



Fluxo de CO₂ e suas correlações com os atributos do solo na reforma do canavial⁽¹⁾

Camila Viana Vieira Farhate⁽²⁾; Zigomar Menezes de Souza⁽³⁾; Allan Challes Mendes de Sousa⁽²⁾; Ana Paula Guimarães Santos⁽²⁾; Talita Fredericci⁽⁴⁾; João Luís Nunes de Carvalho⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

⁽²⁾ Doutorandos em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Campinas; Campinas, São Paulo; camila.vieira@feagri.unicamp.br; ⁽³⁾ Professor Associado da Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas; ⁽⁴⁾ Graduanda em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual de Campinas; ⁽⁵⁾ Pesquisador do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol.

RESUMO: O objetivo desse trabalho foi determinar as correlações existentes entre os atributos físico-químicos do solo e o FCO₂ durante a reforma do canavial. A condução dos experimentos ocorreu em duas áreas experimentais nas usinas Iracema (solo argiloso) e Santa Fé (solo arenoso). Foram realizadas avaliações periódicas nas áreas visando acompanhar modificações no fluxo de CO₂ e nos atributos químicos, físicos do solo e posteriormente foram estabelecidas correlações de Pearson entre o FCO₂ acumulado e os atributos estudados. Na área de solo argiloso o teor de água no solo e a disponibilidade de nutrientes aos microorganismos exerceram maior influência no FCO₂. Na área de solo arenoso, o FCO₂ do solo foi influenciado por atributos físicos relacionados direta ou indiretamente ao transporte do gás do interior do solo até a superfície.

Termos de indexação: Conservação do carbono, preparo do solo, emissão de CO₂.

INTRODUÇÃO

O Fluxo de CO₂ (FCO₂) do solo faz parte do balanço global do carbono nos sistemas terrestres, onde ocorrem entradas via fotossíntese e perdas provenientes da respiração radicular, da atividade dos microrganismos e da mineralização da matéria orgânica do solo (Cerri et al., 2004; Carlisle et al., 2006).

O preparo do solo para implantação do canavial representa uma etapa crítica, uma vez que grande quantidade de carbono é perdida na forma de CO₂ para a atmosfera, pois cria condições mais favoráveis para a oxidação e mineralização do carbono orgânico no solo, por meio do aumento da aeração do solo, da desagregação do solo e do maior contato entre resíduo do solo (La Scala et al., 2008; Schwartz et al., 2010; Bilandzija et al., 2014).

Logo, compreender os atributos do solo que afetam o FCO₂ durante esse período é fundamental para mitigação das emissões de CO₂ do solo e

conservação do carbono no solo.

Dessa maneira, o objetivo desse trabalho foi determinar as correlações existentes entre os atributos físico-químicos do solo e o FCO₂ durante a reforma do canavial.

MATERIAL E MÉTODOS

A condução dos experimentos ocorreu em duas áreas experimentais nas usinas Iracema (solo argiloso) e Santa Fé (solo arenoso), localizadas nos municípios de Iracemápolis e Nova Europa, respectivamente (Tabela 1).

A escolha das áreas foi relacionada às usinas estarem localizadas em condições edafoclimáticas distintas e, apresentarem diferentes tipos de solo, o que poderia influenciar no FCO₂.

A emissão foi avaliada com auxílio de uma câmara de solo fabricada pela companhia LI-COR, Nebraska, EUA, 24 horas após as operações dos preparos do solo para e plantio da cana-de-açúcar em ambas as áreas sempre no horário entre 8 e 10 horas da manhã.

O FCO₂ do solo acumulado durante 97 dias de avaliação foram estimadas pelo método da integral da área abaixo da curva de emissão versus o tempo. A temperatura do solo foi avaliada utilizando o sensor de temperatura, que é parte integrante do sistema do LI-6400.

O teor de água no solo foi avaliado simultaneamente a medição do FCO₂ por meio de um aparelho TDR. Fabricado pela Delta-T Devices, Cambridge, UK.

A densidade e a porosidade do solo foram calculadas segundo metodologia da Embrapa (2011). A determinação da resistência do solo à penetração foi realizada com auxílio de um penetrômetro de impacto (Stolf et al., 1983).

O Cálculo da resistência tênsil do agregado foi realizado conforme descrito por Dexter & Kroesbergen (1985).

