UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO_2, TEMPERATURA E UMIDADE EM LATOSSOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE COLHEITA MANUAL COM QUEIMA E MECANIZADA

Alan Rodrigo Panosso
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
Setembro de 2006

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO_2, TEMPERATURA E UMIDADE EM LATOSSOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE COLHEITA MANUAL COM QUEIMA E MECANIZADA

Alan Rodrigo Panosso

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

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

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Setembro de 2006

Panosso, Alan Rodrigo
P195v Variabilidade espacial da emissão de $co_{2,}$ temperatura e umidade em latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistemas de colheita manual com queima e mecanizada / Alan Rodrigo Panosso. – – Jaboticabal, 2006
iii, 53 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2006
Orientador: Newton La Scala Júnior
Banca examinadora: José Marques Júnior, Marisa de Cássia Piccolo
Bibliografia

1. Respiração do solo. 2. Fluxo de CO_2 do solo. 3. Geoestatística. 4. Cana-de-açúcar – manejo. I. Título. II. Jaboticabal - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.425:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ALAN RODRIGO PANOSSO – Filho de Gino Panosso e Deuci Terezinha Marcelino de Oliveira Panosso, nasceu em Ribeirão Preto, São Paulo no dia 29 de setembro de 1980. Em março de 2000 ingressou no Curso de Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. Foi bolsista de iniciação científica pelo programa PIBIC/CNPq durante o período de agosto de 2001 até agosto de 2004. Iniciou em março de 2005 o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. No mês de setembro de 2006 submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovado como Mestre em Agronomia.

Salmo 23

O Senhor é meu pastor, nada me faltará.
Deitar-me faz em verdes pastos, guia-me
mansamente a águas tranqüilas. Refrigera
a minha alma; guia-me pelas veredas da
justiça por amor de seu nome.

Ainda que eu andasse pelo vale das
sombras da morte, não temerei mal algum,
porque Tu estás comigo; a tua vara e o
teu cajado me consolam.

Preparas uma mesa perante mim na
presença dos meus inimigos, unges a
minha cabeça com óleo, o meu cálice
transborda.

Certamente que a bondade e a
misericórdia me seguirão todos os dias da
minha vida e habitarei na casa do Senhor
por longos dias.

"Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito...
Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus, não somos o que éramos..."

Martin Luther King.

Aos meus amados pais
Gino Panosso e
Deuci T. M. de Oliveira Panosso

DEDICO

À amada irmã Lisliane Panosso, e aos bondosos avós Herophilo Marcelino de Oliveira, Elsa Char de Oliveira e Maria Maximo Panosso.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus e ao nosso Senhor Jesus, fontes inesgotáveis de força e de esperança.

Aos orientadores Newton La Scala Júnior e Gener Tadeu Pereira, por todos os ensinamentos, paciência e amizade nesses anos de convívio.

Aos professores José Marques Júnior, Marisa de Cássia Piccolo, Ely Nahas e Dilermando Perecin pelas valiosas sugestões que em muito enriqueceram este trabalho.

Ao professor Clovis Alberto Volpe, pela disponibilizar os dados da Estação Meteorológica utilizados no presente estudo.

Ao meu primo Sergio Geraldini Marcelino de Oliveira, pelo eterno bom humor e por ser um verdadeiro irmão.

À querida amiga Eva Aparecida de Oliveira, pela ajuda com as correções ortográficas do texto, pela grande amizade e incentivo.

Ao amigo Ademilson Soares de Oliveira, grande músico e compositor, companheiro de todas as horas e parceiro musical.

Aos grandes amigos Norival e Liziane por toda a ajuda e parceria nos trabalhos desenvolvidos no campo e no laboratório.

Á todos os funcionários do departamento de Ciências Exatas: Carlão, Shirley, Juliana, Vanessa e Zezé.

Ao Engenheiro Agrônomo Marcos Marcari pela disponibilidade de áreas e dados referentes às áreas da Fazenda Santa Bárbara.

À direção da Fazenda Santa Isabel.

Ao programa de Pós Graduação em Ciência do Solo por acreditar em minha capacidade.

Ao Prof. William Natale, por toda atenção e compreensão.

À CAPES pela ajuda financeira.

SUMÁRIO

Página

I. INTRODUÇÃO 1
II. REVISÃO DE LITERATURA 4
III. MATERIAL E MÉTODOS 13
3.1. Área Experimental 13
3.2. Medição da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo 18
3.3. Análise da dependência espacial 23
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO 29
V. CONCLUSÕES 43
VI. REFERÊNCIAS 44

VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO_2, TEMPERATURA E UMIDADE EM LATOSSOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE COLHEITA MANUAL COM QUEIMA E MECANIZADA

RESUMO – A caracterização da variabilidade espacial de atributos do solo de áreas agrícolas é uma tarefa importante, pois somada à influência dos aspectos pedológicos temos uma grande contribuição do manejo. Neste trabalho foi determinada a estrutura da variabilidade espacial da emissão de CO_2, temperatura e umidade em Latossolo Vermelho eutroférrico em três localidades sob cultivo da cana-de-açúcar em sistemas de manejos de cana crua e de cana queimada, no nordeste do Estado de São Paulo. As maiores emissões foram observadas no local sob manejo de cana queimada, num valor médio de 2,05 µmol m^{-2} s^{-1}, porém dependência espacial na emissão de CO_2 foi encontrada somente nas áreas sob manejo de cana crua. Os modelos de semivariância foram exponenciais, esféricos e gaussianos sendo a dependência espacial classificada como forte ou moderada em todos os casos. Os mapas de krigagem da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo sob manejo de cana queimada mostraram correspondência à declividade do terreno, com as maiores emissões e temperaturas e menores umidades localizadas na parte mais alta do local estudado. Os resultados indicaram correlação linear entre a emissão de CO_2 com a temperatura e com a umidade do solo somente no local com manejo de cana queimada, e não no sistema de cana crua, onde a presença de palhada na superfície certamente impede a ação direta da radiação solar e o escoamento de chuvas.

Palavras-chave: respiração do solo, fluxo de CO_2 do solo, geoestatística, manejo da cana-de-açúcar, temperatura do solo, umidade do solo.

SPATIAL VARIABILITY OF CO_2 EMISSION, TEMPERATURE AND MOISTURE OF A LATOSOL CROPPED WITH SUGAR CANE UNDER SLASH BURNING AND MECHANIZED HARVEST SYSTEMS

SUMMARY – The characterization of spatial variability in agricultural soils is an important task, because added to the pedological aspects the soil management also influences such variability. In this work the spatial variability structure of a bare Dark Red Latosol CO_2 emission, temperature and moisture were determined in three locations used with sugar cane crop culture, submitted to slash and burn or no till management systems in northeastern of São Paulo State. The highest emissions were observed in the slash and burn plot, with mean value of 2,05 µmol m^{-2} s^{-1}, but no spatial variability structure was seen for the CO_2 emission in this plot. The variability models were exponential, spherical and gaussian, being the spatial dependence classified as strong and moderate in all the cases. In the slash and burn system, the kriging maps of soil CO_2 emission, temperature and moisture had shown similarities to the land declivity, with the higher emissions and temperatures and the lower moisture values located in the highest parts of the studied place. The results indicated linear correlation between soil emission with temperature and moisture only in the slash and burn plot, and not in the no-till plots where crop residues were left in soil surface and certainly modified the direct action of the solar radiation and the rain draining.

Keywords: soil respiration, soil CO_2 flux, geostatistic, sugar cane management, soil temperature, soil moisture.

I. INTRODUÇÃO

A energia solar chega até a superfície da terra na forma de radiação de ondas curtas. Tal radiação é absorvida, aquece a superfície terrestre e é enviada para o espaço na forma de radiação infravermelha (ondas longas). Gases como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), juntamente com o vapor de água (H_2O), são chamados gases do efeito estufa, representam cerca de 1% da atmosfera, sendo os responsáveis pela absorção da radiação infravermelha, impedindo que esta seja enviada para o espaço, espalhando tal radiação de volta para a superfície da terra. O efeito estufa adicional, com relação àquele que prevaleceu a 150 anos atrás, é um acréscimo na radiação infravermelha enviada pela atmosfera para a superfície do planeta, decorrente de um aumento na concentração atmosférica dos gases estufa. O dióxido de carbono é considerado o gás estufa mais importante do efeito estufa adicional, uma vez que é responsável por 60% do aquecimento global, sendo o gás mais emitido devido às atividades antrópicas como a queima de combustíveis fósseis, a agricultura e as mudanças no uso da terra (corte, queima de biomassa vegetal e decomposição do carbono do solo).

De acordo com o relatório Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, na década de 1990 1,6 ± 0,8 bilhões de toneladas de carbono foram emitidas por ano para a atmosfera devido a atividades diversas que envolvem o uso e o manejo dos solos, especialmente atividades agrícolas. Pode-se notar, pelos valores apresentados, que a incerteza nesse balanço é grande, devido a complexidade do tema e da falta de conhecimento de como as diversas práticas de uso e manejo do solo afetam essas emissões.

Em âmbito global, a agricultura aliada às mudanças no uso da terra é responsável por 22% do total de CO_2 enviado por ano para a atmosfera, sendo o setor industrial o que mais emite carbono. No Brasil o quadro é diferente, o setor agropecuário aliado às mudanças no uso da terra é responsável por 75% do total de CO_2 emitido pelo país. A principal estratégia para diminuir o fenômeno do aquecimento

global seria diminuir as emissões e aumentar a absorção de CO_2 através do seqüestro de carbono. Assim, os solos são fundamentais nessa estratégia uma vez que, dependendo do uso e manejo, podem ser uma importante fonte ou sumidouro de carbono.

A produção de CO_2 no interior do solo é relacionada às atividades biológicas, incluindo a respiração das raízes e a decomposição da matéria orgânica do solo pela atividade microbiana. A emissão de CO_2 é resultado da interação dos processos de produção e transporte desse gás no interior do solo. Tais processos são fortemente influenciados pelas condições de temperatura e umidade do mesmo.

A principal cultura agrícola do Brasil no momento, a cana-de-açúcar, possui duas formas de manejo, cana queimada e cana crua. No Estado de São Paulo, 3,5 milhões de hectares são cultivados com cana-de-açúcar, mas em apenas 10% desse total é adotada a prática de manejo que evita queima da cana e adiciona grandes quantidades de resíduos à superfície do solo por ano. Portanto é de grande importância entender como a substituição na prática da queimada pelo cultivo de cana crua altera a dinâmica do carbono em áreas agrícolas, compreendendo como a emissão de CO_2 do solo varia espacialmente em cada um desses sistemas.

Dados das ciências do solo são tipicamente distribuídos no espaço e/ou tempo e a análise geoestatística fornece uma grande variedade de técnicas estatísticas para incorporar as coordenadas espaciais e temporais das observações no processamento dos dados. A variabilidade espacial pode ser determinada através de modelos de semivariograma que têm sido aplicados na determinação da variabilidade de uma série de propriedades do solo, fornecendo assim uma determinação mais acurada do que aquela fornecida quando se assume a independência entre as amostras do campo. A despeito de todos os esforços, ainda são poucos os trabalhos que caracterizaram a variabilidade da emissão de CO_2 de solos utilizando técnicas de análise de semivariância, especialmente relacionando essa variabilidade àquela da temperatura e umidade do solo, possíveis fatores influentes dessa emissão.

Em 1997, na Terceira Conferência das Partes da Convenção do Clima, ocorrida em Quioto, Japão, estabeleceu-se compromissos por parte dos países desenvolvidos

de atingir uma meta de redução média nas emissões de gases do efeito estufa de 5,2% durante o período de 2008 – 2012, em relação ao ano de 1990. O Brasil mesmo não pertencendo ao grupo dos principais países desenvolvidos, responsáveis pela mudança mais recente na composição da atmosfera, tem sido beneficiado com o Protocolo de Quioto. Isso porque o protocolo estimula a transferência de recursos financeiros de países desenvolvidos para países como o Brasil, para implantação de projetos classificados dentro dos chamados Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que visa estimular a redução da emissão de gases do efeito estufa no planeta inteiro. Atividades agrícolas diversas poderiam estar sendo beneficiadas com projetos MDL, ainda não viáveis no momento por dificuldades metodológicas de se garantir que a redução o seqüestro de gases do efeito estufa realmente ocorre. Assim, características como variabilidade espacial e temporal da emissão de CO_2 do solo, bem como a relação da emissão com propriedades do solo, são assuntos de grande interesse científico no momento, pois estão suportando modelos de previsão da emissão desse gás em grandes áreas.

O objetivo do trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial da emissão de CO_2 em latossolos utilizados para o cultivo da cana-de-açúcar nos sistemas de cana crua, colheita mecanizada e cana queimada, colheita manual, relacionando as variações espaciais da temperatura e umidade do solo com a estrutura da dependência espacial da emissão.

II. REVISÃO DE LITERATURA

A temperatura média do nosso planeta é determinada pelo balanço entre a energia solar absorvida pela superfície da Terra e a energia que é emitida por esta de volta para o espaço na forma de radiação infravermelha. Todos os corpos com temperatura acima de -273 ºC são fontes de radiação eletromagnética de espectro contínuo, sendo a intensidade e a característica espectral dessa radiação dependentes da temperatura do corpo em questão (BOEKER & VAN GRONDELLE, 1995). O sol é a fonte primária de energia para todos os processos terrestres e sua temperatura superficial é de aproximadamente 5.700 ºC, a maior intensidade de radiação deste corpo é ao redor de 0,58 µm, região de ondas curtas. Em contraste, a maior parte dos objetos na superfície de nosso planeta está numa temperatura próxima a 27 ºC, nesta temperatura a maior intensidade de radiação é próxima de 9,6 µm, correspondente à região de ondas longas do infravermelho (BOEKER & VAN GRONDELLE, 1995). Nota-se que a característica espectral da radiação que entra no planeta, proveniente do sol, é bem diferente daquela que é emitida pela superfície de nosso planeta de volta para ao espaço.

A atmosfera terrestre interage simultaneamente com a radiação solar e a radiação emitida pela superfície do nosso planeta. A atmosfera é constituída por uma mistura de gases com predominância de nitrogênio (21%) e oxigênio (78%), contudo, são os chamados gases do efeito estufa os responsáveis pelo balanço de radiação da Terra. Os principais gases do efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Por sua natureza química e principalmente estrutura molecular, tais gases absorvem uma fração significativa da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, em comprimentos de onda principalmente em torno de 8,0 e 14,0 µm (ondas longas). A absorção e re-emissão de ondas longas por esses gases dificultam o escape da energia emitida pela superfície do planeta, aprisionando-a na atmosfera terrestre próxima à superfície. Este efeito, denominado de efeito estufa, faz com que a superfície do planeta apresente uma

temperatura média em torno de 27 ºC. Se não fosse pelo efeito estufa, a temperatura média do planeta seria de aproximadamente -18 ºC, condições onde seria improvável a existência da vida.

