entre outros. Por isso podem ser consideradas indicadores importantes para avaliar o impacto de ações antrópicas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Para avaliar a atividade total dos decompositores do solo, a hidrólise do diacetato de fluoresceína tem sido relatado como bom indicador da atividade heterotrófica total do solo, por ser um substrato hidrolisado por várias proteases, lipases e esterases liberadas por bactérias e fungos ativos, que são decompositores primários (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A atividade das células microbianas e de outros organismos é regulada pelas leis da termodinâmica, expressas pela equação de Arrhenius. A temperatura afeta não só as reações fisiológicas das células, mas também características físico-químicas do solo, influenciando o ambiente microbiano. As taxas de reações microbianas no solo sofrem decréscimos acentuados em temperaturas menores que 25 e maiores que 35°C (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Os estudos da dinâmica do C geralmente são baseados em longos períodos de tempo. Entretanto, os estudos de curto período também são importantes, podendo

contribuir na identificação dos sistemas de uso e/ou manejo do solo que causam maiores ou menores emissões imediatas de CO₂. A respiração do solo é um parâmetro importante para o balanço do C global, muito sensível às mudanças ambientais. A associação entre temperatura e respiração do solo é extensivamente estudada em regiões de clima temperado. Giardina e Ryan (2000) relataram que a decomposição da MOS mais recalcitrante ou o C orgânico em solos são menos sensíveis à temperatura do que o C lábil. O aumento da temperatura favorece as reações de condensação e complexação levando à formação de macromoléculas orgânicas resistentes à decomposição. Isto ocorre porque os micro-organismos tornam-se incapazes de decompor eficientemente pela falta de enzimas para a lise das macromoléculas. Assim, estes compostos estarão biogeoquimicamente protegidos. A resistência à decomposição, seja por proteção física, química ou bioquímica, diminui a sensibilidade do C do solo à temperatura, alterando a estrutura da comunidade microbiana. As enzimas hidrolíticas suportam maiores temperaturas pelo fato de geralmente serem protegidas pelos colóides húmicos e argilas (SKUJINS, 1976; BURNS, 1982), o que resulta em maior estabilidade em relação ao aumento da temperatura.

O índice que mede a sensibilidade da atividade microbiana do solo ao aumento de temperatura foi definido como Q₁₀, no qual as taxas de respiração diferem num intervalo de temperatura de 10 °C (LEIRÓS et al. 1999; OHASHI et al. 1999; ZAK et al., 1999; RUSTAD et al., 2000; SCHLESINGER; ANDREWS, 2000; FANG; MONCRIEFF, 2001). Alguns autores relatam que, além da temperatura, os valores de Q₁₀ estimados a partir de conjuntos de dados anuais podem também ser influenciados por diversos fatores, tais como as variações anuais e sazonais no conteúdo de água no solo, biomassa de raízes, as entradas de matéria orgânica, as populações microbianas, ou outras variações dos processos devido às condições de sazonalidade (BEKKU et al., 2003; CURIEL YUSTE et al., 2004; ZHENG et al., 2009).

A respiração do solo também depende da interação entre o conteúdo de água, temperatura e natureza do ambiente coloidal do microambiente do solo (distribuição do tamanho de poros, estabilidade do agregado e composição mineralógica (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Variações sazonais de temperatura e umidade afetam as comunidades biológicas do solo e sua atividade (RAICH et al., 2002). Em baixos potenciais hídricos, a maioria das bactérias, protozoários e microalgas têm baixa atividade respiratória, enquanto leveduras e fungos filamentosos continuam seu

metabolismo. A umidade do solo pode limitar a respiração do solo também por dificultar o contato da biomassa microbiana com o substrato estimulando a dormência, ou mesmo resultando em morte de células vegetativas e aumento da esporulação (ORCHARD; COOK, 1983; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A evolução sazonal da umidade do solo, bem como outros fatores, pode variar de ano para ano e poderia, portanto, afetar o valor de Q_{10} (DAVIDSON et al., 2000). Acredita-se que uma melhor compreensão das variações dos valores de Q_{10} pode melhorar significativamente os estudos sobre o balanço de C em ecossistemas terrestres (WANG et al., 2006). Vários trabalhos também sugerem que a sensibilidade da respiração do solo à temperatura não é constante, mas negativamente correlacionada à temperatura e positivamente correlacionada com a umidade do solo (JANSSENS; PILEGAARD, 2003).

No Brasil, a região do bioma Cerrado vem se constituindo na principal área de produção agrícola, e a manutenção da produtividade do solo depende, por sua vez, da conservação da qualidade do solo. Os principais solos desta região são os Latossolos, que apresentam estrutura granular desenvolvida, relacionada aos expressivos teores de sesquióxidos (FREITAS et al., 2000), apresentando elevada porosidade, favorecendo trocas gasosas e elevadas taxas de infiltração e retenção de água no solo. Entretanto, a introdução de sistemas agrícolas no Cerrado, com o uso intensivo do solo, trouxe conseqüências diretas em relação aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, acarretando rápida degradação e desbalanço nos processos biológicos e ciclagem de nutrientes. Neste bioma, as pastagens e as culturas anuais caracterizam a maior mudança no uso da terra. As pastagens plantadas foram essencialmente formadas com gramíneas exóticas do gênero *Brachiaria* spp (VARELLA et al., 2004). O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é uma cultura de destaque na produção de álcool e açúcar (574,5 milhões de toneladas por ano) e ocupa grandes áreas, chegando em 2011 com área cultivada de 8,6 milhões de hectares (MAPA, 2012). Esses dados se devem à expansão da agricultura e da implantação de usinas em áreas de Cerrado, fazendo do país o maior produtor mundial de açúcar e etanol.

Considerando a grande extensão de pastagens degradadas ou em processo de degradação e a expansão crescente de canaviais na região do Cerrado, percebe-se que muitos dados ainda são necessários para resolver a questão de como a respiração do solo varia ao longo do tempo, e como a bioquímica do solo é afetada devido aos sistemas de uso, à textura e à influência dos fatores ambientais. Apesar do grande

avanço observado nas pesquisas nos últimos anos, dados sobre os processos bioquímicos relacionados à respiração do solo ainda são uma incógnita no Cerrado brasileiro, com grande lacuna de dados.

Portanto, este trabalho vem contribuir com a demanda de se avançar na área da dinâmica do C no sistema solo-planta-atmosfera, principalmente relacionado ao impacto causado pelas práticas de manejo do solo sobre o funcionamento bioquímico e às emissões de CO₂ em diferentes agroecossistemas no Cerrado brasileiro.

2 OBJETIVOS

As mudanças na cobertura vegetal e a textura do solo alteram as atividades bioquímicas e as emissões de CO₂ do solo para a atmosfera. As mudanças na precipitação e condições microclimáticas (temperatura e umidade do solo) afetam a sensibilidade da microbiota do solo. Portanto, objetivou-se com esta pesquisa:

1. determinar as alterações causadas na fração orgânica e no metabolismo microbiano em solos com texturas contrastantes;
2. determinar os efeitos de diferentes sistemas de uso e textura do solo, em relação à sazonalidade da temperatura e umidade do solo, na atividade microbiana e no fluxo de CO₂;
3. determinar a sensibilidade da microbiota do solo, em função do aumento da temperatura em campo e em laboratório.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. M. Responses of soils to climate change. **Advances in Ecology Research**, London, v. 22, p.163-210, 1992.
- BEKKU, Y.S. et al. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 22, p. 205-210, 2003.
- BURNS, R.G. Enzyme activity in soil: location and possible role in microbial ecology. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 14, p. 423–427, 1982.
- CURIEL YUSTE, J. et al. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 161-169, 2004.
- DAVIDSON, E.A. et al. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Holanda, v.48, p.53–69, 2000.
- FANG, C., MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.33, p.155–165, 2001.
- FREITAS, P.L. et al. Nível e natureza do estoque orgânico de Latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 157-170, 2000.
- GIARDINA, C.P.; RYAN, M.G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. **Nature**, London, v.404, p.858-861, 2000.
- JANSSENS, I.A., PILEGAARD, K. Large seasonal changes in Q₁₀ of soil respiration in a beech forest. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p.911–918, 2003.
- KIRSCHBAUM, M.U.F. Soil respiration under prolonged soil warming: are rate reductions caused by acclimation or substrate loss? **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p. 1870–1877, 2004.
- KNORR, W. et al. Longterm sensitivity of soil carbon turnover to warming. **Nature**, London, v.433, p.298–301, 2005.
- LEIRÓS, M.C. et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.31, p. 327–335, 1999.
- LUO, Y.; ZHOU, X. **Soil respiration and the environment**. American Press: Oxford, 2006, 316p.

MAPA, Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. 2012. **Brazilian Sugarcane Yield**. Available in: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>, access in 19 november, 2012.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2.ed., Lavras : Editora UFLA, 2006. 729p.

OHASHI, M., GYOKUSEN, K., SAITO, A. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. **Forest Ecology Management**, v.123, p.105–114, 1999.

ORCHARD, V.A., COOK, F.J. Relationship between soil respiration and soil moisture. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.15, p. 447–453, 1983.

RAICH, J.W., POTTER, C.S., BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. **Global Change Biology**, Oxford, v.8, p.800-812, 2002.

RICHEY, J.E. et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. **Nature**, London, v.416, p.617-620, 2002.

RUSTAD, L.E.; HUNTINGTON, T.G.; BOONE, R.D. Controls on soil respiration: implications for climate change. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Holanda, v. 48, p.1–6, 2000.

SCHLESINGER, W.H.; ANDREWS, J.A. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Holanda, v.48, v.7–20, 2000.

SKUJINS, J.J. Extracellular enzymes in soil. **Critical Reviews of Microbiology**, v.4, p. 383–421, 1976.

VARELLA, R.F. et al. Soil fluxes of CO₂, CO, NO, and N₂O from an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, Tempe, Arizona, v.14 (suplemento), p.S221-S231. 2004.

WANG, C.K.; YANG, J.Y.; ZHANG, Q.Z. Soil respiration in six temperate forests in China. **Global Change Biology**, Oxford, v.12, p.2103-2114, 2006.

ZAK, D.R. et al. Soil temperature, matric potential, and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 63, p.575–584, 1999.

ZHENG, Z.M. et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.41, p.1531-1540, 2009.

CAPÍTULO I

MATÉRIA ORGÂNICA E ATIVIDADE METABÓLICA DA MICROBIOTA DO SOLO, EM FUNÇÃO DO USO E DE TEXTURAS CONTRASTANTES NO CERRADO

RESUMO

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Matéria orgânica e atividade metabólica da microbiota do solo, em função do uso e de texturas contrastantes no Cerrado.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.9-38. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.³

Os micro-organismos atuam na transformação da matéria orgânica, ciclagem dos nutrientes e fluxo de energia no solo. O presente trabalho teve como objetivo avaliar implicações do uso do solo (cana-de-açúcar e pastagem) e da variação textural (texturas muito argilosa e franco-argilo-arenosa) sobre os componentes da fração orgânica e atividade metabólica da microbiota do solo, em relação ao Cerradão. O solo foi amostrado na camada de 10 cm e foi classificado como Latossolo Amarelo. As amostras foram submetidas às análises químicas (pH, N, P, K, Ca, Mg, Al, C) e análise granulométrica. Para as frações orgânicas do solo, os teores de carbono orgânico do solo (COS), C lábil e substâncias húmicas (ácidos húmicos, fúlvicos e humina) foram determinados. A atividade microbiana do solo foi caracterizada através do carbono da biomassa microbiana (CBM), da respiração microbiana e índice qCO_2 . As atividades das enzimas relacionadas à ciclagem de nutrientes foram estimadas: β -glicosidase, fosfatase, urease, arilsulfatase e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). A classe textural do solo tem implicações qualitativas e quantitativas significativas para as propriedades microbianas do solo. A textura muito argilosa apresentou maior amplitude de variação nos dados, com valores sempre maiores em relação ao solo de textura média. O Cerradão apresentou maiores conteúdos de C, N, carbono da biomassa microbiana e respiração microbiana, maiores respostas em relação às atividades enzimáticas, e maior recalcitrância da matéria orgânica, em relação à pastagem e à cana-de-açúcar.

Palavras-chave: atividade enzimática, frações húmicas, cana-de-açúcar, pastagem, Cerrado.

³ Orientador: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Orientador) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU (Co-orientador).

ABSTRACT

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Soil organic matter and microbial metabolic activity in function of texture and soil use at Brazilian Savanna (Cerrado)**. 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.9-38. Thesis (Doctorate in Agronomy/Soil Science) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁴

Soil microorganisms are responsible for organic matter transformation, nutrient cycling and energy flow in the soil. This study aimed to evaluate the implications of land-use change and soil texture in the organic fraction and biochemical activity of a clayey soil and sandy-clay-loam soil with sugarcane, grassland and Cerrado (savanna) at each site. Soil samples were subjected to chemical and physical analyses. The soil organic carbon was characterized by determining levels of labile carbon and humic substances. The biochemical dynamic of soil was determined as a function of enzymes activity related to nutrient cycling: β -glucosidase (C cycle), phosphatase (P cycle), urease (N cycle), arylsulfatase (S cycle), and FDA (representing total enzymatic activity in the soil). Clayey soils had substantial enzyme activity whereas sandy-clayey-loam soils had lower chemical and microbiological properties compared to clayey soils. Soil use influenced all the variables studied. Cerrado had higher C, N, biomass soil carbon, basal soil respiration, the higher enzyme activity and more recalcitrant organic matter relative to the grassland and sugarcane sites.

Keywords: soil enzyme activity, humic fraction, sugarcane, grassland, Cerrado.

⁴ Guidance comitee: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Major Professor) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU.

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é considerado o segundo maior bioma brasileiro, equivalendo a aproximadamente 22% do território nacional, e ocupa a área central do Brasil (SANTOS et al., 2010). A classe dos latossolos predomina no Cerrado Brasileiro, estando presente em 46% da área do bioma. Estes solos se caracterizam, principalmente, pela baixa fertilidade e alta acidez. Por outro lado, trata-se de solos antigos, profundos, com ótima drenagem e que se assentam em relevos planos ou levemente ondulados (SANTOS et al., 2010). Esses solos são áreas propícias à expansão da agricultura, pela facilidade que oferecem à mecanização. Os fatores locais da região do Cerrado estão associados à distribuição espacial da matéria orgânica e variabilidade na estrutura e atividade da microbiota do solo, em relação às diferentes atividades praticadas, representando um cenário conveniente para estudos biogeoquímicos.

O Cerrado vem sofrendo um acelerado processo de degradação pelo intensivo uso da terra, principalmente, pela expansão da agricultura e da pecuária. O impacto ambiental mais evidente desse processo é o desaparecimento gradativo do ecossistema e a sua substituição por uma paisagem bastante homogênea, formada por pastagens e por grandes lavouras. A introdução de pastagens com cultivares de plantas forrageiras exóticas, em comparação às espécies nativas, permitiu ganhos expressivos na produção de carne bovina no Cerrado, que detém 41% do rebanho bovino nacional, com 49,6 milhões de hectares de pastagem cultivada (SANO et al., 1999). Entretanto, esse sistema de uso caracteriza-se em sua maior parte pelo extrativismo, com perda da capacidade produtiva das pastagens.

A substituição da vegetação de Cerrado para implantação de pastagens e/ou monocultura de cana-de-açúcar se constitui na remoção de sistemas biológicos complexos, multiestruturados, extremamente diversificados e estáveis e, portanto, o estudo dos impactos causados pelos diferentes sistemas de uso do solo é de grande importância. Atualmente, a cultura da cana-de-açúcar é destaque no cenário agrícola do Brasil, sendo cultivada em vários ambientes e manejos. Entre as culturas agrícolas, a cana-de-açúcar ocupa o terceiro lugar em área plantada, sendo o Brasil o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (MAPA, 2012). Nos últimos 25 anos, a expansão da cana-de-açúcar ocorreu na região Centro-Sul, onde se concentra grande parte do bioma Cerrado, e corresponde a 82,46% da produção nacional (CONAB, 2011).

Essas mudanças no uso do solo afetam o funcionamento dos ecossistemas impactando a qualidade do solo (MIRALLES et al., 2012). A textura do solo, definida pela fração granulométrica, é uma variável importante no funcionamento do solo, particularmente, no que se refere à acumulação e decomposição da matéria orgânica e às enzimas hidrolíticas que são resultantes da atividade dos micro-organismos do solo.

Os micro-organismos exercem papel essencial nos processos ecológicos no solo, atuando na transformação da matéria orgânica, ciclagem dos nutrientes e fluxo de energia (JACOBSON et al., 2011). A decomposição e mineralização do carbono (C) orgânico do solo são as principais transformações decorrentes da atuação dos micro-organismos. O desmatamento e a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas acarreta um desequilíbrio no ecossistema, influenciando os processos físico-químicos e biológicos do solo. Ao longo do tempo, os recursos, principalmente a matéria orgânica do solo, vão também se esgotando e o resultado disso é a diminuição da atividade funcional do mesmo, resultando na sua degradação, com perda da fertilidade. Particularmente, a fração do C orgânico, como C lábil e substâncias húmicas, é alterada, resultando, normalmente, na perda quantitativa e qualitativa destes componentes no solo. Essas perdas refletem também na estruturação física, tais como densidade, porosidade e agregados do solo, com reflexo no funcionamento deste (MIRALLES et al., 2012).

A microbiota do solo é a fração viva da matéria orgânica mais responsiva às mudanças ambientais causadas pelas atividades humanas (GARCÍA et al., 2003). Assim, as propriedades bioquímicas podem ser consideradas importantes indicadores da qualidade do solo, as quais são principalmente refletidas em termos de tamanho e atividade da biomassa microbiana (TRASAR-CEPEDA et al., 2008). A textura também é um fator que controla a dinâmica biológica do solo (CHODAK; NIKLIŃSKA, 2010; SUGIHARA et al., 2010).

Os processos mediados pelos micro-organismos são catalisados pelas enzimas extracelulares e são essenciais para o funcionamento do solo, promovendo a ciclagem do carbono (β -glicosidase), nitrogênio (urease), fósforo (fosfatase) e enxofre (arilsulfatase) (SINSABAUGH et al., 1993). A biomassa microbiana é um importante constituinte da fertilidade do solo, envolvida na ciclagem biogeoquímica de nutrientes. Os micro-organismos do solo imobilizam C e outros nutrientes formando uma nova biomassa utilizando a energia obtida da oxidação das fontes de C através da respiração (NIEMEYER et al., 2012). A biomassa microbiana, a respiração basal do

solo e as atividades enzimáticas são indicativos da atividade biológica, sendo mais sensíveis às alterações decorrentes do uso e manejo (NAYAK et al., 2007; NIEMEYER et al., 2012). Outro indicador comumente utilizado, representando a quantidade de substrato mineralizado pela biomassa microbiana é o quociente metabólico (qCO_2 ; razão entre o C-CO₂ liberado pela biomassa microbiana) (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

As mudanças na matéria orgânica do solo, resultantes das práticas de manejo na agricultura, podem modificar intensamente os processos ecológicos do solo e essa situação é associada à atividade enzimática devido às mudanças na composição do substrato em relação à biomassa primária. Em geral, a perda das frações mais lábeis (menos decomposta) da matéria orgânica e a acumulação de formas de carbono mais recalcitrantes, ocorrem principalmente quando os solos são submetidos à práticas que envolvem a melhoria dos processos biogeoquímicos (TRASAR-CEPEDA et al., 2008). Essa questão pode ser melhor abordada utilizando-se de características relacionadas à qualidade da matéria orgânica, como a fração ácidos húmicos, para estudar suas correlações com as propriedades biológicas e bioquímicas do solo. Esse pode ser o caso das propriedades diretamente relacionadas à atividade da microbiota do solo, como a respiração basal, biomassa microbiana, ou em relação à decomposição de diferentes substratos (atividades enzimáticas) (GIL-SOTRES et al., 2005; TRASAR-CEPEDA et al., 2008).

Objetivou-se com este trabalho avaliar o impacto do uso do solo e classe textural sobre a matéria orgânica e propriedades bioquímicas de dois Latossolos de texturas contrastantes sob cultivo de cana-de-açúcar, pastagem de braquiária e vegetação original de Cerrado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em amostras de solos coletadas em áreas localizadas nos municípios de Uberaba e Uberlândia, na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais (Figura 1). O clima é classificado como Cwa (EMBRAPA, 1982) em relação à precipitação e temperatura, de acordo com Köppen (1923), caracterizado como “moderadamente quente”, com uma estação seca bem definida durante o outono-inverno (abril a setembro) e uma estação chuvosa e quente durante a primavera-verão (outubro a março). Os solos foram caracterizados como Latossolo Amarelo ácrico típico (LAW, município de Uberaba, de textura muito argilosa) e Latossolo Amarelo distrófico típico (LAd, município de Uberlândia, de textura média), conforme EMBRAPA (2006).

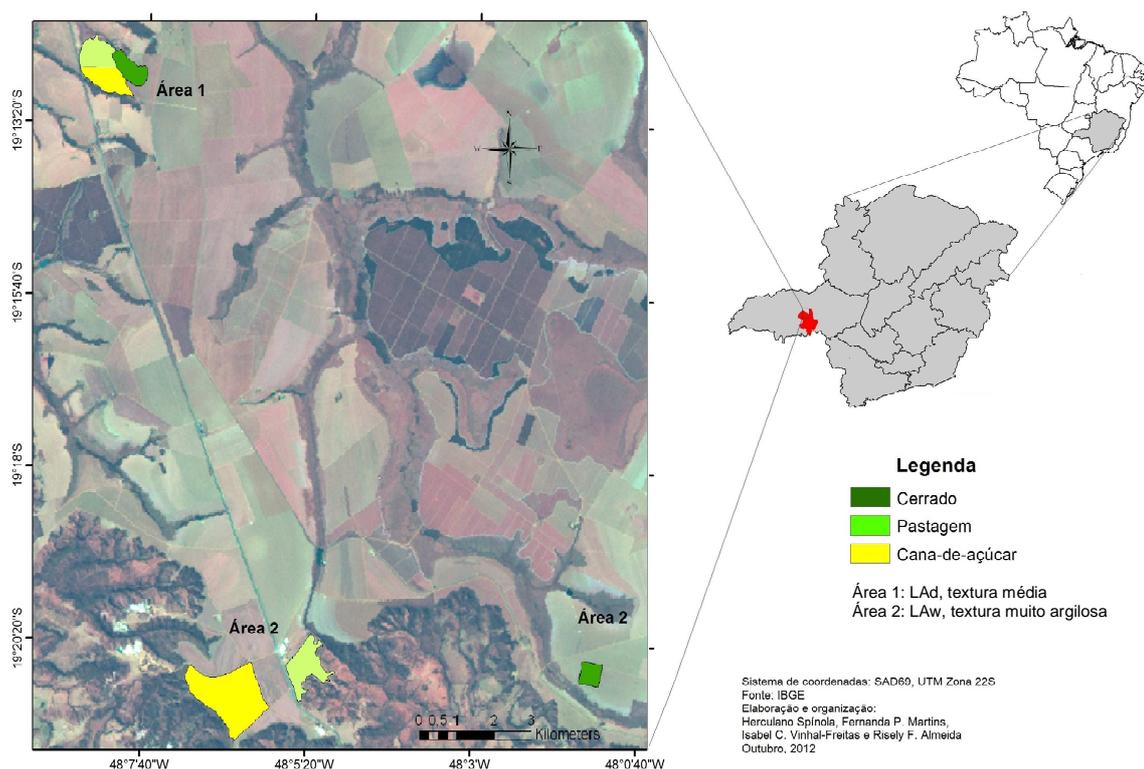


Figura 1. Localização das áreas de estudo, Triângulo Mineiro, MG, Brasil. LAd: Latossolo Amarelo distrófico típico; LAW: Latossolo Amarelo ácrico típico.

Em cada área selecionada (LAW e LAd), foram selecionadas as mesmas condições de uso do solo: vegetação original de Cerradão, pastagem de braquiária e cana-de-açúcar (Figura 1). Neste trabalho, o uso do solo com vegetação original de

Cerradão será designada como “Cerrado”. As pastagens estudadas têm a predominância de *Brachiaria decumbens* (capim-braquiária). A caracterização dos sistemas de uso do solo estudados (coordenadas geográficas, altitude, análise granulométrica, textura e histórico resumido) está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização dos sistemas de uso do solo estudados e histórico resumido.

