

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

**ANISOTROPIA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA  
EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR E EUCALIPTO**

**Ludhanna Marinho Veras**

Engenheira Agrônoma

**2019**

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

**ANISOTROPIA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA  
EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR E EUCALIPTO**

**Ludhanna Marinho Veras**

**Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso**

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).

**2019**

V476a

Veras, Ludhanna Marinho

Anisotropia da variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo sob cultivo de cana-de-açúcar e eucalipto / Ludhanna Marinho Veras. -- Jaboticabal, 2019

61 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Alan Rodrigo Panosso

1. Respiração do solo. 2. Atributos do solo. 3. Dependência espacial. 4. Dimensão fractal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANISOTROPIA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR E EUCALIPTO

**AUTORA: LUDHANNA MARINHO VERAS**  
**ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO**

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

Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

P/

Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA (Videoconferência)  
UNIMAR / Marília/SP

Prof. Dr. GENE TADEU PEREIRA  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 08 de março de 2019

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**LUDHANNA MARINHO VERAS** – Filha de Antônio José Soares Veras e Laurenice Penha Marinho, nasceu em Itaituba-PA, no dia 22 de setembro de 1989. Em agosto do ano de 2011, ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Chapadinha-MA. Foi bolsista de iniciação científica da FAPEMA, pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Iniciou em agosto de 2017 o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal-SP. No mês de março de 2019, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovada como Mestre em Agronomia.

*De nada vale o ganho sem a luta, assim como de nada vale a vida sem o aprendizado.*

*(David Saleeby)*

À Deus,  
À minha família.

**DEDICO**

Fabrcio Domingos Galatti,  
Grazieli de Silva Brito e Mayanna Karlla Lima Souza

**OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela dádiva da vida, por ser meu verdadeiro guia, meu refúgio, minha fortaleza, meu socorro presente.

À minha mãe, mulher da minha vida, pelo amor e apoio incondicional em cada passo dado rumo a novos caminhos.

Ao meu pai Antonio (*in memorian*), que em vida me ensinou o significado de família e a nunca desistir.

Ao meu irmão Antonyere, por ser o meu maior incentivador e defensor.

À minha sobrinha Maria Cecilya, criança de uma sensibilidade sem tamanho e que hoje com seus 7 anos de idade, muitas vezes é tão adulta quanto eu.

À minha grande, louca e unida família, que entende e aceita o motivo pelo qual nem sempre eu estou presente, seja no dia a dia ou em comemorações.

Aos amigos de infância que mesmo de longe sempre estão presentes.

À Rayanne Rocha, Leticiane Pereira, Adriene Fernanda e Isadora Moraes, irmãs, primas e amigas de vida. As nossas histórias serão sempre as melhores.

Ao Professor Alan Rodrigo Panosso, meu orientador e dono de uma inteligência e paciência surreal que muito contribuiu para a minha formação, sou muito grata por todo tempo dedicado a mim, pelos ensinamentos e pelo auxílio em mais uma etapa.

Às amigas que dividem apartamento comigo (Bruna de Oliveira Silva e Wellyne Rocha), bem como suas vidas e histórias. Muito obrigada pela paciência, incentivo e aceitação do meu jeito nem um pouco fácil.

Ao Fabrício Galatti, meu companheiro e amigo. Obrigada por entender minha vida, que é tão corrida quanto a sua e por dividir sua maravilhosa família comigo.

Ao Gustavo André Araújo dos Santos, amigo de outras jornadas e de tantas emoções e aventuras vividas.

À Camila Vieira, pela amizade, pelos ouvidos emprestados, pelos sorrisos e cafezinhos da tarde.



Aos amigos e funcionários do departamento de Ciências Exatas, pelo carinho e amizade.

Ao grupo de pesquisa Proagros (Grazieli, Mayanna, Roberto, Elane, Ricard, André, Mauro, Taise e professora Francirose Shigaki).

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, SP.