Nos últimos 150 anos o aumento exacerbado na concentração atmosférica dos gases do efeito estufa tem contribuído para um acréscimo na quantidade de radiação infravermelha emitida de volta para a superfície do planeta, causando assim um aumento anômalo na temperatura da Terra, o chamado efeito estufa adicional em relação àquele que prevaleceu a 150 anos atrás (RASCHKE, 2001). De acordo com o relatório Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (IPCC, 2001), a melhor estimativa da mudança na temperatura global indica um aumento de 0,6 ± 0,2 ºC desde o final do século XIX, sendo a década de 90 considerada a mais quente no último milênio.

O aumento na concentração atmosférica dos gases do efeito estufa é devido às ações antrópicas, principalmente após o período da revolução industrial. Entre os anos de 1850 e 1999, a concentração atmosférica de CO_2 aumentou de 280 para 367 ppmv (parte por milhão volume), a concentração de CH_4 aumentou de 700 a 1745 ppbv (partes por bilhão volume) e a concentração de N_2O aumentou de 270 a 314 ppbv (IPCC, 2001). A contribuição de cada um desses gases para o aquecimento global é dado pelo índice chamado PAG, Potencial de Aquecimento Global, que tem o CO_2 como referência (PAG = 1) para a representação do potencial de aquecimento global dos demais gases. A molécula de CH_4 na atmosfera terrestre apresenta um PAG igual a 21 e a molécula de N_2O igual a 310 (IPCC, 1996), ou seja, o CH_4 é considerado 21 vezes mais eficiente em absorver a energia infravermelha que o CO_2, cada tonelada de CH_4 emitida para a atmosfera, equivale à emissão de 21 toneladas CO_2. Apesar de apresentar o menor potencial de aquecimento global, o CO_2 foi o gás que apresentou o maior aumento na concentração atmosférica nos últimos tempos, sendo considerado assim o principal responsável pelo efeito estufa adicional.

As atividades como a queima de combustível fóssil, a queima de florestas e a perda da quantidade de húmus do solo são as responsáveis por esse aumento na concentração de CO_2 (HOUGHTON et al., 1992). Estima-se que a média anual do envio

de carbono para a atmosfera resultante da queima de combustíveis fósseis na década de 1990, foi de 6,3 ± 0,4 bilhões de toneladas (IPCC, 2001), sendo 1,6 ± 0,8 bilhões de toneladas devido a atividades diversas que envolvem o uso dos solos (LAL, 2004). Tais valores evidenciam uma incerteza de como as diversas atividades de uso e manejo dos solos contribuem com o aumento da emissão de carbono para a atmosfera.

Os cinco principais reservatórios de carbono são: os oceanos, os reservatórios geológicos, os solos, a atmosfera e os organismos. O estoque de carbono dos solos é estimado em aproximadamente 2.500 bilhões de toneladas e a respiração do solo contribui com cerca de 55 a 75 bilhões de toneladas de carbono por ano enviadas para a atmosfera (KOLCHUGINA et al., 1995; LAL et al., 1995). A emissão de CO_2 do solo é considerada a segunda maior componente do ciclo global do carbono sendo importante nas variações climáticas (RETH et al., 2005), pois pequenas variações no balanço da respiração do solo podem afetar a concentração de CO_2 na atmosfera, alterando a temperatura média anual do planeta bem como a quantidade e distribuição de chuvas. Dependendo do tipo de uso e manejo os solos podem ser uma importante fonte ou sumidouro de carbono para a atmosfera (LAL et al., 1995; BERNOUX et al., 2005) neste contexto medidas mais precisas e acuradas de fluxo de CO_2 do solo são essenciais em estudos cujo objetivo é avaliar o balanço do carbono de um ecossistema (KOLCHUGINA et al., 1995; FANG et al., 1998). A resposta da respiração do solo e da dinâmica do carbono tem sido estudada em prática agrícola como a irrigação (CALDERÓN & JACKSON, 2002; EVE et al., 2002; WICHERN et al., 2004; LEE et al., 2004) e o preparo do solo (REICOSKY & LINDSTROM, 1993; ROCHETTE & ANGERS, 1999; BAYER et al., 2000; PRIOR et al., 2000; LA SCALA et al., 2005).

O CO_2 emitido pelo solo é produzido essencialmente pela respiração das raízes, decomposição da matéria orgânica e atividade microbiana. No caso de solos desprovidos de vegetação, tal emissão não provém da respiração das raízes, sendo a produção deste gás no interior do solo totalmente relacionada à atividade microbiana. Além da produção de CO_2 pelas raízes e pela ação dos microorganismos, faz parte desse processo de emissão o transporte do gás do interior do solo até à superfície que

é governado pela equação de difusão (RIBEIRO, 2005). Esses processos são influenciados, em primeira ordem, pela temperatura e umidade do solo, atributos com grande variabilidade temporal e espacial que tem resposta direta às condições climáticas e topográficas do local onde o gás está sendo produzido (BEVEN & KIRKBY, 1979; WESTERN et al., 1999; KANG et al., 2000). As menores taxas anuais de respiração do solo são encontradas nos ecossistemas de clima temperado e árido, e as maiores taxas ocorrem nos ecossistemas tropicais, onde a temperatura e umidade disponíveis são maiores no ano (RAICH & SHLESINGER, 1992). A Atividade microbiana é dependente da temperatura do solo, a taxa de produção e fluxo de CO_2 do solo aumenta entre 1,5 a 3 vezes para cada 10 ºC num aumento da temperatura entre 0 e 50 ºC, já a umidade do solo afeta a emissão de CO_2 do solo através da difusão dos gases e atividade microbiana (LAL et al., 1995).

A maioria das propriedades do solo apresenta dependência espacial, isso significa que os valores assumidos por uma determinada variável numa posição definida na área de estudo variam de acordo com a direção e a distância de separação entre as amostras vizinhas. Como conseqüência, medidas mais próximas tendem a ser mais parecidas do que valores observados em locais mais distantes. Neste contexto as observações não podem ser consideradas independentes, as análises baseada apenas nas estatísticas clássicas tornam-se inadequadas, e um tratamento estatístico mais avançado é requerido (WEBSTER & OLIVER 1990). Em 1951, na África do Sul, D. G. Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, observou que não conseguia encontrar sentido nas variáveis se não levasse em conta a distância de separação entre as amostras. A partir de 1963, Matheron, baseando-se nas observações de Krige, desenvolve a “teoria das variáveis regionalizadas”. Essa teoria forma a base do procedimento de análise e estimativa das variáveis espacialmente dependentes, denominada geoestatística. A geoestatística é construída a partir de conceitos e métodos estatísticos para o estudo da variabilidade espacial de fenômenos, quando as informações coletadas são georeferenciáveis e apresentam correlação espacial, (GOTWAY CRAWFORD & HERGERT, 1997). Segundo TRANGMAR et al. (1985) e VIEIRA (2000) a geoestatística é baseada na teoria das variáveis regionalizadas, uma

variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples. Essa teoria leva em conta as componentes aleatórias e estruturais da distribuição espacial das variáveis, fornecendo ferramentas quantitativas para a sua descrição e estimativas sem tendência.

A variabilidade espacial das propriedades do solo ocorre naturalmente devido a fatores pedogenéticos diversos. Em adição, muito da variabilidade pode ser causada ainda pelo uso e o manejo dos solos e como conseqüência as propriedades do solo podem exibir variabilidade espacial em macro, meso e micro escalas. Análises de geoestatística têm sido conduzidas numa série de propriedades do solo, físicas, químicas na sua maioria (JOHNSON et al., 1996; GONÇALVES et al., 2001; WANG et al., 2002; SOUZA et al., 2004a), e algumas biológicas (SILVIANO et al., 1998; FRANKLIN & MILLS, 2003, SINEGANI et al., 2005). A variabilidade da respiração do solo dentro de um ecossistema pode ser descrita através do coeficiente de variação (YIM, et al., 2003). Entretanto, apenas o coeficiente de variação não é suficiente para a comparação entre os fluxos de CO_2 de diferentes estudos, isso devido à falta de padronização no esquema experimental, como o tamanho e a forma da área, o número de pontos amostrais e o seu arranjo espacial (FANG et al., 1998). A incorporação de funções que relacionam distância e variância das propriedades entre os pontos nas análises espaciais, o semivariograma, tem grande importância na determinação mais acurada, do que quando se considera as propriedades não dependentes espacialmente. São poucos os trabalhos que caracterizaram a variabilidade da emissão de CO_2 de solos, utilizando técnicas de análise de semivariância (HANSON et al., 1993;), especialmente relacionando essa variabilidade àquela da temperatura e umidade do solo, possíveis fatores controladores dessa emissão.

ROCHETTE et al. (1991) estudaram a variabilidade espacial da respiração do solo em área sem vegetação e na cultura do milho não encontraram modelos de variabilidade espacial para os solos quando estes estavam sem cobertura vegetal. Entretanto, os resultados nas áreas com vegetação mostraram que os parâmetros espaciais da respiração do solo foram influenciados pelo teor de água no solo, através

do aumento das condições de anaerobiose do solo ou pela baixa difusão do gás para a superfície do solo causada pelo preenchimento dos poros pela água.

Em estudo do fluxo de CO_2 do solo em plantação de *Pinus elliotti* realizado na Florida, EUA, FANG et al. (1998) observaram que a temperatura do solo foi o fator mais importante que controla as taxas de respiração do solo, quando o teor de água do solo não foi um fator limitante para a respiração. Os mesmos autores encontraram uma correlação linear negativa significativa entre o fluxo de CO_2 e o teor de matéria orgânica do solo indicando que altas taxas de emissão de CO_2 estão associadas a baixos teores de matéria orgânica em solos minerais.

DASSELAAR et al. (1998) caracterizaram a variabilidade espacial dos gases responsáveis pelo efeito estufa adicional, o CO_2, N_2O e o CH_4, em solos com cobertura vegetal. Apesar de encontrar estrutura de variabilidade para a emissão de CO_2, afirmaram que não foi possível descrever a dependência espacial das emissões como função da dependência espacial de processos e propriedades do solo, contudo, apontaram a umidade do solo como um dos principais fatores controladores das emissões.

LA SCALA et al. (2000) estudaram mudanças nos padrões da variabilidade espacial da emissão de CO_2 em latossolo desprovido de vegetação e encontraram mudanças desses parâmetros durante o período de estudo, podendo ser atribuídas à forte influência da temperatura e umidade do solo. Os modelos de emissão apresentaram similaridades aos modelos de variabilidade do teor de carbono orgânico e a capacidade de troca catiônica do solo.

PASSIANOTO et al. (2003) em estudo sobre a emissão de gases em sistemas de preparo convencional e plantio direto realizado em um argissolo utilizado para pastagem, no estado de Rondônia, observaram que o tratamento convencional apresentou as maiores taxas de respiração do solo durante 6 meses de estudo. O preparo convencional introduz no solo uma grande quantidade de material orgânico facilmente decomponível além de ser responsável pela quebra da estrutura dos agregados do solo expondo partículas de matéria orgânica, que estavam fisicamente protegidas, à ação dos microrganismos.

SCHWENDENMANN et al. (2003) em estudo sobre a variabilidade espacial e temporal do fluxo de CO_2 de latossolos em floresta tropical encontraram uma relação entre o fluxo de CO_2 e o teor de água volumétrico do solo, descrita como uma função parabólica. Os autores afirmaram que o aparente efeito da temperatura do solo na emissão de CO_2 é provavelmente devido à covariância entre a temperatura e o teor de água do solo, sendo este o principal fator que controla a emissão de CO_2 do solo em períodos de seca ou em regiões onde a temperatura do solo é elevada e pouco variável.

RETH et al. (2005) em pesquisa onde desenvolveram um modelo que permite estimar o fluxo de CO_2 em solos desprovidos de vegetação e em solos de várzea tão bem quanto em florestas, em regiões de clima temperado, concluíram que a temperatura e o teor de água do solo são os principais fatores que influíram nas taxas de emissão de CO_2.

VARELLA et al. (2004) compararam a emissão CO_2, CO, NO e N_2O entre áreas com 20 anos de pastagem e cerrado nativo brasileiro, e encontraram diferenças significativas na dinâmica temporal da emissão de CO_2 do solo. Verificaram altos fluxos de CO_2 na área com pastagem apenas durante a transição do período úmido para o período seco do ano. Em ambas a áreas a emissão de CO_2 aumentou com o aumento da umidade do solo até 30% do volume de poros ocupados pela água, e após esse valor ocorreu uma diminuição da emissão de CO_2 com o aumento da umidade do solo.

No estudo da variabilidade espacial e temporal da respiração do solo em plantação de *Eucalyptus*, EPRON et al. (2004) afirmaram que o teor de água do solo foi o fator determinante das variações temporais da respiração do solo. Foi encontrada uma fraca correlação entre a respiração do solo e a temperatura do solo e em algumas regiões esta correlação foi negativa. Variações locais do teor de água do solo não puderam ser correlacionadas às variações locais da respiração do solo durante o período úmido do ano, contudo foi observada correlação positiva entre as variações locais da respiração do solo com as variações locais teor de água do solo na estação seca do ano. Não foram encontradas correlações espaciais da respiração do solo com o teor de carbono do solo.

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e conseqüentemente, mudanças no manejo dos resíduos dessa cultura podem ter resultados notórios no balanço mundial de carbono (RAZAFIMBELO et al., 2006). A colheita tradicional da cultura da cana-de-açúcar envolve a queimada das folhas e resíduos, para facilitar o trabalho de colheita manual da cana. Em contraste, na colheita mecanizada não há necessidade da "despalha" com fogo, apenas esse fato já representa uma importante contribuição na diminuição da emissão de gases estufa e em adição, os resíduos da cultura são deixados na superfície do solo, permitindo um possível aumento no teor de matéria orgânica do solo. Atualmente no nordeste do Estado de São Paulo, 3,5 milhões de hectares são cultivados com cana-de-açúcar. Porém, somente em cerca de 350.000 ha desse total é adotada a prática de manejo que é o da cana crua, evitando a queima e adicionando grandes quantidades de resíduos à superfície do solo por ano (RIPOLI & RIPOLI, 2004).