Uso do solo	Coordenadas geográficas	Alt. m	Argila ----- g kg ⁻¹	Silte -----	Areia -----	Textura ¹	Histórico
Cerrado	19°20'45" S 48°00'56" O	970	780	108	111	Muito argilosa	Sem alteração antropogênica.
Pastagem	19°20'43" S 48°05'15" O	970	792	97	111	Muito argilosa	1980: desmatamento da vegetação natural de Cerrado. 1985-actual: pastagem de braquiária. 1981: desmatamento da vegetação natural de Cerrado. 1981-2004: soja em sistema convencional. 2004-2005: algodão. 2005-2007: subsolagem e implantação do sistema plantio direto, com rotação soja/milho. 2007-actual: cana-de-açúcar. 2011: Jul: colheita. Set/out: adubação com 300kg ha ⁻¹ da formulação 21-0-5. 2012: colheita realizada no final de outubro. Não houve adubação nem calagem. Nunca houve queima na área, somente colheita mecânica.
Cana-de-açúcar	19°21'08" S 48°06'23" O	976	732	148	117	Muito argilosa	1980: desmatamento da vegetação natural de Cerrado. 1987-actual: pastagem de braquiária. 1985: desmatamento da vegetação original de Cerrado. 1985-1990: pastagem. 1990-1997: soja em sistema convencional. 1997/98: implantação do sistema plantio direto. 2000-2006: subsolagem e rotação soja/milho, plantio direto. 2006-actual: cana-de-açúcar. 2011: Ago: colheita e adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 6-6-6. Out: aplicação de 170kg KCl ha ⁻¹ e 270kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-12. 2012: Jun: colheita. Ago: adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 10-10-10 + 2,8 ton ha ⁻¹ de calcário dolomítico. Set: aplicação de 180kg KCl ha ⁻¹ e 380kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-10. Nunca houve queima na área, somente colheita mecânica.
Cerrado	19°12'51" S 48°08'04" O	926	225	147	649	Franco-argilo-arenosa	Sem alteração antropogênica.
Pastagem	19°12'40" S 48°08'34" O	912	224	169	627	Franco-argilo-arenosa	1980: desmatamento da vegetação natural de Cerrado. 1987-actual: pastagem de braquiária. 1985: desmatamento da vegetação original de Cerrado. 1985-1990: pastagem. 1990-1997: soja em sistema convencional. 1997/98: implantação do sistema plantio direto. 2000-2006: subsolagem e rotação soja/milho, plantio direto. 2006-actual: cana-de-açúcar. 2011: Ago: colheita e adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 6-6-6. Out: aplicação de 170kg KCl ha ⁻¹ e 270kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-12. 2012: Jun: colheita. Ago: adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 10-10-10 + 2,8 ton ha ⁻¹ de calcário dolomítico. Set: aplicação de 180kg KCl ha ⁻¹ e 380kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-10. Nunca houve queima na área, somente colheita mecânica.
Cana-de-açúcar	19°13'00" S 48°06'24" O	925	260	167	642	Franco-argilo-arenosa	1980: desmatamento da vegetação natural de Cerrado. 1987-actual: pastagem de braquiária. 1985: desmatamento da vegetação original de Cerrado. 1985-1990: pastagem. 1990-1997: soja em sistema convencional. 1997/98: implantação do sistema plantio direto. 2000-2006: subsolagem e rotação soja/milho, plantio direto. 2006-actual: cana-de-açúcar. 2011: Ago: colheita e adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 6-6-6. Out: aplicação de 170kg KCl ha ⁻¹ e 270kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-12. 2012: Jun: colheita. Ago: adubação de 1 ton ha ⁻¹ da formulação NPK 10-10-10 + 2,8 ton ha ⁻¹ de calcário dolomítico. Set: aplicação de 180kg KCl ha ⁻¹ e 380kg ha ⁻¹ da formulação 27-0-10. Nunca houve queima na área, somente colheita mecânica.

¹ Os sistemas de uso com solo de textura franco-argilo-arenosa estão dentro do grupamento denominado de textura média.

Em cada área selecionada realizou-se amostragem do solo (camada de 0-10 cm), em janeiro de 2012 (estação chuvosa). Coletou-se quatro amostras compostas em cada área, cada uma delas formadas por quatro amostras simples (sub-amostras), as quais foram misturadas e homogeneizadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos selados, levadas ao laboratório e posteriormente peneiradas (< 2 mm) e estocadas em sacos plásticos, em geladeira a 4° C, até a realização das análises bioquímicas.

A distribuição do tamanho das partículas do solo (textura) foi realizada em amostras de solo secas ao ar (TFSA < 2 mm), utilizando o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986; EMBRAPA, 2009). As análises químicas realizadas foram: pH em água (1:2,5 solo/água); carbono orgânico do solo (COS) determinado por oxidação com dicromato de potássio (YEOMANS; BREMNER, 1988); nitrogênio total (N) pelo método Kjeldahl (BLACK, 1965); fósforo (P), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg⁺²), alumínio (Al⁺³) e H+Al, feitos de acordo com Tedesco et al. (1995) em amostras de TFSA, peneiradas (< 2 mm) e moídas em cadinho de porcelana.

As substâncias húmicas foram extraídas de amostras de TFSA, segundo técnica de solubilidade diferencial (SWIFT, 1996), conforme adaptação feita por Benites et al. (2003). Após serem maceradas em cadinho de porcelana, foram obtidas as frações correspondentes aos ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina, com base na solubilidade diferencial em soluções alcalinas e ácidas. Do somatório de todas essas frações húmicas foram obtidas as substâncias húmicas. A determinação do C de cada fração húmica foi realizada de acordo com Yeomans e Bremner (1988).

O carbono facilmente oxidado, caracterizado como carbono lábil, foi determinado conforme procedimento descrito por Blair et al. (1995). 1g de solo foi colocado em tubos de centrífuga de 50 mL, adicionando-se 25 mL de solução de KMnO₄ 0,033 mol L⁻¹. Os tubos foram agitados por uma hora. Em seguida, foram centrifugados e 1,0 mL do sobrenadante foi transferido para um balão volumétrico de 250 mL, completando-se o volume com água destilada. Alíquotas de 1,0 mL de seis soluções padrões de KMnO₄, com concentrações variando de 0,025 a 0,033 mol L⁻¹, sofreram a mesma diluição. Determinou-se a absorbância das soluções diluídas em espectrofotômetro ajustado para o comprimento de onda de 565 nm. A variação na concentração do KMnO₄, estimada a partir da curva-padrão, foi usada para se estimar a quantidade de C oxidado (C_{lábil}) considerando-se que 1,0 mol de MnO₄⁻ é consumido na oxidação de 0,75 mol (9 g) de carbono.

As propriedades microbiológicas foram realizadas com o solo na umidade de campo. O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método da irradiação-extração (FERREIRA et al., 1999; VANCE et al., 1987), utilizando K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ como agente extrator. O carbono orgânico (C) nos extratos foi estimado pela oxidação com $K_2Cr_2O_7$. A diferença na concentração de C entre as amostras irradiadas e as não irradiadas dos extratos foram expressos como CBM pela multiplicação de um fator (K_c) de 0,45 (VANCE et al., 1987). Os resultados foram expressos em $\mu\text{g C kg}^{-1}$ solo seco.

A respiração basal do solo (RBS) foi medida pela determinação do C- CO_2 liberado conforme Silva et al. (2007), por incubação estática de 100g de solo em vidros herméticos a 25°C (BOD). O C- CO_2 foi coletado após 10 dias em 10 mL de solução NaOH 1 mol L^{-1} , o qual foi titulado com HCl, após a adição de $Ba(OH)_2$ para a precipitação dos carbonatos. O C- CO_2 liberado foi expresso em $\text{mg C-}CO_2 \text{ kg}^{-1}$ solo seco por 10 dias. O quociente metabólico (qCO_2) foi obtido pela razão entre o C- CO_2 evoluído das amostras de solo e a respectiva biomassa microbiana (ANDERSON, DOMSCH, 1993).

As atividades da β -glicosidase (BGLI) e da fosfatase ácida (FOSF) foram determinadas de acordo com Eivazi e Tabatabai (1988) e Tabatabai e Bremner (1969) em 1g de solo adicionado de solução com substrato sintético em tampão universal modificado, incubado em banho-maria, a 37°C e por 1 hora. O produto formado, o p -nitrofenol (PNF), foi medido em espectrofotômetro a 410 nm. A quantificação foi feita utilizando-se de uma curva de referência contendo diferentes concentrações de PNF. A atividade da arilsulfatase (ARIL) foi realizada da mesma forma que a BGLI, substituindo-se o substrato sintético pelo p -nitrofenil-sulfato $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ em tampão acetato de sódio pH 5,8. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g PNF g}^{-1}$ solo seco h^{-1} .

A atividade da urease foi determinada de acordo com metodologia modificada de Kandeler e Gerber (1988), utilizando-se 5g de solo com tampão citrato pH 6,7 e solução de uréia 10% como substrato. As amostras foram incubadas em banho-maria, a 37°C e por 3 horas. O produto formado foi o N- NH_4 liberado, determinado em espectrofotômetro a 600 nm pelo kit comercial Uréia 500® (Doles). Os resultados foram expressos em $\mu\text{g N-}NH_4 \text{ g}^{-1}$ solo seco h^{-1} .

A atividade enzimática catalítica (intra e extracelular) foi estimada pela hidrólise do diacetato de fluorosceína (FDA), conforme proposto por Green et al.

(2006). A incubação foi realizada com 1g de solo utilizando-se como substrato o diacetato de fluoresceína e tampão fosfato de potássio pH 7,6. A incubação foi feita em incubadora Shaker a 30°C por 1 hora sob agitação de 100 rpm. A extração foi realizada com solução de clorofórmio/metanol (2:1). O produto formado foi a fluoresceína de sódio e a quantificação das amostras foi feita com base em curva padrão, com leitura em espectrofotômetro a 490 nm. Os resultados foram expressos em $\mu\text{g fluoresceína g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$.

As propriedades do solo foram analisadas por meio da análise de variância e as diferenças significativas entre as médias foram avaliadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, utilizando o software SISVAR (FERREIRA, 2008). Para as variáveis microbiológicas e químicas, foram utilizadas análises de correlações de Pearson, pelo software Sigma Plot. As análises de componentes principais (ACP) foram realizadas pelo software Canoco 4.5.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de uso e a textura do solo tiveram implicações expressivas sobre os atributos químicos dos solos (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos de Latossolos sob diferentes sistemas de uso do solo com texturas contrastantes, na camada de 0-10 cm (n=4, \pm desvio padrão).

Característica ¹	Textura muito argilosa ²			Textura média ³		
	Cerrado	Pastagem	Cana-de-açúcar	Cerrado	Pastagem	Cana-de-açúcar
pH água (2:1)	4,3 \pm 0,1	5,5 \pm 0,3	6,6 \pm 0,1	4,9 \pm 0,0	5,6 \pm 0,1	5,7 \pm 0,05
COS (g kg ⁻¹)	35,1 \pm 4,0	27,5 \pm 2,9	20,6 \pm 1,6	20,5 \pm 1,8	16,6 \pm 2,5	14,5 \pm 0,6
NT (g kg ⁻¹)	2,2 \pm 0,6	1,5 \pm 0,4	1,1 \pm 0,3	1,6 \pm 0,2	1,2 \pm 0,2	0,7 \pm 0,1
C/N	15,9	18,3	18,7	12,8	13,8	20,7
P (mg kg ⁻¹)	1,3 \pm 0,3	1,0 \pm 0,1	11,5 \pm 0,6	0,9 \pm 0,3	2,6 \pm 1,0	12,2 \pm 4,8
K (mg kg ⁻¹)	57,9 \pm 4,9	41,7 \pm 10,6	101,1 \pm 19,8	42,5 \pm 11,7	23,2 \pm 6,1	37,7 \pm 7,2
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,3 \pm 0,0	1,4 \pm 0,6	2,9 \pm 0,1	0,3 \pm 0,0	1,4 \pm 0,6	2,9 \pm 0,1
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,2 \pm 0,0	0,4 \pm 0,3	0,6 \pm 0,1	0,2 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	0,4 \pm 0,05
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,0 \pm 0,3	0,1 \pm 0,1	0,0 \pm 0,0	0,6 \pm 0,1	0,05 \pm 0,05	0,0 \pm 0,0
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	12,3 \pm 1,7	5,9 \pm 1,1	2,3 \pm 0,07	6,8 \pm 1,2	3,4 \pm 0,1	3,1 \pm 0,1
SB	0,65 \pm 0,01	1,9 \pm 0,9	3,8 \pm 0,3	0,45 \pm 0,19	1,36 \pm 0,32	1,49 \pm 0,07
CTC (cmol _c dm ⁻³)	12,9 \pm 1,7	7,8 \pm 0,1	6,0 \pm 0,2	7,2 \pm 1,4	4,8 \pm 0,3	4,6 \pm 0,1
V (%)	5,5 \pm 0,7	25,0 \pm 12,7	62,5 \pm 2,1	6,0 \pm 1,1	28,5 \pm 5,1	32,5 \pm 1,5
m (%)	60,5 \pm 4,9	6,5 \pm 1,5	0,0 \pm 0,0	57,5 \pm 7,8	3,5 \pm 3,0	0,0 \pm 0,0

¹ NT: nitrogênio total; P (Mehlich); SB: Soma de bases trocáveis (Ca⁺², Mg⁺², K⁺); CTC: capacidade de troca catiônica; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio. ² Latossolo Amarelo ácrico típico. ³ Latossolo Amarelo distrófico típico.

Os resultados referentes aos solos sob Cerrado são típicos deste bioma, caracterizado por solos ácidos e pobres em nutrientes (MENDES et al., 2012) (Tabela 2). Os valores de pH variaram de 4,3 a 6,6, nos solos de textura muito argilosa, e 4,9 a 5,7, nos solos de textura média. Os menores valores de pH foram encontrados no Cerrado, resultado que pode ser relacionado à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição da serapilheira, que contribui para o abaixamento do pH em solos de vegetação natural (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). A acidez potencial (H+Al) variou de 2,3 a 12,3 cmol_cdm⁻³, nos solos de textura muito argilosa, e de 3,1 a 6,8 cmol_cdm⁻³, nos solos de textura média (Tabela 2), sendo os maiores valores encontrados no solo de vegetação natural de Cerrado. Os teores de P, K, Ca+Mg e a relação C/N nas áreas de cana-de-açúcar foram em geral maiores (Tabela 2). O teor de P foi em média 10 vezes maior na área de cana-de-açúcar, em relação às demais áreas analisadas. As áreas de cana-de-açúcar tratam-se de áreas cultivadas recebendo calagem e adubação (Tabela 1). As áreas de Cerrado apresentaram os maiores teores de N e H+Al, diferindo significativamente das outras áreas. A perda de N nas áreas manejadas foi em média 40% menor em relação ao Cerrado, levando a uma limitada disponibilidade

de N nas áreas de cana e pastagem, principalmente no solo de textura média. Alguns estudos demonstram que o N é um nutriente que regula os processos ecológicos, sendo indicado como um dos principais limitadores metabólicos em solos tropicais (RAMIREZ et al., 2010; RAMIREZ et al., 2012).

O solo de textura muito argilosa apresentou teores de COS de 18, 37 e 41% maiores nas áreas sob cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado, respectivamente, quando comparado ao de textura média (Tabela 2). O Cerrado apresentou sempre maiores teores de COS em ambos os solos, seguido pela pastagem e pela cana-de-açúcar.

Tabela 3. Distribuição (valores médios) e relação da fração orgânica em Latossolos de texturas muito argilosa e média, sob sistemas de uso do solo, na camada de 0-10 cm (n=4; \pm desvio padrão).

Carbono orgânico ¹	Textura muito argilosa			Textura média		
	Cerrado	Pastagem	Cana-de-açúcar	Cerrado	Pastagem	Cana-de-açúcar
C _{AH} (g kg ⁻¹)	3,5 \pm 0,2	2,2 \pm 0,3	1,6 \pm 0,2	2,9 \pm 0,2	2,2 \pm 0,2	2,3 \pm 0,4
C _{AF} (g kg ⁻¹)	4,6 \pm 0,3	3,0 \pm 0,2	2,3 \pm 0,1	2,9 \pm 0,3	2,0 \pm 0,3	1,6 \pm 0,1
C _{HU} (g kg ⁻¹)	21,7 \pm 1,0	18,0 \pm 1,3	14,9 \pm 1,0	11,9 \pm 0,9	9,6 \pm 0,4	6,6 \pm 0,2
C _{Lábil} (g kg ⁻¹)	2,8 \pm 0,4	3,0 \pm 0,1	2,9 \pm 0,2	0,8 \pm 0,2	0,9 \pm 0,1	0,7 \pm 0,04
C _{AH} /C _{AF}	0,7	0,7	0,5	0,9	1,3	1,4
C _{EA} /C _{HU}	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5

¹ C_{AH}: carbono da fração ácido húmico; C_{AF}: carbono da fração ácido fúlvico; C_{HU}: carbono da fração humina; C_{Lábil}: carbono lábil; C_{EA}: fração no extrato alcalino (C_{AH}+ C_{AF}).

Os sistemas de uso de solo, sob cana de açúcar e pastagem, reduziram significativamente os teores de COS, sendo a redução mais expressiva no solo muito argiloso (Tabela 3). Roscoe et al. (2006) constataram que, após 23 anos de cultivo de pastagem em substituição ao Cerrado, os teores de carbono orgânico nos primeiros 100 cm do solo não demonstraram diferenças significativas. Entretanto, neste trabalho, avaliando a camada de 0-10 cm, as diferenças entre o COS do Cerrado e da pastagem são expressivos (Tabela 3). As áreas de cana-de-açúcar apresentaram menores teores de COS (Tabela 3), embora a relação C/N tenha sido maior em relação às outras áreas (Tabela 2). Esse resultado indica a pobreza nutricional da palhada da cana, com baixas taxas de decomposição (PULROLNIK et al., 2009). Esses resultados mostram que o sistema de uso do solo leva à perda de COS e que essa perda é dependente da textura do solo, mostrando que o solo muito argiloso é mais afetado pela atividade agrícola nos exemplos estudados. A importância da pastagem para a matéria orgânica do solo em solos de Cerrado é substanciada pelo fato de que, embora apresentem pequena biomassa da parte aérea (apenas 11% no total), elas

contribuem com 50% do C aportado ao solo anualmente (PULROLNIK et al., 2009). Possivelmente, isso se deve à rápida ciclagem e ao aporte de C derivado da grande quantidade de raízes finas da pastagem (WILCKE; LILLENFEIN, 2004).

As substâncias húmicas, representadas por C_{AH} , C_{AF} e C_{HU} , também foram expressivamente alteradas com o sistema de uso do solo (Tabela 3) e suas quantidades estão associadas à textura. Os maiores teores de C nos solos sob as diferentes coberturas vegetais estudadas foram encontrados nas frações húmicas (C_{HU}), principalmente no solo muito argiloso, pela maior interação à fração mineral do solo (PULROLNIK et al., 2009).

A retirada da vegetação nativa para introdução de cana e pastagem levou a importantes modificações nas frações orgânicas. O Cerrado apresentou os maiores teores de carbono, comparado ao solo da pastagem e da cana nos dois solos, apresentando diferenças estatísticas entre as áreas ($P < 0,05$) (Tabela 3). As frações do carbono mais lábeis, como o C_{AF} e o $C_{Lábil}$ foram menores nos solos manejados com cana-de-açúcar e a pastagem (Tabela 3). O $C_{Lábil}$ não se diferenciou entre as áreas do solo muito argiloso. O maior aporte de resíduos advindos do cerradão pode ser responsável por esse resultado. Os resultados corroboram com os de Roscoe et al. (2001), que observaram elevada quantidade de carbono lábil no Cerrado, na camada de 0-7,5 cm, e não observaram tal acúmulo na pastagem. Entretanto, Pulrolnik et al. (2009), estudando solo muito argiloso, também não observaram a diminuição do estoque de $C_{Lábil}$ na pastagem, em comparação ao Cerrado, assim como neste estudo, indicando que a textura é crucial na transformação do carbono do solo.

No solo muito argiloso, o C_{AF} foi maior que o C_{AH} em todos os sistemas e, no solo textura média, o C_{AF} foi menor que o C_{AH} , exceto no Cerrado. Os valores da relação C_{AH}/C_{AF} foram $< 1,0$, no solo muito argiloso, variando de 0,5 a 0,7 e, no solo de textura média, essa relação foi maior, variando de 0,9 a 1,4, enquanto a relação C_{EA}/C_{HU} foi baixa ($< 0,5$) e sem diferença significativa entre as áreas e entre solos de texturas contrastantes. Longo e Espíndola (2000) e Pulrolnik et al. (2009) constataram diminuição dos estoques de substâncias húmicas decorrente da mudança da vegetação natural de Cerrado para outros usos, evidenciando o efeito do manejo sobre o teor e sobre a distribuição dos componentes orgânicos em solos tropicais. Essas mudanças na quantidade e qualidade de matéria orgânica e as tendências associadas à humificação afetam as comunidades microbianas do solo e sua atividade, como

observaram Bausenwein et al. (2008), Chatterjee et al. (2009), Stursová e Baldrian (2011) e Miralles et al., (2012).

Os teores de carbono da biomassa microbiana (CBM), da respiração basal do solo (RBS), aos 10 dias de incubação, e do quociente metabólico (qCO_2) estão representados na Figura 1. Nesse estudo, as mudanças do uso do solo e a quantidade de argila alteraram significativamente as propriedades microbianas do solo.

O solo de textura muito argilosa apresentou maior CBM em relação ao solo de textura média, em todas as áreas avaliadas. Diferenças significativas ($P < 0,05$) foram encontradas entre os sistemas avaliados, sendo os maiores teores de CBM encontrados no solo da área de Cerrado, seguido da pastagem. Independente da classe textural, a área com cana-de-açúcar apresentou os menores valores de CBM (Figura 1). No solo de textura média, as linhas medianas apresentadas na Figura 1 foram semelhantes entre o CBM do Cerrado ($412 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco) e da pastagem ($465 \mu\text{g C g}^{-1}$ solo seco). Solos mais argilosos podem apresentar uma maior comunidade microbiana devido ao alto teor de COS nesses solos, maior interação com os fatores físicos e uma menor flutuação na disponibilidade de água (CHODAK; NIKLIŃSKA, 2010). De acordo com Anderson e Domsch (1978), os maiores valores de CBM em áreas de vegetação natural podem ser explicados com base na maior diversidade do substrato orgânico produzido e aportado neste local. Pulrolnik et al. (2009), estudando Latossolo argiloso, também relataram maiores valores de CBM no Cerrado, em relação à pastagem.

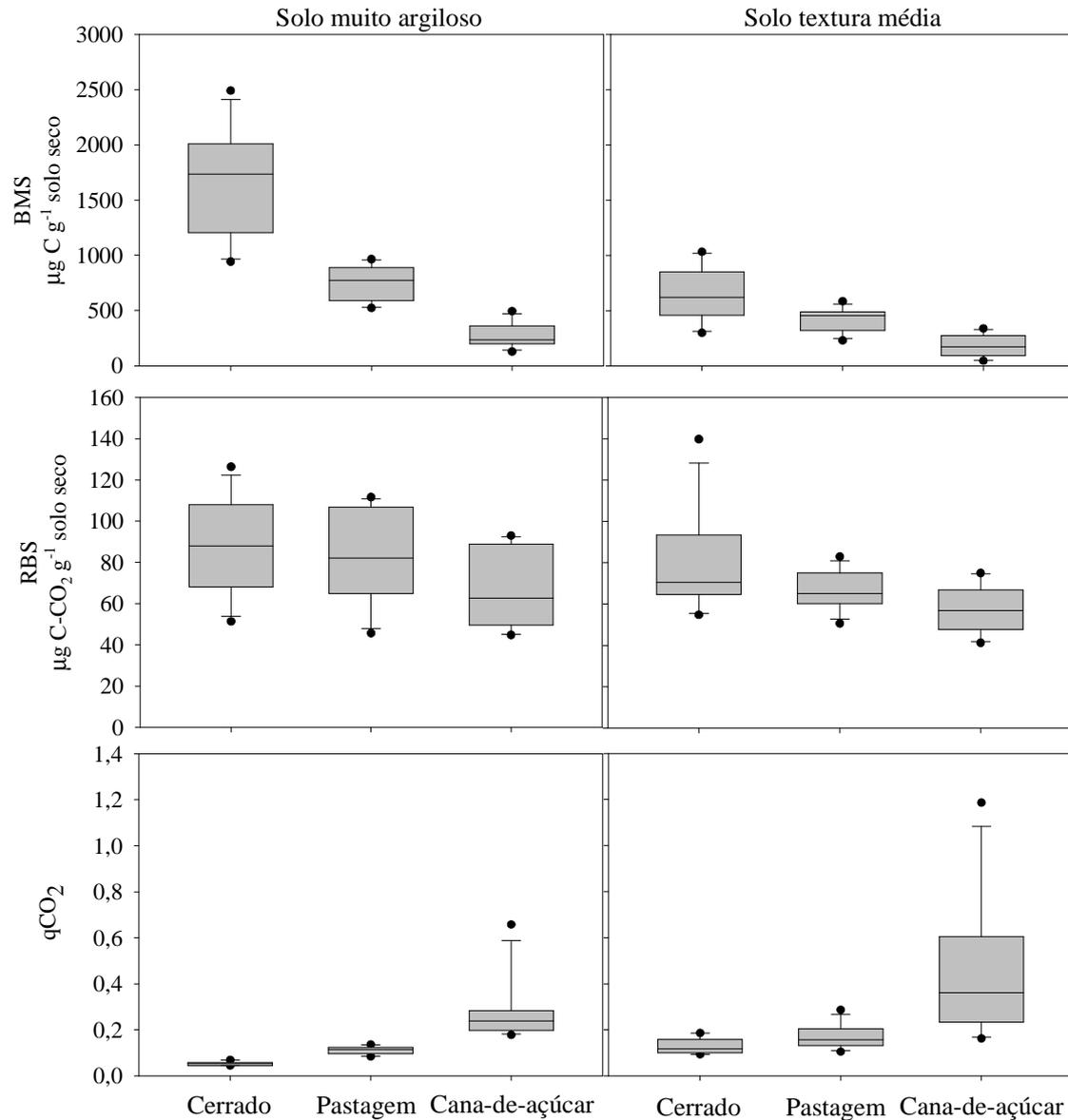


Figura 2. Efeito do uso e manejo quanto ao carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (RBS) aos 10 dias de incubação, e o quociente metabólico (qCO_2) em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliadas em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição. A linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos.

Os maiores fluxos de respiração do solo foram obtidos no solo muito argiloso, onde a respiração foi em média 1,2 vezes maior do que no solo de textura média (Figura 2). A RBS seguiu a mesma ordem do CBM sendo as maiores médias encontradas no solo da área de Cerrado seguido da pastagem, e os menores valores para o solo da área sob cana-de-açúcar, independente da textura do solo. Em sistemas

onde o manejo de insumos é alto, a atividade microbiana do solo pode ser diminuída, como relatado por Vallejo et al. (2010).