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

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO .....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Gases do efeito estufa na agricultura .....	4
2.2 Produção e emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....	5
2.3 Anisotropia do solo .....	7
2.4 Variabilidade espacial de CO <sub>2</sub> do solo e atributos químicos e físicos do solo ...	8
2.5 Geoestatística aplicada ao estudo da anisotropia de CO <sub>2</sub> do solo e atributos físicos e químicos do solo .....	9
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
3.1 Caracterização da área em estudo .....	11
3.2 Avaliação da emissão de CO <sub>2</sub> , temperatura e umidade do solo .....	13
3.3 Avaliação dos atributos físicos e químicos do solo .....	14
3.4 Análises estatísticas e processamento de dados .....	14
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>18</b>
4.1 Estatísticas descritiva da emissão de CO <sub>2</sub> , temperatura do solo e umidade do solo .....	18
4.2 Dimensão Fractal ( $D_F$ ) de FCO <sub>2</sub> do solo e demais atributos químicos e físicos do solo .....	21
4.3 Variabilidade espacial de CO <sub>2</sub> , MO e Ds. ....	26
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>

## ANISOTROPIA DA VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-ACÚCAR E EUCALIPTO

**RESUMO** – O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é um dos principais gases do efeito estufa adicional, sendo a agricultura uma grande contribuinte para a emissão do mesmo no Brasil. Para melhor modelar a perda de carbono do solo via CO<sub>2</sub>, deve-se considerar a variação espacial dessa variável, bem como dos atributos do solo, atento ao uso do solo agrícola e manejo. O presente estudo objetivou caracterizar a anisotropia espacial de FCO<sub>2</sub> e atributos físicos e químicos do solo por meio da dimensão fractal (D<sub>F</sub>), na região do Cerrado no Mato Grosso do Sul. Para o estudo da anisotropia e geração de mapas de padrões espaciais foi utilizado uma malha regular amostral constituída de 102 pontos nas duas áreas. Para a FCO<sub>2</sub> foram observados valores de D<sub>F</sub> 2,51 ± 0,41 para cana-de-açúcar e 2,61 ± 0,18 para eucalipto. A D<sub>F</sub> de FCO<sub>2</sub> e dos atributos do solo estudadas por meio do gráfico de rosas mostrou que o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo apresenta variação espacial associada a diferentes atributos químicos e físicos do solo. Foram observados ganhos de precisão quando comparados os mapas de padrões espaciais isotrópico e anisotrópico para as variáveis FCO<sub>2</sub>, matéria orgânica do solo (MO) e a densidade do solo (Ds) nas duas áreas, indicados pela validação cruzada, com os valores de coeficiente de determinação entre 0,82 e 0,99 para área de cana-de-açúcar e 0,94 e 0,98 para áreas de eucalipto. FCO<sub>2</sub> é um fenômeno de natureza complexa, sendo sua anisotropia espacial associada às variações espaciais dos demais atributos do solo e suas relações interespecíficas aliadas inclusive às ações antrópicas.

**Palavras-chave:** Respiração do solo, atributos do solo, dependência espacial, dimensão fractal.

## ANISOTROPY OF SPATIAL VARIABILITY OF CO<sub>2</sub> SOIL EMISSION IN A SUGARCANE AND EUCALYPTUS AREA

**ABSTRACT** – Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) is one of principal greenhouse gases, being the agriculture one of the contributor major to emission specially in Brazil. To better understands this phenomenon, it is necessary to consider the spatial variation of this variable, as well as the attributes of the soil, considering the type of agricultural land use and management. The present study objective of characterizing the spatial anisotropy of FCO<sub>2</sub> and other soil physical and chemical attributes, through the fractal dimension ( $D_F$ ), in Cerrado region, Mato Grosso do Sul. For the study of anisotropy and maps generation of spatial patterns, a regular sample consisting of 102 points in both areas was used. To FCO<sub>2</sub> anisotropy values of  $D_F$  were observed for  $2.51 \pm 0.41$  for sugarcane and  $2.61 \pm 0.18$  for eucalyptus areas.  $D_F$  of FCO<sub>2</sub> and other soil attributes studied through the rose graphics showed that the FCO<sub>2</sub> presents spatial variation associated with different soil chemical and physical attributes. Precision and accuracy gains were observed when comparing spatial patterns generated from isotropic and anisotropic modeling for FCO<sub>2</sub>, soil organic matter (MO) and soil density (Ds) in the two study areas, as indicated by cross-validation, with values of determination coefficient varying between 0.82 and 0.99 for sugarcane and 0.94 and 0.98 for eucalyptus areas. The spatial pattern indicated that the spatial variability of FCO<sub>2</sub>, soil organic matter (MO) and soil density (Ds) that obtained gains in the two studied areas with cross validation. The FCO<sub>2</sub> is a phenomenon of complex nature being its spatial anisotropy related to the spatial variation of the other soil attributes and its intrinsically relationship in addition with the anthropogenic action in the different cultivated areas studied.