SÁ et al., (2001) registraram um aumento de carbono orgânico significativo na camada de 10 cm do solo em latossolos sob plantio direto, com presença de resíduos na superfície, quando comparados aos solos com vegetação natural e com 22 anos de preparo convencional, concluindo que a taxa de seqüestro de carbono foi de 99 g m^{-2} por ano, nos primeiros 44 cm do solo.

CAMPOS (2003) analisou a influência da palhada depositada sobre o solo na dinâmica do carbono no agrossistema cana-de-açúcar, através da comparação entre sistema tradicional de queima e colheita manual com o sistema de colheita mecanizada sem queima do canavial, em área de Latossolo Vermelho na região de Ribeirão Preto (SP). O autor concluiu que no manejo sem a queima houve maior emissão de CO_2 quando comparado ao manejo com queima. Entretanto, quando estabelecido o balanço de carbono, o sistema sem queima deixa de liberar para a atmosfera cerca de 5 Mg C-CO_2 ha^{-1} ano^{-1}.

RAZAFIMBELO et al. (2006) mostraram que latossolos sob o manejo de cana crua contém 15% a mais de carbono nos primeiros 10 cm do solo, que as áreas sob o manejo de cana queimada, após 6 anos de cultivo. Assim, é de grande importância entender como a substituição na prática da queimada pelo cultivo de cana crua altera a

dinâmica do carbono em áreas agrícolas, compreendendo como a emissão de CO_2 do solo varia espacialmente em cada um desses sistemas.

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental

O estudo foi conduzido em áreas pertencentes às fazendas Santa Isabel e Santa Bárbara, localizadas no nordeste do Estado de São Paulo. A Fazenda Santa Isabel pertence ao município de Jaboticabal (SP), tendo coordenadas geográficas 21º 17' a 21º 18' S e 48º 08' a 48º 10' O, com altitude média de 595 m acima do nível do mar. A Fazenda Santa Bárbara localiza-se no município de Guariba (SP), tendo coordenadas geográficas 21º 19' a 21º 20' S e 48º 13' a 48º 14' O, com altitude média de 600 m acima do nível do mar (Figura 1). Os solos das áreas foram classificados como Latossolo Vermelho eutroférrico textura muito argilosa (LVef) (EMBRAPA, 1999). O solo da Fazenda Santa Isabel apresenta teor de argila de 57,7%, teor de matéria orgânica do solo de 34,8 g dm^{-3}, soma de bases de 37,7 % e pH de 4,7 (POCAY, 2000; SOUZA, 2001). O solo da Fazenda Santa Bárbara apresentou teor de argila de 62,2%, teor de matéria orgânica 27,0 g dm^{-3}, soma de bases de 45,4 % e pH de 4,8 (SOUZA, 2004b). O relevo em ambas as áreas é predominantemente suave ondulado, com declividades variando de 3 a 8 % nos locais amostrados das fazendas Santa Bárbara e Santa Isabel, respectivamente. O clima da região é classificado, segundo Köepen, como sendo do tipo Aw, definido como tropical de verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média variando de 19,1 a 24,8 ºC. A precipitação pluviométrica anual média é de 1.425 mm, com período de maior concentração de outubro a março e com precipitações mais espaçadas e de menores intensidades de abril a setembro.

FIGURA 1. Imagens de satélite mostrando a localização geográfica das fazendas Santa Isabel e Santa Bárbara, no Estado de São Paulo.

As áreas utilizadas neste estudo apresentam um longo histórico de cultivo de cana-de-açúcar (Saccharum spp.), mais de 60 anos para a Fazenda Santa Isabel e mais de 30 anos para a Fazenda Santa Bárbara. Quando iniciado o experimento, no dia 29 de Agosto de 2005, a área da Fazenda Santa Isabel (área denominada A1) estava no início do 3º corte com densidade de palhada de 14 toneladas/ha (Figura 2). A variedade plantada foi a RB835486, em sistema de cana crua sem queima, a colheita mecanizada tinha sido realizada no dia 28 de julho de 2005. Para as avaliações foi instalado no dia 29 de agosto de 2005 uma grade irregular contendo 69 pontos e ocupando uma área de 120 x 120 m, onde as distâncias de separação entre os pontos vizinhos eram de 10 m e 20 m (Figura 3). O levantamento topográfico da área foi realizado pelo método de irradiação espacial, utilizando estação total modelo DTM – 750 fabricada pela empresa NIKON. Em cada um dos pontos da grade foi inserido um

colar de PVC no solo numa profundidade de 3 cm, utilizado na metodologia de avaliação da emissão de CO_2, como descrita na secção 3.2.

FIGURA 2. Foto da área de cana crua com colheita mecanizada, 3º corte (A1), Fazenda Santa Isabel Jaboticabal (SP).

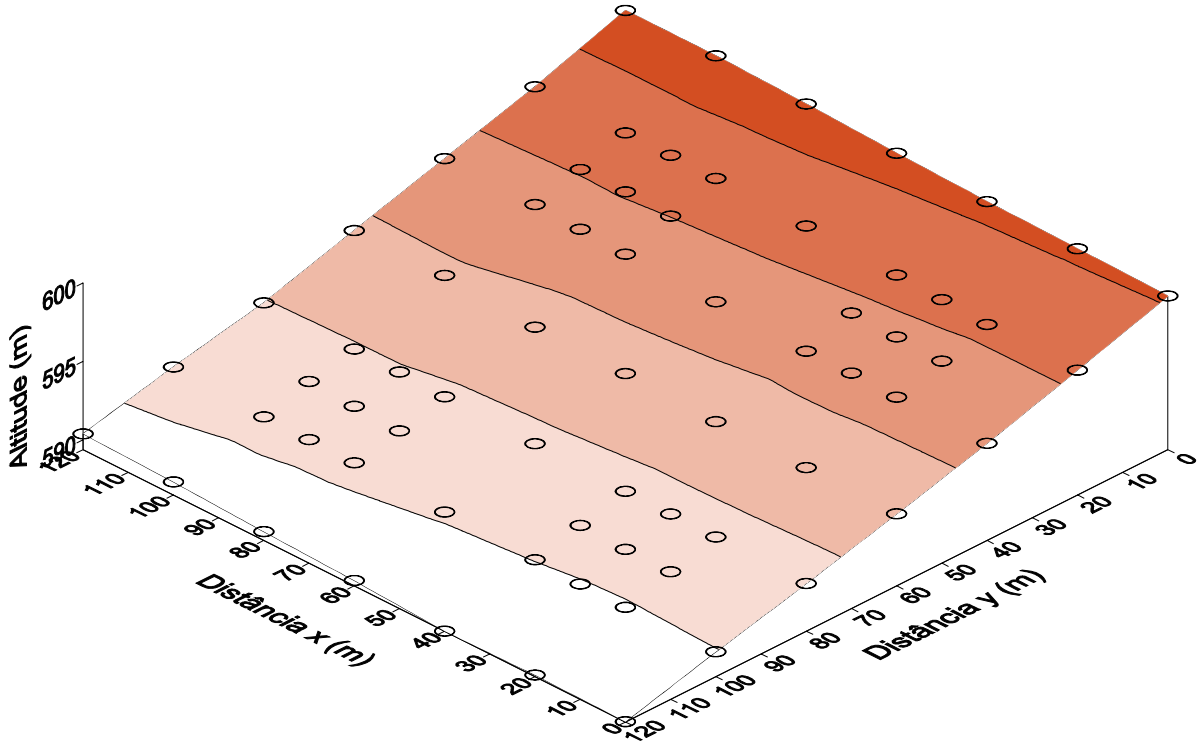

FIGURA 3. Levantamento topográfico mostrando a malha de pontos amostrados da área de cana crua (3º corte), da Fazenda Santa Isabel, representada pelos círculos.

Na Fazenda Santa Bárbara foram utilizadas duas áreas localizadas em talhões vizinhos com diferentes históricos de manejo: cana queimada colheita manual (A2) e cana crua colheita mecanizada (A3) com densidade de palha de 14 toneladas/ha. As áreas estavam no início do 5º corte, a variedade plantada nos dois talhões foi a RB855453, a despalha com fogo tinha sido realizada na área A2 no dia 28 agosto de 2005 com posterior colheita manual. Na área A3 a cana foi retirada no dia 03 de setembro de 2005, através de colheita mecanizada.

Nos dias 5 e 19 de outubro de 2005, em cada um dos talhões das áreas A2 e A3, respectivamente, foi instalado uma grade regular, e inseridos os colares de PVC em 60 pontos amostrais, cobrindo uma área de 50 x 90m, onde as distâncias mínimas de separação eram de 10m. Os dados do levantamento topográfico dessas grades foram

fornecidos pelo departamento de Qualidade Agrícola da Usina São Martinho e podem ser visualizados nas Figuras 4 e 5.

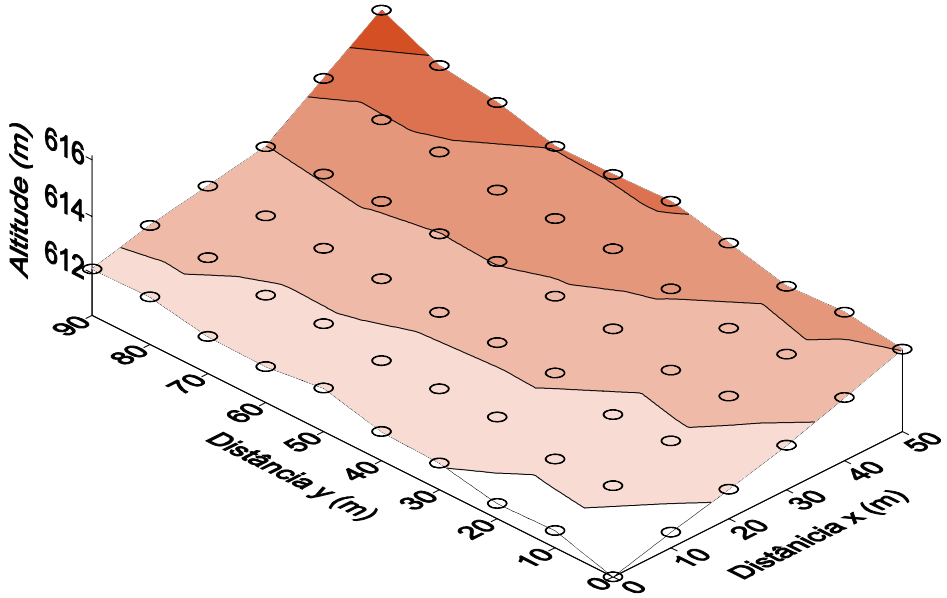

FIGURA 4 Levantamento topográfico mostrando a malha de pontos amostrados da área de cana queimada (5º corte) da Fazenda Santa Bárbara, representada pelos círculos.

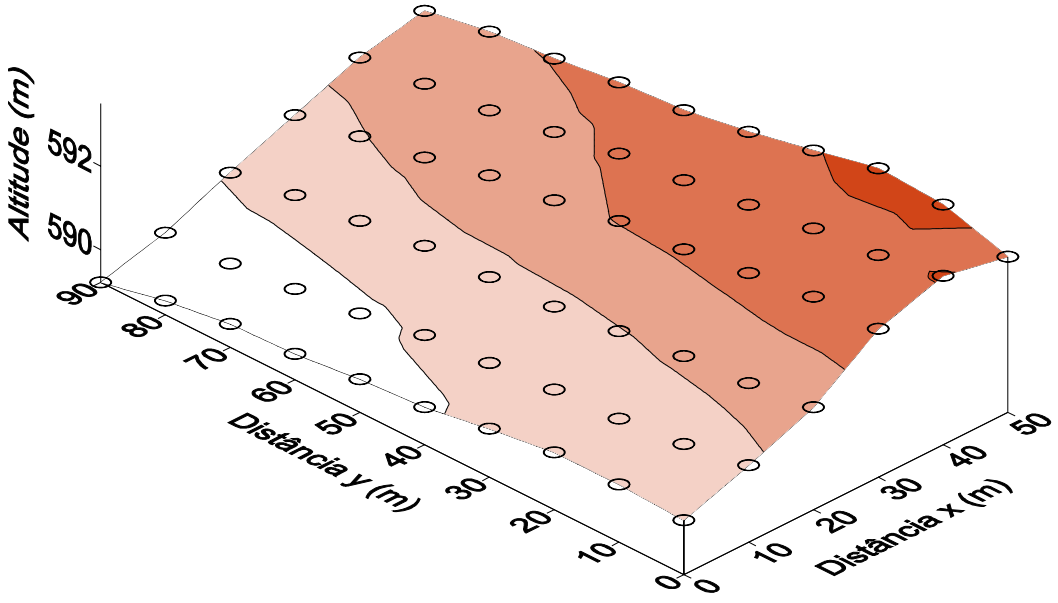

FIGURA 5 Levantamento topográfico mostrando a malha de pontos amostrados da área de cana crua (5º corte) da Fazenda Santa Bárbara, representada pelos círculos.

3.2. Medição da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo

A emissão de CO_2 e a temperatura do solo foram registradas utilizando-se uma câmara de fluxo fabricada pela companhia LI-COR (LI-6400-09) e sensor de temperatura do sistema LI-6400, respectivamente (Figura 6). Tendo em vista o princípio da difusão que governa a emissão de CO_2 do solo para a atmosfera, tal emissão passa a ser fortemente dependente do gradiente de concentração desse gás entre o solo e o interior da câmara de fluxo. Assim a emissão de CO_2 é dependente da concentração de CO_2 no interior da mesma, ocorrendo uma diminuição da emissão de CO_2 com o aumento da concentração desse gás no interior da câmera (HEALY et al., 1996). No modo de medição, o sistema LI-6400 monitora a concentração de CO_2 no interior da câmara sendo esta sempre operada próxima a concentração de CO_2 da atmosfera no local estudado. Assim, uma série de procedimentos deve ser adotada para realização das medições da emissão de CO_2 utilizando-se o sistema LI-6400 + LI-6400-09. Inicialmente a câmara de solos, que é um sistema fechado com volume interno de 991 cm^3 e área de contato com o solo de 71,6 cm^2, é instalada sobre um colar de PVC, previamente colocado no solo. A utilização de colares de PVC é decorrente ao fato de que podem ocorrer distúrbios causados pela inserção da câmara diretamente no solo, como a quebra de sua estrutura porosa, por exemplo, causando um aumento de CO_2 emitido pelo solo. Após pelo menos 24 horas a instalação dos colares no campo, acopla-se a câmara de solo LI-6400-09 sobre eles, não encostando a câmara no solo, para minimizar os distúrbios mecânicos sobre o mesmo. Antes de avaliação da emissão de CO_2, é tomada a concentração de CO_2 do ar próximo à superfície da área (380 μmol mol^{-1}, por exemplo), sendo este valor introduzido no sistema como referência para a realização das avaliações. No início da leitura, a câmera é inserida sobre o colar sendo reduzida a concentração de CO_2 no seu interior até o valor de 10 μmol mol^{-1} abaixo daquele na superfície do solo (no exemplo, até 370 μmol mol^{-1}), dirigindo-se o gás do interior da câmara através de soda lime. Após tal redução, o aumento natural de concentração de CO_2 no interior da câmara, devido à emissão de CO_2 do solo, é seguido a cada 2,5 segundos, sendo a emissão de CO_2 computada durante um tempo

total de aproximadamente 90 segundos enquanto a concentração de CO_2 dentro da câmara aumenta até 10 μmol mol^{-1} acima da concentração de CO_2 do ar (390 μmol mol^{-1}). Após o período total de medição, o software do sistema LI-6400 produz uma regressão linear entre a emissão de CO_2 e a concentração de CO_2 no interior da câmara, sendo a emissão naquele ponto calculada como aquela quando a concentração no interior da câmara era igualada à registrada no sistema em aberto (no caso em 380 μmol mol^{-1}).