O quociente metabólico (índice qCO_2 , ou a quantidade de C- CO_2 produzida por unidade de carbono da biomassa microbiana) apresentou resultados inversamente proporcionais ao CBM e à RBS, sendo as maiores médias para as áreas de cana-de-açúcar seguido das áreas de pastagem. O Cerrado, em ambas as classes texturais, apresentaram os menores valores (Figura 2). Os ambientes mais impactados em função da textura do solo são os de Latossolo de textura média, por apresentarem os maiores valores de qCO_2 . O maior estresse microbiológico ocorreu sob cultivo com cana-de-açúcar. O qCO_2 foi diferente entre as texturas dos solos e entre os sistemas de uso. O índice qCO_2 é um dos principais indicadores de avaliação do estado metabólico da microbiota do solo. No entanto, o menor qCO_2 em solos que não foram perturbados, como sob Cerrado, significa que estes solos apresentaram menor atividade respiratória por unidade de biomassa do que solos com manejo (cana e pastagem). Isso indica que os solos degradados respiram mais do que incorporam carbono na biomassa microbiana e existem fatores abióticos limitando o crescimento de micro-organismos, resultando em estresse ambiental.

As atividades das enzimas hidrolíticas foram afetadas tanto pelo sistema de uso do solo, como pela classe textural (Figura 3). Os resultados demonstram os maiores valores de atividades enzimáticas e variações em sistemas sob o solo muito argiloso, quando comparado ao de textura média para todas as enzimas avaliadas. Observa-se que as maiores respostas de atividade enzimática foram no Cerrado, seguido pela pastagem. As áreas de solo sob cana-de-açúcar apresentaram sempre os menores valores de atividade de enzimas (Figura 3). Isso indica uma limitação no solo da cana-de-açúcar no suprimento de energia, principalmente para a síntese de proteínas e outros compostos, provavelmente pela menor qualidade do substrato.

A enzima β -glicosidase apresentou a maior variabilidade nos valores, como demonstrado na Figura 3. A atividade da enzima foi em média 237, 345 e 372 $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$ no solo muito argiloso e 143, 241 e 243 $\mu\text{g } p\text{-nitrofenol } g^{-1} \text{ solo seco } h^{-1}$ no solo de textura média para os sistemas cana, pastagem e Cerrado, respectivamente. Em ambos os solos de texturas contrastantes, a atividade média da β -glicosidase não se diferenciou estatisticamente entre pastagem e Cerrado ($P>0,05$), e observa-se, na Figura 3, as linhas medianas próximas nesses sistemas. A maior

contribuição da β -glicosidase indica que a capacidade de despolimerização e suprimento de substratos orgânicos, como a maltose e a celobiose, decresce do Cerrado=pastagem>cana.

A arilsulfatase é a enzima envolvida na mineralização de sulfatos de ésteres em solos (TABATABAI, 1994). Neste estudo, foi a enzima que teve a menor produção de p-nitrofenol em todos os sistemas, com médias de 35, 63 e 134 μg p-nitrofenol g^{-1} solo seco h^{-1} , no solo muito argiloso, e médias de 14, 27 e 56 μg p-nitrofenol g^{-1} solo seco h^{-1} , no solo de textura média, para a cana, a pastagem e o Cerrado, respectivamente. Esta enzima tem alta correlação com a matéria orgânica do solo (TABATABAI; BREMNER, 1970; LI; SARAH, 2003; MENDES et al., 2012), o que sugere a alta dependência da enzima arilsulfatase na ciclagem do S, principalmente no Cerrado e na pastagem.

A atividade da fosfatase foi substancialmente maior nos dois solos (Figura 3), em relação às demais atividades enzimáticas. A atividade da enzima foi em média 279, 514 e 957 μg p-nitrofenol g^{-1} solo seco h^{-1} , no solo muito argiloso, e 178, 339 e 607 μg p-nitrofenol g^{-1} solo seco h^{-1} , no solo de textura média, para os sistemas cana, pastagem e Cerrado, respectivamente. Esses altos valores para a atividade da fosfatase, principalmente no Cerrado, têm sido reportados por Mendes et al. (2012), que estudando cinco fisionomias de Cerrado, encontraram valores de fosfatase ácida variando de 739 a 1892 μg p-nitrofenol g^{-1} solo seco h^{-1} principalmente em Cerrados com formações florestais como é o caso do Cerradão.

Esses altos valores de atividade da fosfatase em solos ácidos e altamente intemperizados, com formação vegetal nativa, podem ser uma resposta das plantas e micro-organismos para a alta deficiência de P no solo (MENDES et al., 2012). No caso deste estudo, tanto o Cerrado, em solo de textura muito argilosa, quanto o de textura média apresentaram os menores teores de P (Tabela 2), em relação à cana e à pastagem. Em condições como estas, a produção de fosfatase é estimulada e exsudada pelas raízes das plantas e pelos micro-organismos do solo, aumentando a liberação de P inorgânico a partir de compostos orgânicos (SINSABAUGH et al., 1993). Por outro lado, quando os níveis de P inorgânico são elevados e disponíveis no solo, como nos sistemas cultivados com cana-de-açúcar, a produção de fosfatase parece ser inibida, como foi relatado por Carneiro et al. (2004), em solos sob preparo convencional, que receberam fertilizantes fosfatados para as culturas anuais.

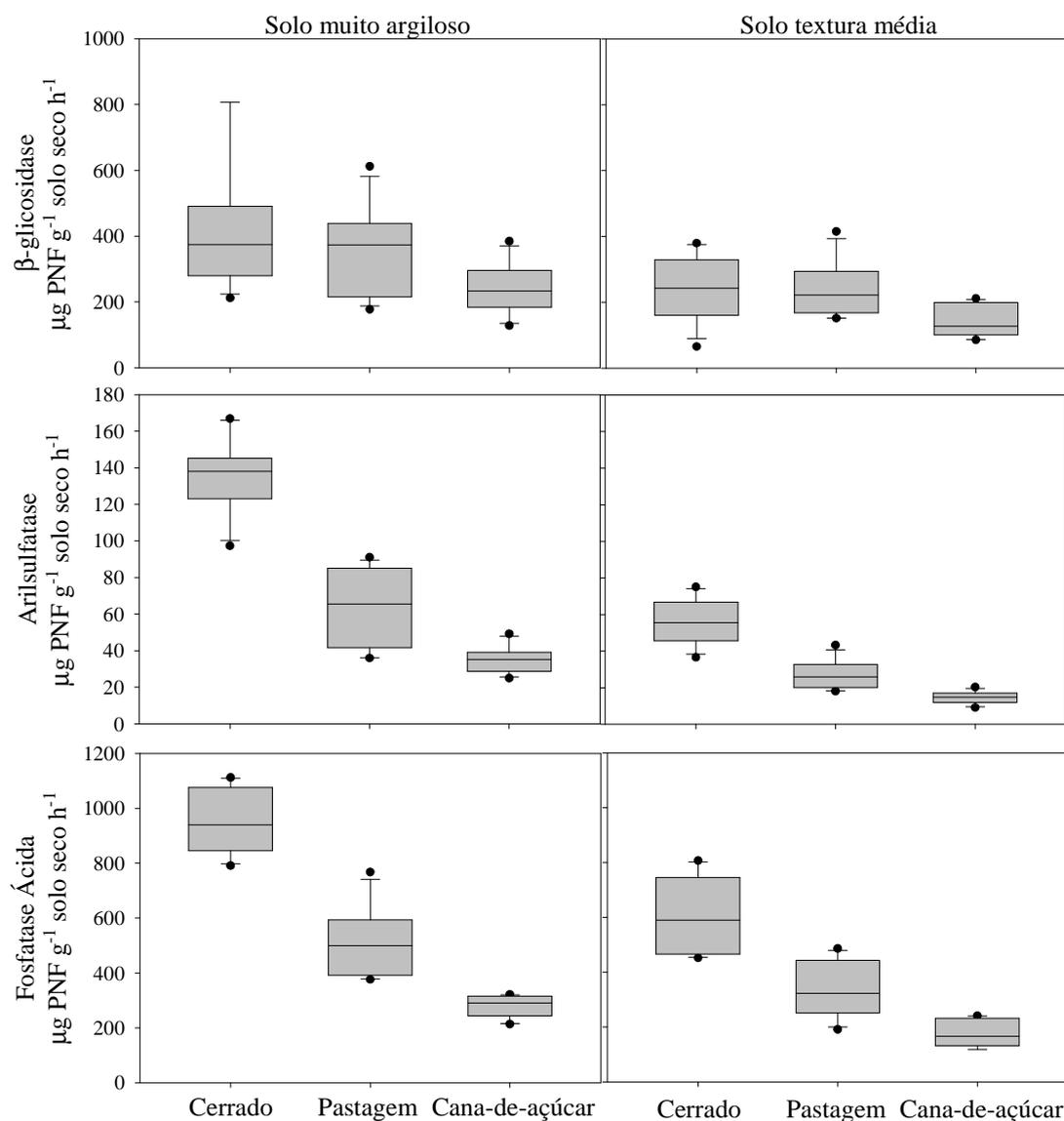


Figura 3. Atividades das enzimas hidrolíticas extracelulares, β -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase ácida em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliadas em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição, a linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos.

Entre sistemas de uso do solo, as médias de atividade da enzima urease foram estatisticamente iguais entre a pastagem ($158 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$) e o Cerrado ($143 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$) no solo muito argiloso, sendo a cana-de-açúcar o sistema com menor atividade ($56 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$). No solo de textura média, as maiores atividades da urease também foram encontradas na pastagem ($100 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$) e no Cerrado ($83 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$), que se diferenciaram estatisticamente da cana ($45 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \text{solo seco h}^{-1}$) (Figura 4).

A atividade enzimática total do solo, representada pela hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), está representada na Figura 4. Há nítida diferença entre os sistemas de uso e entre os dois solos, sendo a atividade da FDA maior no solo muito argiloso e para o Cerrado (Figuras 3 e 4). As médias de atividade da FDA obtidas no solo muito argiloso foram 177, 298 e 426 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco h^{-1} e no solo de textura média as médias foram 106, 172 e 320 $\mu\text{g FDA g}^{-1}$ solo seco h^{-1} para a cana-de-açúcar, a pastagem e o Cerrado, respectivamente.

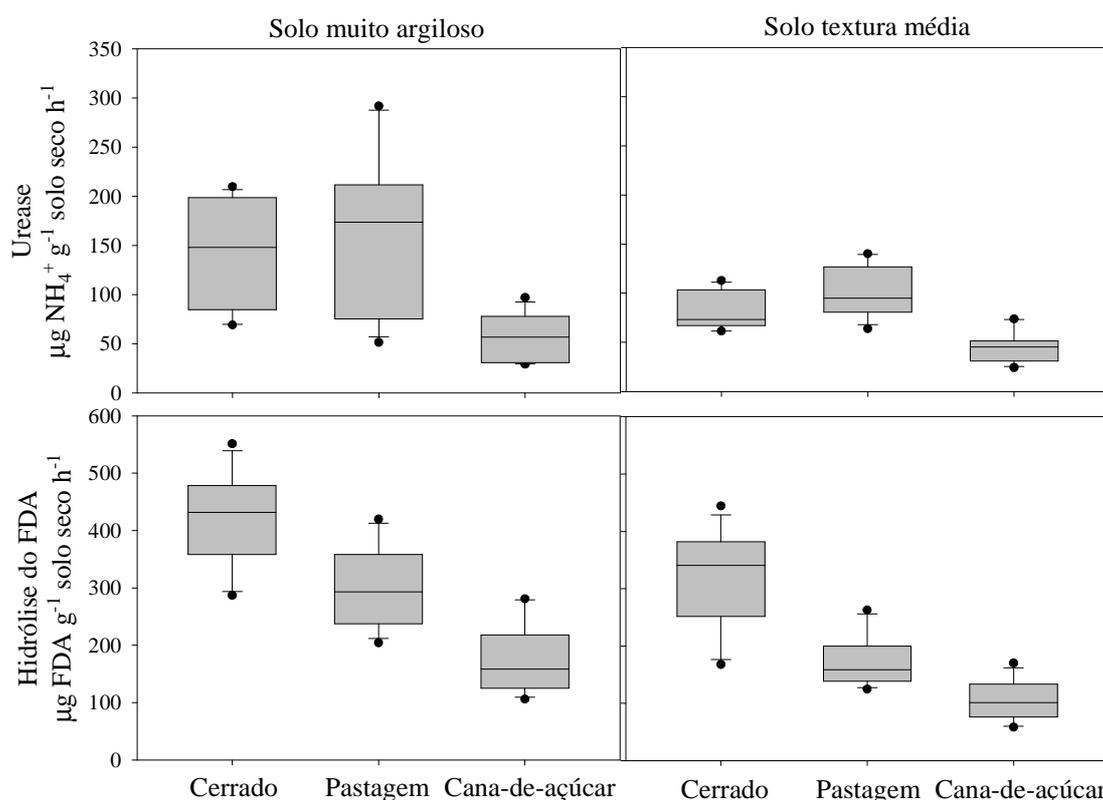


Figura 4. Atividade da enzima urease, e hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), em solos de textura muito argilosa e textura média, avaliados em três sistemas de uso: cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado. Os box-plots representam os 50% centrais da distribuição, a linha traçada dentro do box-plot representa a mediana, e as linhas que saem da caixa representam valores mínimos e máximos. Os valores atípicos são representados com pontos pretos.

As correlações de Pearson (Tabela 4) foram realizadas entre características químicas e bioquímicas (enzimas: β -glicosidase (B-GLI), arilsulfatase (ARIL), hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA), urease (URE), fosfatase ácida (FOSF), carbono da biomassa microbiana (CBM), carbono orgânico do solo (COS), carbono da fração ácido húmico (C_{AH}), carbono da fração ácido fúlvico (C_{AF}), carbono da

fração humina (C_{AH}), carbono lábil ($C_{Lábil}$), nitrogênio total (N), respiração basal do solo (RBS)) e o teor de argila. As correlações destes indicadores tornam-se importantes porque medem o grau de associação entre as variáveis e são essenciais nos estudos de ecologia funcional do solo.

Foram observadas correlações significativas positivas entre a maioria das características avaliadas ($P < 0,05$) (Tabela 4). Em relação às enzimas hidrolíticas, altas correlações (considerando valores de $r > 0,70$) não foram encontradas para a enzima BGLI. Em contrapartida, a enzima ARIL apresentou alta correlação ($r = 0,92$) com a enzima FOSF e foi a única enzima que apresentou correlação significativa com o teor de argila ($r = 0,55$). A atividade enzimática total representada pela FDA se correlacionou principalmente com ARIL, FOSF, CBM, COS, C_{AF} , N e RBS. O N total foi altamente correlacionado com a maioria das variáveis ($r > 0,74$), exceto para BGLI, URE, C_{AH} e $C_{Lábil}$. A RBS se correlacionou principalmente com FDA e URE, e o qCO_2 apresentou correlações negativas com BGLI, ARIL, FDA, FOSF, CBM e C_{AF} . Stursová e Baldrian (2011) também relataram que os fatores que mais afetaram a atividade enzimática foram o conteúdo de COS, N e ácidos húmicos, assim como este estudo demonstrou (Tabela 4), e que, diferentemente deste trabalho, a arilsulfatase não foi afetada por essas características, mas foi muito influenciada pelo CBM, a exemplo da FOSF. Muitos autores evidenciam a alta correlação da matéria orgânica (carbono e N) e a maioria das propriedades bioquímicas (DICK, 1984; KAISER et al, 1992; RAUBUCH; BEESE, 1995). O CBM se correlacionou positivamente com todas as atividades enzimáticas analisadas, porém foi mais determinante para ARIL, FDA e FOSF. O $C_{Lábil}$ foi a característica do solo que menos se correlacionou com as variáveis analisadas (Tabela 4).

Tabela 4. Correlação de Pearson¹ entre características de solos com textura muito argilosa e textura média (Latosolo Vermelho distrófico típico), com diferentes coberturas vegetais (cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado), n=72.

	BGLI	ARIL	FDA	URE	FOSF	CBM	COS	C _{AH}	C _{AF}	C _{HU}	C _{lábil}	N	RBS	qCO ₂	Argila
BGLI	1	0,60	0,58	0,57	0,65	0,63	0,66	ns	0,59	0,56	0,47	0,62	0,53	-0,49	ns
ARIL		1	0,82	0,59	0,92	0,91	0,89	0,67	0,90	0,84	0,57	0,89	0,54	-0,51	0,55
FDA			1	0,62	0,87	0,86	0,79	0,63	0,80	0,68	ns	0,74	0,70	-0,59	ns
URE				1	0,55	0,67	0,67	ns	ns	0,49	ns	0,47	0,73	ns	ns
FOSF					1	0,90	0,84	0,78	0,90	0,77	ns	0,83	0,56	-0,58	ns
CBM						1	0,85	0,68	0,83	0,73	ns	0,83	0,63	-0,56	ns
COS							1	0,56	0,86	0,92	0,77	0,89	0,58	ns	0,71
C _{AH}								1	0,71	0,51	ns	0,61	ns	ns	ns
C _{AF}									1	0,87	0,51	0,93	ns	-0,53	ns
C _{HU}										1	0,72	0,88	ns	ns	0,79
C _{lábil}											1	0,61	ns	ns	0,79
N												1	ns	ns	0,72
RBS													1	ns	ns
qCO ₂														1	ns
Argila															1

Somente coeficientes significativos a $P < 0,05$ foram mostrados. ns: coeficientes não significativos. ¹ BGLI: β -glicosidase; ARIL: arilsulfatase; FDA: hidrólise do diacetato de fluoresceína; URE: urease; FOSF: fosfatase ácida; CBM: carbono da biomassa microbiana; COT: carbono orgânico total; C_{AH}: carbono da fração ácido húmico; C_{AF}: carbono da fração ácido fúlvico; C_{HU}: carbono da fração humina; C_{lábil}: carbono lábil; N: nitrogênio total; RBS: respiração basal do solo. Os valores utilizados são correspondentes às Tabelas 1 e 2 e Figuras 2,3 e 4.

As maiores atividades bioquímicas relatadas no solo de Cerrado (clímax), do que em locais que foram desmatados e cultivados (cana e pastagem), só poderiam ser suportados por características físico-químicas favoráveis, como um alto conteúdo de COS e N, assim como relatado também por Miralles et al. (2012). Portanto, o aumento da atividade microbiana e bioquímica seria o resultado de aumento da quantidade e disponibilidade de substratos, incluindo a melhor estrutura do solo para o armazenamento de água, a qual favorece a atividade microbiana.

Solos com maior teor de matéria orgânica (Cerrado), comparados a solos com menores teores (mais degradados como a pastagem e a cana-de-açúcar) tendem a ter sua biomassa microbiana e atividade enzimática aumentadas. Miralles et al. (2012) relatam que solos impactados por mudanças no uso perdem uma grande parte da matéria orgânica pré-existente e que a matéria orgânica recalcitrante composta de substâncias húmicas está ligada a solos de textura mais argilosa (MIRALLES et al., 2012). Portanto, os solos manejados e impactados pelas atividades humanas acumulam formas de C mais resilientes, que são comparativamente menos biodegradáveis em solos com vegetação nativa.

A Figura 5 demonstra a análise de componentes principais (ACP), onde foram utilizadas as variáveis correlacionadas na Tabela 4. O componente principal 1 explicou com alto percentual as variações representadas em função das áreas e variáveis selecionadas: o componente principal 1 explicou 74% e o componente principal 2 explicou 0,8%.

As áreas com manejo intensivo do solo, como a cana-de-açúcar, em ambas as texturas avaliadas, e a pastagem do solo de textura média se agruparam nos componentes principais de valores negativos, juntamente com a variável qCO_2 , a qual indica o maior estresse metabólico dessas áreas (Figura 5). Os procedimentos envolvidos no manejo da cana-de-açúcar e a pastagem degradada no solo de textura média estariam fazendo com que a matéria orgânica não estabilizada fosse perdida. Em outras palavras, o agrupamento das variáveis analisadas em dois grupos sugere que as interações entre as propriedades envolvidas na ciclagem de nutrientes, como o C, N, P e S, caracterizam os ecossistemas não perturbados (FRANKENBERGER; DICK, 1983) e são totalmente perdidas em solos sob manejo intensivo (cana e pastagem). A perda do grau de associação entre as atividades enzimáticas e outras propriedades tem sido demonstrada em solos de vegetação natural que foram desmatadas, com grande impacto

nas variáveis químicas e bioquímicas pelas mudanças no uso e manejo (NOURBAKSHI, 2007; TRASAR-CEPEDA et al., 2008; MIRALLES et al., 2012).

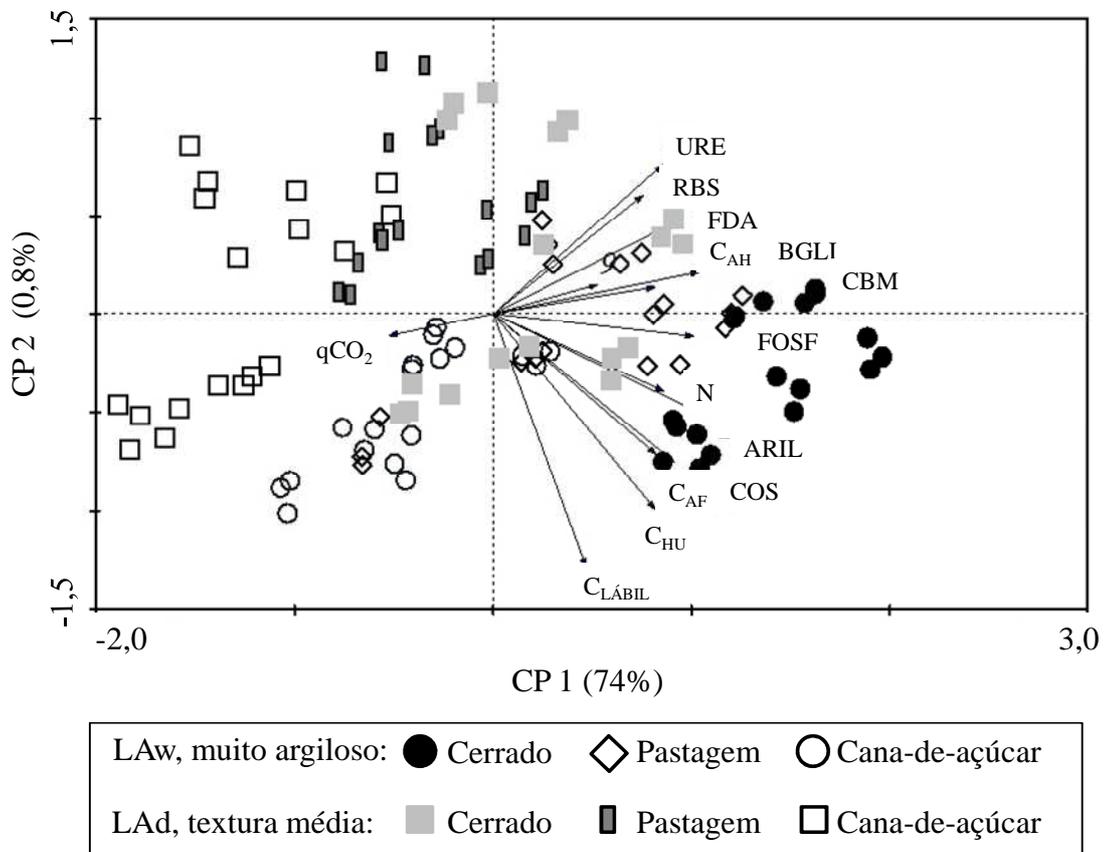


Figura 5. Análise de componentes principais e ordenação espacial das áreas analisadas conforme a textura do solo, utilizando características químicas e bioquímicas das variáveis da tabela 4. CP: componente principal; LAW: Latossolo Amarelo ácrico típico; LAd: Latossolo Amarelo distrófico típico.

O solo das áreas com maior teor de matéria orgânica, como o Cerrado, em ambas as texturas contrastantes dos solos, e a pastagem no solo muito argiloso foram bem agrupados nas componentes principais de valores positivos, indicando melhor associação a todas as variáveis avaliadas, tanto as químicas, e as relacionadas com as atividades enzimáticas e à biomassa microbiana, quanto as variáveis da fração orgânica do solo (Figura 5). Este fator reflete claramente que a atividade da biomassa microbiana foi maior nas áreas de Cerrado, independente da textura do solo e das características da matéria orgânica do solo. Estes resultados evidenciam a perda de matéria orgânica como substrato para a atividade microbiana nas outras áreas (cana e pastagem), como relatado por Trasar-Cepeda et al. (2000), estudando solos ácidos em áreas de vegetação nativa florestal.

CONCLUSÕES

1. A classe textural do solo tem implicações qualitativas e quantitativas significativas para as propriedades bioquímicas.
2. O solo muito argiloso apresenta uma maior amplitude de variação nos indicadores microbianos e bioquímicos, com valores sempre maiores em relação ao de textura média.
3. As áreas sob cana-de-açúcar e pastagem têm impactos negativos sobre os indicadores microbianos, bioquímicos e na fração orgânica do solo, com efeito mais expressivo nas áreas sobre cana-de-açúcar.
4. Os indicadores microbianos e de enzimas utilizados neste trabalho foram sensíveis ao sistema de uso e podem ser usadas para definir o funcionamento e qualidade do solo, sendo inclusive mais indicados do que a fração orgânica, devido aos valores de detecção.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology Biochemistry**, Elmsford, v.10, p.215-221, 1978.
- ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 25, n.3, p. 393-395, 1993.
- BAUSENWEIN, U. et al. Exploring soil microbial communities and soil organic matter: variability and interactions in arable soils under minimum tillage practice. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.40, p.67–77, 2008.
- BENITES, V.M.; MADARI, B.; MACHADO, P.L.O.A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo**: Um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2003. 7p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 16).
- BLACK, C.A. **Methods of Soil Analysis**, Part I and II. American Society Inc. Publishing, Madison, U.S.A, p. 770–779, 1965.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system. **Australian Journal of Agriculture Research**, Victoria, Australia, v.46, p.1459-1466, 1995.
- CARNEIRO, R.G. et al. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.661–669, 2004.
- CHATTERJEE, A. et al. Soil processes and microbial community structures in 45- and 135-year-old lodgepole pine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.39, p.2263–2271, 2009.
- CHODAK, M.; NIKLIŃSKA, M. Effect of texture and tree species on microbial properties of mine soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.46, p.268-275, 2010.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 28 nov 2011.
- DICK, W.A. Influence of long term-tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, p.569–574, 1984.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M.A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.20, p.601–606, 1988.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. rev. e ampl., Brasília: EMBRAPA, 2009, 627p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Levantamento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, 1982. 526p. (Boletim de Pesquisa 1).