Foram realizadas determinações do pH do solo



(CaCl_2 0,01 mol L^{-1}), cátions trocáveis (Al^{+3} , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), fósforo disponível (resina), carbono orgânico (oxidação por via úmida), acidez potencial, CTC potencial e saturação de bases de acordo com metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Os dados foram inicialmente avaliados em relação à hipótese de normalidade pelo teste de Kolmogorov Smirnov e posteriormente foram estabelecidas correlações de Pearson entre os atributos estudados e o FCO_2 acumulado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na área de solo argiloso, o FCO_2 acumulado apresentou correlações diretas com a umidade do solo e o V% ($r = 0,63$ e $r = 0,62$ respectivamente) e inversa entre com o teor de alumínio no solo ($r = -0,60$) (Tabela 2).

Esses resultados indicam que o teor de água no solo, variou dentro de um intervalo em que seu aumento resultou em maior atividade microbiana sem, contudo, limitar a oxigenação do solo. Correlações diretas entre a umidade e o FCO_2 foram encontrados em outros estudos sob diferentes condições de solo (Corradi et al., 2013; Teixeira et al., 2013).

A escassez de precipitações durante a realização do experimento e o baixo conteúdo de argila na área de solo arenoso ocasionou umidade do solo 50% inferior à área de solo argiloso (Figuras 1). Tal fato, associado com o menor conteúdo de matéria orgânica do solo, provavelmente foram os fatores limitantes da emissão de CO_2 na área de solo arenoso.

Tanto o teor de alumínio trocável como a saturação por bases, estão associados a disponibilidade de nutrientes aos microorganismos. Um índice V% baixo significa que há pequenas quantidades de cátions disponíveis, como Ca, Mg e K, saturando as cargas negativas dos colóides as quais estão sendo neutralizada por hidrogênio e alumínio (Ronquim, 2010).

Os coeficientes de correlações lineares significativas encontrados entre o FCO_2 e V% e teor de alumínio no solo indicam que, de forma geral, pequenos desequilíbrios nutricionais do solo foram capazes de reduzir o FCO_2 na área de solo argiloso.

Na área de solo arenoso a macroporosidade apresentou correlação linear direta com o FCO_2 ($r = 0,62$) e a microporosidade do solo apresentou correlação inversa ($r = -0,72$) altamente significativa com o FCO_2 , mostrando a influência da distribuição do tamanho de poros no FCO_2 . Além disso, os atributos densidade do solo e resistência do solo à penetração também apresentaram correlação significativa ($r = -0,52$ e $r = 0,62$, respectivamente)

com o FCO_2 e estão diretamente relacionados à porosidade do solo (Tabela 2).

Segundo Fang & Moncrief (1999), a produção e transporte de CO_2 no solo são dois processos que regem o fluxo de CO_2 a partir da superfície do solo e a distribuição espacial do CO_2 no interior do solo.

A porosidade não só viabiliza o armazenamento e o transporte do gás, como também a compactação do solo, ou seja, a alteração nos percentuais de macro e microporosidade, afeta as raízes dos vegetais e as atividades microbianas, responsáveis pela respiração do solo (Goutal et al., 2012).

A densidade do solo apresenta influência na porosidade total e distribuição dos tamanhos dos poros (Tormena et al., 1998). Altos valores de densidade do solo, pode limitar oxigenação no solo devido à diminuição do número de poros, o que pode ser um fator limitante para a atividade microbiana e o FCO_2 do solo subsequentes (Bicalho et al., 2014). Brito et al. (2009), relataram que a emissão de CO_2 do solo foi maior na área que apresentou menor densidade do solo e resistência do solo à penetração, maior quantidade de agregados e macroporosidade do solo, onde a macroporosidade viabiliza o fluxo de O_2 e CO_2 do solo. Epron et al. (2004) encontraram correlação negativa da densidade do solo com a emissão de CO_2 em solo de floresta na Guiana.

A resistência tênsil do agregado está diretamente ligada à porosidade do solo e conseqüentemente as emissões de CO_2 . O aumento de matéria orgânica no solo resulta em maior porosidade do agregado e aumento no número e na força das ligações entre as partículas, ocasionando aumento da resistência tênsil (TORMENA et al., 2008).