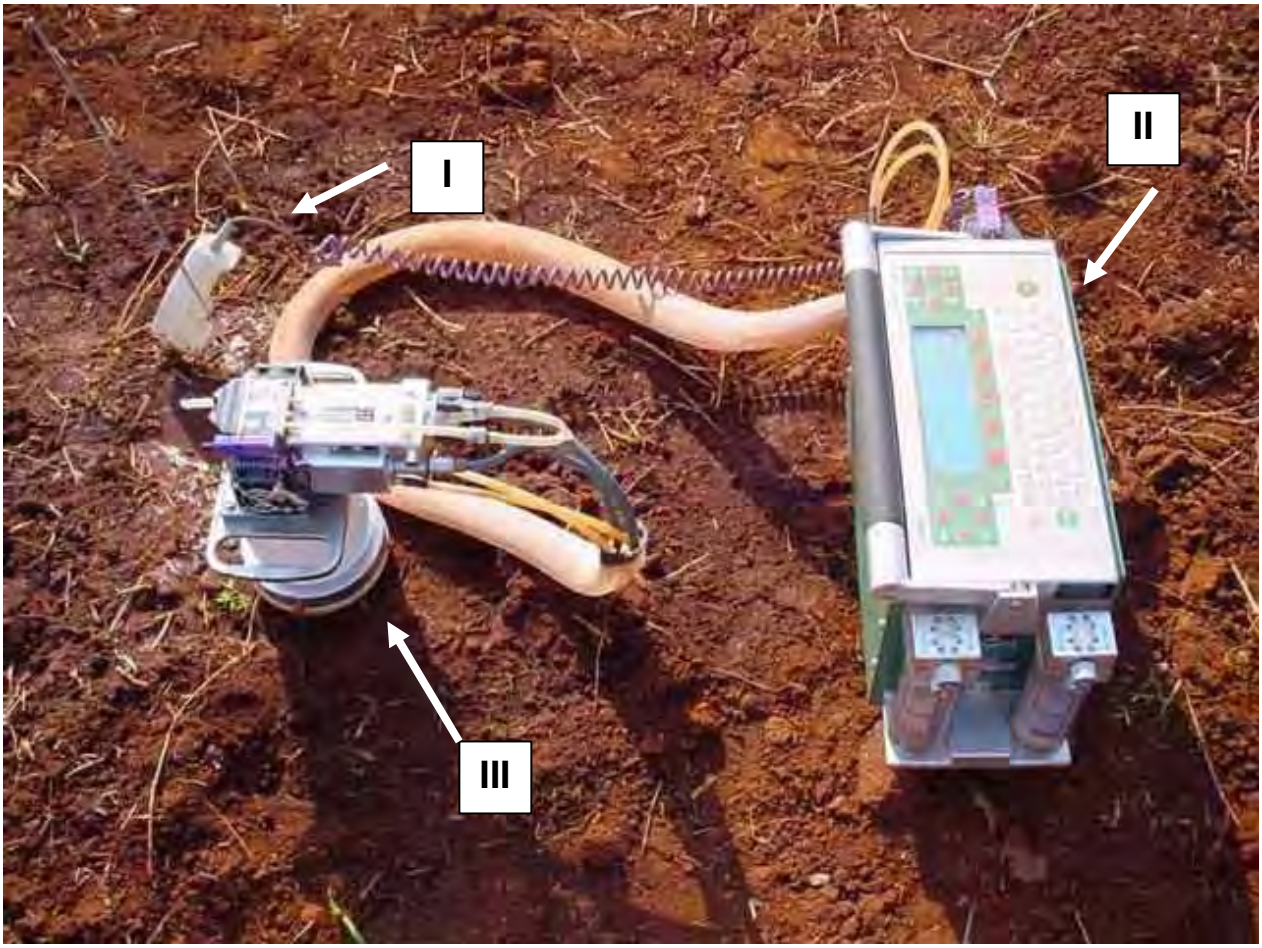

FIGURA 6. Câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (III), software interligado à câmara (II) e sensor de temperatura inserido no interior do solo (I).

A temperatura do solo foi avaliada em todos os pontos estudados nas áreas em A1, A2, e A3 utilizando-se o sensor de temperatura, parte integrante do sistema ao LI-6400. Tal sensor consiste de uma haste de 20 cm que é inserida no interior do solo, o mais perpendicular possível em relação à superfície, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de CO_2, assim como mostra a Figura 6. O princípio de funcionamento deste sensor é baseado no chamado termistor, que nada mais é do que uma resistência elétrica que tem o seu valor modificado com a temperatura do solo. As leituras da temperatura do solo foram feitas durante o período em que o sistema LI-6400 estava realizando as medidas de emissão de CO_2 do mesmo.

A umidade do solo nos locais estudados foi avaliada de forma diferenciada, sendo utilizada a metodologia gravimétrica para a A1 e um sistema portátil TDR em A2 e A3. Na A1, ao final das avaliações de emissão de CO_2 e temperatura do solo, foram coletadas amostras de solo nos 69 pontos da grade com o trado da camada de 0 a 10 cm. Essas amostras foram armazenadas em recipientes para a conservação sendo transportadas até o laboratório do Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da UNESP – Jaboticabal. As amostras foram pesadas (peso úmido) e levadas à estufa a 105ºC por um período de 72 horas, para a determinação da massa de sólidos (massa seca), obtendo-se assim o valor da umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}). Em A2 e A3 foi utilizado um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbel® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia) para a obtenção da umidade do solo. O aparelho de TDR é constituído por uma sonda apresentando 2 hastes de 12 cm que devem ser inseridas no interior do solo o mais perpendicular possível em relação à sua superfície, nos locais próximos aos colares de PVC. O seu princípio de funcionamento consiste em medir o tempo de percurso de um pulso eletromagnético (EM) no espaço compreendido entre as duas extremidades das hastes, sendo que o tempo de percurso está relacionado com a constante dielétrica média do meio no qual a sonda-guia é inserida. Nessas áreas a avaliação da umidade do solo foi realizada concomitantemente às avaliações de emissão de CO_2 em cada um dos 60 pontos em cada grade.

As avaliações da emissão de CO_2 e temperatura do solo foram conduzidas no dia 08 de setembro de 2005 em A1, no período da tarde, com início às 14 h. Neste local a concentração de CO_2 do ar foi avaliada como sendo de 370 μmol mol^{-1}. A emissão e temperatura do solo foram feitas em todos os pontos da grade, com término das avaliações às 17 horas. Após o fim das medidas foram coletadas as amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica. As avaliações da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo em A2 e A3 foram realizadas nos dias 08 e 21 de outubro de 2005, respectivamente, durante o período da manhã, com início às 7 h. Nesses dias a concentração de CO_2 do ar próximo à superfície do solo naquele local foi de 400 μmol mol^{-1}. As avaliações foram realizadas em todos os pontos amostrais com os sistemas portáteis LI-6400 e TDR, com término por volta das 10 h.

FIGURA 7. TDR - Hydrosense system, Sistema portátil utilizado para medição da umidade do solo e colar de PVC inserido no solo.

A temperatura do ar e a precipitação pluviométrica, apresentados na Figura 8, foram extraídas de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da área de Agrometeorologia de Departamento de Ciências Exatas da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária da UNESP – Jaboticabal. As observações feitas na Estação Agroclimatológica são cotadas, digitadas em formato padronizado, realizada a consistência e controle de qualidade. Em seguida foram obtidas as médias diárias durante o período de realização do estudo. A Figura 8 indica os dias em que foram avaliadas a emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo nas áreas experimentais.

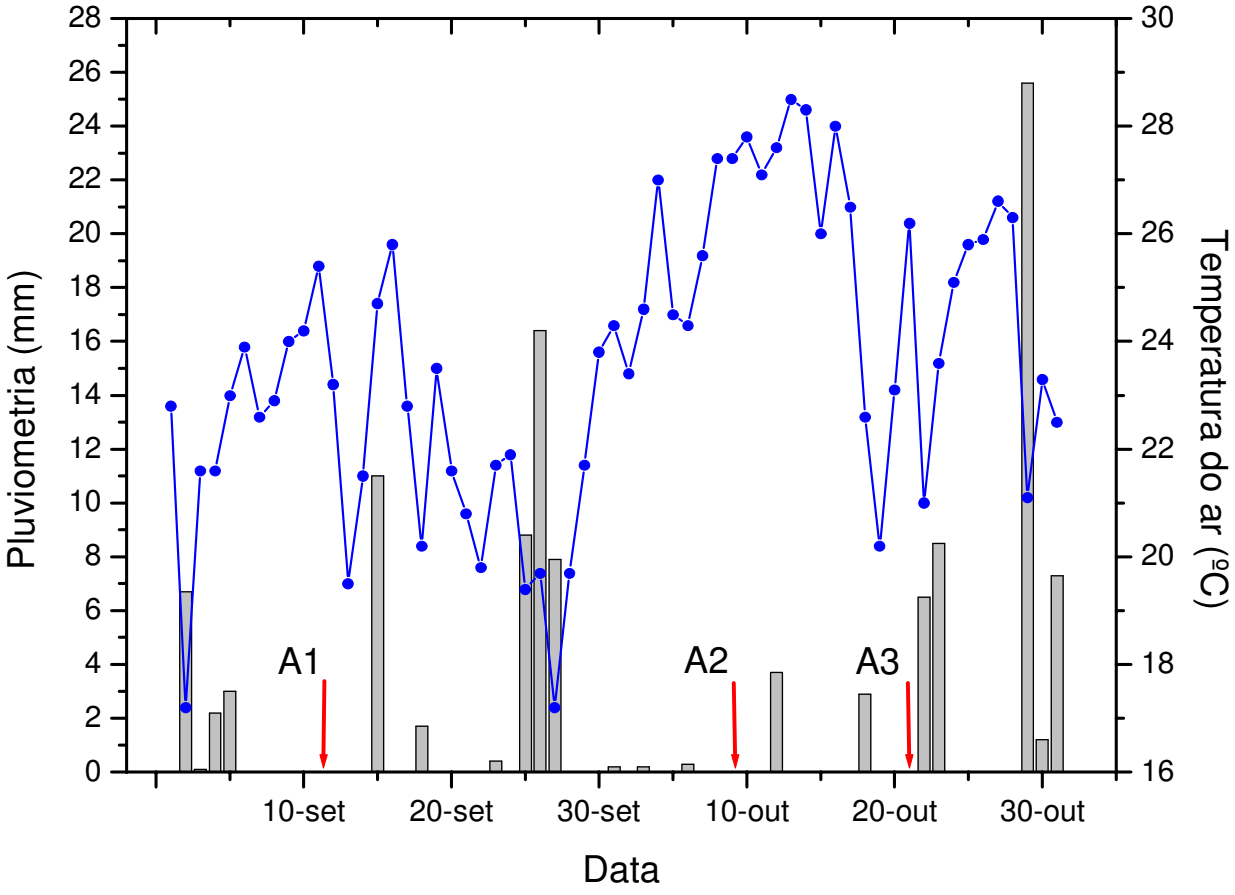

FIGURA 8. Pluviometria (barras verticais em cinza, eixo vertical esquerdo) e temperatura do ar (círculos, linha sólida em azul, eixo vertical direito) durante o período de avaliação do experimento. Flechas em vermelho indicam os dias de avaliação da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo para A1 (08-set), A2 (08-out) e A3 (21-out).

3.3. Análise da dependência espacial

Como já dito anteriormente a geoestatística é baseada na teoria das variáveis regionalizadas, que é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples, assim, para melhor compreensão dessa ferramenta, se faz necessário uma breve apresentação teórica de alguns de seus conceitos.

Uma variável regionalizada á uma variável aleatória que assume diferentes valores de acordo com a sua posição na área de estudo, pode ser considerada a realização de um conjunto de variáveis aleatórias. Se todos os valores de uma variável regionalizada forem considerados em todos os pontos dentro de uma área amostral, a variável regionalizada é apenas uma de infinitas variáveis aleatórias. Esse conjunto é chamado de função aleatória e é simbolizado por $Z(x_i)$.

Na prática, quando retiramos uma amostra de solo em um local com coordenadas definidas, teremos apenas uma realização da função aleatória. Para estimar valores em locais não amostrados, devemos introduzir as restrições de estacionaridade estatística. A existência de estacionaridade permite que o experimento possa ser repetido mesmo que as amostras sejam coletadas em pontos diferentes, pois elas pertencem à mesma população com os mesmo momentos estatísticos (VIEIRA, 2000).

Uma função aleatória é considerada estacionária quando o valor esperado para a sua realização é o mesmo para todos os pontos na área de estudo, ou seja,

$$E[Z(x_i)] = m \quad (1)$$

Sendo $Z(x_i)$ a função aleatória e m a média dos valores da variável, o qual não depende da distância de separação h. Se escolhermos dois pontos distintos na área, separados pelo vetor h, o valor médio da diferença $[Z(x_i) – Z(x_i+h)]$ é:

$$E[Z(x_i) - Z(x_i + h)] = 0 \quad (2)$$

Assim, temos a estacionaridade de primeira ordem, também conhecida como a estacionaridade da média.