**Keywords:** Soil respiration, soil attributes, spatial dependency, fractal dimension.

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
<b>Tabela 1</b> – Análise descritiva para as emissões de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), temperatura do solo (°C) e umidade do solo (%) nos dias estudados em área sob cultivo de cana-de-açúcar .....	19
<b>Tabela 2</b> – Análise descritiva para as emissões de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ), temperatura do solo (°C) e umidade do solo (%) nos dias estudados em área sob cultivo de eucalipto .....	20

## LISTA DE FIGURAS

### Página

<b>Figura 1</b> – Área experimental de cana-de-açúcar e eucalipto com suas respectivas malhas amostrais para a determinação da emissão de CO <sub>2</sub> e demais atributos do solo .....	11
<b>Figura 2</b> – Precipitação (mm) e temperatura média do ar (°C) durante o período de avaliação dos experimentos em solo sob cultivo de a) cana-de-açúcar e b) eucalipto .....	12
<b>Figura 3</b> – Gráfico de rosas da Dimensão fractal (D <sub>F</sub> ) do fluxo médio de CO <sub>2</sub> e dos demais atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes direções com escala de 5/80m <b>a)</b> fluxo médio de CO <sub>2</sub> do solo; <b>b)</b> Teor de matéria orgânica do solo; <b>c)</b> densidade do solo; <b>d)</b> cálcio; <b>e)</b> acidez potencial; <b>f)</b> Capacidade de troca catiônica; <b>g)</b> Macroporos; <b>h)</b> Microporos; <b>i)</b> Porosidade total .....	22
<b>Figura 4</b> - Matriz de correlação da dos dados brutos e dados fractais da área de cana-de-açúcar .....	23
<b>Figura 5</b> – Gráfico de rosas da Dimensão fractal (D <sub>F</sub> ) do fluxo médio de CO <sub>2</sub> e dos demais atributos do solo sob cultivo de eucalipto em diferentes direções com escala de 5/80m <b>a)</b> fluxo médio de CO <sub>2</sub> do solo; <b>b)</b> Teor de matéria orgânica do solo; <b>c)</b> densidade do solo; <b>d)</b> cálcio; <b>e)</b> acidez potencial; <b>f)</b> Capacidade de troca catiônica; <b>g)</b> Macroporos; <b>h)</b> Microporos; <b>i)</b> Porosidade total .....	24
<b>Figura 6</b> - Matriz de correlação da dos dados brutos e dados fractais da área de eucalipto .....	25
<b>Figura 7</b> – Rede de correlação linear da variabilidade temporal da área de cana-de-açúcar, a) pontos amostrais, b) pontos de conexão.....	26
<b>Figura 8</b> – Rede de correlação linear da variabilidade temporal da área de eucalipto, a) pontos amostrais, b) pontos de conexão. ....	27
<b>Figura 9</b> – Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para emissão de CO <sub>2</sub> do solo em área de cana-de-açúcar .....	28
<b>Figura 10.</b> Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação para MO do solo em área de cana-de-açúcar .....	29
<b>Figura 11.</b> Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para D <sub>s</sub> em área de cana-de-açúcar .....	30
<b>Figura 12</b> – Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação para emissão de CO <sub>2</sub> do solo em área de eucalipto .....	31

**Figura 13.** Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação para MO do solo em área de eucalipto..... 32

**Figura 14.** Mapas de padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação para Ds em área de eucalipto ..... 33

## 1 INTRODUÇÃO

O debate sobre a mudança climática tem ganhado destaque a cada ano, os seus impactos têm deixado a sociedade sob alerta e com o desafio de entender as severas mudanças que o clima vem apresentando (Silva et al., 2016).

Apesar de incertezas em relação às mudanças globais, a humanidade é apontada como principal responsável pelo aumento da temperatura global, devido aos crescentes níveis de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Dentre as atividades relacionadas com a emissão desses gases, 75% são pertinentes às práticas agrícolas e as mudanças no uso da terra logo após o desmatamento (Cerri et al., 2013).