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, p.991-996, 1999.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v.6, p.36-41, 2008.

FRANKENBERGER, W.T.; DICK, W.A. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activity indices in soil. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.47, p.945-951, 1983.

GARCÍA, C. et al. Microbial activity in soils of SE Spain exposed to degradation and desertification processes. Strategies for their rehabilitation. In: GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, M.T. (eds). **Research and Perspectives of Soil Enzymology in Spain**, Murcia:CEBAS-CSIC, 2003, p. 93-146.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. et al., (eds). **Methods of soil analysis: Part 1**. SSSA Book Ser. 5. SSSA and ASA, Madison, WI, 1986.

GIL-SOTRES, F. et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.37, p.877-887, 2005.

GREEN, V.S.; STOTT, D.E.; DIACK, M. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.693-701, 2006.

KAISER, E.A. et al. Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.24, p.675-683, 1992.

KANDELER, E.; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.6, p.68-72, 1988.

- KÖPPEN, W. **Die klimate der erde**. Walter de Gruyter, Berlin, Leipzig, 1923.
- LI, X.; SARAH, P. Arylsulfatase activity of soil microbial biomass along a Mediterranean –arid transect. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.35, p.925–934, 2003.
- LONGO, R.M.; ESPÍNDOLA, C.R. C-orgânico, N-total e substâncias húmicas sob influência da introdução de pastagens (*Brachiaria* sp.) em áreas de Cerrado e Floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.723-729, 2000.
- JACOBSON, T.K.B.; BUSTAMANTE, M.M.C.; KOZOVITS, A.R. Diversity of shrub tree layer, leaf litter decomposition and N release in a Brazilian Cerrado under N, P and N plus P additions. **Environmental Pollution**, Barking, v.159, p.2236–2242, 2011.
- LEIRÓS, M.C. et al. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Athlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): general parameters. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.32, p.733-745, 2000.
- MAPA, Brazilian Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. 2012. Brazilian Sugarcane Yield. Available in: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>, acess in 19 november, 2012.
- MENDES, I.C. et al. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, Hague, Holanda, v.359, p.183-195, 2012.
- MIRALLES, I. et al. Modifications of organic matter and enzymatic activities in response to change in soil use in semi-arid mountain ecosystems (southern Spain). **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.63, p.272-283, 2012.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo. 2.ed., Lavras: Editora UFLA, 2006. 729p.
- NAYAK, D.R.; BABU, Y.J.; ADHYA, T.K. Long-term application of compost influences microbial biomass and enzyme activities in a tropical Aeris Endoaquept planted to rice under flooded condition. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.39, p.1897–1906, 2007.
- NIEMEYER, J.C. et al. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.59, p.96-105, 2012.
- NOURBAKHS, F. Decoupling of soil biological properties by deforestation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.121, p.435–438, 2007.
- PULROLNIK, K. et al. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e Cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.1125-1136, 2009.

- RAMIREZ, K.S. et al. Consistent effects of nitrogen fertilization on soil bacterial communities in contrasting systems. **Ecology**, Tempe, Arizona, v.91, p.3463–3470, 2010.
- RAMIREZ, K.S.; CRAINE, J.M.; FIERER, N. Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biome. **Global Change Biology**, Oxford, v.18, p.1918-1927, 2012.
- RAUBUCH, M.; BEESE, F.. Pattern of microbial indicators in forest soils along an European transect. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.19, p.362–368, 1995.
- ROSCOE, R. et al. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the ¹³C/¹²C isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. **Geoderma**, v.104, p.185-202, 2001.
- ROSCOE, R.; BODDEY, R.M.; SALTON, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M.; SALTON, J.C. (eds). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p.17-41.
- SANO, E.E. et al. **Área e distribuição espacial de pastagens cultivadas no Cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 21p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa, 3).
- SANTOS, M.A. et al. **O Cerrado brasileiro: notas para estudo**. Belo Horizonte: UFMG/ Cedeplar, 2010. 15p. (Texto para discussão ; 387).
- SILVA, E.E.; AZEVEDO, P.H.S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédica, Embrapa Agrobiologia, 2007. (Comunicado Técnico 99).
- SINSABAUGH, R. et al. Wood decomposition: nitrogen and phosphorus dynamics in relation to extracellular enzyme activity. **Ecology**, Tempe, Arizona, v.74, p.1586–1593, 1993.
- STURSOVÁ, M.; BALDRIAN, P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transforming enzymes and the quantification of soil-bound and free activity. **Plant and soil**, The Hague, Holanda, v.338, p.99-110, 2011.
- SUGIHARA, S., et al. Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.44, p.80-88, 2010.
- SWIFT, R.S. Organic matter characterization. In: SPARKS, D.L. et al. (Eds.). **Methods of soil analysis**. SSSA: American Society of Agronomy, (SSSA, Book Series, 5). Part 3. Chemical methods. p.1011-1020, 1996.
- TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W. et al. (eds). **Methods of soil analysis**. Part 2: Microbiological and biochemical properties, no. 5. Soil Science Society of America, Madison, 1994, pp 775–833.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.34, p.225–229, 1969.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Use of ρ -nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.1, p.301–307, 1970.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174 p. (Boletim Técnico, 5). 1995.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M.C.; GIL-SOTRES, F. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in an area of the European temperate-humid zone (Galicia, NW Spain): specific parameters. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.32, p.747–755, 2000.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M.C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.40, p.2146–2155, 2008.

VALLEJO, V.E.; ROLDAN, F.; DICK, R.P. Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.46, n.6, p.577-587, 2010.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.19, p.703–707, 1987.

WILCKE, W.; LILIENFEIN, J. Soil carbon-13 natural abundance under native and managed vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.827-832, 2004.

YEOMANS, J.; BREMNER, J.M.. A rapid and precise method four routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, p.1467–1476, 1988.

CAPÍTULO II

MODELAGEM DA EMISSÃO DE CO₂ EM FUNÇÃO DA UMIDADE E TEMPERATURA DO SOLO EM AGROECOSSISTEMAS NO CERRADO

RESUMO

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Modelagem da emissão de CO₂ em função da umidade e temperatura do solo em agroecossistemas no Cerrado.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.39-64. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁵

A aplicação de modelos cinéticos de emissão de CO₂ têm sido abordados na literatura para a melhor compreensão sobre os processos e modelos que regulam a emissão de CO₂ do solo. O objetivo deste trabalho foi aplicar modelos estimativos sobre a influência da umidade e temperatura do solo sobre a emissão de CO₂ em duas classes texturais de Latossolo (muito argiloso e textura média), sob diferentes sistemas de uso (Cerrado, pastagem e cana-de-açúcar). Para isso, o CO₂ foi monitorado quinzenalmente durante 12 meses no ano de 2012, juntamente com as condições edafoclimáticas (temperatura do ar, do solo e umidade do solo). Modelos lineares, quadráticos e exponenciais foram aplicados com o intuito de avaliar o fator umidade do solo e a influência da umidade e temperatura na emissão de CO₂. O solo muito argiloso apresentou as menores temperaturas médias anuais do solo e os maiores teores de umidade em relação ao solo de textura média. A pastagem em ambos os solos apresentou as maiores emissões de CO₂, seguido do Cerrado e da cana-de-açúcar com as menores emissões. A correlação entre a emissão de CO₂ e a umidade do solo foi significativa apenas para a pastagem no solo de textura média ($R^2 = 0,67$), e, no solo muito argiloso, os modelos foram significativos para a cana-de-açúcar no modelo quadrático ($R^2 = 0,32$) e para o Cerrado ($R^2 = 0,16$). Os modelos envolvendo temperatura e umidade do solo explicaram as variações da Rs no solo de textura média, especialmente na área de pastagem no solo de textura média. A umidade foi mais limitante à respiração do solo nas áreas de textura média em relação às áreas de textura muito argilosa.

Palavras-chave: umidade do solo, modelos, emissão de CO₂ do solo, Cerrado, pastagem, cana-de-açúcar.

⁵ Orientador: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Orientador) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU (Co-orientador).

ABSTRACT

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Modelling CO₂ emissions in function to soil moisture and temperature in agroecosystems of the brazilian Cerrado (savanna)**. 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.39-64. Thesis (Doctorate in Agronomy/Soil Science) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁶

Kinetic models that predict CO₂ emissions were studied to better understand the processes and templates that influence soil CO₂ emissions. The objective of this study was to use models that better estimate and explain the influence of moisture and soil temperature on CO₂ emissions from soils with different clay content and under different land use systems (sugarcane, grassland and Cerrado). CO₂ efflux, climate conditions and soil abiotic factors (temperature and moisture) were monitored every two weeks for 12 months in 2012. Linear, quadratic and exponential models were used to understand how soil moisture and a combination of soil moisture and temperature affected CO₂ emissions. Clayey soil had the lowest average annual soil temperature and highest soil moisture relative to medium texture soils for all the sites studied. CO₂ emissions were highest from both soil types under grassland, followed by Cerrado and then sugarcane. Correlation between CO₂ emissions and soil moisture was significant for grassland and sandy-clay-loam soil ($R^2 = 0.67$), and the quadratic model was significant for sugarcane ($R^2 = 0.32$) and the Cerrado ($R^2 = 0.16$). Models involving two factors (e.g. temperature and soil moisture) explained variations in CO₂ emissions from sandy-clay-loam soil, especially under grassland. Soil moisture was the most limiting factor for CO₂ emissions from sites with sandy-clay-loam soils relative to clayey sites.

Keywords: soil moisture, models, soil CO₂ emissions, Cerrado, grassland, sugarcane.

⁶ Guidance comitee: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Major Professor) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU.

1 INTRODUÇÃO

A transformação do carbono no solo tem papel fundamental na sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas. Particularmente, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) do solo têm sido muito estudadas devido à crescente preocupação mundial relacionada com as mudanças climáticas e à qualidade do solo (RAICH; SCHLESINGER, 1992; POST; KWON, 2000; LAL, 2004; SUGIHARA et al., 2012). As quantificações das emissões são essenciais para estimar as perdas de carbono (C) e as conseqüências relativas ao aquecimento global, as quais são resultados da atividade dos organismos heterotróficos e autotróficos, tais como da microfauna, macrofauna e respiração de raízes (CARVALHO; BUSTAMANTE, 2007).

A matéria orgânica do solo é de grande importância na formação e manutenção das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos (PACHECO; PETTER, 2011). Nas regiões de clima tropical, a taxa de mineralização da matéria orgânica do solo atinge níveis elevados devido às altas temperaturas e atividade microbiana, reduzindo a quantidade de carbono no solo (TORRES et al., 2005).

A perda de C depende da quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo, textura, ciclagem de nutrientes (KEMMIT et al, 2006) e uso, manejo e vegetação (DUIKER; LAL, 1999). As emissões de CO₂ do solo por ações antrópicas equivale a cerca de 25% das emissões totais na Terra (BOUWMANN; GERMON, 1998).

A textura do solo é um componente de grande importância no funcionamento de um ecossistema e deve ser considerada nos estudos de fluxo de CO₂ (GENTILE et al., 2010; SUGIHARA et al., 2012). Dados de literatura têm mostrado que a MOS é mais protegida ao ataque de organismos decompositores em solos argilosos devido à formação de agregados ou associação aos minerais de argila (PLANTE et al, 2006). Em adição, a macro e a microfauna têm uma maior capacidade para decompor a MO em um solo arenoso do que em um solo argiloso, devido às diferenças na distribuição do tamanho dos poros ou disponibilidade de nutrientes (HASSINK, 1994). Muitos estudos em agroecossistemas tropicais têm relatado um menor acúmulo de C em solo de textura arenosa em comparação aos de textura argilosa sob condições semelhantes de manejo do solo (MAPFUMO et al, 2007; GENTILE et al, 2010).

Na região do Triângulo Mineiro, há estações chuvosas e secas claramente definidas, as quais podem limitar a atividade microbiana principalmente nos meses secos, como relatado por Vinhal-Freitas et al. (2013). Mesmo durante a estação

chuvosa, a umidade do solo pode variar muito devido às chuvas intermitentes e elevadas taxas de evaporação (SUGIHARA et al, 2010a, 2010b), como consequência das elevadas temperaturas. Assim, uma estimativa razoável da emissão de CO₂ em regiões com essas condições climáticas requerem o monitoramento contínuo da emissão de CO₂, além da umidade e da temperatura do solo.

As estimativas de emissão de CO₂ anuais sob condições climáticas diversas são importantes para prever os efeitos do clima no fluxo de CO₂. No entanto, esses estudos podem depender ainda do tipo de solo, sistema de uso da terra, além da geomorfologia. A aplicação de modelos cinéticos de emissão de CO₂, utilizando fatores como umidade e temperatura do solo, têm sido frequentemente abordados na literatura, havendo uma tendência a enfatizar a melhor compreensão sobre os processos e modelos que regulam a emissão de CO₂ do solo e os componentes de seu fluxo (HANSON et al., 2000; REICHSTEIN et al., 2003; KUZYAKOV, 2006; BAHN et al., 2008; PANOSSO et al., 2009; HEINEMEYER et al., 2011; SUGIHARA et al., 2012). Estudos sobre a influência de fatores relacionados à emissão de CO₂ do solo, especialmente temperatura e umidade do solo, são extensivamente estudados em florestas e pastagens de regiões de clima temperado.

O Cerrado é um bioma que ocupa dois milhões de km² na região central do Brasil. O Cerrado se tornou uma das principais áreas de expansão da cana-de-açúcar, principalmente no Triângulo Mineiro, predominando sobre a pastagem cultivada e a produção de café e grãos, concentrando nesta região 71% da produção de cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais (MARTINS, 2008). No Brasil, alguns estudos têm sido realizados avaliando a emissão de CO₂ para cana-de-açúcar (BRITO et al., 2009; PANOSSO et al., 2009;), floresta nativa (D'ANDREA et al., 2010), pastagem (SANTIN, 2012), Cerrado (PINTO-JUNIOR et al., 2009). Entretanto, as modelagens da emissão de CO₂ do solo em relação aos fatores abióticos e/ou bióticos são escassos e pontuais. Desta forma, há necessidade de mais pesquisas nos Latossolos representativos do bioma Cerrado, em diferentes agroecossistemas.

Objetivou-se com este trabalho aplicar modelos estimativos da interferência da umidade e temperatura do solo na emissão de CO₂ em duas classes texturais de Latossolo, sob diferentes sistemas de uso (cana-de-açúcar, pastagem e cerradão).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em amostras de solos coletadas em áreas localizadas nos municípios de Uberaba e Uberlândia, na região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais (Figura 1). O clima é classificado como Cwa (EMBRAPA, 1982) em relação à precipitação e temperatura, de acordo com Köppen (1923), caracterizado como “moderadamente quente”, com uma estação seca bem definida durante o outono-inverno (abril a setembro) e uma estação chuvosa e quente durante a primavera-verão (outubro a março). Os solos foram caracterizados como Latossolo Amarelo ácrico típico (LAW, município de Uberaba, de textura muito argilosa) e Latossolo Amarelo distrófico típico (LAd, município de Uberlândia, de textura média), conforme EMBRAPA (2006). Os sistemas de uso do solo escolhidos para esse estudo foram cana-de-açúcar (CA), pastagem (PA) e Cerradão (CE). As localizações e principais características de cada área estão descritas na Tabela 1.

A área de Cerrado é considerada Cerradão, apresentando formação florestal densa e alta, formando assim um dossel praticamente fechado, de predominância arbórea-arbustiva. Neste trabalho, esta área será designada simplesmente como “Cerrado”, ou CE. As áreas de pastagem estudadas têm a predominância de *Brachiaria decumbens* (capim-braquiária), com uso nesse sistema há mais de 25 anos. As áreas de cana-de-açúcar escolhidas tanto no solo muito argiloso (AR), quanto no franco-argilo-arenoso (textura média - TM) têm a mesma idade de implantação do canavial, ambas em 2007, ambas com corte mecanizado.

Em cada área selecionada realizou-se amostragem do solo (camada de 0-10 cm), em janeiro de 2012 (estação chuvosa). Coletou-se quatro amostras compostas em cada área, cada uma delas formadas por quatro amostras simples (sub-amostras), as quais foram misturadas e homogeneizadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos selados, levadas ao laboratório e posteriormente peneiradas (< 2 mm).

Para caracterização química, as análises químicas realizadas foram: pH em água (relação solo:água 1:2,5); o carbono orgânico do solo (COS) foi determinado por oxidação com dicromato de potássio (YEOMANS; BREMNER, 1988); o nitrogênio total (NT) pelo método Kjeldahl (BLACK, 1965), em amostras de TFSA, peneiradas (< 2 mm) (Tabela 1).

Para a caracterização física, a distribuição do tamanho das partículas do solo foi realizada em amostras de solo secas ao ar (TFSA < 2 mm), utilizando o método da

pipeta (GEE; BAUDER, 1986; EMBRAPA, 1997). A densidade do solo foi feita pelo método do anel volumétrico, e a macro e microporosidade foram determinadas em mesa de tensão, conforme EMBRAPA (1997) (Tabela 1). O teste de resistência à penetração (RP) foi realizado com penetrômetro de impacto, segundo Stolf (1991), com 10 repetições em cada área, na profundidade de 0-10 cm. A umidade gravimétrica foi determinada no dia da amostragem. No solo muito argiloso, a umidade se encontrava em média 350 g kg^{-1} , e no solo de textura média, a umidade se encontrava em média de 140 g kg^{-1} .

Os dados de precipitação e temperatura do ar foram coletados diariamente durante o ano de 2012, através de pluviômetro localizado na Fazenda Bom Jardim, próxima às áreas de cada textura contrastante do solo. Os dados de precipitação média anual foram adquiridos desde 1976 (Figura 1). Percebe-se uma divisão clara das estações chuvosa, representada pelos meses: outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março, com chuvas concentradas, e da estação seca, representada pelos meses: abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, onde a precipitação é muito baixa. Observa-se também que a precipitação de 2012 apresenta uma regularidade de distribuição da precipitação bem semelhante nos referidos períodos. As oscilações médias de precipitação são comuns na região.

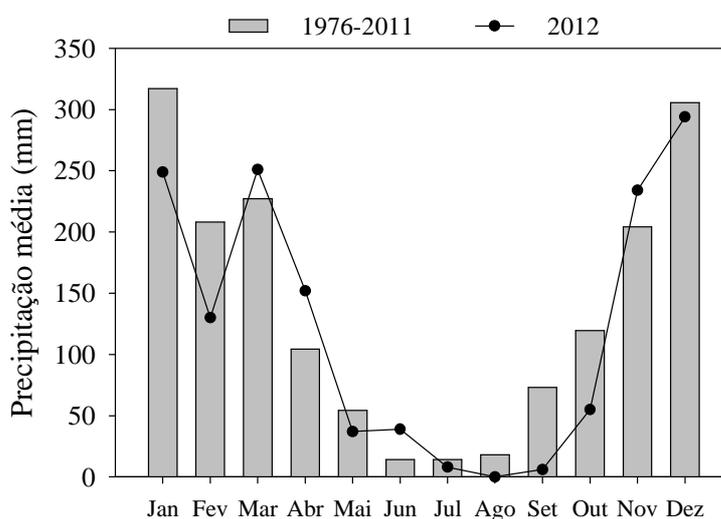


Figura 1. Precipitação média anual de 1976 a 2011 e do ano de 2012, na região do Triângulo Mineiro, segundo dados meteorológicos da Fazenda Bom Jardim, no município de Uberlândia.

A emissão de CO₂ foi medida por um sistema de câmara fechada em uma frequência de 15 em 15 dias, ao longo do período experimental (12 meses). Cilindros feitos de aço inox (10 cm de diâmetro e 8 cm de altura) foram inseridos a 3 cm de profundidade no solo de cada área, aleatoriamente, após a remoção dos resíduos vegetais da superfície. O analisador de CO₂ utilizado foi o sistema automático de fluxo de gases, por infravermelho (IRGA, Li-cor 8100). Em cada área foram realizadas de 10 a 15 medições quinzenais, por tratamento, totalizando uma média de 300 medições por área, de janeiro a dezembro do ano de 2012. Toda a medição de campo foi realizada no período das 8:00 - 11:00 h da manhã.

Em todas as áreas de estudo, as temperaturas do solo e a umidade gravimétrica foram monitoradas quinzenalmente. A temperatura do solo foi medida na profundidade de 10 cm por meio de sonda acoplada ao sistema automático Li-cor. Para determinação da umidade gravimétrica do solo foram amostradas quatro amostras compostas por área, na camada de 0-10 cm, próximo aos pontos onde foram medidas a emissão de CO₂, a cada vez que se ia ao campo. O solo foi peneirado (< 2 mm) e 10g de solo foi disposto em um recipiente de alumínio, e seco em estufa a 105°C por 24 horas. Para a análise da umidade gravimétrica, as amostras foram acondicionadas em latas de alumínio com tampas, sendo determinada no mesmo dia por secagem do solo a 110°C em estufa, por 24 horas. A umidade foi calculada por diferença de peso entre o material de solo úmido e o seco.

Análises de variância (ANAVA) e testes posteriores foram conduzidos a fim de testar as diferenças para a emissão de CO₂ do solo (E) e a umidade do solo (U), em função da textura do solo e da época do ano.

As análises de modelagem para avaliar o efeito da temperatura e umidade sobre a emissão de CO₂ do solo foram realizadas conforme modelos descritos na literatura, a saber: regressão linear ($E = a + bU$) (DAVIDSON et al., 1998; HUANG et al., 1999; JIA et al., 2006), regressão exponencial ($E = aU^b$) (ZHANG et al., 2010) e quadrática ($E = a + bU + cU^2$) (SOTTA et al., 2004).

Os modelos lineares ($E = a + b(TsUs)$; $E = a + bTs + cUs$) (WILDUNG et al., 1975; REINKE et al., 1981), ($E = a + bTs + cUs + dTsUs$) (WANG et al., 2003) e exponenciais ($E = aTs^bUs^c$; $E = ae^{bT}U^c$) (REINERS, 1968; XU; QI, 2001; CHEN et al., 2003) também foram analisados, onde 'a', 'b' e 'c' são parâmetros ajustados. As análises foram realizadas pelo software SPSS e os gráficos plotados no programa Sigma Plot.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta uma descrição das áreas de estudo e características químicas e físicas da camada superficial do solo (0-10 cm). As áreas estudadas têm condições edafoclimáticas muito semelhantes. Certamente, as diferenças encontradas nos resultados estão sobre interferências dos teores de argila e areia e o sistema de uso do solo (Tabela 1). Assim, as análises comparativas das áreas podem assegurar uma melhor mensuração da emissão de CO₂, quanto às variáveis relacionadas às características do solo e uso da terra.

Nota-se que as áreas de solo muito argiloso apresentaram teores de carbono orgânico do solo (COS) em média 39% maiores do que no solo de textura média. O Cerrado apresentou os maiores teores de COS e os menores valores de pH e densidade do solo (Ds), em ambas as texturas (Tabela 1). Esses resultados corroboram com os encontrados por Neves et al. (2004) e Queiroz et al. (2012), os quais relataram maiores teores de COS nas áreas de pastagem e Cerrado nativo. O maior teor de COS na pastagem pode estar relacionado à maior quantidade de biomassa radicular e ao não revolvimento do solo, o que permite um acúmulo maior de carbono no solo. O carbono orgânico do solo é um dos atributos de grande importância nos processos físicos, químicos e biológicos nos ecossistemas tropicais, pois as interações desses processos são alterados significativamente em sistemas agrícolas, quando comparadas com os sistemas naturais. Uma das principais causas da perda de COS e sua emissão está relacionada à intensidade de fertilização dos solos como relatado por Galford et al. (2011).

Observa-se que os valores de densidade do solo de textura muito argilosa são menores que os obtidos para o de textura média, devido à textura do solo, assim como relatado no trabalho de Cavichiolo et al. (2005). O Cerrado apresentou os menores valores para densidade do solo, em função do maior teor de matéria orgânica, quantidade de raízes e serapilheira (Tabela 1). Queiroz et al. (2012) também relataram o menor valor de Ds para o Cerrado na camada de 0-10 cm em relação a áreas de agricultura. As áreas de cana-de-açúcar e pastagem no solo muito argiloso apresentaram as maiores densidades do solo e maiores resistências à penetração, não apresentando diferenças expressivas entre si (Tabela 1).