Para a análise geoestatística é necessário também a estacionaridade de segunda ordem e implica que para cada par de uma variável aleatória, a função de covariância Cov(h) existe e seja dependente da distância h (VAUCLIN et al., 1983).

$$Cov(h) = E\,[Z(x_i).Z(x_1 + h)] - m^2 \quad (3)$$

A estacionaridade de segunda ordem, não á uma condição fácil de ser satisfeita na prática, pois implica na existência de uma variância finita dos valores medidos, essa suposição é forte e difícil de ser verificada. Portanto, uma suposição alternativa e mais fraca é assumida, denominada de hipótese intrínseca. A hipótese intrínseca requer que para todo vetor h, a variância do incremento $Z(x_i) – Z(x_i+h)$ seja finita e independente da posição dentro da área de estudo (TRANGMAR et. al, 1985), temos assim a função:

$$Var\ [Z(x_i) - Z(x_i + h)] = E\,[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 = 2\gamma(h) \quad (4)$$

A qual é denominada de variograma. Na prática a forma do variograma não é muito utilizada e sim a forma $\gamma(h)$, denominada de semivariograma que é estimado como a média do quadrado das diferenças entre todas as observações separadas pela distância h.

Se as hipóteses forem satisfeitas, então podemos estimar o semivariograma pela equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (5)$$

Sendo $\hat{\gamma}$(h) a estimativa da semivariância em função da distância de separação h; N o número de pares das observações separadas por h; $z(x_i)$, o valor assumido pela variável Z no ponto x_i e $z(x_i + h)$ é o valor assumido pela variável Z no ponto $x_i + h$. O gráfico da semivariância em função das várias distâncias de separação é o chamado semivariograma experimental (Figura 9) e ao contrário das funções de covariância e correlação, as quais medem a similaridade, a semivariância mede a dissimilaridade média entre dados separados por um vetor h.

O semivariograma é uma das ferramentas mais utilizadas na geoestatística para medir a dependência espacial. A continuidade ou dependência espacial pode ser estimada pelo semivariograma experimental, o qual é usado para descrever a relação existente entre os valores de uma variável de interesse em vários intervalos de distâncias.

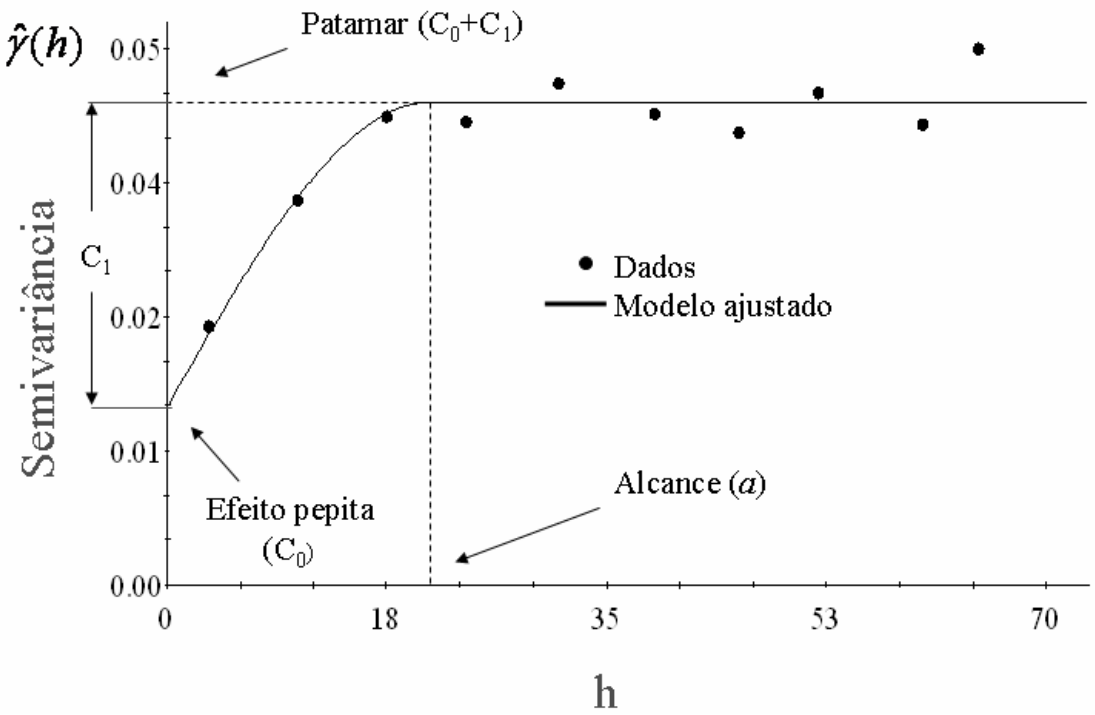

FIGURA 9. Semivariograma experimental, $\hat{\gamma}$(h) em função da distância de separação h, calculado usando a equação (5).

Existem três parâmetros no semivariograma, o efeito pepita (C_0), o patamar (C_0+C_1) e o alcance (a). O valor da semivariância na interseção com o eixo Y é definido como efeito pepita (C_0) e representa a variância devido a erros inerentes às medições ou à micro-variabilidade da propriedade que não pôde se detectada com a escala de amostragem utilizada. O valor da semivariância aumenta com o aumento da distância de separação entre as amostras, atingindo um valor aproximadamente constante chamado patamar (C_0+C_1) é aproximadamente igual à variância dos dados amostrais quando as hipóteses de estacionaridade são satisfeitas. O alcance (a) é a distância na qual o patamar ocorre, representa a distância dentro da qual as amostras apresentam-

se correlacionadas espacialmente, a partir dessa distância não existe correlação entre as observações.

Vários modelos teóricos podem ser ajustados ao semivariograma experimental. Os modelos esférico, exponencial, gaussiano e linear podem ser usados para descrever o semivariograma experimental. A forma do semivariograma pode ser completamente reveladora sobre o tipo de variação espacial presente na área (BURROUGH & McDONNELL, 1998).

O modelo linear é dado pela equação:

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{a} h \ ; 0 < h < a \quad (6)$$

O modelo esférico experimental:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] \ ; 0 < h < a \quad (7)$$

Ajustado quando o efeito pepita não é tão grande, e existe um alcance e patamar bem definidos.

O modelo exponencial experimental:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right) \right) \right] \ ; 0 < h < D, \quad (8)$$

sendo: D a máxima distância na qual o semivariograma é definido. Ajustado quando o efeito pepita e o patamar são bem definidos e o alcance não muito bem definido. O modelo exponencial atinge o patamar apenas assintotacamente, enquanto o modelo esférico o atinge no valor do alcance.

O modelo gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)^2 \right) \right] \ ; 0 < h < D. \quad (9)$$

Similar ao modelo exponencial, a variação é muito suave e o efeito pepita é muito pequeno quando comparada à dependência espacial.

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes da análise geoestatística e pode ser uma das maiores fontes

de ambigüidade da análise. Portanto, a chave para uma estimativa bem sucedida é a escolha de um modelo que capture o padrão de continuidade espacial da variável em questão (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 2000). A técnica da validação cruzada ajuda na escolha entre diferentes modelos de semivariogramas, uma vez que permite a comparação entre os valores estimados e medidos utilizando apenas as informações disponíveis nos dados amostrais. Nesta técnica, o valor medido num ponto específico da malha é temporariamente desconsiderado dos dados amostrais, e este mesmo valor é estimado utilizando os valores das amostras vizinhas. Portanto, podemos construir um gráfico dos valores medidos contra os estimado e calcular a regressão linear entre eles. O semivariograma ajustado que fornecer uma equação de regressão mais próxima da bissetriz Y = X, ou seja, $Z^*(x_i) = Z(x_i)$, deve ser escolhido.

Ajustado o modelo ao semivariograma experimental da variável e havendo dependência espacial entre as amostras, pode-se estimar valores da variável em qualquer posição no campo não amostrado de estudo para posteriormente construir o seu respectivo padrão espacial. A "krigagem" é um processo de interpolação usado para fornecer uma melhor estimativa de um atributo em locais não amostrados. Nesse processo as estimativas são feitas baseadas nos valores dos pontos vizinhos e no conhecimento da relação espacial existente em uma série de dados dada pelos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais.

A equação da krigagem é:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(x_i) \qquad (10)$$

sendo Z*, o valor que se quer estimar em x_0; N, o número de valores medidos, $Z(x_i)$, envolvidos na estimativa e λ_i os pesos associados a cada valor medido, $Z(x_i)$. Os λ_i variam de acordo com a variabilidade espacial expressa pelo semivariograma.

O método de "krigagem" nada mais é que uma média móvel ponderada onde os pesos λ_i são obtidos em função do modelo ajustado aos semivariogramas experimentais. O processo de "krigagem" é considerado melhor que outros métodos

para estimar valores em regiões não amostradas, sem tendência e com variância mínima (JOHNSON et al., 1996).

A variabilidade da emissão de CO_2 temperatura e umidade do solo é preliminarmente descrita por meio da estatística descritiva e posteriormente pela geoestatística. As estimativas dos modelos de semivariância e a construção dos mapas dos padrões espaciais da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo, foram obtidas nos programas GS+ Versão 7.0 (ROBERTSON, 1998) e Surfer Versão 8.0.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi realizada a análise estatística representada pelo “box-plot” cujo objetivo foi identificar os pontos atípicos e extremos, que posteriormente foram excluídos e seus valores substituídos por uma média aritmética simples realizada com os valores dos pontos vizinhos mais próximos da grade. As observações discrepantes ou assimétricas podem ser classificadas em Atípicos – pontos que apresentam valores compreendidos entre 1,5 e 3 vezes os valores correspondentes à faixa de 25 a 75% dos valores, e Extremos – pontos superiores a 3 vezes os valores correspondentes à faixa de 25 a 75% dos valores (ISAAKS & SRISVASTAVA, 1989).

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam os resultados da análise “box-plot” para a emissão de CO_2 do solo, temperatura, umidade área A1 pelo método gravimétrico e umidade área A2 e A3 pelo TDR respectivamente. Quanto a emissão de CO_2, pode-se observar a ocorrência de pontos discrepantes em duas áreas de estudo (Figura 10). Para a temperatura do solo, na área de cana crua A1 foi encontrado 1 ponto atípico e para a A3 2 valores discrepantes (Figura 11). Para os dados de umidade do solo referentes à área de cana crua A1, onde a avaliação foi feita através do método gravimétrico, foi observado uma grande quantidade de dados discrepantes (Figura 12) e para as áreas com cana queimada (A2) e cana crua (A3) não foram encontrados dados com valores discrepantes de umidade (Figura 13). Os valores discrepantes foram rejeitados e substituídos pela média aritmética de 4 vizinhos mais próximos.

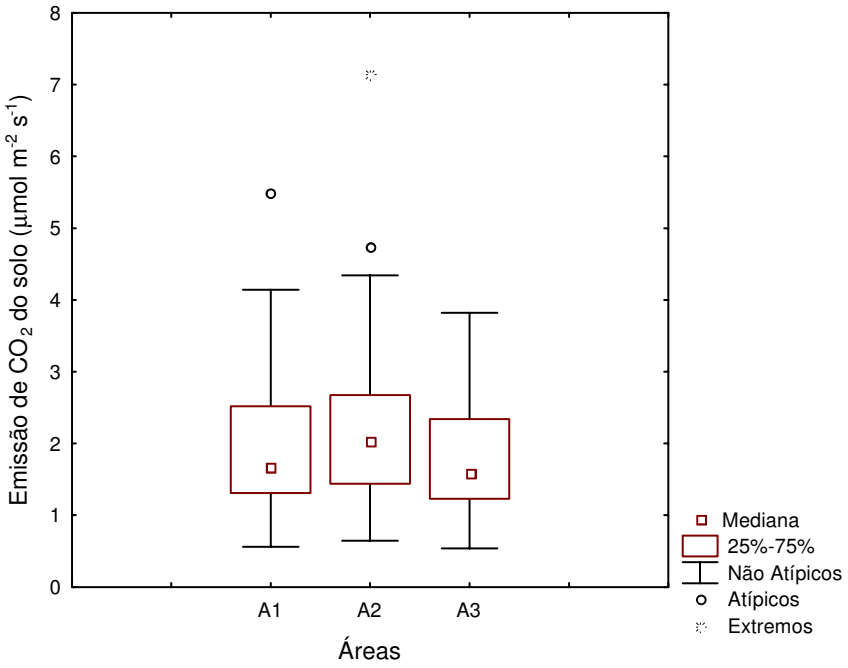

FIGURA 10. Análise "box-plot" da emissão de CO_2 do solo nas áreas: cana crua A1 (n=69), cana queimada A2 (n=60) e cana crua A3 (n=60).

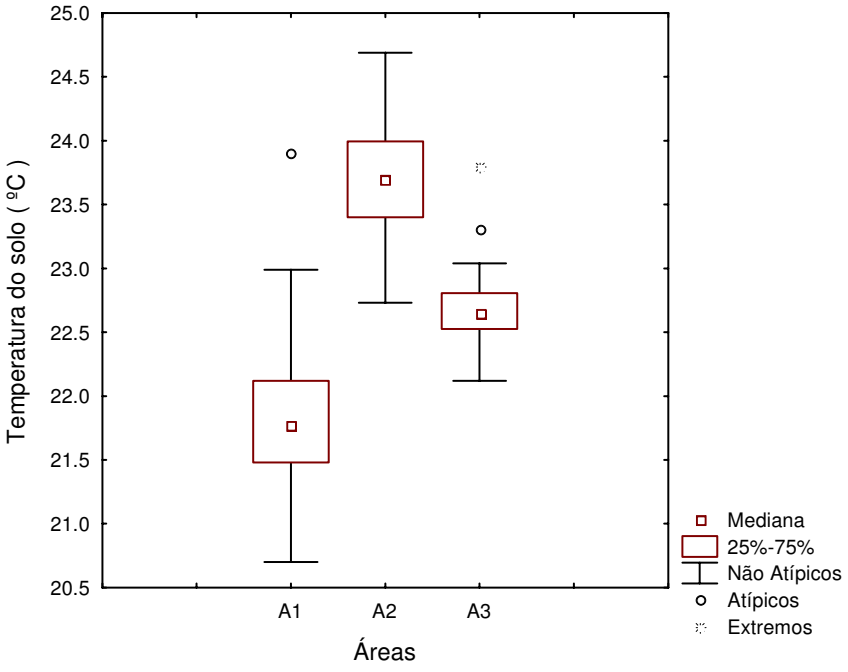

FIGURA 11. Análise "box-plot" da temperatura do solo para as áreas: cana crua A1 (n=69), cana queimada A2 (n=60) e cana crua A3 (n=60).