Considerando a grande demanda de produção e sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores de importantes commodities agrícolas (Pereira et al., 2017), ocupando o primeiro lugar como maior produtor mundial de cana-de-açúcar e liderando a produtividade no setor florestal (IBÁ, 2016), com o eucalipto, fez com que a emissão de gases do efeito estufa pela produção agrícola aumentasse consideravelmente. Assim, tem-se buscado estratégias para reduzir as emissões desses gases principalmente do CO<sub>2</sub>, que contribui com 60% do efeito estufa adicional na atmosfera (IPCC, 2007). Em associação, os atributos do solo juntamente com as condições climáticas ordenam o potencial de emissão de CO<sub>2</sub> dos solos agrícolas (Schlömer et al., 2013; Xie et al., 2015).

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo é entendida como resultado da interação dos processos de produção do gás realizadas no interior do solo e do transporte desse gás para a atmosfera (Sartori et al., 2006; Yiqi e Zhou, 2006; Panosso et al., 2012), bem como uma interação complexa dos atributos físicos, químicos, biológicos e climáticos.

Dessa forma, FCO<sub>2</sub> é dependente de fatores intrínsecos ao solo, como a temperatura e a umidade (Epron et al., 2006; Schwartz et al., 2010; Silva-Olaya et al., 2013; Costa et al., 2017), o teor de matéria orgânica (Lal, 2009), densidade e porosidade do solo (Brito et al., 2009; Jassal et al., 2004; Texeira et al., 2013) e também o pH (Xu; Qi 2001).

A estrutura espacial dos atributos do solo é afetada pelas práticas de manejo (Panosso et al., 2009) e por inúmeros fatores de forma altamente complexa, devido à covariação espacial e temporal entre os fatores que a influenciam (Allaire et al., 2012;



Fóti et al., 2016), apresentando diferentes padrões de variabilidade espacial em diferentes direções (La Scala et al., 2009; Panosso et al., 2012), sendo contínua ao longo das superfícies e dependente da escala (Zhao et al., 2009).

De acordo com La Scala et al. (2009), em áreas agrícolas a resposta da emissão de CO<sub>2</sub> às propriedades do solo como porosidade e teor de água do solo, bem como as condições de temperatura e umidade do solo, podem sofrer variação tanto espacial quanto temporal (La Scala et al., 2010).

Essa variação espaço temporal também foi observada em área de floresta cultivada sob solo argiloso em Maryland, EUA (Savva et al., 2013). Assim, tão importante quanto determinar a variabilidade espacial dos atributos do solo (Bottega et al., 2011; Siqueira Coelho et al., 2012), é realizar uma caracterização adequada destes (Grego & Vieira, 2005; Lima et al., 2015).

De tal modo, o uso da geoestatística permite a avaliação da variação dos atributos de um local para o outro e os mapeamentos para as zonas específicas de manejo (Vieira, 2010; Montanari et al., 2010; Corrêa et al., 2015).

A geoestatística tem sido amplamente utilizada para caracterizar a variabilidade espacial e temporal (Isaaks e Srivastava, 1989), os semivariogramas podem fornecer um grau de dependência espaço-temporal entre os pontos amostrais em uma direção.

A geometria fractal pode ser usada para descrever de forma simples a estrutura complexa do solo, por meio da utilização de poucos padrões fractais, como a dimensão fractal, que junto com as alterações em outros parâmetros, refletem os efeitos do manejo nos atributos do solo (Pachepsky e Crawford, 2004), oferecendo oportunidades descritivas e preditivas para o estudo do solo fornecendo um quadro quantitativo único para a integração biológica, fenômenos químicos e físicos ao longo de uma gama de escalas espaciais e temporais (Perfert e Kay, 1995).

A combinação de geoestatística e análise fractal espacial aumentam as ferramentas disponíveis para entender a variabilidade espacial do solo (Perez et al., 2010). Dessa forma, a técnica fractal pode ser utilizada ainda para investigar e caracterizar quantitativamente a variabilidade espacial ao longo de um grande intervalo de escalas (Biswas et al., 2012), podendo ajudar no entendimento das ações de perda de CO<sub>2</sub> do solo que são representadas pelas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, e governadas pela difusão do CO<sub>2</sub> por meio dos poros do solo, podendo

ser influenciadas pelas propriedades ou pela cobertura vegetal presente no local (Pinto Júnior et al., 2009).