Tabela 1. Localização das áreas de estudo e caracterização físico/química¹ (0-10 cm) dos Latossolos estudados (n=4)

Área	Coordenadas	Alt. m	Argila ----- g kg ⁻¹ -----	Silte ----- g kg ⁻¹ -----	Areia ----- g kg ⁻¹ -----	Textura ²	COS	NT	P	pH	C/N	Ds	RP	Mac	Mic	VTP -----
							-- g kg ⁻¹ solo --	mg dm ⁻³	1:2,5	g cm ⁻³		MPa	----- m ⁻³ m ⁻³ -----			
Cana-de-açúcar	19°21'08" S 48°06'23" O	976	732	148	117	Muito argilosa	20,6 (1,8)	1,1 (0,3)	11,5 (3,2)	6,6 (0,1)	19,2	1,13 (0,06)	2,55 (0,60)	0,10 (0,03)	0,36 (0,05)	0,79
Pastagem	19°20'43" S 48°05'15" O	970	792	97	111	Muito argilosa	27,5 (3,7)	1,5 (0,4)	1,0 (0,3)	5,5 (0,1)	18,3	1,07 (0,07)	2,70 (0,67)	0,09 (0,01)	0,38 (0,02)	0,47
Cerrado	19°20'45" S 48°00'56" O	970	780	108	111	Muito argilosa	35,0 (4,7)	2,2 (0,6)	1,3 (0,5)	4,3 (0,1)	16,1	0,82 (0,13)	1,08 (0,06)	0,20 (0,05)	0,32 (0,03)	0,52
Cana-de-açúcar	19°13'00" S 48°06'24" O	925	260	167	642	Franco- argilo- arenosa	14,6 (1,0)	0,7 (0,1)	12,2 (2,8)	5,7 (0,1)	20,8	1,56 (0,07)	1,56 (0,15)	0,09 (0,02)	0,25 (1,0)	0,34
Pastagem	19°12'40" S 48°08'34" O	912	224	169	627	Franco- argilo- arenosa	16,2 (2,0)	1,2 (0,2)	2,6 (0,7)	5,6 (0,1)	13,5	1,43 (0,07)	1,30 (0,66)	0,16 (0,04)	0,23 (0,02)	0,39
Cerrado	19°12'51" S 48°08'04" O	926	225	147	649	Franco- argilo- arenosa	19,8 (2,9)	1,6 (0,2)	0,9 (0,1)	4,9 (0,1)	12,3	1,28 (0,14)	1,11 (0,03)	0,19 (0,05)	0,23 (0,03)	0,42

¹ COS: carbono orgânico do solo; NT: nitrogênio total; P: fósforo (Mehlich); C/N: relação C/N; Ds: densidade do solo; RP: resistência do solo à penetração; Mac: macroporosidade; Mic: microporosidade, VTP: volume total de poros (1-(Ds/Dp)). ² As áreas de textura franco-argilo-arenosa estão dentro do grupamento denominado de textura média. Os valores em parênteses representam os desvios padrão.

Em média, as áreas do solo muito argiloso apresentaram 32% a mais de microporos em relação às áreas do solo de textura média. A macroporosidade se apresentou menor nas áreas com cana-de-açúcar e pastagem de ambas as texturas dos solos, em razão da maior compactação (Tabela 1). As áreas de Cerrado apresentaram menor resistência à penetração e maior macroporosidade nas áreas estudadas. Isto ocorre principalmente por não ocorrer nenhum tipo de ação antrópica nestas áreas, visto que, na profundidade de 0-10 cm, a cana-de-açúcar possui efeito acentuado na compactação do solo em função do tráfego de máquinas, e a pastagem, o pisoteio animal (Tabela 1). Os valores de macroporosidade obtidos para a cana e a pastagem do solo muito argiloso, e para a cana do solo de textura média estão próximos do valor mínimo de porosidade de aeração ($0,10 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$) necessário ao desenvolvimento do sistema radicular (GUPTA; ALLMARAS, 1987). Xu e Qi (2001) evidenciam a importância do espaço poroso do solo para o transporte de gases, e, conseqüentemente, para a atividade microbiana. Fang et al (1998) observaram que uma maior porosidade total facilita a entrada de oxigênio no solo, favorecendo a respiração do solo.

Os resultados mostram que existem diferenças de temperatura do solo e do ar nas áreas avaliadas (Figura 2), sendo maiores no solo de textura média. As temperaturas mínimas e máximas do solo registradas no solo muito argiloso variaram de 15,7-24,3; 18,3-27,6 e de 17,8-23,0 °C para a cana, pastagem e cerradão, respectivamente. Para o solo de textura média, as mínimas e máximas variaram de 17,5-27,2; 19,7-30,5 e de 18,7-23,8 °C para a cana, pastagem e cerradão, respectivamente (Figura 2). A temperatura do solo é o fator primário que regula as atividades biológicas e pequenas modificações têm implicações em vários processos ecológicos do solo, incluindo a decomposição e mineralização da matéria orgânica pelos micro-organismos do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Esse monitoramento de temperatura do solo deve ser feito nos estudos de emissão de CO₂.

Os dados demonstraram que as áreas de pastagem, independente da textura, apresentaram maiores flutuações da temperatura do solo durante o ano (Figura 2). Observa-se, na Figura 2, que a variação das emissões de CO₂ ao longo do ano acompanhou a sazonalidade da umidade e da temperatura do solo. As emissões de CO₂ nas áreas de cana-de-açúcar em ambas as texturas de solos foram menores em comparação às áreas de Cerrado e pastagem. As áreas de pastagem apresentaram os maiores valores de emissão de CO₂ e as maiores variações sazonais no período

avaliado (Figura 2b e 2e). Para a cana-de-açúcar, as flutuações da Rs foram menores em ambos os solos (Figura 2a, 2d), embora em todos os sistemas o fluxo respiratório tenha sido restaurado após a reumidificação natural do solo a partir do mês de outubro, com o início da estação chuvosa. O rápido incremento da taxa respiratória indica que a estação seca e as menores temperaturas para esse período diminuem a atividade biológica do solo, mudando o fluxo de CO₂. Os menores valores da emissão de CO₂ foram medidos no mês de agosto (médias de 3,17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no solo muito argiloso e de 2,98 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no solo de textura média), conseqüência da baixa umidade devido à estação seca (Figura 2).

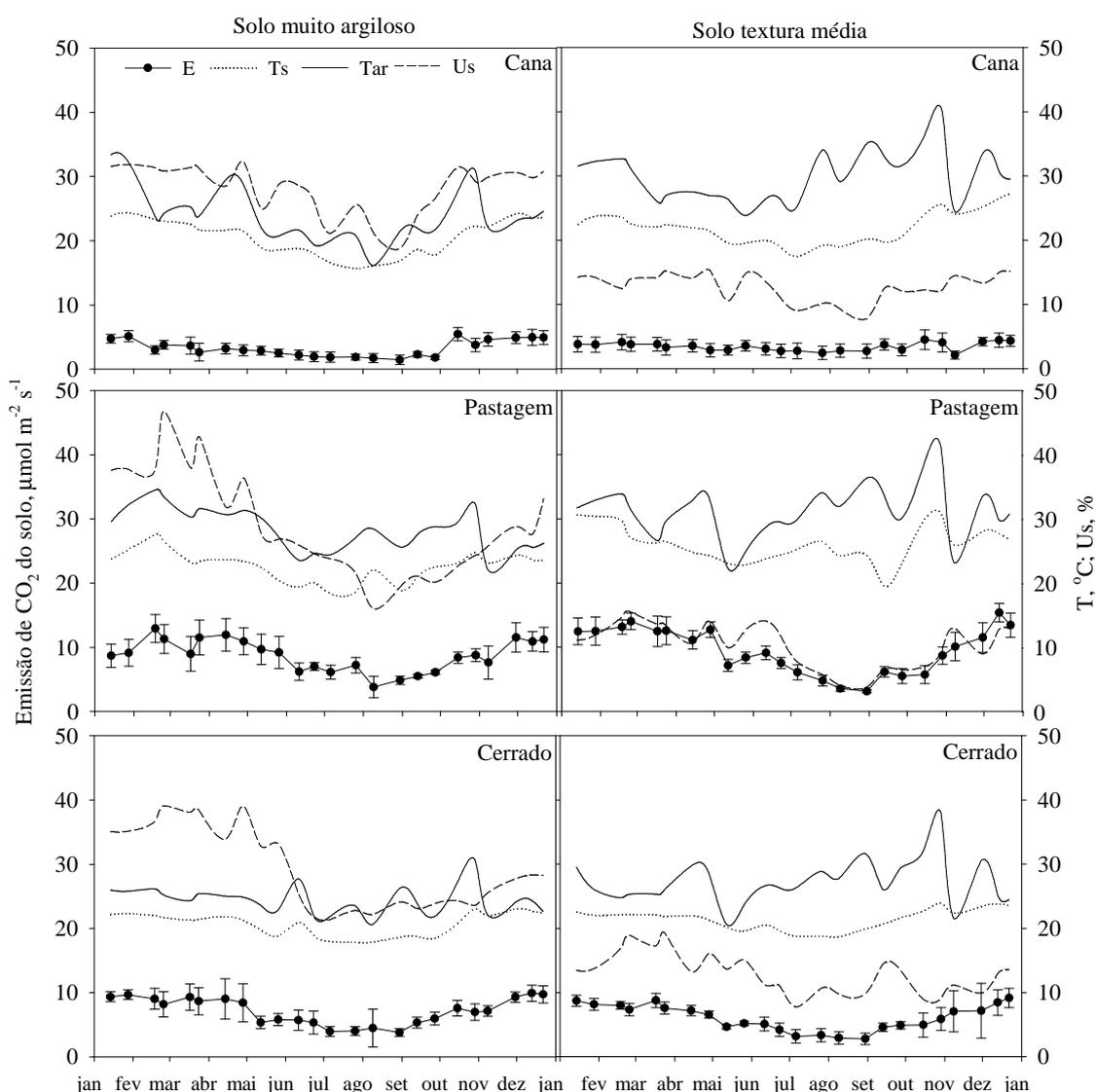


Figura 2. Emissão de CO₂ do solo, temperatura do ar (Tar, °C), temperatura do solo (Ts, °C) e na umidade do solo (Us, %, 0-10 cm), durante o ano de 2012 (monitorado de janeiro a dezembro, a cada 15 dias), nos agroecossistemas em solo muito argiloso e de textura média. As barras indicam o desvio padrão (n=12).

Os fluxos no mês de dezembro (médias de $9,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no solo muito argiloso e de $9,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no solo de textura média) foram 3,0 vezes maiores comparados ao mês de agosto, devido ao aumento da pluviosidade, e em consequência ao aumento da umidade do solo (Figura 2), assim como relatado por Pinto-Junior et al. (2009). Nota-se, na Figura 2, que o mês de agosto foi o mês mais seco do ano, onde a emissão foi menor possivelmente porque a atividade da microbiota do solo foi menor neste período, devido à baixa umidade no solo, concordando com os resultados de Salimon (2003). No início das primeiras chuvas (época seca-úmida, início de setembro), a emissão de CO_2 aumentou (Figura 2 e Tabela 2) devido ao incremento da atividade da microbiota do solo (LEE et al., 2004; JASSAL et al., 2008; MAIER et al., 2010, 2011) e diminuição da difusividade do solo. Resultados semelhantes para o Cerrado e a pastagem foram obtidos por Pinto-Junior et al. (2009) e para áreas de cana-de-açúcar no trabalho de Brito et al. (2009). Além disso, a pastagem possui grande quantidade de raízes finas nas camadas mais superficiais do solo em relação à cana-de-açúcar e ao Cerrado, o que aumenta a emissão de CO_2 e o efeito do conteúdo de água no solo.

As áreas de Cerrado que possuem formação densa possuem raízes mais profundas, permitindo acesso às águas mais profundas do solo na estação seca, diminuindo assim a sazonalidade da respiração do solo sob essa cobertura vegetal. Portanto, acredita-se que a variação no conteúdo de água no solo e na atmosfera devem ser os responsáveis pela sazonalidade observada e também pela maior amplitude de variação do fluxo nas pastagens. Observa-se também que a temperatura do solo teve amplitude de variação muito menor que a umidade (Figura 2). Na pastagem, as médias anuais foram maiores do que as encontradas na literatura. Varella et al. (2004) estudaram uma pastagem em área de Cerrado, e Pinto-Junior et al. (2009), estudando pastagens em região de transição da Amazônia para o Cerrado, obtiveram uma média anual de $4,00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Esses maiores valores podem ter sido afetados devido à fotossíntese da pastagem dentro da câmara.

A umidade gravimétrica do solo não foi significativa entre sistemas de uso, mas sim em relação à textura ($P < 0,05$). No solo muito argiloso, a umidade variou de 19,6 a 38,9% e, no solo de textura média, de 7,1 a 16,2% (Figura 2). A umidade do solo foi em média 58% maior no solo muito argiloso, em relação ao solo mais arenoso. A umidade do solo é um fator que interfere na intensidade das atividades biológicas do solo e no transporte de gases. A umidade do solo, em condições

tropicais, influencia as emissões de CO₂, por exemplo, em épocas chuvosas e quentes, grande parte das emissões pode ser precedente da decomposição e mineralização da matéria orgânica pelos micro-organismos. Também, o fluxo pode ser mais alto por motivos físicos, como quando a saída do CO₂ do solo é forçada quando a água preenche os poros (ZANCHI et al., 2003).

As médias estacionais das emissões de CO₂ (E), temperatura do solo (Ts) e umidade do solo (Us) durante o ano de 2012 estão demonstrados na Tabela 2. Os efluxos foram maiores na estação úmida e os menores valores foram relatados na estação seca em todos os agroecossistemas avaliados. As emissões médias anuais de CO₂ foram 3,25, 8,73 e 7,17 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no solo muito argiloso, e de 3,43, 9,47 e 6,08 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no solo de textura média, para os agroecossistemas cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado, respectivamente, se diferenciando significativamente entre as áreas (P<0,05). Maier et al. (2011) também relataram maiores efluxos de CO₂ na estação chuvosa e um declínio na estação seca. Os menores valores de emissões de CO₂ na área de cana podem ser sido relacionados também à maior resistência à penetração do solo (Tabela 1). As diferenças entre as umidades nos solos foram diferentes estatisticamente em relação à textura (Tabela 2).

Tabela 2. Fluxos médios de emissão de CO₂ do solo (E, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura do solo (Ts, °C, 0-10 cm) e umidade do solo (Us, %) estacional nos agroecossistemas avaliados em solo muito argiloso (AR) e de textura média (TM).

Época ²	Agroecossistemas ¹								
	Cana-de-açúcar			Pastagem			Cerradão		
AR	E	Ts	Us	E	Ts	Us	E	Ts	Us
Úmida	3,68 ^A	21,2 ^A	29,8 ^A	10,53 ^A	23,1 ^A	35,9 ^A	8,54 ^A	20,9 ^A	34,1 ^A
Seca	2,82 ^B	19,7 ^A	25,1 ^B	6,93 ^B	21,9 ^B	22,4 ^B	5,79 ^B	20,3 ^A	24,4 ^B
Média	3,25	20,5	27,5	8,73	22,5	29,2	7,17	20,6	29,2
TM	E	Ts	Us	E	Ts	Us	E	Ts	Us
Úmida	3,68 ^A	21,3 ^A	13,5 ^A	12,12 ^A	26,1 ^A	13,0 ^A	7,48 ^A	21,3 ^A	15,1 ^A
Seca	3,17 ^A	22,2 ^A	11,3 ^B	6,83 ^B	26,5 ^A	8,4 ^B	4,68 ^B	21,5 ^A	10,5 ^B
Média	3,43	21,8	12,4	9,47	26,3	10,7	6,08	21,4	12,8

¹ Respiração do solo: ANAVA significativa (P<0,05) para o desdobramento da interação área x época do ano, seguindo a ordem: pastagem>cerradão>cana-de-açúcar dentro de cada textura do solo para todas as estações. Somente a umidade do solo foi significativa para a fonte de variação textura. ² Letras maiúsculas diferentes na coluna, para Rs e Ts, são diferentes estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05) entre as estações do ano.

Para o solo de textura muito argilosa, a época chuvosa apresentou incrementos nas emissões de CO₂ do solo em relação à época seca de 58,3, 45,1 e 51,2%, no solo muito argiloso; e de 31,5, 57,7 e 56,6%, no solo de textura média, para os agroecossistemas cana-de-açúcar, pastagem e Cerrado, respectivamente (Tabela 2). Embora inicialmente tenha sido hipotetizado que a textura do solo influenciaria na respiração do solo, por apresentar diferenças na porosidade, aeração, umidade e temperatura do solo, não houve diferença estatística para a fonte de variação textura (P>0,05) em relação à emissão de CO₂. A emissão de CO₂ também não acompanhou as tendências observadas para a temperatura do ar (Figura 2), não havendo correlações significativas para esse fator.

A aplicação de modelos para quantificar as relações entre a emissão de CO₂ do solo e a umidade do solo depende da textura de solo e do sistema de uso (Tabela 3).

No solo muito argiloso, o modelo linear foi significativo apenas para o Cerrado, porém com baixo coeficiente de determinação (R² = 0,16), o mesmo se aplica ao modelo potencial para esta área. Isso mostra que, nas condições desse estudo, o modelo linear seria de pouca aplicação e as flutuações da umidade não foram suficientes para modelar a emissão de CO₂ com o aumento da umidade (Tabela 3).

Tabela 3. Equações ajustadas para a emissão de CO₂ do solo (E) e a umidade do solo (Us).

Área ¹	n	E-Us	R ²	P
CE AR	300	E = 2,615 + 0,150Us	16	<0,0001
		E = 0,815Us ^{0,639}	16	<0,0001
		E = 15,736 -0,778Us -0,015Us ²	22	0,070
PA AR	300	E = 3,478 + 0,177Us	22	0,060
		E = 1,159Us ^{0,599}	22	0,053
		E = 2,649 -0,236Us -0,0009Us ²	22	0,052
CA AR	313	E = 0,846 + 0,086Us	7	0,893
		E = 0,189Us ^{0,854}	6	0,549
		E = 18,096 -1,405Us + 0,030Us ²	32	<0,0001
CE TM	300	E = -0,954 + 0,377Us	31	0,058
		E = 0,705Us ^{0,827}	31	0,071
		E = -2,308 + 0,886Us -0,018Us ²	32	0,074
PA TM	300	E = -0,297 + 0,892Us	67	<0,0001
		E = 0,792Us ^{1,036}	67	<0,0001
		E = -0,548 + 0,952Us -0,003Us ²	67	<0,0001
CA TM	313	E = 1,649 + 0,137Us	5	0,063
		E = 0,978Us ^{0,491}	5	0,063
			6	0,607

$$E = -3,819 + 1,093Us - 0,040Us^2$$

¹CA, cana-de-açúcar; PA, pastagem; CE, Cerrado; AR, solo muito argiloso; TM, solo de textura média.

Para as áreas de cana-de-açúcar no solo muito argiloso, o modelo polinomial quadrático foi significativo ($R^2 = 0,32$). O solo de textura média apresentou modelos significativos apenas para a área de pastagem ($R^2 = 0,67$), demonstrando um efeito da umidade mais evidente na área em que as condições físicas do solo (maior porcentagem de areia) e a vegetação predominante de capim-braquiária, ou seja, menor cobertura do solo, em relação à cana e ao Cerrado, possibilitou um maior efeito de reumedecimento e secagem nesta área no que concerne à pastagem no solo de textura muito argilosa, causando maior variação na emissão de CO₂ (Figura 2). Observa-se também na Figura 2 que a umidade do solo acompanhou as variações da emissão de CO₂ durante todo o ano na pastagem do solo de textura média mais do que nos outros sistemas, o que pode indicar uma maior sensibilidade dessa área às condições secas do solo.

De forma a modelar o efeito combinado entre temperatura do solo (Ts) e umidade (Us) para a emissão de CO₂ (E), foram utilizados todos os dados das medições realizadas em 2012 nos diferentes agroecossistemas sob as duas texturas, integrando as variáveis em cinco equações (Tabela 4). Esses modelos com duas variáveis independentes, como a Ts e a Us, e a E como a variável dependente tem sido amplamente utilizada em muitos estudos sobre os efeitos na E (DAVIDSON et al, 1998; XU; QI, 2001; JIA et al, 2006; LI et al, 2008 e ZHANG et al., 2010). Variações nas taxas de emissão de CO₂ do solo podem ser explicadas em grande parte pela disponibilidade de água e temperatura (Figura 2; Tabela 2).

A maioria das regressões foi significativa aos níveis de 0,05 e 0,001. Em comparação à equação unidimensional da Tabela 4, o R^2 da equação bidimensional aumentou em cada área, exceto quando os três locais foram analisados em conjunto para cada solo de textura contrastante. As variações explicadas pelas cinco equações diferiram no solo de textura muito argilosa (AR): 26-43% para cana (CA), 31-40% para pastagem (PA), 56-57% para cerradão (CE); e no solo de textura média (TM): 8-11% para cana, 72-76% para pastagem e 45-60% para cerradão (Tabela 4). O R^2 de cada equação foi pouco diferente para cada equação, quando aplicadas para um mesmo conjunto de dados. Isso indica que cada equação pode ser usada para prever a emissão de CO₂, de acordo com os dados de temperatura e umidade do solo.

Entre os cinco modelos, a única equação que não foi significativa para a correlação entre Ts e Us da área CE AR foi a do modelo linear ($E = a + b(TsUs)$). O mesmo ocorreu para as áreas CA TM e PA TM para o modelo de equação potencial ($E = aTs^bUs^c$). Para as demais equações testadas, a modelagem Ts-Us foi significativa para a emissão de CO₂ em todos os agroecossistemas e texturas do solo. Na área de pastagem no solo de textura média (PA TM), a equação potencial não resultou em resposta da E em função da Ts-Us. Em geral, para o solo muito argiloso, o R² foi menor em relação ao de textura média, especialmente para as áreas de pastagem e Cerrado, entretanto não houve diferenças para o coeficiente de variação para os modelos lineares aplicados para uma mesma área (Tabela 4). A equação $E = a + bTs + cUs$ e a equação com adição do fator TsUs ($E = a + bTs + cUs + dTsUs$) foram os modelos mais significativos por apresentarem coeficientes de variação com melhores ajustes, e em alguns casos o R² foi maior nesses modelos, demonstrando que quanto maior a variação na Ts, maior a influência da Us na emissão de CO₂, visto que a equação foi significativa para todas as variáveis (Tabela 4).

Os modelos aplicados para todos os dados foram significativos para todas as equações. A ilustração da dispersão dos dados está representada na Figura 3. Nos modelos aplicados (Tabela 4), os R² do solo de textura muito argilosa foram em média 18,6% menores em relação aos R² do solo de textura média, onde a temperatura do solo foi maior. No entanto, as alterações temporais da Rs foram controladas pela Us (Figura 2). Nesse estudo, a variação explicada pelos modelos de temperatura e umidade do solo foi menor para todas as áreas em conjunto (Figura 3; Tabela 4), do que avaliando individualmente.

Esses resultados sugerem que a sensibilidade do solo em emitir mais CO₂ em relação ao aumento da temperatura do solo aumenta à medida que aumenta a umidade do solo, confirmada por Jassal et al. (2008), Li et al. (2008), Zhang et al. (2010). Os menores fluxos nos meses mais secos do ano podem ser resultado da limitação do substrato causado pela difusão limitada de solutos nos filmes de água no solo.

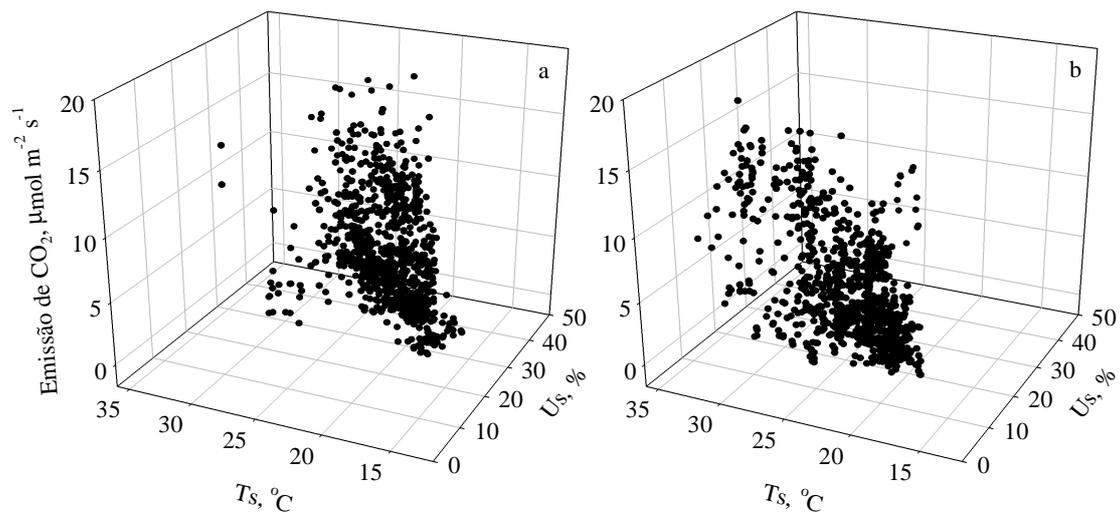


Figura 3. Emissão de CO₂ do solo, temperatura do solo (Ts, °C, 0-10 cm) e umidade do solo (Us, %, 0-10 cm), em solo de textura muito argilosa (a) e textura média (b). n=913.

Outros estudos, como o trabalho de D'Andrea et al. (2009), afirmam que os fatores abióticos como temperatura e água do solo não são os principais determinantes do fluxo de CO₂ do solo em regiões tropicais, e sim os fatores bióticos. Esses fatores podem incluir a produção primária líquida, a biomassa radicular, a cobertura do solo, a biomassa microbiana, as concentrações de nitrogênio e a quantidade e qualidade do substrato (CURIEL-YUSTE et al., 2004; DILUSTRO et al., 2005). Kirschbaum (2006) observou que as mudanças na disponibilidade do substrato podem influenciar a aparente dependência da respiração do solo à temperatura. Portanto, é necessário incorporar fatores adicionais (bióticos ou propriedades do solo) em modelos de respiração do solo.