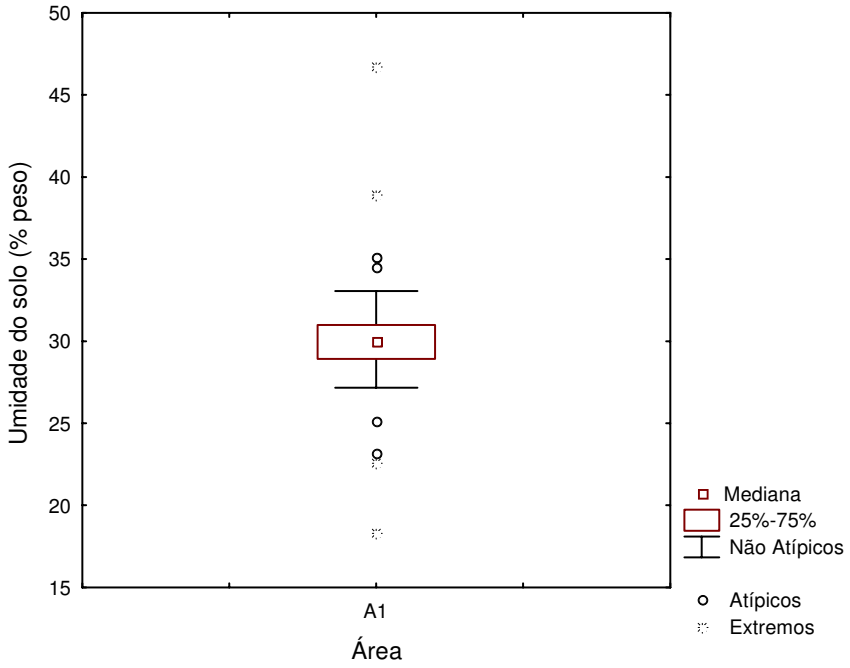

FIGURA 12. Análise “box-plot” da umidade gravimétrica do solo (n=69) para área de cana crua A1.

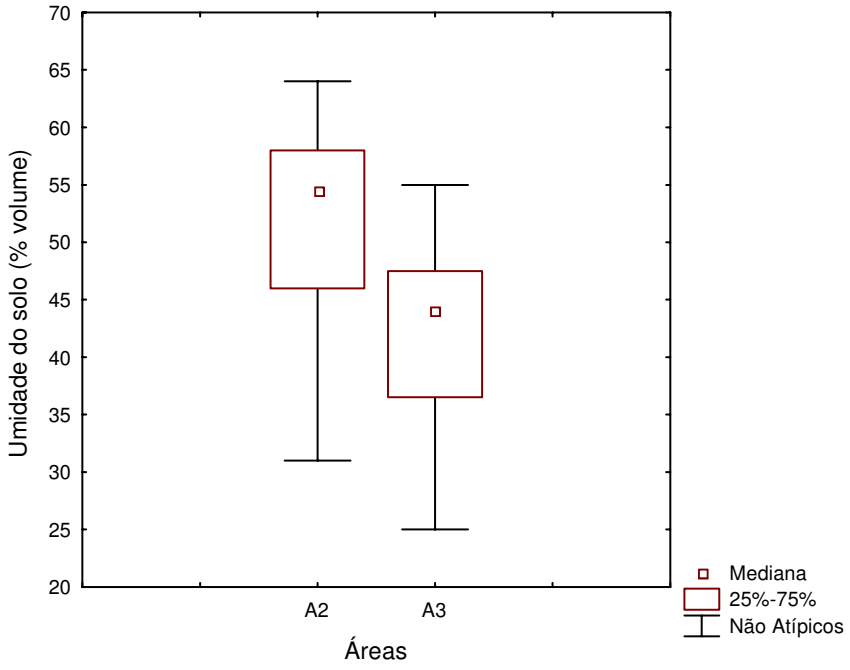

FIGURA 13. Análise “box-plot” da umidade do solo avaliada pelo TDR para as áreas de cana queimada A2 (n=60) e cana crua A3 (n=60).

As estatísticas descritivas da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo são apresentadas na Tabela 1. As médias da emissão de CO_2 do solo para as áreas de cana crua A1 e A3 foram de 1,83 e 1,76 μmol m^{-2} s^{-1} respectivamente, a área com cana queimada apresentou uma maior média de emissão de CO_2 de 2,05 μmol m^{-2} s^{-1}. Esses valores são inferiores quando comparados aos encontrados nas pesquisas em solos com cobertura vegetal (SING & GUPTA,1977; TEDESCHI et al., 2006), porém similares àqueles publicados em estudos realizados em latossolos sem vegetação (LA SCALA et al., 2000, 2003). A análise de comparação de médias pelo teste T indicou que a emissão de CO_2 do solo foi maior na área de cana queimada A2 quando comparada àquela observada na área vizinha com o manejo de cana crua A3, $p<0,05$.

Adotando o critério de classificação para o coeficiente de variação proposto por WARRICK & NIELSEN (1980), a emissão de CO_2 foi aquela que apresentou os maiores valores de coeficiente de variação em todas as áreas, sendo classificados como altos (>24%). Os resultados deste estudo foram semelhante aos encontrados por EPRON et al. (2004) que em estudo dos aspectos da variabilidade espacial da respiração do solo em plantação de eucalipto encontraram valores de C.V. entre 25 a 50%. SCHWENDENMANN et al. (2003) em estudo semelhante em solos de floresta tropical, observaram valores de C.V. entre 35 e 45%. Em estudo sobre a variabilidade da emissão de gases do efeito estufa, DASSELAAR et al. (1998) encontraram um coeficiente de variação de 55% para a emissão de CO_2 em solo vegetados. Importante salientar que a emissão de CO_2 em área de manejo de cana queimada (A2) apresentou o menor valor de C.V. (38%) do que os C.V. das áreas com o manejo de cana crua, A1 (46%) e A3 (43%). A temperatura do solo apresentou a classificação do coeficiente de variação como baixo (<12%) para todas as áreas, sendo a variável com os menores coeficientes de variação. A umidade do solo apresenta coeficiente de variação baixo para a área de cana crua A1 e médios (12% < C.V. < 20%) para as áreas de cana queimada A2 e cana crua A3. Em trabalho realizado num Latossolo Vermelho eutroférrico, com a cultura de mamona (*Ricinus cammunis*) na região da cidade de Campinas, SP, SIQUEIRA (2006) encontrou valores para os coeficientes de variação da

umidade do solo semelhantes para os registrados pelo método gravimétrico e pelo TDR, entre 13 e 20%, em área com a cultura do milho, entretanto, SOUZA et al. (2004) e JÚNIOR et al. (2006) notificaram valores de coeficientes de variação baixos para a umidade do solo registrada pelo método gravimétrico em latossolos. Os resultados mostraram que a diferença da variabilidade indicada pelo coeficiente de variação entre as áreas é devido aos métodos utilizados, os dados de umidade do solo obtidos pelo método gravimétrico apresentaram uma menor variabilidade quando comparados àqueles obtidos pelo TDR, mesmo tendo apresentado uma grande quantidade de dados discrepantes.

Tabela 1. Estatística descritiva da emissão de CO_2 (µmol m^{-2} s^{-1}), temperatura (ºC) e umidade do solo (% peso para A1 e % volume para A2 e A3).

	Área 1			Área 2			Área 3		
Estatística	ECO2	Tsolo	Usolo	ECO2	Tsolo	Usolo	ECO2	Tsolo	Usolo
Média	1,83	21,8	30,0	2,05	23,7	52,3	1,76	22,6	42,1
Mediana	1,67	21,8	30,1	2,04	23,7	54,5	1,60	22,6	44,0
Mínimo	0,56	20,7	27,2	0,65	22,7	31,0	0,54	22,1	25,0
Máximo	4,14	23,0	33,0	4,34	24,7	64,0	3,82	23,0	55,0
Assimetria	0,70	0,45	-0,16	0,46	-0,15	-0,74	0,60	-0,04	-0,35
Curtose	-0,06	0,22	-0,17	-0,02	-0,28	-0,10	-0,26	-0,08	-0,78
Desvio Padrão	0,85	0,50	1,20	0,77	0,50	7,70	0,76	0,20	7,10
C.V. (%)	46	2	4	38	2	15	43	1	17
Valor de p	0,01	0,30	0,86	0,26	0,26	0,01	0,04	0,69	0,07

N=69 (A1), N=60 (A2 e A3); ECO2 = emissão de CO_2 do solo; Tsolo = temperatura do solo; Usolo = umidade do solo; C.V.= Coeficiente de Variação. $p < 0,05$ significativo a 5% pelo teste de Shapiro-Wilk. $p < 0,01$ significativo a 1%. $p > 0,05$ não significativo pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para as variáveis emissão de CO_2 nas áreas de cana crua (A1 e A3) e a umidade do solo para a área de cana queimada (A2), o teste de normalidade foi significativo, indicando que as variáveis apresentaram distribuição diferente da normal. Segundo GONÇALVES et al. (2001) a condição de normalidade não é exigência para a análise geoestatística, o importante é que a distribuição não apresente caudas muito alongadas que poderiam comprometer a análise. As variáveis emissão de CO_2 para as áreas de cana crua e a umidade do solo para a área de cana queimada apesar de não apresentarem distribuição normal, possuem valores de coeficientes de assimetria e curtose que se aproximaram da normal (Tabela 1). Portanto as distribuições das variáveis podem ser consideradas suficientemente simétricas e sem caudas alongadas, tornando possível a abordagem de dependência espacial dos dados pela geoestatística.

Os parâmetros dos modelos matemáticos dos semivariogramas ajustados para as variáveis emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo são apresentados na Tabela 2. A emissão de CO_2 apresentou dependência espacial apenas para as áreas de cana crua (A1 e A3). Não foi possível ajustar um modelo teórico ao semivariograma experimental para a emissão de CO_2 na área com manejo de cana queimada. Para as áreas de cana crua, A1 e A3, os modelos ajustados foram exponencial e esférico respectivamente. Estudando a variabilidade da emissão de CO_2 diária por 18 dias numa mesma área, LA SCALA et al. (2003) encontraram, em sua maioria, modelos esféricos de variabilidade espacial, porém alguns desses dias também apresentaram modelos exponenciais. A variável temperatura do solo apresentou modelo esférico para a área de cana crua A1 e gaussiano para as demais áreas. De acordo com ISAAKS & SRIVASTAVA (1989) o modelo gaussiano e o modelo esférico descrevem fenômenos com maior continuidade sem variações muito brusca em pequena escala. A literatura carece de trabalhos que caracterizam a estrutura de variabilidade da temperatura do solo. AL-KAYSSI (2002) estudou os aspectos de variabilidade espacial da temperatura do solo em casa de vegetação e o modelo esférico foi aquele que melhor descreveu a variabilidade encontrada. A umidade do solo apresentou modelo gaussiano para a área de cana crua A1 e exponencial para a área de cana queimada A2. Para a área de cana crua localizada em A3, o semivariograma experimental apresentou efeito pepita puro.

Vários trabalham indicam que a variável umidade do solo apresenta o modelo esférico como aquele que melhor descreve a sua variabilidade (SOUZA et al., 2004; HERBST & DIEKKRÜGER, 2003; ERSAHIN & RESIT BROHI, 2006; SIQUEIRA, 2006).

Tabela 2. Modelos, parâmetros dos semivariogramas estimados, grau de variabilidade espacial, coeficiente de determinação e soma de quadrados de resíduos para emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo, nas áreas estudadas.

	A1 (cana crua)						
	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	$C_0 / (C_0 + C_1)$	r^2	SQR
ECO2	Exp.	0,137	0,557	58,5	0,25	0,74	0,0168
Tsolo	Esf.	0,034	0,200	42,3	0,17	0,81	$2,2 \times 10^{-3}$
Usolo	Gau.	0,558	1,337	91,1	0,41	0,82	0,156
	A2 (cana queimada)						
	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	$C_0 / (C_0 + C_1)$	r^2	SQR
ECO2	E.P.P.	0,523	0,523	-----	1,00	-----	-----
Tsolo	Gau.	0,097	0,237	74,1	0,40	0,86	$2,1 \times 10^{-3}$
Usolo	Exp.	20,20	54,74	72,4	0,37	0,57	198
	A3 (cana crua)						
	Modelo	C_0	$C_0 + C_1$	a (m)	$C_0 / (C_0 + C_1)$	r^2	SQR
ECO2	Esf.	0,250	0,502	32,7	0,50	0,50	$9,84 \times 10^{-3}$
Tsolo	Gau.	0,026	0,042	66,0	0,61	0,71	$7,4 \times 10^{-5}$
Usolo	E.P.P.	44,97	44,97	-----	1,00	-----	-----

N = 69 (A1), N=60 (A2 e A3); Esf = esférico; Exp = exponencial, Gau = gaussiano; E.P.P. = efeito pepita puro; ECO2 = emissão de CO_2 do solo; Tsolo = temperatura do solo; Usolo = umidade do solo.

O alcance (a) é um importante parâmetro no estudo do semivariograma, uma vez que representa a distância máxima que pontos de uma mesma variável estão correlacionados espacialmente. Os valores de alcances estimados a partir dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais da emissão de CO_2 do solo, nas áreas de cana crua foram 58,5 m e 27,3 m para A1 e A3, respectivamente. A variável emissão

de CO_2 do solo na área de cana queimada apresentou efeito pepita puro, ou seja, ausência total de dependência espacial, o alcance (a), para os dados de ECO2, é menor que o menor espaçamento entre as amostras (10 m). ROCHETTE et al. (1991) encontraram valor de alcance bem definido de 20 m para a respiração do solo em área com a cultura do milho. DASSELAAR et al. (1998) encontraram valores de alcance de 55 e 75 m para a emissão de CO_2 em solos com cobertura vegetal. Em estudo sobre a variabilidade espacial do fluxo de CO_2 em solo desprovido de vegetação, LA SCALA et al. (2000) observaram valores de alcances de 58,4 m e 29,6 m, bastante semelhantes aos encontrados no presente estudo.

A temperatura do solo apresentou maior alcance na área de cana queimada (74,1 m), indicando maior dependência espacial dessa variável nessa área, do que nas áreas de cana crua 42,3 m e 66,0 m para A1 e A2 respectivamente. Tais valores de alcance são superiores àqueles reportados por AL-KAYSSI (2002) que encontrou valores de 35,5 m para a temperatura em solo desprovido de vegetação.