Diante do exposto, a hipótese do trabalho é que os atributos químicos e físicos do solo sob diferentes usos apresentam anisotropia espacial, e estas, por sua vez, refletem seus padrões na variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

Assim, o objetivou-se caracterizar a anisotropia espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e demais atributos físicos e químicos do solo, por meio da dimensão fractal, na região do Cerrado, no Mato Grosso do Sul, em diferentes usos agrícolas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Gases do efeito estufa na agricultura

A ocorrência de fenômenos naturais extremos como as intensas ondas de calor, tempestades, secas e furacões, cada vez mais severos, tem sido apontada como consequência das mudanças ocorridas no clima global (IEA, 2017). É crescente a preocupação mundial em relação as mudanças climáticas do planeta, atribuídas principalmente a emissão adicional de gases do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), além dos gases fluorados.

De acordo com a EPA (2018) (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), o  $\text{CO}_2$  engloba 81% das emissões de GEE, seguido pelo  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , que contribuem com 10% e 6%, respectivamente.

Os GEE's são liberados por uma variedade de processos, o mais importante é o consumo de combustíveis fósseis para geração de energia, calor e transporte, e atualmente soma mais de 9 bilhões de toneladas de C- $\text{CO}_2$  para a atmosfera a cada ano (Andres et al., 2012; Maraseni e Qu, 2016). Além dessas fontes, atividades antrópicas como a agricultura, também contribuem consideravelmente para a emissão de GEE, e de acordo com o IPCC (2007) gases de efeito estufa emitidos na atmosfera por atividades antrópicas foram responsáveis pelo aumento da temperatura média global de aproximadamente  $0,7^\circ\text{C}$  durante o século passado.

Devido à crescente demanda mundial por alimentos e outros produtos agrícolas, a intensificação da agricultura duplicou a produtividade das culturas entre 1970 e 2016, mas também aumentou os problemas com os impactos ambientais (FAOSTAT, 2017, Boscaro et al., 2018).

A agricultura é responsável pela produção de três gases de efeito estufa:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , cada gás contribui para o aquecimento da atmosfera; no entanto, o potencial de aquecimento de cada gás possui variação. As emissões de  $\text{CO}_2$  estão associadas principalmente a mudanças emergentes no uso da terra e os diferentes sistemas de preparo e manejo do solo com as diversas culturas agrícolas. Sistemas de preparo que utilizam o revolvimento do solo são conhecidos por acelerar a decomposição da matéria orgânica do solo (MO) e conseqüentemente contribuir significativamente para a intensificação da emissão de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera

(Pezzuolo et al., 2014; 2017). Por outro lado, a redução ou eliminação do revolvimento do solo em sistemas de preparo como plantio direto, além de aumentarem o conteúdo de C em solos agrícolas também podem reduzir a porosidade total e alterar a distribuição do tamanho dos poros para os poros menores (Beare et al., 2009). Nessas condições a produção de  $N_2O$  é potencializada tanto via a nitrificação como a desnitrificação (Alvarez, 2005).

Portanto, cada técnica de preparo do solo influencia diferentemente a quantidade de carbono do solo. Assim, combinação de diferentes práticas de manejo pode contribuir para mitigar as mudanças climáticas de diferentes formas (Marraccini et al., 2012).

As emissões de GEE dos solos precisam ser melhor quantificadas para os relatórios globais, uma vez que 35%  $CO_2$ , 47%  $CH_4$ , 53%  $N_2O$  e 21% óxido nítrico das respectivas emissões anuais totais referem-se as emissões provenientes de solos agrícolas (IPCC,2007).

O tipo de solo com relação as suas propriedades físicas e químicas, as condições climáticas, e o tipo de cultura a ser implantada em determinada área também podem alterar significativamente os valores de monóxido de carbono atmosférico e outros GEE emitidos, e portanto precisam ser avaliados separadamente para caracterizar adequadamente a desgaseificação do solo, por conta da multiplicidade de processos de interações que podem ocorrer no sistema solo-planta-atmosfera (Oertel et al., 2016).

Deste modo, muitos estudos têm sido conduzidos para desenvolver inventários de emissões de GEE relacionados a atividades agrícolas, e é importante que os mesmos sejam feitos em uma variedade de escalas espaciais (local, regional e global).