Como as emissões de CO₂ refletem diferentes fenômenos do solo (respiração de raízes, atividade de microrganismos e a própria difusão física do CO₂), é evidente que não há um único determinante no processo, sendo necessário considerar os diferentes tipos de vegetação. Entretanto, a umidade foi essencial para o funcionamento desses componentes da Rs, sendo um fator limitante em avaliações em maior escala de tempo. Sendo assim, os fatores bióticos devem ser considerados para pesquisas futuras.

Tabela 4. Equações de regressão para a emissão de CO₂ do solo (E), influenciada pela temperatura (Ts, °C, 0-10 cm) e a umidade (Us, %, 0-10 cm) do solo, e coeficientes de determinação (R²).

Área ¹	n	E = a + b(TsUs)	R ²	E = a + bTs + cUs	R ²	E = aTs ^b Us ^c	R ²	E = ae ^{bTs} Us ^c	R ²	E = a + bTs + cUs + dTsUs	R ²
CE AR	300	a = 1,738 b = 0,008	0,31 ^{ns}	a = -14,15 b = 0,908 c = 0,085	0,57 ^{**}	a = -22,490 b = -0,176 c = 0,982	0,56 ^{**}	a = 0,001 b = 0,012 c = 2,792	0,56 [*]	a = -14,550 b = 0,100 c = 0,927 d = -0,0007	0,57 ^{**}
PA AR	300	a = 3,852 b = 0,007	0,31 [*]	a = -6,23 b = 0,531 c = 0,099	0,39 ^{**}	a = -31,565 b = -0,514 c = 0,856	0,40 ^{**}	a = 0,073 b = 0,009 c = 1,441	0,38 ^{**}	a = -12,668 b = 0,341 c = 0,802 d = -0,001	0,40 ^{**}
CA AR	313	a = 0,165 b = 0,005	0,26 [*]	a = -4,14 b = 0,315 c = 0,029	0,43 ^{**}	a = -8,061 b = -0,095 c = 0,729	0,42 ^{**}	a = 0,003 b = 0,011 c = 2,136	0,42 ^{**}	a = -2,72 b = -0,032 c = 0,254 d = 0,003	0,42 ^{**}
CE TM	300	a = 0,559 b = 0,019	0,45 [*]	a = -12,879 b = 0,703 c = 0,291	0,60 ^{**}	a = -26,268 b = -0,364 c = 0,914	0,59 [*]	a = 0,0005 b = 0,047 c = 2,853	0,58 ^{**}	a = 0,807 b = -0,962 c = -0,070 d = 0,058	0,60 ^{**}
PA TM	300	a = 0,166 b = 0,032	0,72 ^{**}	a = -7,37 b = 0,297 c = 0,827	0,75 ^{**}	a = -41,48 b = -0,892 c = 0,828	0,64 ^{ns}	a = 0,102 b = 0,097 c = 1,044	0,73 ^{**}	a = 11,963 b = -1,097 c = -0,465 d = 0,075	0,76 ^{**}
CA TM	313	a = 1,821 b = 0,006	0,08 [*]	a = -0,31 b = 0,146 c = 0,043	0,10 [*]	a = 0,001 b = 2,282 c = 0,350	0,07 ^{ns}	a = 0,155 b = 0,011 c = 0,959	0,09 [*]	a = -6,949 b = 0,561 c = 0,477 d = -0,025	0,11 [*]
AR	913	a = 0,621 b = 0,009	0,27 [*]	a = -9,677 b = 0,112 c = 0,598	0,36 ^{**}	a = -22,617 b = -0,280 c = 0,889	0,35 ^{**}	a = 0,008 b = 0,016 c = 1,986	0,36 ^{**}	a = -5,744 b = -0,041 c = 0,426 d = 0,006	0,36 ^{**}
TM	913	a = 1,790 b = 0,015	0,21 [*]	a = -11,748 b = 0,191 c = 0,675	0,48 ^{**}	a = -20,993 b = -0,257 c = 0,909	0,45 ^{**}	a = 0,002 b = 0,024 c = 2,458	0,45 ^{**}	a = 8,335 b = -1,584 c = -0,178 d = 0,075	0,49 ^{**}

¹ CA: cana-de-açúcar; PA: pastagem; CE: Cerrado; AR: solo de textura muito argilosa; TM: solo textura média.

4 CONCLUSÕES

1. As emissões médias de CO₂ do solo durante 12 meses de avaliação no ano de 2012 foram maiores nas áreas de pastagem>Cerrado>cana-de-açúcar.
2. O maior conteúdo de água no solo na época chuvosa aumentou a emissão de CO₂, em torno de 50%, comparado à época seca.
3. Os modelos envolvendo temperatura e umidade explicaram razoavelmente bem as variações da Rs no solo de textura média, especialmente na área de pastagem.
4. A umidade foi limitante à respiração do solo nas áreas de textura média, em relação às áreas de textura muito argilosa, influenciadas pela textura.

REFERÊNCIAS

- BAHN, M.; RODEGHIERO, M.; ANDERSON-DUNN, M.; DORE, S.; GIMENO, C.; DRÖSLER, M. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply. **Ecosystems**, New York, v.11, p.1352–1367, 2008.
- BLACK, C.A. **Methods of Soil Analysis**, Part I and II. America Society Inc. Publishing, Madison, U.S.A, p. 770–779, 1965.
- BOUWMANN, A. F.; GERMON, J. C. Introduction: Special issue - Soils and climate change. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.27, p.219, 1998.
- BRITO, L.F.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M.; LA SCALA JUNIOR, N. Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, p.77-83, 2009.
- CAVICHIOLO, S.R.; DEDECEK, R.A.; GAVA, J.L. Modificações nos atributos físicos de solos submetidos a dois sistemas de preparo em rebrota de *Eucalyptus saligna*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, p.571-577, 2005.
- CHEN, Q.S.; LI, L.H.; HAN, X.G.; YAN, Z.D.; WANG, Y.F.; YUAN, Z.Y. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin river basin of Inner Mongolia. **Acta Phytoecologica Sinica**, Beijing, v.27, p.202–209, 2003.
- CURIEL-YUSTE, J.; JANSSENS, I.A.; CARRARA, A.; CEULEMANS, R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.161-169, 2004.
- D'ANDREA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FREITAS, D.A.F.; ROSCOE, R.; GUIMARÃES, P.T.G. Variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em diferentes sistemas de manejo do cafeeiro. **Química Nova**, São Paulo, v.32, p.2314-2317, 2009.
- D'ANDREA, A.F.; SILVA, M.L.N.; FREITAS, D.A.F.; CURI, N.; SILVA, C.A. Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO₂ do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n.62, p.85-92, 2010.
- DAVIDSON, E.A.; BELK, E.; BOONE, R.D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. **Global Change Biology**, Oxford, v.4, p.217-227, 1998.
- DILUSTRO, J.J.; COLLINS, B.; DUNCAN, L.; CRAWFORD, C. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.204, 85-95, 2005.
- DUIKER, S.W.; LAL, R. Crop residue and tillage effects on carbon sequestration in a Luvisol in central Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.52, 73-81, 1999.

- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Levantamento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, 1982. 526p. (Boletim de Pesquisa 1).
- FANG, C.; MONCRIEFF J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.205, p.135-146, 1998.
- GALFORD, G.L.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.W.; MUSTARD, J.F.; CRONIN, T.W.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Historical carbon emissions and uptake from the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, Tempe, Arizona, v.21, p.750-763, 2011.
- GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. et al. (eds). **Methods of soil analysis**: Part 1. SSSA Book Ser. 5. SSSA and ASA, Madison, WI, 1986.
- GENTILE, R.; VANLAUWE, B.; KAVOO, A.; CHIVENGE, P.; SIX, J. Residue quality and N fertilizer do not influence aggregate stabilization of C and N in two tropical soils with contrasting texture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, Holanda, v.88, p.121-131, 2010.
- GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v.6, p. 65-100, 1987.
- HANSON, P.J.; EDWARDS, N.T.; GARTEN, C.T.; ANDREWS, J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration from total soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Holanda, v.48, p.115-146, 2000.
- HASSINK, J. Effect of soil texture on the size of the microbial biomass and on the amount of C and N mineralized per unit of microbial biomass in Dutch grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.26, p.1573-1581, 1994.
- HEINEMEYER, A.; DI BENE, C.; LLOYD, A.R.; TORTORELLA, D.; BAXTER, R.; HUNTLEY, B.; GELSOMINO, A.; INESON, P. Soil respiration: implications of the plant-soil continuum and respiration chamber collar-insertion depth on measurement and modelling of soil CO₂ efflux rates in three ecosystems. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.62, p.82-94, 2011.

- HUANG, C.C.; GE, Y.; CHANG, J.; LU, R.; XU, Q.S. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China. **Acta Ecologica Sinica**, Beijing, v.19, p.324–328, 1999.
- JASSAL, R.S.; BLACK, T.A.; NOVAK, M.D.; GAUMONT-GUAY, D.; NESIC, Z. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. **Global Change Biology**, Oxford, v.14, p.1-14, 2008.
- JIA, B.; ZHOU, G.; WANG, Y.; WANG, F.; WANG, X. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia. **Journal of Arid Environments**, London, v.67, p.60-67, 2006.
- KEMMIT, S.L.; WRIGHT, D.; GOULDING, K.W.T.; JONES, D.L. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.898-911, 2006.
- KIRSCHBAUM, M.U.F. The temperature dependence of organic-matter decomposition-still a topic of debate. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.2510-2518, 2006.
- KÖPPEN, W. **Die klimare der erde**. Walter de Gruyter, Berlin, Leipzig, 1923.
- KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.425–448, 2006.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v.304, 1623-1627, 2004.
- LEE, X.; WU, H.; SIGLER, J.; OISHI, C.; SICCAMI, T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.1017–1026, 2004.
- LI, H.J.; YAN, J.X.; YUE, X.F.; WANG, M.B. Significance of soil temperature and moisture for soil respiration in a Chinese mountain area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.490-503, 2008.
- MAIER, M.; SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E.E.; HOLST, J. Pore-space CO₂ dynamics in a deep, well-aerated soil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, p.877–887, 2010.
- MAIER, M.; SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E.E.; SCHINDLER, D. Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: implications for flux models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.151, p.1723-1730, 2011.
- MAPANDA, F.; MUPINI, J.; WUTA, M.; NYAMANGARA, J.; REES, R.M. A cross-ecosystem assessment of the effect of land cover and land use on soil emission of selected greenhouse gases and related soil properties in Zimbabwe. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, p.721-733, 2010.

- MAPFUMO, P.; MTAMBANENGWE, F.; VANLAUWE, B. Organic matter quality and management effects on enrichment of soil organic matter fractions in contrasting soils in Zimbabwe. **Plant and Soil**, The Hague, Holanda, v.296, 137-150, 2007.
- NEVES, C.M.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MACEDO, R.L.; TOKURA, A.M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.28, p.1038-1046, 2004.
- PACHECO, L. P.; PETTER, F. A. Benefits of cover crops in soybean plantation. In: **Brazilian Cerrados**. In: Tzi Bun Ng (ed). Soybean - Applications and Technology, 2011. p.67-94.
- PANOSSO, A.R.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA JR, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.275–282, 2009.
- PINTO-JUNIOR, O.E.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A.C.; NOGUEIRA, J.S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, p.813-821, 2009.
- PLANTE, A.F.; CONANT, R.T.; STEWART, C.E.; PAUSTIAN, K.; SIX, J. Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.70, p.287-296, 2006.
- POST, W.M.; KWON, K.C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. **Global Change Biology**, Oxford, v.6, 317-327, 2000.
- QUEIROZ, L.R.; GONTIJO NETO, M.M.; ALVARENGA, R.C.; MENDES, F.F.; SIMÃO, E.P.; WILDA, L.R.M. Estoque de carbono e densidade do solo sob cultivo com diferentes culturas agrícolas, em Sete Lagoas, MG. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, Águas de Lindóia, 2012. Embrapa Milho e Sorgo, **Anais...** p.1705-1711, 2012.
- RAICH, J.W.; SCHLESINGER, W.H. The global dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, Stockholm, 44B, 81-99, 1992.
- REICHSTEIN, M.; REY, A.; FREIBAUER, A.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; BANZA, J. Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.17, 15/11–15/15, 2003.
- REINERS, W.A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota Forests. **Ecology**, Tempe, Arizona, v.49, p.471–483, 1968.
- REINKE, J.J.; ADRIANO, D.C.; MCLEOD, K.W. Effects of litter alteration on carbon dioxide evolution from a South Carolina pine forest floor. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, p.620–623, 1981.

- SALIMON, C.I. **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Ocidental, Acre**. Tese (Doutorado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP. 2003. 97f.
- SANTIN, R.C. **Emissão de gases de efeito estufa em solo cultivado com pastagem (Tifton 85) e irrigado com efluente de esgoto tratado**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Dissertação (mestrado). Piracicaba, 2012. 82f.
- SOTTA, E.D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.601–617, 2004.
- SUGIHARA, S., FUNAKAWA, S., KILASARA, M., KOSAKI, T. Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agro-ecosystems in Tanzania. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.44, p.80-88, 2010a.
- SUGIHARA, S.; FUNAKAWA, S.; KILASARA, M.; KOSAKI, T. Effects of land management on CO₂ flux and soil C stock in two Tanzanian croplands with contrasting soil texture. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.46, p.1-9, 2012.
- SUGIHARA, S.; FUNAKAWA, S.; KOSAKI, T. In situ short-term carbon and nitrogen dynamics in relation to microbial dynamics after a simulated rainfall in croplands of different soil texture in Thailand. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.56, p.813-823, 2010b.
- TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.29, p.609-618, 2005.
- VINHAL-FREITAS, I.C.; FERREIRA, A.S.; CORRÊA, G.F.; WENDLING, B. Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. **Vadose Zone Journal**, Madison, In Press, doi:10.2136/vzj2012.0027, 2013.
- WANG, F.Y.; ZHOU, G.S.; JIA, B.R.; WANG, Y.H. Effects of heat and water factors on soil respiration of restoring *Leymus Chinensis* Steppe in degraded land. **Acta Phytocologica Sinica**, Beijing, v.27, p.644–649, 2003.
- WILDUNG, R.E.; GARLAND, T.R.; BUSCHBOM, R.L. The interdependent effect of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.7, p.373–378, 1975.
- XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v.7, p.667-677, 2001.

YEOMANS, J.; BREMNER, J.M.. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, p.1467–1476, 1988.

ZANCHI, F.B.; ROCHA, H.R.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F.L.; DEUS, J.A.; AGUIAR, L.J.G. Medição do efluxo de CO₂ do solo: monitoramento com câmaras automáticas sobre floresta e pastagem em Rondônia. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 6., **Anais**. Fortaleza: Ed. Betania, 2003. p.631-632.

ZHANG, L.H.; CHEN, Y.N.; ZHAO, R.F.; LI, W.H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China. **Journal of Arid Environment**, London, v.74, p.1200-1211, 2010.

CAPÍTULO III

SENSIBILIDADE DA RESPIRAÇÃO DO SOLO (Q_{10}) EM AGROECOSSISTEMAS EM CONDIÇÕES DE CAMPO E LABORATÓRIO

RESUMO

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Sensibilidade da respiração do solo (Q_{10}) em agroecossistemas em condições de campo e laboratório.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.65-90. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁷

Os fatores mais importantes relacionados à sensibilidade do fluxo de CO_2 do solo em vários ecossistemas são a umidade e a temperatura do solo. Assim, esta pesquisa objetivou medir o fluxo de CO_2 em três diferentes sistemas de uso (cana-de-açúcar, pastagem e cerrado), com o objetivo principal de entender a relação entre a taxa de respiração do solo e sua relação com a temperatura, tanto em condições de campo, quanto em incubações em laboratório, em solos de diferentes texturas: muito argiloso e franco-argilo-arenoso (textura média). A emissão de CO_2 foi medida por um sistema de câmara fechada em uma frequência de 15 em 15 dias, ao longo 12 meses. As temperaturas do ar e do solo e a umidade gravimétrica também foram monitoradas a uma profundidade de 10 cm. Em laboratório, a atividade microbiana foi medida pela determinação do C- CO_2 liberado por incubação estática com temperaturas induzidas de 20, 25 e 30°C. Os valores de Q_{10} foram calculados pela função de van't Hoff e Arrhenius. Os valores de Q_{10} medidos a partir de dados de campo foram maiores pois são resultados de múltiplos processos em resposta às mudanças na temperatura. Na cana e na pastagem do solo de textura média, os valores de Q_{10} foram menores em relação ao solo muito argiloso, podendo significar um processo de adaptação da microbiota. A energia de ativação foi maior no Cerrado em ambos os solos, para os dados de campo. Em laboratório, houve incremento da resposta da atividade microbiana ao aumento da temperatura no solo muito argiloso, e no solo de textura média houve uma diminuição da atividade, quando o solo foi incubado a 30°C. Em laboratório, a sensibilidade à temperatura foi menor no solo muito argiloso com menores energias de ativação. A variabilidade da resposta ao aumento da temperatura foi inversamente correlacionada à qualidade do substrato.

Palavras-Chave: valores de Q_{10} , resposta à temperatura, efluxo de CO_2 , Cerrado, pastagem, cana-de-açúcar.

⁷ Orientador: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Orientador) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU (Co-orientador).

ABSTRACT

VINHAL-FREITAS, ISABEL CRISTINA. **Field and laboratory evaluations of soil respiration sensitivity (Q_{10}) in agroecosystems.** 2013. 91p. Uberlândia: UFU, 2013. p.65-90. Thesis (Doctorate in Agronomy/Soil Science) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.⁸

Soil moisture and temperature are the most important factors affecting soil respiration. This study measured CO_2 flux in three different land use systems (sugarcane, pasture and Cerrado) to understand the relationship between soil respiration rate and temperature under field and laboratory conditions and in soils of different textures: clayey and sandy-clay-loam (medium texture). CO_2 emissions were measured every 15 days for 12 months in 2012 using an automated closed-chamber system. Soil temperature, air temperature and gravimetric soil moisture were monitored at a depth of 10 cm for 12 months. In the laboratory, microbial activity was measured by determining the C- CO_2 released during incubation at 20, 25 and 30°C. Q_{10} values were calculated using van't Hoff and Arrhenius functions. Q_{10} values from field data were higher because they resulted from multiple processes caused by temperature change. Sugarcane and grassland in sandy-clay-loam soil had lower Q_{10} values compared to clayey soil. This might indicate that the soil microorganisms were adapting to temperature changes. The activation energy from field data was higher in both types of soil from the Cerrado. Higher laboratory incubation temperatures led to greater microbial activity in clayey soil whereas incubation at 30°C resulted in lower microbial activity than incubation at 25°C for medium textured soil. The laboratory assay showed that temperature sensitivity and activation energy were lower in clayey soil. Variability in response to increasing temperature was inversely correlated to substrate quality.

Keywords: Q_{10} values, soil temperature, CO_2 efflux, Cerrado, grassland, sugarcane.

⁸ Guidance comitee: Gilberto Fernandes Corrêa – UFU (Major Professor) e Adão de Siqueira Ferreira – UFU.

1 INTRODUÇÃO

A concentração média de CO₂ na atmosfera aumentou de 285 a 394 ppm entre 1850 a 2012 (DLUGOKENCKY; TANS, 2012). A maior parte deste incremento é atribuída às atividades humanas, como o uso de combustíveis fósseis e a mudança do uso da terra. O efluxo de CO₂ ou respiração do solo é considerado o segundo maior componente que contribui para o ciclo do carbono na atmosfera (XU; QI, 2001; FIERER et al., 2006; ZHENG et al., 2009). Portanto, as avaliações e o monitoramento da emissão de CO₂ são de fundamental importância de modo a prever possíveis alterações no aquecimento da Terra. As atividades humanas relacionadas à agricultura fazem parte deste dimensionamento devido à sensibilidade do solo ao uso e às características intrínsecas de cada solo. Particularmente, a respiração do solo (Rs) é regulada por fatores bióticos e abióticos, os quais sofrem influência do clima, vegetação e processos de formação pedológica (CURIEL YUSTE et al., 2004; ZHENG et al., 2009).

Os solos de ecossistemas naturais podem estocar grandes quantidades de carbono, podendo ser importantes drenos de CO₂ atmosférico (LAL, 2004). As diversas práticas de manejo na agricultura, como aração, fertilização e irrigação são mudanças no uso do solo que interferem na emissão de CO₂. Muitos outros fatores têm sido relacionados por afetar a Rs, como variações anuais ou sazonais da umidade no solo, biomassa radicular, resíduos orgânicos, comunidade microbiana, flutuações dos processos sazonais e anuais, como fatores fenológicos das plantas (CURIEL YUSTE et al., 2004). Entretanto, os fatores mais importantes relacionados ao fluxo de CO₂ do solo em vários ecossistemas reportados na literatura são a umidade e a temperatura do solo (LLOYD; TAYLOR, 1994; XU; QI, 2001; CURIEL YUSTE et al., 2004; 2007).

A resposta dos sistemas biológicos do solo à temperatura tem sido monitorada em diferentes ecossistemas pelo índice conhecido como Q₁₀, cujo aumento de dez (10) graus celsius na temperatura acarretaria na duplicação da atividade de um sistema biológico (MOTA, 1989). O Q₁₀ é um parâmetro importante em modelos ecológicos de ecossistemas em relação ao ciclo do carbono, existindo uma relação exponencial-linear entre o Q₁₀ e a temperatura (Zheng et al., 2009). A determinação do índice Q₁₀ é dependente de vários modelos adotados na literatura, a maioria deles de regiões de clima temperado (LLOYD; TAYLOR, 1994; FANG; MONCRIEFF, 2001; DAVIDSON et al., 2006; ZHENG et al., 2009; CHEN et al., 2010).

Mielnick e Dugas (2000) relataram que o fluxo de CO₂ possui um padrão sazonal e é mais correlacionado à temperatura do que com a umidade do solo. Algumas evidências sugerem que a sensibilidade da Rs à temperatura não é constante, mas negativamente relacionada com a temperatura, e positivamente relacionada com a umidade do solo durante o ano (XU; QI, 2001; JANSSENS; PILEGAARD, 2003). As incubações em laboratório e posteriormente o uso de funções matemáticas é considerada uma metodologia aceita para se avaliar a sensibilidade da respiração à temperatura (JENKINS; ADAMS, 2011). Entretanto, há variação considerável nos métodos utilizados (LLOYD; TAYLOR, 1994; HANSON et al., 2000; FANG; MONCRIEFF, 2001). Muitos estudos têm mostrado grandes variações na sensibilidade da respiração à temperatura entre diferentes estudos e tipos de solos (FANG et al., 2005; KNORR et al., 2005; FIERER et al., 2006; HARTLEY; INESON, 2008).

A textura do solo influencia no crescimento de raízes, sendo o crescimento mais lento em solos de textura mais arenosa, do que em solos de textura mais argilosa, atuando indiretamente na respiração do solo, devido à menor fertilidade do solo, menor condutividade e menor capacidade de retenção de água em solos menos argilosos (LUO; ZHOU, 2006). A respiração em solos arenosos é geralmente menor durante períodos secos e quentes, enquanto solo de textura mais argilosa tem uma capacidade tampão sobre os efeitos da umidade do solo sobre a respiração devido à menor perda de água do solo (LUO; ZHOU, 2006).

Para o cálculo do Q₁₀, as funções comumente usadas para descrever a dependência da respiração heterotrófica à temperatura são as propostas por Arrhenius e van't Hoff (LLOYD; TAYLOR, 1994). Os parâmetros derivados são usualmente utilizados para explicar alguns atributos particulares da ciclagem do carbono como substrato para a respiração (JENKINS; ADAMS, 2011). Por exemplo, o parâmetro “a” pré-exponencial tem sido utilizado como um índice de qualidade da serapilheira e matéria orgânica do solo (FIERER et al., 2003, 2005). Do mesmo modo, a energia de ativação (“Ea”) é derivada a partir da função de Arrhenius e é usada para descrever a suscetibilidade dos substratos de carbono (JENKINS; ADAMS, 2011).

Embora as respostas de respiração do solo às mudanças na temperatura e umidade são relativamente bem compreendidas, estudos sobre os fatores que afetam a respiração do solo em solos tropicais são escassos (LA SCALA JR. et al., 2000; LI et al., 2004), e no Brasil são mais focados no bioma da floresta amazônica (COELHO, 2005; PINTO JUNIOR et al., 2009). Adquirir conhecimentos sobre a Rs nas regiões

tropicais é crucial para o entendimento do ciclo do carbono global, pois os ecossistemas tropicais são os que mais influenciam na dinâmica global do fluxo de carbono.

Objetivou-se com este trabalho avaliar a sensibilidade à temperatura dos componentes biológicos e microbianos do solo de agroecossistemas em Latossolos de texturas contrastantes na região do Cerrado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em solos coletados de áreas localizadas nos municípios de Uberaba e Uberlândia, Minas Gerais, na região do Triângulo Mineiro. O clima é classificado como Cwa (EMBRAPA, 1982), em relação à precipitação e temperatura, de acordo com Köppen (1923), caracterizado como “moderadamente quente”, com uma estação seca bem definida durante o outono-inverno (abril a setembro) e uma estação chuvosa e quente durante a primavera-verão (outubro a março). O solo foi caracterizado como Latossolo Amarelo distrófico típico (LAd), nas áreas de textura média, e Latossolo Amarelo ácrico típico (LAW), nas áreas de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2006).

Tanto o solo de textura muito argilosa, quanto o de textura média estão localizados em média a 946 m de altitude, com relevo plano, e foram constituídos de três áreas de estudo em cada um: cana-de-açúcar (AR: 19°21'08"S e 48°06'23"O; TM: 19°13'00"S e 48°06'24"O), pastagem (AR: 19°20'43"S e 48°05'15"O; TM: 19°12'40"S e 48°08'34"O) e Cerrado (AR: 19°20'45"S e 48°00'56"O; TM: 19°12'51"S e 48°08'04"O). A área de cerradão apresenta formação florestal densa e alta, formando assim um dossel arbóreo-arbustivo praticamente fechado. Neste trabalho, esta área será designada simplesmente como “Cerrado”, ou CE. As áreas de pastagem estudadas têm a predominância de capim *Brachiaria decumbens* (capim-braquiária), com uso nesse sistema há mais de 25 anos. As áreas de cana-de-açúcar escolhidas tanto no solo muito argiloso (AR), quanto no franco-argilo-arenoso (TM) têm a mesma idade de implantação do canavial, ambas em 2007.