A umidade do solo apresenta alcances de 91,1 m para área de cana crua A1, e 72,4 m para área de cana queimada A2. SOUZA et al. (2004) encontraram valores de alcance para a umidade de 69 m para profundidade de 0 – 0,2 m em área de cultivo de cana-de-açúcar com queima e colheita manual, valor muito semelhante ao encontrado nesse estudo (72,4 m). JÚNIOR et al. (2006) observaram valores de alcance da umidade gravimétrica do solo para profundidades de 0,1 – 0,2 m , 0,2 – 0,3 m e 0,3 – 0,4 m variando de 10 a 80 m, contudo, na profundidade de 0 – 0,1 m não foi observado estrutura de variabilidade espacial da umidade do solo. ERSAHIN & RESIT BROHI (2006) avaliando a variabilidade espacial to teor de água no solo nas profundidades de 0 – 0,3 m e 0,3 – 0,6 m reportaram valores de alcances maiores a 300 m, muito superiores àqueles encontrados no presente trabalho.

A análise $C_0/(C_0 + C_1)$ é expressa em percentual do efeito pepita em relação ao patamar e tem por objetivo facilitar a comparação do grau de dependência espacial das variáveis em estudo (TRANGMAR et al., 1985). De acordo com CAMBARDELLA et al. (1994) e CHIEN et al. (1997) todas as emissões e a temperatura do solo em A1 podem ser consideradas fortemente espacialmente dependentes, pois $25\% \leq C_0/(C_0 + C_1)$. A

emissão registrada em A3 e as temperaturas e umidades do solo registrada nas demais áreas podem ser consideradas como moderadamente espacialmente dependentes, pois $25\% < C_0/(C_0 + C_1) < 75\%$.

Os semivariogramas teóricos e os padrões espaciais (mapas) da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo são apresentados nas Figuras 14, 15 e 16. Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais das variáveis ECO2, Tsolo e Usolo foram utilizados para obter a estimativa nos locais não amostrados no processo de interpolação denominado de krigagem. Para as variáveis que apresentaram efeito pepita puro, ECO2 em A2 e Usolo em A3 o método de interpolação utilizado foi o inverso da distância. A comparação dos mapas de krigagem de ECO2 para as áreas de cana crua nos permite verificar que a emissão de CO_2 em A1 apresenta uma distribuição mais errática, menos contínua quando comparada à A3, fato que pode ser explicado devido à diferença dos modelos ajustados que foi exponencial para A1 e esférico para A3. O modelo exponencial descreve uma função aleatória mais errática em pequenas distâncias, quando comparado ao modelo esférico, caracterizando eventos que variam muito em pequena escala, ou seja, mudanças abruptas ocorrem em todas as distâncias (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Quando se considera os valores da emissão de CO_2, nota-se que na estrutura da dependência espacial em A1 e A3, áreas com manejo cana crua, não há aparentemente uma relação espacial com a temperatura ou mesmo umidade do solo. Diferentemente, nota-se nos mapas apresentados da área de cana queimada (A2), uma relação da emissão de CO_2 com a umidade e a temperatura do solo. Nessa área, as regiões dos maiores valores da emissão de CO_2 do solo são as mesmas onde ocorrem os maiores valores de temperatura do solo e menores de umidade. A emissão de CO_2 é o resultado da interação dos processos de produção pela atividade microbiana e transporte através do perfil do solo. Apesar da emissão de CO_2 do solo ser uma variável dependente da temperatura e umidade do solo quanto à sua variabilidade temporal, vários autores afirmam que a contribuição desses fatores não é tão grande quando analisamos a variabilidade espacial de tal emissão (YIM et al., 2003; TEDESCHI et al., 2006). Porém, no presente trabalho, foi encontrada uma relação direta entre emissão e temperatura e

inversa entre emissão e umidade do solo, somente na área onde o manejo com cana queimada foi conduzido.

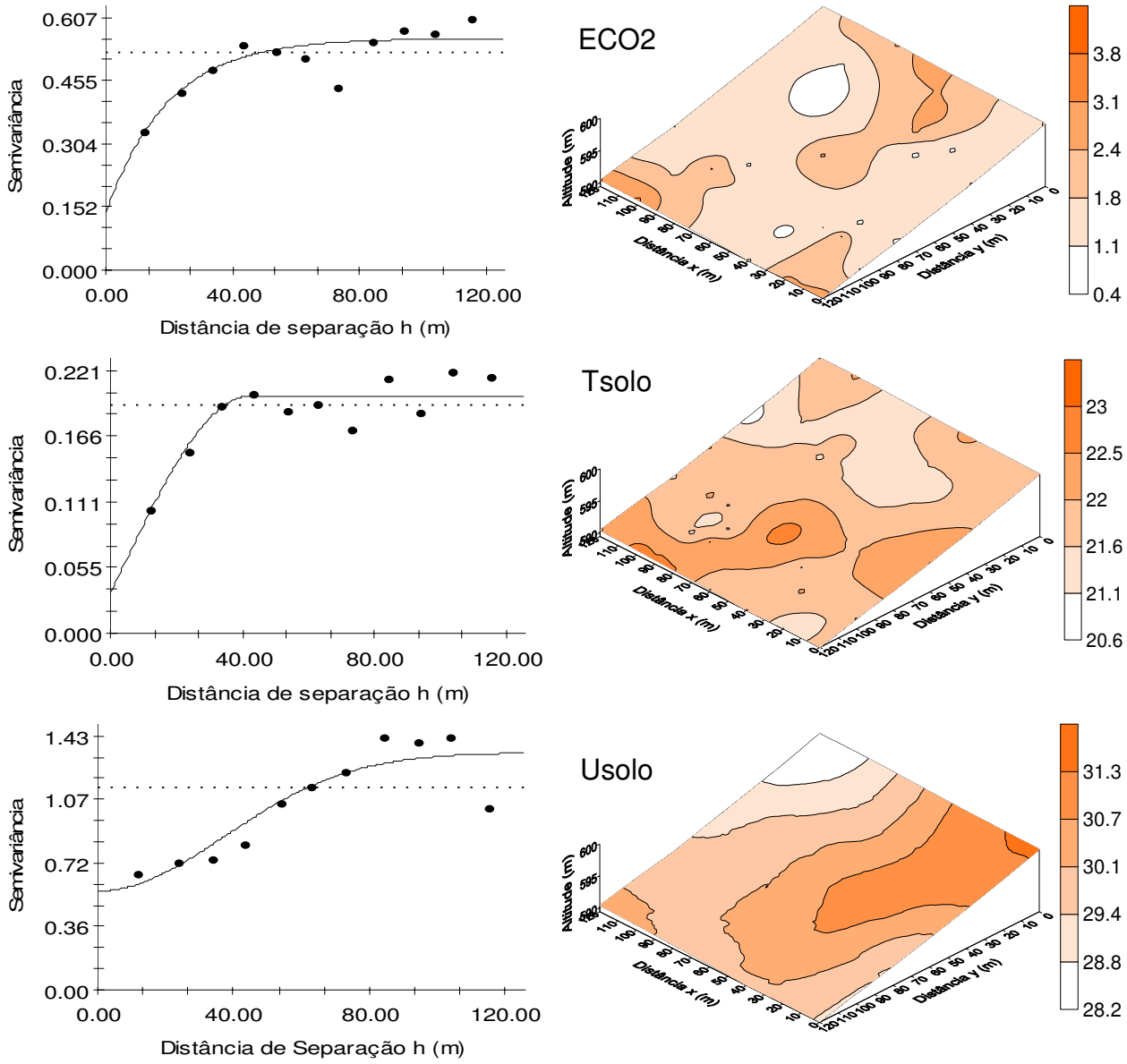

FIGURA 14. Semivariogramas ajustados e padrão espacial da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo para a área com cana crua (A1). ECO2 = emissão de CO_2 do solo (µmol m^{-2} s^{-1}); Tsolo = temperatura do solo (ºC); Usolo = umidade do solo (% de peso).

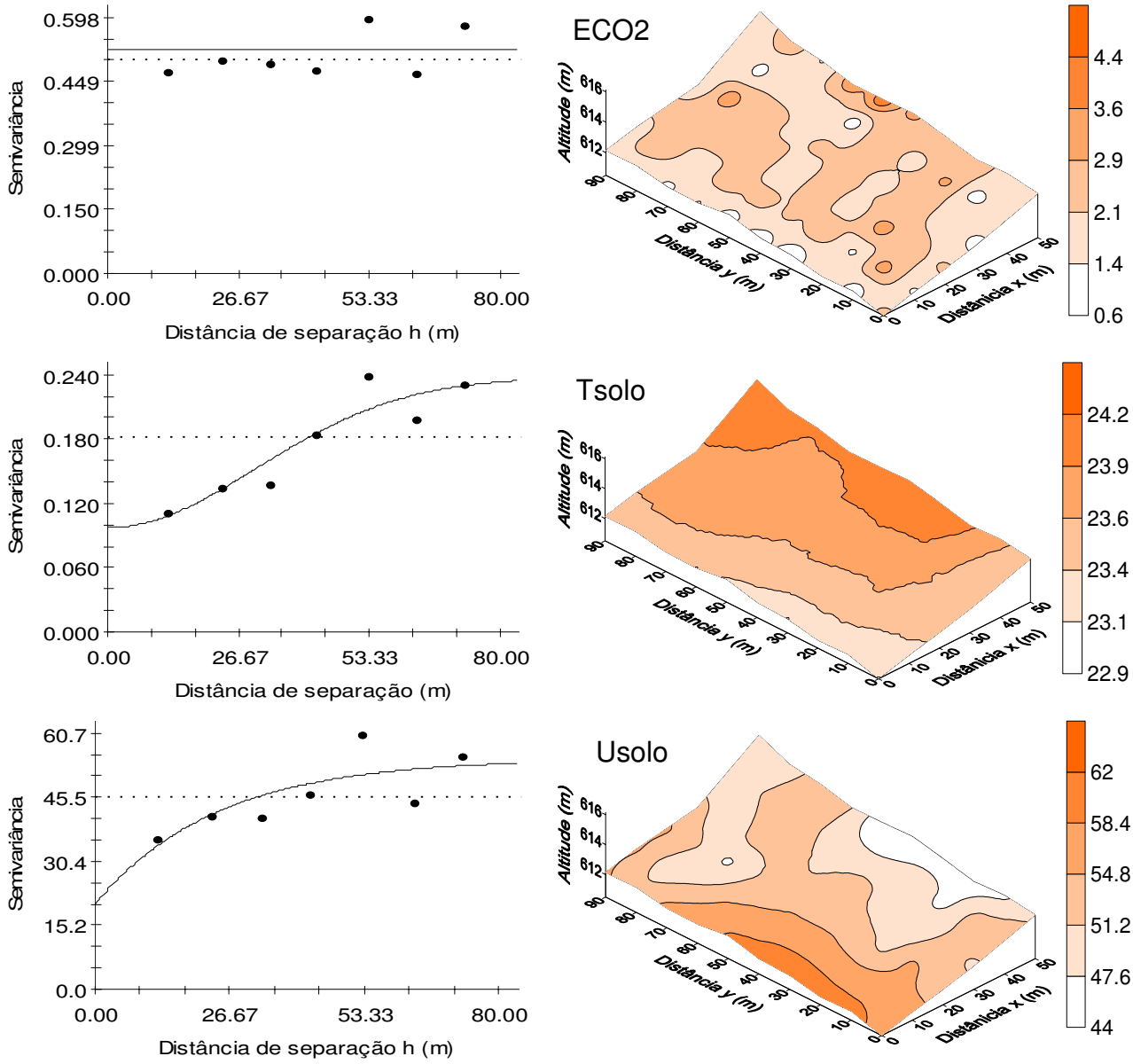

FIGURA 15. Semivariogramas ajustados e padrão espacial da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo para a área com cana queimada (A2). ECO2 = emissão de CO_2 do solo (µmol m^{-2} s^{-1}); Tsolo = temperatura do solo (ºC); Usolo = umidade do solo (% de volume).

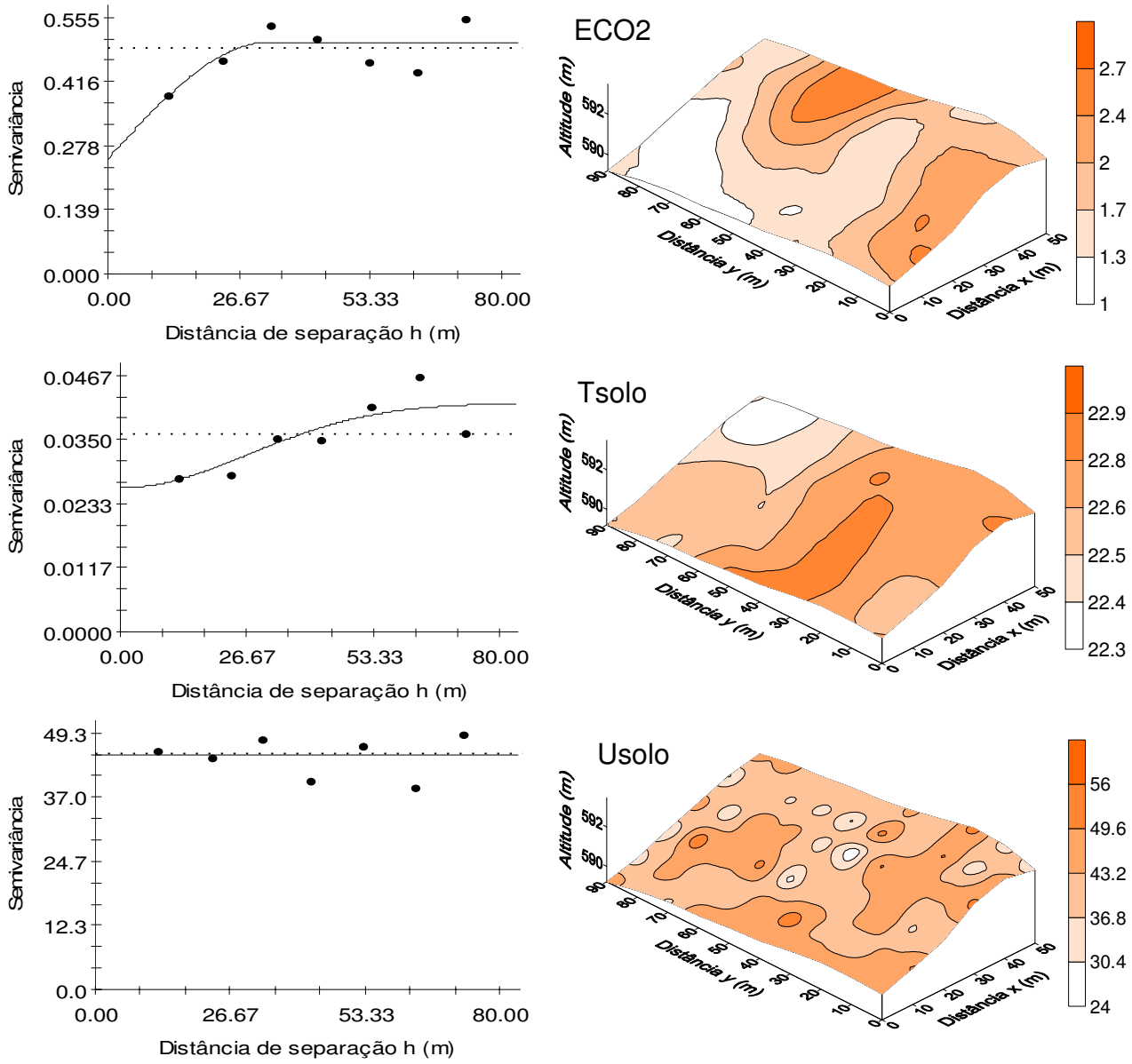

FIGURA 16. Semivariogramas ajustados e padrão espacial da emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo para a área com cana crua (A3). ECO2 = emissão de CO_2 do solo (µmol m^{-2} s^{-1}); Tsolo = temperatura do solo (ºC); Usolo = umidade do solo (% de volume).