## **2.2 Produção e emissão de $CO_2$ do solo**

Em relatório elaborado pelo INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC (IPCC, 2007), o aquecimento global foi ressaltado como uma realidade, com destaque a contribuição do ser humano em fenômenos ligados às mudanças climáticas, enfatizando as mudanças no uso e manejo do solo que de acordo com o relatório, são responsáveis por aproximadamente um quarto das

emissões globais de gases do efeito estufa (GEE), incluindo o desmatamento, emissões de CH<sub>4</sub> na agropecuária e de N<sub>2</sub>O em solos fertilizados (IPCC, 2014).

O fenômeno conhecido como efeito estufa se dá devido a altas concentrações na atmosfera de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e vapores d'água. Sendo o aumento dessa concentração de GEE a principal causa do aquecimento global. De acordo com Vermeulen et al. (2012) e Smith et al. (2014) os GEE's estão relacionados principalmente à queima de combustíveis fósseis e também às mudanças no uso do solo, especialmente na agricultura.

A agricultura contribui significativamente para o total de emissões antropogênicas de GEE (Smith et al., 2007). Atividades relacionadas à produção de alimentos, pecuária, fertilizantes, manejo do solo, liberam quantidades expressivas de GEE (Rakotovo et al., 2017), com isso o setor agropecuário tem desenvolvido estratégias para mitigação desses gases (Smith et al., 2007; Sá et al., 2017). Devido à grande quantidade emitida na atmosfera, o CO<sub>2</sub> é o gás que mais contribui com esse fenômeno e também o considerado mais importante GEE de origem antropogênica (IPCC, 2007).

A produção de CO<sub>2</sub> que acontece no interior do solo é um processo relacionado à atividade biológica, bem como a respiração da microbiota, das raízes (Ryan e Law, 2005) e também a decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana, influenciada pela temperatura e umidade do solo (Epron et al., 2006; Lal, 2009). Seu transporte é explicado pela equação de difusão, que é controlada pelo gradiente de concentração de CO<sub>2</sub> existente entre o solo e a atmosfera (Panosso et al., 2009).

A emissão de CO<sub>2</sub> é o resultado de interações complexas entre os atributos físicos, químicos, biológicos e climáticos e os atributos físicos, químicos (Panosso et al., 2011; Bottega et al., 2013; Moitinho et al., 2013; Tavares et al., 2016), como a temperatura e a umidade (Epron et al., 2006; Schwartz et al., 2010; Silva-Olaya et al., 2013; Costa et al., 2017), o teor de matéria orgânica (Lal, 2009), densidade e porosidade do solo (Brito et al., 2009; Jassal et al., 2004) e também o pH (Xu e Qi 2001).

Como visto, a emissão de CO<sub>2</sub> do solo pode envolver processos de interação ambientais físicos, químicos e biológicos do solo (Saiz et al., 2006; Carbonell Bojollo et al., 2012), e as mudanças no uso da terra que uma vez manejada de forma incorreta

pode acarretar a um declínio no estoque de matéria orgânica aumentando a emissão de CO<sub>2</sub> para atmosfera (Lal 1997). Assim, adotar práticas de manejo adequadas, minimizando a decomposição e mineralização do carbono orgânico do solo, promovendo a proteção desse carbono pode aumentar o sequestro deste. (Cerri et al., 2006; Panosso et al., 2009).

### **2.3 Anisotropia do solo**

O termo anisotropia também inclui a anisotropia inerente e a induzida, estando associado às distintas propriedades que o solo apresenta em cada direção. A anisotropia é uma característica dos solos que condiciona tanto o seu comportamento quanto a previsão do mesmo, causada por características intrínsecas a ele, como a forma de deposição de solo, fatores externos ou também pelo estado de tensão que este se encontra.

De acordo com Piovezan et al, (2016), é uma característica frequente nos elementos da natureza, onde a variabilidade ou distribuição espacial desses elementos podem ocorrer de forma mais intensa em uma direção e do que em outra.

Assim, estudar a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> na agricultura é importante para manter a sustentabilidade de culturas, auxiliar na preservação do carbono do solo e reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa, além de fornecer informações em relação à dinâmica de CO<sub>2</sub> no solo (Panosso et al., 2008; Brito et al., 2009).