Os dados de precipitação e temperatura do ar foram coletados diariamente durante o ano de 2012, através de pluviômetro e termômetro, localizados próximo às áreas de cada solo analisado, na Fazenda Bom Jardim (Figura 1).

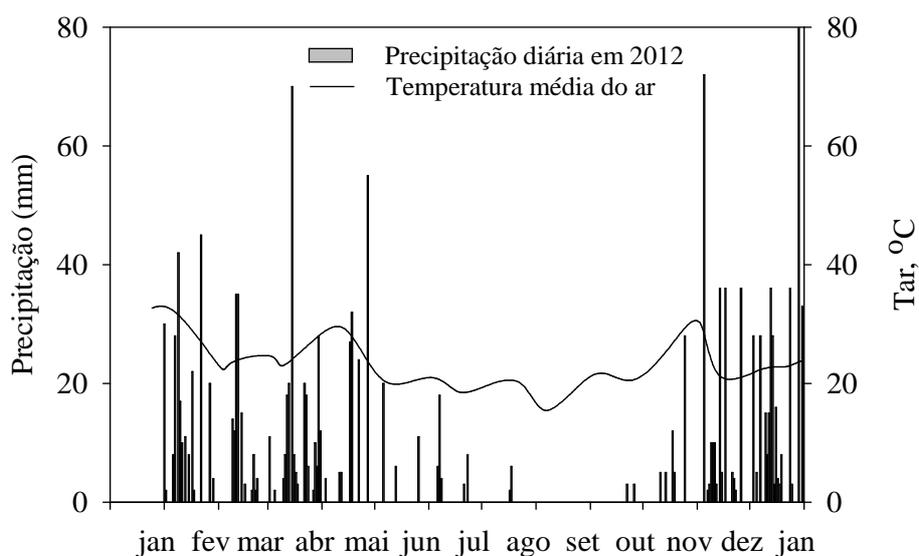


Figura 1. Precipitação diária no ano de 2012 e variação da temperatura média mensal do ar.

Em cada área selecionada realizou-se amostragem do solo (camada de 0-10 cm), em janeiro de 2012 (estação chuvosa). Coletou-se quatro amostras compostas em cada área, cada uma delas formadas por quatro amostras simples (sub-amostras), as quais foram misturadas e homogeneizadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos selados, levadas ao laboratório e posteriormente peneiradas (< 2 mm). A distribuição do tamanho das partículas do solo foi realizada em amostras de solo secas ao ar (TFSA < 2 mm), utilizando o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986; EMBRAPA, 1997). As áreas de LAw de textura muito argilosa apresentaram média de 77% de argila e as áreas de LAd de textura franco-argilo-arenosa apresentaram média de 24% de argila.

Para a análise da umidade gravimétrica, as amostras foram acondicionadas em latas de alumínio com tampas, sendo determinada no mesmo dia por secagem do solo, a 110°C em estufa, por 24 horas. A umidade foi calculada por diferença de peso entre o material de solo úmido e o seco.

A emissão de CO₂ no campo foi medida por um sistema de câmara fechada em uma frequência de 15 em 15 dias, ao longo do período experimental (12 meses). Cilindros de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram inseridos a 3 cm de profundidade no solo de cada área, aleatoriamente, após a remoção dos resíduos vegetais da superfície. O analisador de CO₂ utilizado foi o sistema portátil automático

de fluxo de gases, por infravermelho (IRGA, Li-cor 8100). Em cada área foi realizada em média 25 medições mensais, totalizando em média 300 medições por área, de janeiro a dezembro do ano de 2012. Toda a medição de campo foi realizada no período das 8:00-11:00 h da manhã. Em todas as áreas de estudo, a temperatura do solo foi monitorada a uma profundidade de 10 cm por meio de uma sonda acoplada ao sistema automático Li-cor.

O bioensaio com indução de temperaturas de incubação em laboratório consistiu na estimativa da atividade microbiana pela determinação do C-CO₂ liberado em álcali conforme Silva et al. (2007) e Leirós (2000). Para eliminar o efeito da umidade do solo, esta foi padronizada para 60% da capacidade de campo. 100g de solo foram colocados em vidros herméticos e copinhos descartáveis contendo 10mL de NaOH 1 mol L⁻¹ foram colocados acima do solo para capturar o CO₂. O solo foi incubado em BODs regulados para manter as temperaturas de 20, 25 e 30°C ± 0,1°C durante o período de 31 dias de incubação. Estas faixas de valores de temperatura foram consideradas ótimas para a atividade microbiana do solo, ou seja, de 20,0°C (THIERRON; LAUDELOUT, 1996) a 30,0°C (O'CONNELL, 1990). O C-CO₂ foi coletado a cada 7 dias para evitar a saturação do hidróxido, o qual foi titulado com HCl após a adição de BaCl₂ para a precipitação dos carbonatos. Esse ensaio foi conduzido com 8 repetições para cada área e temperatura (as repetições de campo foram duplicadas). A taxa da atividade respiratória microbiana foi expressa em μmol C-CO₂ g⁻¹ solo seco h⁻¹, e o C-CO₂ acumulado ao final de 31 dias de incubação foi expresso em mg C-CO₂ kg⁻¹ solo seco.

Os valores de Q₁₀ foram calculados por duas funções comumente utilizadas para relacionar a respiração do solo (Rs) à temperatura do solo (Ts). Pela equação exponencial, ou de van't Hoff (1898), utilizou-se a equação: $Rs = ae^{bT}$, onde: Rs é a taxa de respiração do solo (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹); T é a temperatura do solo (°C) medida a 10 cm de profundidade; 'a' e 'b' são os coeficientes da regressão exponencial (a é considerado um índice de qualidade da matéria orgânica (FIERER et al., 2003), e 'b' é considerado o coeficiente de temperatura reativo). O Q₁₀ da equação exponencial foi calculado pela equação: $Q_{10} = e^{10b}$, onde: 'b' é o coeficiente obtido da regressão exponencial (1).

A função proposta por Arrhenius (1889) também foi utilizada para estimar o Q₁₀: $Rs = ae^{(-Ea/RT)}$, onde: Rs é a taxa de respiração do solo (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹); a é o coeficiente da equação linear obtida entre o logaritmo natural da Rs em relação à temperatura absoluta (1/T) em Kelvin (K); Ea é a energia de ativação, valor obtido pela

multiplicação do coeficiente 'b' pela constante dos gases R (8,314 J K⁻¹ mol⁻¹); e T é a média da temperatura do solo no período, em Kelvin (K). O Q₁₀ de acordo com Arrhenius foi calculado pela equação: $Q_{10} = e^{(10Ea/(RT(T+10)))}$.

A análise de variância (ANAVA) foi conduzida pelo programa SPSS e os gráficos e modelos foram gerados pelo programa Sigma Plot.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A temperatura do solo muito argiloso variou de 14,8 a 25,8°C; de 17,6 a 29,4°C e de 17,0 a 24,4°C; e no solo de textura média a temperatura do solo variou de 16,8 a 27,6°C; de 19,3 a 33,8°C e de de 17,5 a 26,0°C, na cana-de-açúcar, na pastagem e no Cerrado, respectivamente, durante o ano de 2012. O sistema de uso do solo que apresentou a menor temperatura do solo durante o ano foi na área de cana-de-açúcar do solo muito argiloso, e o sistema com a maior temperatura do solo durante o ano foi a pastagem no solo de textura média (Figura 2). As médias das temperaturas do solo, em relação à separação em épocas do ano, foram significativamente menores em todas as áreas na época seca ($P < 0,05$), e as temperaturas do solo na época úmida foram maiores durante o ano de 2012 (Figura 2). A água é condutora de calor, dissipando-o em profundidade no solo muito argiloso, onde a retenção de água é maior, enquanto o ar é isolante térmico, concentrando o aquecimento nos primeiros centímetros do solo de textura média (TM), onde a fase gasosa é dominante, devido à menor retenção de água (COSTA, 1979).

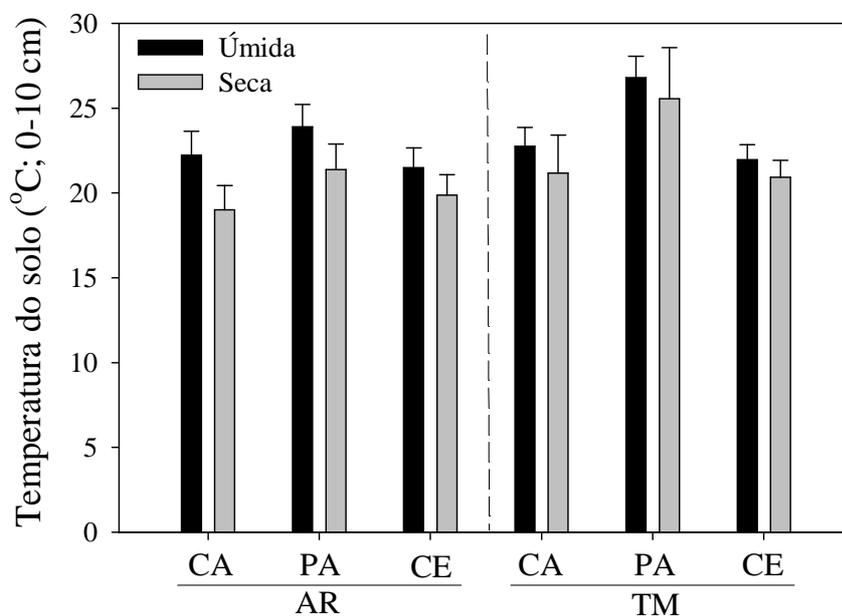


Figura 2. Média estacional da temperatura do solo nos agroecossistemas avaliados durante o ano de 2012. CA: cana-de-açúcar, PA: pastagem e CE: Cerrado; AR: solo de textura muito argilosa e TM: solo de textura média. As barras indicam o desvio-padrão ($n = 6$).

Para avaliar a resposta da respiração do solo (R_s) em relação à temperatura (T_s) durante o ano de 2012, as funções de van't Hoff e Arrhenius foram aplicadas aos modelos (Figuras 3 e 4).

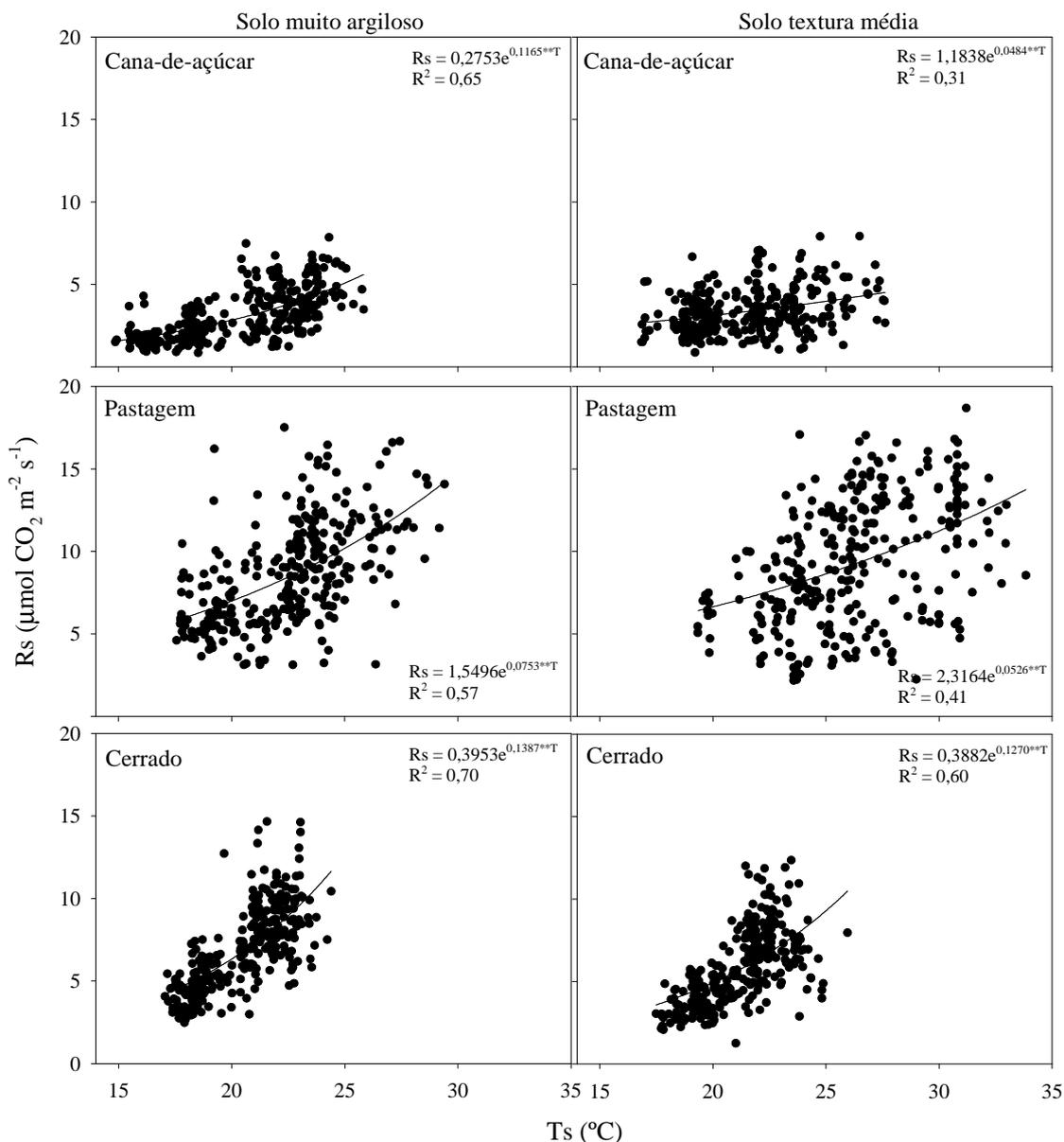


Figura 3. Modelos exponenciais (van't Hoff, 1898) para a respiração do solo (R_s) em função da temperatura do solo (T_s , 0-10 cm), para cada área analisada. O coeficiente $b(T)$ foi utilizado para o cálculo do Q10. **, significativo a $P < 0,001$. Cana-de-açúcar: $n = 313$; pastagem: $n = 300$ e Cerrado: $n = 300$

A resposta da R_s , analisada pela equação de van't Hoff, foi alterada e depende do sistema de uso do solo e conteúdo de argila (Figura 3). Os valores dos parâmetros da

equação foram todos significativos à 1 % de probabilidade. Em geral, os valores de ‘a’ na equação foram maiores no solo de textura média nas áreas sob agricultura, em comparação ao muito argiloso. O parâmetro ‘b’ foi o inverso dos valores de ‘a’. Nas áreas sob Cerrado, os valores dos parâmetros foram muito semelhantes, mas significativo para equação de van’t Hoff (Figura 3). Os valores dos parâmetros são muito semelhantes aos obtidos por Chen et al. (2010). Observa-se também que os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,31 a 0,70, sendo os maiores valores nas áreas de solo muito argiloso. Os valores de R^2 relatados variaram muito e foram dependentes dos ecossistemas avaliados (CHEN et al., 2010). Os resultados mostram que quanto maior a variação da respiração do solo em resposta à temperatura, menores são os valores de R^2 (Figura 3). Contudo, observou-se nas áreas sob pastagem que os valores de R^2 foram baixos, mas os valores de “b” foram maiores, quando comparados às demais áreas, devido à inclinação da curva.

A segunda equação usada foi a linear e apresentou valores de R^2 muito semelhantes em comparação à primeira equação para os agroecossistemas (Figura 4). Isso mostra que as duas equações estão medindo uma resposta comum dos sistemas biológicos de cada área. A equação linear para avaliar a função proposta por Arrhenius é uma das mais usadas para avaliar a respostas dos organismos à temperatura, incluindo a respiração do solo (JENKINS; ADAMS, 2012). Apesar disso, a equação de Arrhenius apresenta um único valor de ajuste (a) nos dados analisados, podendo dificultar as análises comparativas do parâmetro “a” com os dados de literatura. Isso ocorre devido à grande amplitude dos valores registrados na literatura e os obtidos neste trabalho, cuja variação por unidade de temperatura ficou entre 4129 e 13581 (Figura 4). Entretanto, os valores de “a” desta equação podem ser utilizados, além da determinação do Q_{10} , para avaliar a energia de ativação na acessibilidade dos organismos em transformar o carbono orgânico solo.

Os resultados demonstraram que a sensibilidade da R_s à temperatura do solo variou entre os diferentes agroecossistemas, mas não diferiram estatisticamente entre as funções em que foram ajustadas (Tabela 1). Em geral, os valores de Q_{10} foram um pouco superiores quando a equação de Arrhenius foi aplicada nas áreas avaliadas, exceto para área de cana-de-açúcar no solo de textura média (Tabela 1).

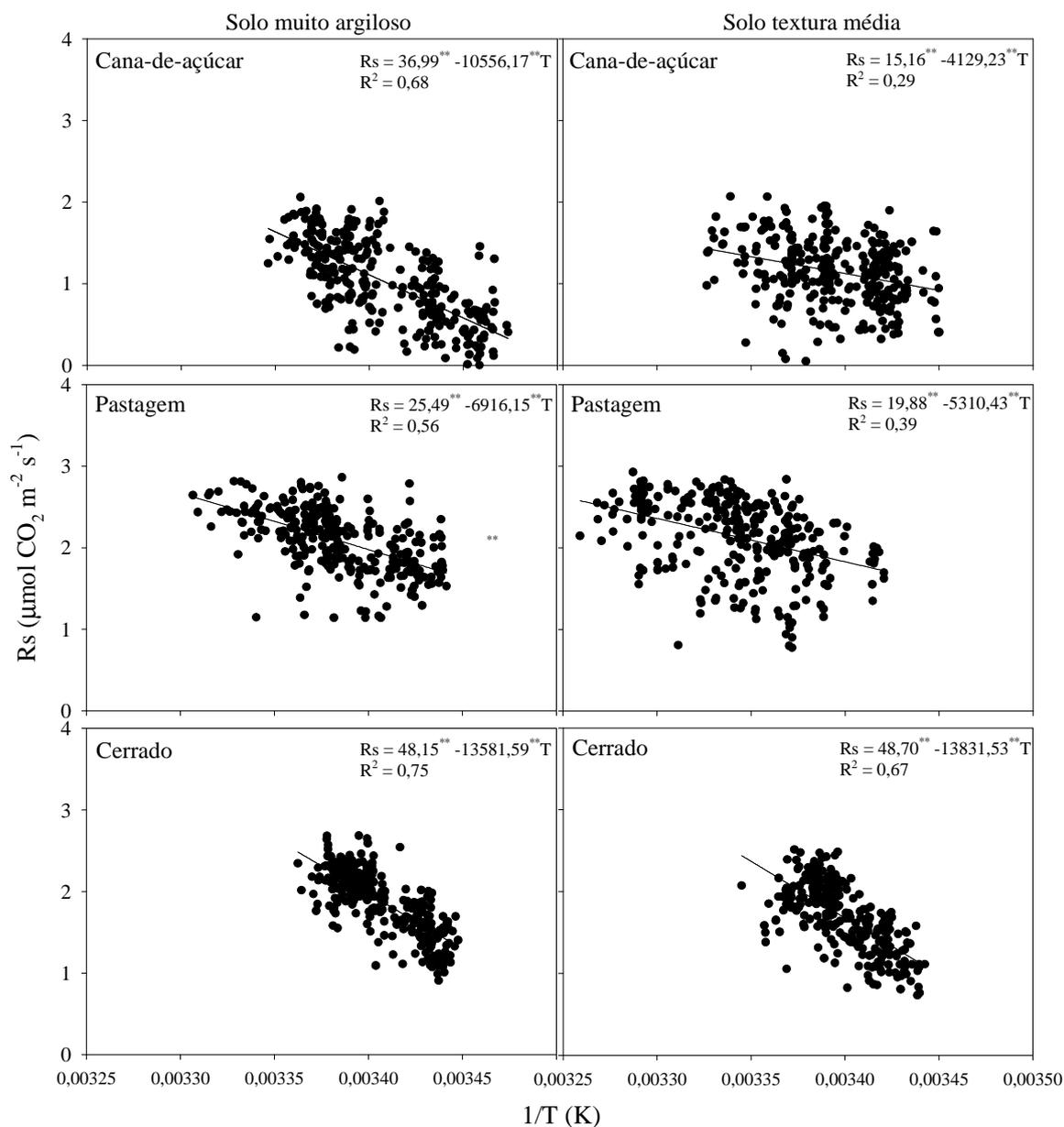


Figura 4. Logaritmo neperiano da respiração do solo ($\text{Ln } \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) expresso em relação à temperatura absoluta ($1/T$) em Kelvin (K), ajustado à equação linear, para cada agroecossistema analisado. O coeficiente $a(T)$ foi utilizado para o cálculo da energia de ativação e determinação do valor de Q_{10} conforme Arrhenius (1889). **, significativo a $P < 0,001$; cana-de-açúcar: $n = 313$; pastagem: $n = 300$ e Cerrado: $n = 300$.

Comparativamente, os resultados mostram, de modo geral, que os valores de Q_{10} são superiores nas áreas para o solo de textura muito argilosa, exceto nas áreas de Cerrado nativo, onde os valores foram similares. Isso demonstra que a textura do solo tem mais influência sobre a sensibilidade da R_s à temperatura em áreas agrícolas. Em parte, essa resposta pode estar associada às características quantitativas e qualitativas da comunidade microbiana do solo, exsudatos do sistema radicular das plantas, qualidade

da matéria orgânica e, incluindo também, as práticas e manejo do solo (FONTAINE; BAROT, 2005). Muitos são os relatos que mostram que em áreas agrícolas ocorre uma degradação dos solos quanto às características químicas, físicas e biológicas, afetando o funcionamento do solo (DAVIDSON; JANSSENS, 2006; VINHAL-FREITAS et al., 2012; VINHAL-FREITAS et al., 2013).

Os resultados deste trabalho divergem dos encontrados na literatura (DAVIDSON; JANSSENS, 2006; BRITO et al., 2009), os quais mostram que áreas em que apresentam maior estabilidade física da matéria orgânica, como os solos com maior quantidade de argila, apresentam menores valores de Q_{10} . Entretanto, esses trabalhos foram feitos em menores períodos de tempo. De acordo com Davidson e Janssens (2006), a R_s é controlada pelo fornecimento de substrato, biomassa microbiana e clima, não somente pela temperatura. Os resultados do presente trabalho podem estar associados às características específicas de clima tropical e às condições do Cerrado brasileiro.

Tabela 1. Sensibilidade à temperatura (Q_{10}) dos solos com diferentes texturas em agroecossistemas no Cerrado, fator 'a' modelado da função exponencial proposta por van't Hoff, e energia de ativação calculada pela equação proposta por Arrhenius. Os dados de R_s e T_s foram medidos durante o ano de 2012 (Figuras 1 e 2).

	Muito argiloso			Textura média		
	Cana-de-açúcar	Pastagem	Cerrado	Cana-de-açúcar	Pastagem	Cerrado
Q_{10} (van't Hoff) ¹	3,20	2,12	4,00	1,62	1,69	3,56
Q_{10} (Arrhenius) ²	3,27	2,12	4,59	1,58	1,77	4,72
'a' ³	0,27	1,55	0,39	1,18	2,32	0,39
Ea ⁴	87,7	56,5	112,9	34,3	44,2	114,9
$T_{s_{anual}}$ ⁵	20,6	22,6	20,7	21,9	26,2	21,4

¹ O Q_{10} foi calculado com base nas equações exponenciais ajustadas na Figura 2, significativo a $P < 0,05$ entre agroecossistemas; ² O Q_{10} foi calculado com base nas equações lineares ajustadas na Figura 3; ³ 'a', $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, obtido do coeficiente do modelo exponencial ajustado na equação de van't Hoff (Figura 2); ⁴ Ea: energia de ativação (kJ mol^{-1}), calculada pelo coeficiente angular das equações ajustadas na Figura 3; ⁵ T_s , temperatura média do solo durante todo o ano de 2012 ($^{\circ}\text{C}$, 0-10 cm) (n=300).

A área de cana-de-açúcar no solo muito argiloso também demonstrou maior sensibilidade às variações na temperatura (Tabela 1). Porém, as diferenças dos valores Q_{10} entre esta área e o Cerrado nativo no solo muito argiloso foram menores, quando comparadas com o de textura média. Os solos de textura muito argilosa apresentam geralmente maiores conteúdos de nutrientes, de matéria orgânica, formação de agregados, distribuição de raízes e, possivelmente, uma microbiota diferenciada em

relação à textura com maior percentual de argila. Isso resulta em maior capacidade dos sistemas biológicos, especialmente os micro-organismos, em responderem às alterações climáticas. Esses relatos, quanto à textura do solo, devem ser considerados em observações de áreas sob um dado sistema de uso do solo, principalmente em estudos de modelagem de emissões de gases de efeito estufa. No entanto, mais estudos devem ser feitos, com esse cuidado, em áreas de cana-de-açúcar, devido às grandes extensões e importância da cultura no Brasil.