A Tabela 4 apresenta os resultados dos coeficientes de correlação linear entre a emissão de CO_2, a temperatura e a umidade do solo, para cada uma das áreas estudadas. A análise de correlação linear entre a emissão de CO_2, a temperatura e a umidade do solo para cada uma das áreas estudadas indica que não houve

significância no sistema de cana crua (A1 e A3). Este aspecto, que em certo modo se assemelha ao discutido anteriormente na análise dos mapas, pode estar relacionado à presença de palhada na superfície dessas áreas. Apesar da declividade do terreno, aspectos como a incidência de radiação solar ou infiltração de água no solo podem ser menos importantes na definição da variabilidade espacial nessas áreas do que em locais sem palhada, como na cana queimada, onde uma relação com a declividade foi observada. Por outro lado, em A2, onde é adotada a prática de queima da cana para a colheita, foi observado índice de correlação positivo significativo entre a emissão de CO_2 e a temperatura do solo (0,59), e índice de correlação negativo significativo entre a emissão de CO_2 e a umidade do solo (-0,53). RETH et al. (2005) observaram índices de correlação positivo significativo da emissão de CO_2 com a umidade do solo apenas nos períodos secos do ano. A correlação negativa da emissão de CO_2 com umidade do solo reforça a hipótese anteriormente apresentada de que a umidade estaria afetando o processo de transporte do gás do interior para a superfície do solo nas área com cana queimada.

Tabela 4. Correlação linear entre a emissão de CO_2 em cada área com a temperatura e a umidade do solo.

Emissão de CO_2 (Área)	Tsolo	Usolo
ECO2 (A1)	0,02	0,14
ECO2 (A2)	0,59*	-0,53*
ECO2 (A3)	0,08	-0,15

* Índice de correlação significativo ($p < 0,05$).

A Tabela 5 apresenta a correlação linear entre a emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo com a altimetria de suas respectivas áreas. Para área de cana crua (A1), foi encontrado índice de correlação negativo e significativo apenas com a temperatura do solo, nessa área pontos situados na região mais elevada do levantamento apresentaram os menores valores de emissão temperatura do solo. A área de cana queimada apresentou índices de correlação significativos com todas as

variáveis, sendo positivo para a emissão de CO_2 e temperatura do solo, e negativo para a umidade do solo. A umidade do solo nas áreas de cana crua, não apresentou índice de correlação significativo com a topografia de suas respectivas áreas, indicando que a presença da palhada modifica o escoamento e conseqüente acúmulo de umidade nas regiões mais baixa do perfil.

Tabela 5. Correlação linear entre a emissão de CO_2, temperatura e umidade com a topografia das áreas de estudo.

Variáveis	Altimetria cana crua (A1)	Altimetria cana queimada (A2)	Altimetria cana crua (A3)
ECO2	0.13	0.39*	0.37*
Tsolo	-0.32*	0.66*	0.02
Usolo	-0.02	-0.43*	-0.09

* Índice de correlação significativo ($p < 0,05$).

V. CONCLUSÕES

A área com cana queimada (A2) apresentou uma maior média de emissão de CO_2 do solo quando comparada à área de cana crua A3. Nossos resultados indicam que práticas de manejo de cana-de-açúcar que evitam a queima e deixam a palhada da cultura sobre a superfície do solo devem ser levadas em consideração em futuras implementações de projetos classificados como MDL para atividades agrícolas, visando a possível captação de recursos financeiros através de créditos de carbono.

A emissão de CO_2 não apresentou estrutura de dependência espacial para a área com cana queimada. Os modelos ajustados para as áreas de cana crua foram exponencial e esférico para a área A1 e A3 respectivamente.

Os mapas de krigagem das variáveis indicam que a variação espacial da emissão de CO_2 do solo pode ser relacionada às variações de temperatura e umidade ao longo do terreno somente na área com cana queimada.

Apenas no local de cana queimada foi observada correlação entre os maiores e menores valores da emissão, temperatura e umidade do solo com a declividade do terreno. Este fato não foi verificado nos locais de manejo com cana crua, onde a palhada estava presente na superfície do solo.

Em futuras amostragens para a avaliação da emissão de CO_2 do solo em condições semelhantes, sugere-se a utilização de um gradeado regular suficiente para cobri toda a área de interesse com o intervalo de amostragem igual ao alcance de dependência espacial, associando uma melhor representatividade com um menor esforço de amostragem.

VI. REFERÊNCIAS

AL-KAYSSI, A. W. Spatial variability of soil temperature under greenhouse conditions. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 453-462, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 2, p. 101–09, 2000.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C. ; VOLKOFF, B. ; CARVALHO, M. C. S.; FELLER, C.; CERRI, C. E. P. ; ESCHENBRENNER, V. ; PICCOLO, M. C. ; FEIGL, B. J. . Gases do Efeito Estufa e Estoques de Carbono nos Solos: Inventário do Brasil. **Cadernos de Ciências e Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 235-246, 2005.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, Oxford, v. 24, n. 1, p.43-69, 1979.

BOEKER, E.; VAN GRONDELLE, R. **Environmental Physics**. John Wily & Sons, West Sussex, 1995. 448 p.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, New York, 1998. 333 p.

CALDERÓN, F. J.; JACKSON, L. E. Rototillage, disking, and subsequent irrigation: effects on soil dynamics, microbial biomass, and carbon dioxide efflux. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, n. 3, p. 752-58, 2002.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B., NOVAK J. M.; PARKIN T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima de cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. 2003. 103p. Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, Piracicaba.

CHIEN, Y.; LEE, D.; GUO, H.; HOUNG, K. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 4, p. 291-298, 1997.

DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRÉ, W. J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, Å. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON; L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society America Journal,** Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 1998.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999. 412 p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R. JOURDAN, C.; BONNEFOND J. M.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a *Eucalyptus* plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.

EVE, M. D.; SPEROW, M.; HOWERTON, K.; PAUSTIAN, K.; FOLLETT, R. F. Predicted impact of management changes on soil carbon storage for each cropland region of the conterminous United States. **Journal of soil and water conservation**, Iowa, v. 57, n. 4, p. 196–204, 2002.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO_2 efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

FRANKLIN R. B.; MILLS, A. L.; Multi-scale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an Virginia agricultural field. **FEMS Microbiology Ecology**, Amsterdam, v. 44, n. 3, p. 335-346, 2003.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum,** Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

GOTWAY CRAWFORD, C. A.; HERGERT, G. W. Incorporating spatial trends and anisotropy in geostatistical mapping of soil properties. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 298-309, 1997.

HANSON, P. J.; WULLSCHLEGER, S. D.; BOHLMAN, S. A.; TODD, D. E. Seasonal and topographic patterns of forest floor CO_2 efflux from an upland oak forest. **Tree Physiology**, Victoria, v. 13, n. 1, p. 1-15, 1993.

HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSEL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 60, n. 3, p. 740-747, 1996.

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B. Modelling the spatial variability of soil moisture in micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. **Physics and Chemistry of the Earth**, Amsterdam, v. 28, n. 6-7, p. 239-245, 2003.

HOUGHTON, J. T.; CALLANDER, B. A.; VARNEY, S. K. **Climate change 1992**: the supplementary report to the IPCC Scientific Assessment. Nova York: Cambridge University Press,1992. 230 p.

IPCC 1996. Climate **Change 1995: The Science of Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 572 p.

IPCC 2001. **Third Assessment Report, Climate Change 2001**. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Suíça. Disponível em http://www.grida.no/climate/ipcc_tar, acesso, Jul, 2006.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics.** Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JOHNSON, G. A.; MORTENSEN, D. A.; GOTWAY, C. A. Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geostatistics. **Weed Science**, Champaign, v. 44, n. 3, p. 704-710, 1996.

JÚNIOR, V. V., CARVALHO, M. P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O. S.; VÁZQUES, E. V., INGARAMO, O.E. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, n.1-2, p. 166-177, 2006.

KANG, S.; KIM, S.; OH, S.; LEE, D. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover, and air temperature. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 136, n. 1-3, p. 173-184, 2000.

KOLCHUGINA, T. P.; VINSON, T. S.; GASTON, G. G.; ROZHKOV, V. A.; SHWIDENKO, A. Z. Carbon polls, fluxes, and sequestration potential in soil of the former Soviet Union. In. LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (Ed). **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995, p. 25-39.

LA SCALA JÚNIOR, N.; LOPES, A.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T.; PEREIRA G.T. Soil CO_2 efflux following rotary tiller of a tropical soil. **Soil & Tillage Research** Amsterdam, v. 84, n. 2, p. 222-225, 2005.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR J.; PEREIRA G. T.; CORÁ J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO_2 emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.

LA SCALA JÚNIOR, N.; PEREIRA, G.T.; PANOSSO, A. R. Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO_2 num agrossistemas desprovido de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 88-95, 2003.

LAL, R. FAUSEY, N. R.; ECKERT, D. J. Land use and soil management effects on emissions of radiatively active gases from tow soils in Ohio. In. LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (Ed). **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995, p. 41-57.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004.

LEE, X.; WU, H.; SIGLER, J.; OISHI, C.; SICCAMA, T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 6, p. 1017-1026, 2004.

PASSIANOTO, C. C.; AHRENS, T.; FEIGL, B. J.; STEUDLER, P. A. CARMO, J. B.; MELILLO, J. M. Emissions of CO_2, N_2O and NO in conventional and no-till management practices in Rondônia, Brazil. **Biology and Fertility of Soils,** Heidelberg v. 38, n. 4, p. 200-208, 2003.

POCAY, V. G. **Relação entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2000. 176f. Dissertação de Mestrado (Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

PRIOR, S. A.; REICOSKY, D. C.; REEVES, D. W.; RUNION, G. B.; RAPER, R. L. Residue and tillage effects on planting implement-induced short-term CO_2 and water loss from a loamy sand soil in Alabama. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3-4, p. 197–99. 2000.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus,** Stockholm, v. 44, n. 2, p. 81–99, 1992.

RASCHKE, E. Is the additional greenhouse effect already evident in the current climate? **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, Berlin, v. 371, n. 6, p. 791-797, 2001.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C.; Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p.285-289, 2006.

RETH, S.; MARKUS, R.; FALGE, E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO_2 efflux – A modified model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, n. 1-2, p. 21-33, 2005.

REICOSKY, D. C., LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 6, p. 1237–1243, 1993.

RIBEIRO, C. E. R. **Avaliação da influencia da temperatura e umidade do solo na variação espaço-temporal da emissão de CO_2 por um latossolo**. 2005. 55f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba; Barros Marques Editoração Eletrônica, 2004. 302 p.

ROBERTSON, G. P. GS+: **Geostatistics for the environmental sciences**: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D. A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 63, n. 3, p. 621–28, 1999.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 71, n. 2, p. 189-196, 1991.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V. B; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal,** Madison, v. 65, n. 5, p. 1486-1499, 2001.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO_2 efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SILVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK G. Variabilidade espacial de atributos de solo e *Crotalaria juncea* L. em áreas severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 22, n. 1, p. 115-122, 1998.

SIQUEIRA, G. M. **Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos**. 2006 fls. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas.

SINEGANI, A. A. S.; MAHBOOBI A. A.; NAZARIZADEH, F. The effect of agricultural practices on the spatial variability of arbuscular mycorrhiza spores. **Turkish Journal of Biology**, Ankara, v. 29, n. 3 p. 149-153, 2005.

SINGH, J. S.; GUPTA, S. R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **The Botanical Review,** Bronx, v. 43, n. 4, p. 449-528, 1977.

SOUZA C. K. **Relação solo – paisagem – erosão e variabilidade espacial de latossolos em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Jaboticabal (SP).** 2001. 186f. Dissertação de Mestrado (Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 937-944, 2004.

SOUZA, Z. M. **Variabilidade espacial e atributo de um latossolo sob diferentes formas de relevo.** 2004. 141f. Tese de Doutorado (Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P.L.; BORGHETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, n. 1, p.110-121, 2006.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy,** San Diego, v. 38, p. 45-94, 1985.

VARELLA, R. F.; BUSTAMANTE, M. M. C.; PINTO, A. S.; KISSELLE, K. W.; SANTOS, R. V.; BURKE, R. A.; ZEPP, R. G.; VIANA, L. T. Soil fluxes of CO_2, CO, NO and N_2O an old pasture and from native savanna in Brazil. **Ecological Applications**, Estados Unidos, v. 14, n. 4, p. 221-231, 2004.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G.; NIESLSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observation. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 175-184, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 153, n. 1-2, p. 143-155, 2002.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics.** New York, Academic Press, 1980.

WEBSTER, R.; OLIVER M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. New York: Oxford University Press, 1990. 328 p.

WESTERN A. W.; GRAYSON, R. B.; BLÖSCHL, G.; WILLGOOSE, G. R.; MCMAHON T. A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 3, p.797-810, 1999.

WICHERN, F.; LUEDELING, E.; MÜLLER, T.; JOERGENSEN, R. G.; BUERKERT, A. Field measurements of the CO_2 evolution rate under different crops during an irrigation cycle in a mountain oasis of Oman. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 25, n. 1, p. 85-91, 2004.

YIM, M. H.; JOO, S. J.; SHUTOU, K.; NAKANE, K. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, n. 1-3, p. 585-588, 2003.