No solo arenoso os maiores valores de correlação foram encontrados para a microporosidade do solo, possivelmente a variável com maior influência sobre a FCO_2 neste estudo, seguido da macroporosidade, resistência tênsil do agregado e densidade do solo (Tabela 2). Logo, a área que apresentou menor microporosidade, maior macroporosidade, maior resistência tênsil do agregado e menor densidade do solo foi aquela que apresentou o maior FCO_2 .

Corroborando com esses resultados Bicalho et al. (2014), em estudo sob a variabilidade espacial da emissão de CO_2 e atributos do solo em áreas de cana-de-açúcar colhida mecanicamente observaram que o coeficiente de correlação linear entre a emissão de CO_2 e os atributos do solo foi significativa ($p < 0,05$) para as variáveis relacionadas à porosidade do solo.

Observou-se ainda no solo arenoso, correlação direta entre o FCO_2 e os teores de P trocável do solo ($r = 0,58$) (Tabela 2). Nordgren (1992) encontrou uma forte correlação ($r = 0,99$; $p < 0,01$) entre a taxa



de respiração do solo e a adição de fósforo no solo. O autor concluiu que a falta deste elemento no solo pode impedir o crescimento dos microrganismos.

CONCLUSÕES

Na área de solo argiloso o teor de água no solo e a disponibilidade de nutrientes aos microorganismos exerceram maior influência no FCO_2 .

Na área de solo arenoso, o FCO_2 do solo foi influenciado por atributos físicos relacionados direta ou indiretamente ao transporte do gás do interior do solo até a superfície.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a Fundação AGRISUS - Agricultura Sustentável pelo apoio financeiro concedido, as Usinas Iracema e Santa Fé pelo fornecimento das áreas de estudo.

REFERÊNCIAS

BICALHO, E. S. et al. Spatial variability structure of soil CO_2 emission and soil attributes in sugarcane area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 189:206-215, 2014.

BILANDZIJA, D.; ZGORELEC, Z & KISIĆ, I. Soil carbon loss by soil respiration under different tillage treatments. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 79:1-6, 2014.

BRITO, L. F. et al. Soil CO_2 emission of sugarcane fields as affected by topography. *Scientia Agricola*, 66:77-83, 2009.

CARLISLE, E. A.; STEENWERTH, K. L. & SMART, D. R. Effects of land use on soil respiration: conversion of oak woodlands to vineyards. *Journal of Environmental Quality*, 35:1396-1404, 2006.

CERRI, C. E. P. et al. Assessment of soil property spatial variation in an amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma*, 123:51-68, 2004.

CORRADI, M. M. et al. Crop residues on short-term CO_2 emissions in sugarcane production areas. *Engenharia Agrícola*, 33:699-708, 2013.

DEXTER, A. R. & KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31:139-147, 1985.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 3. Ed.

Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011, 230 p.

EPRON, D. et al. Spatial and temporal variations of soil respiration in a eucalyptus plantation in Congo. *Forest Ecology and Management*, 202:149-160, 2004.

FANG, C. & MONCRIEF, J. B. A model for soil CO_2 production and transport 1: model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95:225-236, 1999.

KEMPER, W. D. & CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Part 1.* Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.

LA SCALA JR., N. et al. Short-temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. *Soil and Tillage Research*, 99:108-118, 2008.

NORDGREN, A. A method for determining microbially available n and p in an organic soil. *Biology and Fertility of Soils*, 13:195-199, 1992.

RAIJ, B. et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais / Carlos Cesar Ronquim. – Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. p.30.

STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V.L. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF;. STAB – Açúcar.Alcool Subprod., 3:18-23, 1983.

SWANSTON, C. W. et al. Carbon dynamics during a long-term incubation of separate and recombined density fractions from seven forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 34:1121-1130, 2002.

TEIXEIRA, L. G. et al. Soil and crop residue C- CO_2 emission under tillage systems in sugarcane-producing areas of southern Brazil. *Scientia Agricola*, 70:327-335, 2013.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. & LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. & ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:33-42, 2008.

WATTS, C. W. & DEXTER, A. R. Soil friability: Theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. *European Journal of Soil S Conspectus Scientificus*, Zagreb, 79:1-6, 2014.

Tabela 1 – Localização e características edafoclimáticas das áreas avaliadas nas áreas experimentais localizada nos municípios de Iracemápolis (Usina Iracema) e Nova Europa (Usina Santa Fé).