As áreas sob pastagem também tiveram os valores de Q_{10} significativamente alterados em relação às áreas de Cerrado nativo (Tabela 1). Porém, as diferenças do Q_{10} entre essas áreas foram relativamente menores no solo de textura muito argilosa, quando se comparam as duas texturas. Esse resultado pode ter um efeito maior associado às características de densidade do sistema radicular e de plantas, alterando a resposta dos componentes bióticos à temperatura. É importante ressaltar que as medidas de fluxo de CO_2 quantificados nesta área foram realizadas na presença das plantas e que parte desta quantificação pode ser procedente da respiração das plantas. Os Q_{10} da pastagem do solo de textura média foram próximos aos valores relatados para pastagens em clima temperado (1,60-1,81) (LIU et al., 2007). Possivelmente, exsudatos das raízes de compostos orgânicos são abundantes no solo de pastagem, podendo ter uma contribuição mais significativas nos valores de Q_{10} e diminuindo as diferenças dos valores entre as duas texturas analisadas neste trabalho. Dados de literatura sobre o Q_{10} em áreas de pastagem em regiões tropicais ainda são escassos (LIU et al., 2007), principalmente no Brasil.

A energia de ativação (E_a) foi maior nas áreas de Cerrado, quando comparadas aos agroecossistemas cana e pastagem (Tabela 2). Esses resultados sugerem que existem diferenças relacionadas à qualidade do substrato, com maior quantidade de carbono lábil ou uma comunidade decompositora mais ativa/eficiente. De acordo com Sjögersten e Wookey (2002), solos com menores valores de E_a necessitam de menor energia cinética (ex. temperatura ou atividade enzimática) para que os processos metabólicos ocorram. Entretanto, no caso das áreas de cana-de-açúcar e pastagem no solo de textura média, a menor energia de ativação não indica maior eficiência metabólica, mas pode indicar um processo de aclimação dos microrganismos do solo, como sugere Edwards et al. (2004) e Panikov (2007), com menor dependência da temperatura.

Os maiores valores de Q_{10} e E_a nas áreas de cerradão podem ser relacionados às mudanças na estrutura da microbiota de diferentes taxas de crescimento (FONTAINE;

BAROT, 2005). Em solos onde a biomassa microbiana tem maiores condições de mudar rapidamente a taxa respiratória, o Q_{10} geralmente é maior (Tabela 2), existindo uma influência entre a atividade das plantas e a existência de substratos lábeis. Plantas ativas estão continuamente exsudando compostos orgânicos ao solo, e isso exerce uma forte influência no efluxo de CO_2 derivado da decomposição. Outro fator que interfere é a respiração de raízes, as quais são mais sensíveis às mudanças de temperatura (BOONE et al., 1998). Bosatta e Ågren (1999) relataram que uma maior energia de ativação existe em solos onde um maior número de enzimas são requeridas para mineralizar o carbono ao produto final CO_2 , tendo relação direta com a qualidade do substrato (baixa ou alta qualidade), o que leva a uma maior E_a , e conseqüentemente maior sensibilidade à temperatura.

A respiração acumulada dos micro-organismos do solo ao final de 31 dias de incubação em condições controladas foi afetada mais pela temperatura e textura do solo, ocorrendo, em geral, uma menor diferença de atividade entre os sistemas nas temperaturas avaliadas (Figura 5).

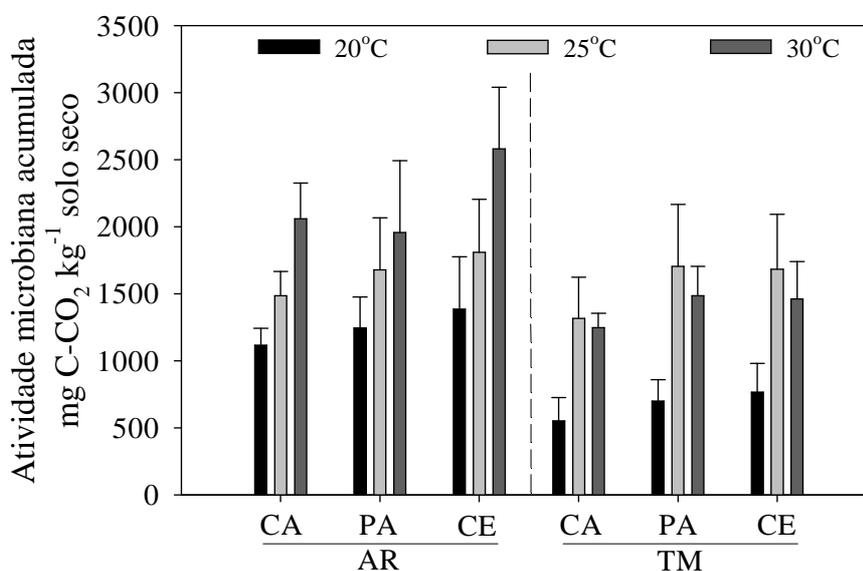


Figura 5. Atividade microbiana acumulada ao final de 31 dias de incubação nos agroecossistemas avaliados durante o ano de 2012. CA: cana-de-açúcar, PA: pastagem e CE: Cerrado; AR: solo de textura muito argilosa e TM: solo de textura média. As barras indicam o desvio-padrão (n = 8).

Na temperatura de incubação de 25 °C, a resposta microbiana do solo não resultou em diferença entre os sistemas de uso e a classe textural do solo. Observou-se também que, no solo de textura média e na temperatura de 30 °C, não houve uma

resposta da atividade microbiana em comparação às outras temperaturas e não seguiu as mesmas tendências observadas para o solo de textura muito argilosa. A temperatura é um dos principais fatores que regula a atividade microbiana do solo. Particularmente, temperaturas acima de 30 °C podem afetar negativamente no crescimento de alguns micro-organismos, tais como os fungos filamentosos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). O efeito negativo de temperaturas elevadas pode ser mais pronunciado no solo de textura média. O solo muito argiloso pode ter um maior efeito protetor da microbiota do solo em relação ao solo de textura muito argilosa. Este efeito pode ser decorrente do teor e qualidade da matéria orgânica, da formação de agregados e da umidade do solo.

A tabela 2 mostra os parâmetros derivados das funções exponencial e Arrhenius, de acordo com as equações derivadas da Figura 6. Observa-se que os valores de R^2 foram relativamente baixos em ambos os modelos, exceto aos valores de cana-de-açúcar no solo muito argiloso (Figura 6). Isso indica que a resposta à temperatura da microbiota do solo é dependente de outras condições que podem estar regulando atividade dos micro-organismos do solo. A área de cana de açúcar no solo muito argiloso teve altos valores de R^2 , podendo estar este resultado associado a fatores específicos como os teores de nutrientes. Apesar dos baixos valores de R^2 os parâmetros das equações são significativos e podem ser usados na determinação dos Q_{10} da microbiota do solo. Observa-se também que os parâmetros da equação dependem do agroecossistema e da textura do solo.

A incubação no laboratório permitiu isolar, em parte, as interferências de fatores bióticos e abióticos, como a respiração das raízes e da macrofauna, e posteriormente o solo foi incubado em condições altamente controladas. Sem a limitação da umidade, a sensibilidade da decomposição microbiana em relação ao aumento da temperatura foi menor no solo muito argiloso do que no de textura média na cana e na pastagem (Tabela 2). A atividade microbiana vinda do solo incubado pode ter resultado em uso de praticamente todo o carbono lábil existente naquela pequena amostra de solo. Esse fato é totalmente distinto dos efeitos da sazonalidade, quando avalia-se a respiração no campo durante um longo período de tempo. Incubações de laboratório têm sofrido críticas de alguns autores por subestimar a sensibilidade à temperatura devido às mudanças que ocorrem na matéria orgânica do solo durante a incubação (KIRSCHBAUM, 1995). Espíndola e Ferreira (2011), estudando o efeito da temperatura na atividade microbiana na mesma área de Cerrado deste trabalho com incubações em

laboratório, relataram um Q_{10} de aproximadamente 1,80, corroborando com os resultados desta pesquisa (Tabela 2).

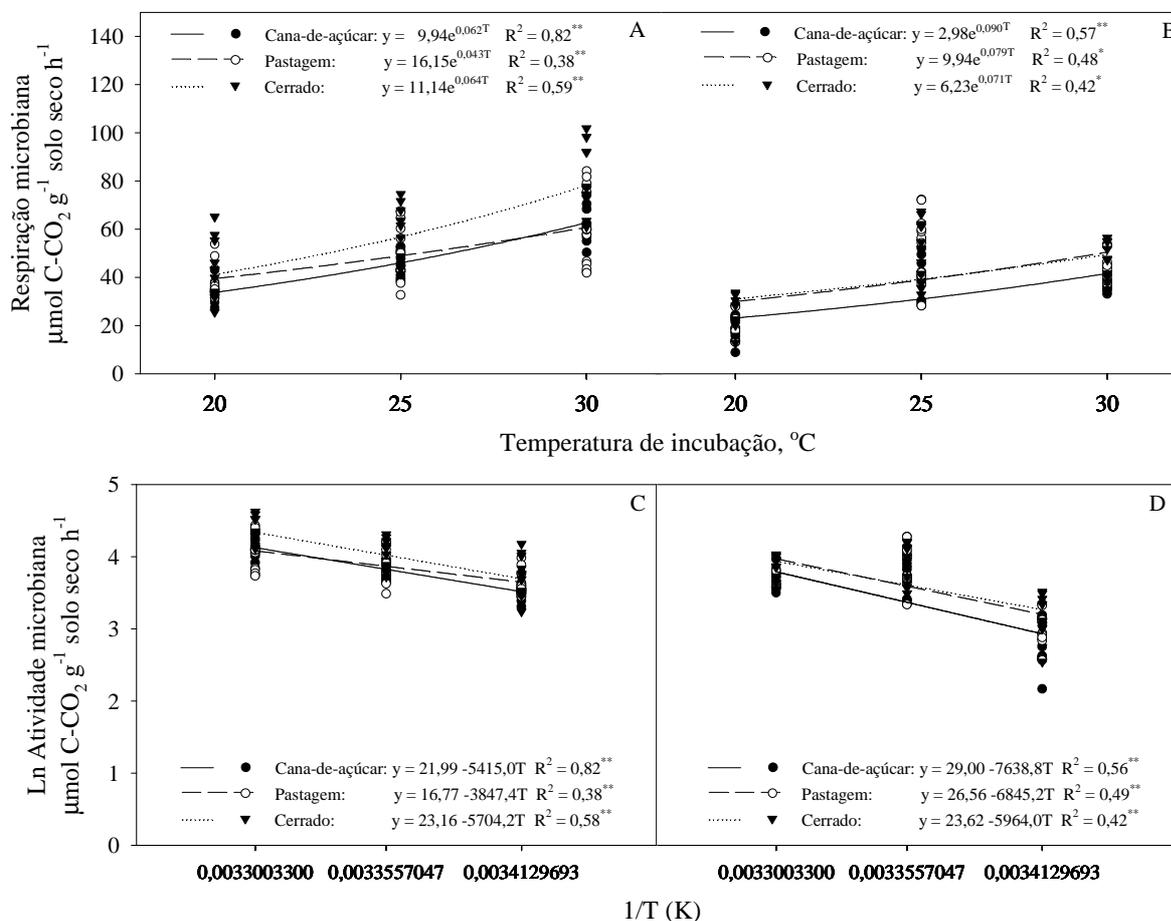


Figura 6. Respiração microbiana do solo vs. temperatura de incubação, com umidade de 60% cc, para três agroecossistemas em solo muito argiloso (A, C) e solo de textura média (B, D). As funções exponenciais (van't Hoff, 1898) foram ajustadas (A e B) e as lineares (C e D) (Arrhenius, 1889) foram aplicadas para o cálculo do Q_{10} do solo. ** $P < 0,001$; * $P < 0,05$.

Sob condições de laboratório, os valores de Q_{10} foram relativamente baixos (menores que 2,35), em relação aos valores reportados por outros autores (JANSSENS; PILEGAARD, 2003; REY; JARVIS, 2006). CURIEL YUSTE et al. (2007) afirmam que temperaturas relativamente altas (30°C) podem explicar parcialmente esses menores valores de Q_{10} obtidos. Curiel Yuste et al. (2007) relataram que, sob um cenário sem limitação de água no solo e com alta exposição do C lábil, os valores de Q_{10} ficam próximos de 2, relacionado como um “ Q_{10} fisiológico” (Tabela 2). Esses autores também relataram que o Q_{10} sazonal, com medidas em campo, foram substancialmente maiores que o Q_{10} obtido em laboratório.

Tabela 2. Sensibilidade à temperatura (Q_{10}) dos solos com diferentes texturas em agroecossistemas no Cerrado, fator 'a' modelado pela função exponencial proposta por van't Hoff, e energia de ativação calculada pela equação proposta por Arrhenius. Os dados de Rs e Ts foram medidos durante o ano de 2012 (Figuras 1 e 2).

	Muito argiloso			Textura média		
	Cana-de-açúcar	Pastagem	Cerrado	Cana-de-açúcar	Pastagem	Cerrado
Q_{10} (van't Hoff) ¹	1,84	1,54	2,21	2,35	2,21	1,95
Q_{10} (Arrhenius) ¹	1,80	1,52	1,86	2,30	2,11	1,91
'a', ²	9,94	16,15	11,14	2,98	9,94	6,23
Ea ³	45,02	31,98	47,42	63,60	56,91	49,59

¹O Q_{10} foi calculado com base nas equações exponenciais e lineares ajustadas na Figura 4; ²'a', $\mu\text{mol C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$, obtido do coeficiente do modelo exponencial ajustado (Figura 4A e 4B); ³ Ea: energia de ativação (kJ mol^{-1}), calculada pelo coeficiente angular das equações ajustadas na Figura 4C e 4D; (n=8).

A Ea não se diferenciou em relação à cana e ao Cerrado e a pastagem foi o sistema que apresentou menores valores de Ea no solo de textura muito argilosa (Tabela 2). A teoria cinética prevê um incremento na dependência da oxidação do substrato à temperatura, especialmente em relação à acessibilidade do substrato pelos microrganismos, o que pode levar a um aumento na Ea, possibilitando a decomposição de substratos recalcitrantes (DAVIDSON et al., 2006).

A correlação entre os valores de Q_{10} com a constante exponencial 'a', considerado um índice de qualidade do substrato (REICHSTEIN, 2005; KOCH et al., 2007), foi feita para investigar a influência da qualidade do substrato à mineralização do C. A constante 'a' foi inversamente correlacionada aos valores de Q_{10} (Figura 7), também reportada por outros estudos (FIERER et al., 2005; 2006; KOCH et al., 2007).

A regressão explicou 69% a variabilidade dos valores de Q_{10} , em relação à mineralização do C durante o ano de 2012, monitorada em campo, e 43% a incubação em laboratório (Figura 7). Esse resultado afirma a hipótese da qualidade do substrato como um fator importante que influencia na sensibilidade da respiração à temperatura, implicando em maior energia de ativação para substratos muito complexos ou grandes inputs de substratos de baixa qualidade, que requerem um grande número de reações bioquímicas para mineralizar o carbono, principalmente quando a umidade do solo é limitante.

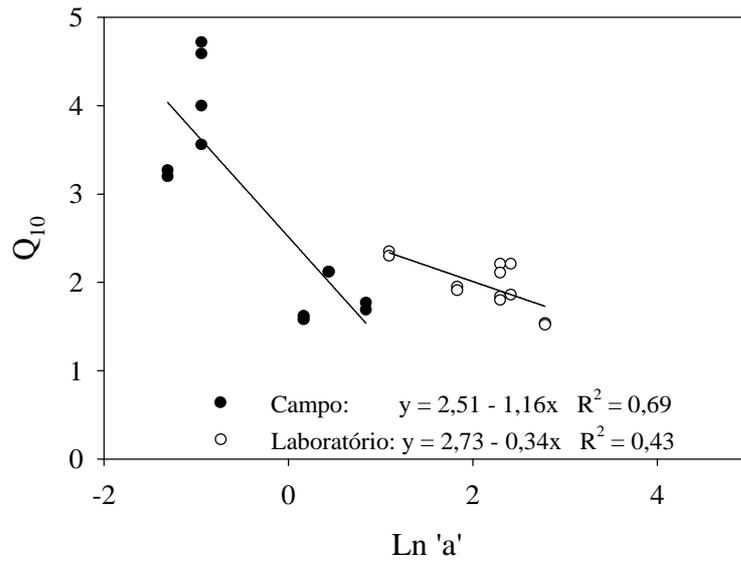


Figura 7. Relações entre valores de Q_{10} estimados para medidas em campo durante 12 meses no ano de 2012 e valores de Q_{10} estimados por incubação em laboratório por 31 dias, e o coeficiente 'a' ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $\mu\text{mol C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo seco h}^{-1}$).

4 CONCLUSÕES

1. A respiração do solo e a respiração microbiana do solo foram ajustadas às equações propostas por van't Hoff e Arrhenius, não havendo diferença entre o modelo utilizado, sendo os parâmetros de cada equação dependentes do agroecossistema e da textura.
2. Os valores de Q_{10} da respiração do solo à campo foram significativamente afetados pelo sistema de uso e textura do solo.
3. Os valores de Q_{10} da microbiota do solo foram diferentes dos obtidos à campo com a respiração do solo em laboratório, sob influência da umidade.

REFERÊNCIAS

ARRHENIUS, S. The effect of constant influences upon physiological relationships. **Scandinavian Archives of Physiology**, Scandinavia, v.8, p.367-415, 1889.

BOONE, R.D.; NADELHOFFER, K.J.; CANARY, J.D.; KAYE, J.P. Root exerts a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. **Nature**, London, v.396, p.570-572, 1998.

BOSATTA, E.; ÅGREN, G.I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.31, p.1889-1891, 1999.

BRITO, L.F.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M.; LA SCALA JUNIOR, N. Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, p.77-83, 2009.

CHEN, B.; LIU, S.; GE, J.; CHU, J. Annual and seasonal variations of Q₁₀ soil respiration in the sub-alpine forests of the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. **Soil Biology and Biochemistry**, v.42, p.1735-1742, 2010.

COELHO, M.M. **Estudo da respiração do solo em floresta de transição no sudoeste da Amazônia**. Dissertação (mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente. Cuiabá, 46f., 2005.

COSTA, J.B. **Caracterização e constituição do solo**. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1979. 527p.

CURIEL YUSTE, J.; BALDOCCHI, D.D.; GERSHENSON, A.; GOSLDSTEIN, A.; MISSON, L.; WONG, S. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture. **Global Change Biology**, Oxford, v.13, p.1-18, 2007.

CURIEL YUSTE, J.; JANSSENS, I.A.; CARRARA, A.; CEULEMANS, R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as temperature sensitivity. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.161-169, 2004.

DAVIDSON, E.A.; JANSSENS, I.A.; LUO, Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q₁₀. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, p.154-164, 2006.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P.P. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA)/Earth System Research Laboratory (ESRL)/Global Monitoring Division. Disponível em: <www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>, 2012.

EDWARDS, E.J.; BENHAM, D.G.; MARLAND, L.A.; FITTER, A.H.. Root production is determined by radiation flux in a temperate grassland community. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.209-227, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Levantamento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, 1982. 526p. (Boletim de Pesquisa 1).

ESPÍNDOLA, S.P.; FERREIRA, A.S. Adição de fósforo tem implicações sobre sensibilidade à temperatura (Q_{10}) da respiração microbiana do solo em sistema agrícola e mata nativa do Cerrado. In: FERTBIO, **Anais...**, 2012. Maceió, Alagoas, p.1-4, 2012.

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.33, p.155-165, 2001.

FANG, C.M.; SMITH, P.; MONCRIEFF, J.B.; SMITH, J.U. Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature. **Nature**, London, v.433, 57-59, 2005.

FIERER, N.; COLMAN, B.P.; SCHIMEL, J.P.; JACKSON, R.B. Predicting the temperature dependence of microbial respiration in soil: a continental-scale analysis. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.20, GB3026, p.1-10, 2006.

FIERER, N.; CRAINE, J. M.; MCLAUCHGHAN, K.; SCHIMEL, J.P. Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. **Ecology**, Tempe, Arizona, v.86, p.320-326, 2005.

FONTAINE, S.; BAROT, S. Size and functional diversity of microbe populations control plant persistence and long-term soil carbon accumulation. **Ecology Letters**, Oxford, v.8, p.1075-1087, 2005.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. et al. (eds). **Methods of soil analysis: Part 1**. SSSA Book Ser. 5. SSSA and ASA, Madison, WI, 1986.

HANSON, P.J.; EDWARDS, N.T.; GARTEN, C.T.; ANDREWS, J.A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, Dordrecht, Holanda, v.48, p.115-146, 2000.

- HARTLEY, I.P.; INESON, P. Substrate quality and the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.40, p.1567-1574, 2008.
- JANSSENS, I.A.; PILEGAARD, K. Large seasonal changes in Q_{10} of soil respiration in a beech forest. **Global Change Biology**, Oxford, v.9, p.911–918, 2003.
- JENKINS, M.E.; ADAMS, M.A. Respiratory quotients and Q_{10} of soil respiration in sub-alpine Australia reflect influences of vegetation types. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.43, p.1266-1274, 2011.
- KIRSCHBAUM, M.U.F. The temperature dependence of organic-matter decomposition still a topic of debate. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.38, p.2510-2518, 2006.
- KNORR, W.; PRENTICE, I. C.; HOUSE, J. I.; HOLLAND, E. A. Longterm sensitivity of soil carbon turnover to warming. **Nature**, London, v.433, p.298–301, 2005.
- KOCH, O.; TSCHERK, O.D.; KANDELER, E. Temperature sensitivity of microbial respiration, nitrogen mineralization, and potential soil enzyme activities in organic alpine soils. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.21, GB4017.
- KÖPPEN, W. **Die klimate der erde**. Walter de Gruyter, Berlin, Leipzig, 1923.
- LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G..T.; CORÁ, J..E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.32, p.1469-1473, 2000.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v.123, p.1-22, 2004.
- LI, Y.; XU, M.; SUN, O.J.; CUI, W. Effects of root and litter exclusion on soil CO_2 efflux and microbial biomass in wet tropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.36, p.2111-2114, 2004.
- LIU, L.X.; DONG, Y.S.; QI, Y.C.; ZHOU, L.X. Study on the temperature sensitivity of soil respiration in Xilin River of Inner Mongolia, China. **Chinese Journal of Environment Science**, Beijing, v.27, p.226-230, 2007.
- LLOYD, J.; TAYLOR, J.A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional Ecology**, Oxford, v. 8, p. 315-323. 1994.
- LUO, Y.; ZHOU, X. **Soil Respiration and the Environment**. Academic Press, 2006. 328 pp.
- MIELNICK, P.C.; DUGAS, W.A. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.32, p.221-228, 2000.

O'CONNELL, A. M. Microbial decomposition (respiration) of litter in eucalypt forests of southwestern Australia: an empirical model based on laboratory incubations. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 22, p. 153-160, 1990.

PINTO-JUNIOR, O.E.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A.C.; NOGUEIRA, J.S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, p.813-821, 2009.

REICHSTEIN, M.; KÄTTERER, T.; ANDRÉN, O.; CIAIS, P.; SCHULZE, E.D.; CRAMER, W.; PAPALE, D.; VALENTINI, R. Temperature sensitivity of decomposition in relation to soil organic matter pools, critique and outlook. **Biogeosciences**, [N.I.], v.2, p.317–321, 2005.

REY, A.; JARVIS, P. Modelling the effect of temperature on carbon mineralization rates across a network of European forest sites (FORCAST). **Global Change Biology**, Oxford, v.12, p.1894–1908, 2006.

SJÖRGERSTEN, S.; WOOKEY, P.A. Climatic and resource quality controls on soil respiration across a forest-tundra ecotone in Swedish Lapland. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.34, p.1633-1646. 2002.

THIERRON, V.; LAUDELOUT, H. Contribution of root respiration to total CO₂ efflux from the soil of a deciduous forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 26, p.1142-1148, 1996.

van't HOFF, J.H. **Lectures on theoretical and physical chemistry**. Part. I. Chemical dynamics. In: ARNOLD, E.(ed.), Academic Press, London. 1898. pp.224-229.

VARELLA, R.F.; BUSTAMANTE, M.; PINTO, A.; KISSELLE, K.; SANTOS, R.; BURKE, R.; ZEPP, R.; VIANA, L. Soil fluxes of CO₂, CO, NO, and N₂O from an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, Tempe, Arizona, v.14 (suplemento), p.S221-S231. 2004.

WANG, W.; FANG, J. **Soil respiration and the effects of human activities in global grasslands**. In: EcoSummit, Beijing, 2007, p.326-327.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v.7, p.667-677, 2001.

ZHENG, Z.M.; YU, G.R.; FU, Y.L.; WANG, Y.S.; SUN, X.M.; WANG, Y.H. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.41, p.1531-1540, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A classe textural do solo tem implicações qualitativas e quantitativas bastante significativas sobre as propriedades bioquímicas, microbianas e nas frações orgânicas do solo. Os indicadores microbianos e de enzimas utilizados neste trabalho foram sensíveis ao sistema de uso e podem ser usadas para definir o funcionamento e qualidade do solo, sendo inclusive mais indicados do que a fração orgânica devido aos valores de detecção.

As emissões de CO₂ foram independentes da textura do solo ao longo do ano de 2012, mas variaram em relação ao sistema de uso, o qual tem grande influência e define o perfil microbiano e bioquímico do solo. A umidade gravimétrica do solo e a temperatura do solo, quando avaliados em conjunto e em modelos bidimensionais, explicam melhor a influência exercida sobre a respiração do solo, principalmente em áreas em que os dados sofrem grande variação durante o ano, como a pastagem do solo de textura média.

A determinação do Q₁₀ depende do componente biológico que se está avaliando e existem muitas variáveis que podem afetar a modelagem na estimativa de Q₁₀. Essas modelagens necessitam ainda ser ampliadas a outros agroecossistemas e solos de texturas contrastantes para confirmar os valores de Q₁₀ em uma escala mais ampla, devido à importância do bioma Cerrado e as áreas agrícolas dessa região.