Características	Usinas	
	Iracema	Santa Fé
Coordenadas geográficas	22° 34'S e 47° 31'O	21°46'S e 48° 33'O
Altitude (m)	608	490
Precipitação média anual (mm)	1.420	1.311
Classificação climática de Köppen	Cfa	Aw
Tipo de solo	Latossolo Vermelho eutroférrico	Latossolo Vermelho-Amarelo álico

Tabela 2 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre a emissão de CO₂ e atributos do solo nos diferentes sistemas de manejos nas áreas experimentais com solo argiloso (Iracemápolis) e arenoso (Nova Europa).

Variável	Solo Argiloso	Solo Arenoso	
Física	Us	0,63**	0,10
	Ts	-0,37	-0,32
	Ds	-0,24	-0,52*
	Macro	-0,25	0,62*
	Micro	0,19	-0,72**
	RP	0,50	-0,35
	RT	-0,16	0,62*
Química	pH	0,31	0,45
	Al	-0,60*	-0,03
	Ca	0,34	0,16
	Mg	0,26	0,42
	K	0,01	0,31
	P	0,06	0,58*
	CO	0,30	0,31
	CTC	-0,22	0,40
	V%	0,62*	0,41

FCO₂ = fluxo de CO₂ acumulado; CBM = carbono da biomassa microbiana ($\mu\text{g C g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); Ds = densidade do solo (kg m^{-3}); DMP = diâmetro médio ponderado (mm); PT = porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Macro = macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Micro = microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); RP = resistência do solo à penetração (MPa); RT = resistência tênsil do agregado (kPa); pH em CaCl₂; Al= Aluminio trocável Ca = cálcio trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Mg = magnésio trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); K = potássio trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}); CO = carbono orgânico (g dm^{-3}); CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$); V = saturação por bases (%); CV = coeficiente de variação (%). Letras minúsculas comparam a utilização da rotação de culturas, dentro de cada sistema de preparo do solo estudado. Letras maiúsculas comparam os sistemas de preparo do solo, dentro da utilização de rotação de culturas, para cada tratamento estudado, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. *Valores significativos do coeficiente de correlação ($p < 0,05$); ** Valores significativos do coeficiente de correlação.

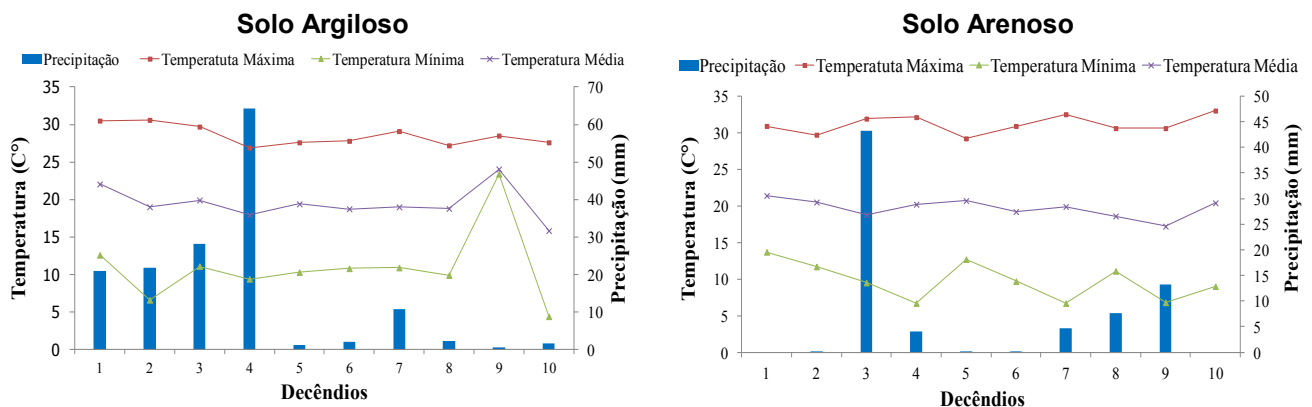


Figura 1. Temperatura média, máxima, mínima (°C) e precipitação (mm) durante o período de avaliação da emissão de CO₂ nas áreas experimentais de solo argiloso e solo arenoso.