As propriedades do solo, também apresentam anisotropia. Assim, a variabilidade espacial dos atributos do solo ocorre de forma natural devido a fatores pedogênicos e uso e manejo do solo (Western et al., 1999).

Segundo Trangmar et al, (1986) a anisotropia ocorre devido uma complexa interação dos processos de formação do solo, que resulta a distribuição espacial das propriedades do solo, incluindo FCO<sub>2</sub>. A variabilidade das características do solo pode ser tratada por meio de diferentes métodos estatísticos. Alguns autores têm demonstrado que os atributos de solo muitas vezes não revelam uma variação puramente aleatória ao longo de um terreno, apresentando correlação espacial

(Almeida; Guimarães, 2016; Gomes et al., 2007; Zanão Júnior et al 2010; Zonta et al. 2014).

Para se estudar a anisotropia, o modelo proposto deve representar bem a variabilidade espacial da variável estudada. Modelos mais adequados para esse estudo estão na geoestatística que engloba modelos, baseados na teoria das variáveis regionalizadas e nas funções aleatórias, formalizadas por Matheron (1963, 1971).

Assim, a geoestatística tem sido utilizada como importante ferramenta de análise dos dados, a fim de modelar e estudar a estrutura de dependência espacial dos atributos do solo, por meio do ajuste de semivariogramas experimentais (Manziona e Zimback, 2011).

#### **2.4 Variabilidade espacial de CO<sub>2</sub> do solo e atributos químicos e físicos do solo**

De estudo mais antigos até estudos recentes, mostram que a variabilidade espacial do solo pode apresentar dependência espacial, podendo ser ocasionada por diversos fatores (Trangmar et al., 1985; Zhang et al., 1992; Vieira, 1995; Mantovanelli et al., 2016; Ferrari et al., 2018).

Assim, a própria formação o solo pode apresentar heterogeneidade horizontal e verticalmente (Cajazeiras e Assis Júnior, 2011), ou seja o preparo do solo, efeitos residuais, manejo adotados, forma de aplicação de insumos, e outros fatores podem em algumas situações tanto aumentar a heterogeneidade do solo como diminuí-la (Carvalho et al., 2003, Cavalcante et al., 2007; Vieira et al., 2011).

Os atributos químicos como Cálcio (Ca), capacidade de troca catiônica (CTC), e MO, são bastante sensíveis a variabilidade (Cambardella et al., 1994; Campos et al., 2006), já os atributos físicos mais sensíveis a essa variabilidade espacial são a estabilidade de agregados, densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) (Vasconcelos et al., 2010; Vieira et al., 2011).

Embora com constantes estudos na área, os atributos do solo e os fatores ambientais que influenciam o CO<sub>2</sub> são de difícil separação e interpretação, pois estes, assim como a perda de C do solo, via respiração, apresentam variabilidade espacial (Bicalho et al., 2017; Cunha et al., 2018).

Na ciência do solo, muitos dados observados têm apresentado dependência espacial, mostrando variações em escalas maiores, de poucos metros a escalas menores, de quilômetros (Silva et al., 2004; Souza et al., 2006). Técnicas geoestatísticas possibilitam determinar valores a diversos pontos na área estudada, podendo ajudar a encontrar uma melhor forma de manejo e também reduzir os efeitos da variabilidade espacial na área.

Os aspectos da variabilidade espacial se fazem importante no estudo da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, pois o FCO<sub>2</sub> varia no tempo e no espaço dependendo das condições edafoclimáticas e das práticas de manejo agrícola adotada (Panosso et al., 2009).

Portanto, caracterizar a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e seus atributos químicos e físicos na agricultura, auxilia para a manutenção da sustentabilidade de culturas, fornece subsídios para o manejo adequado (Arthur et al., 2014), contribui para o uso racional dos recursos (Noetzold et al., 2018). Além de preservar o carbono do solo e reduzir a emissão de gases que causam o efeito estufa (Panosso et al., 2009), fornece importantes informações sobre a dinâmica de CO<sub>2</sub> no solo (Brito et al., 2009), permitindo o entendimento das propriedades envolvidas nos processos de produção e transporte de CO<sub>2</sub>, facilitando as explicações sobre as variações espaciais da emissão de sua emissão no solo (Panosso et al., 2011).

## **2.5 Geoestatística aplicada ao estudo da anisotropia de CO<sub>2</sub> do solo e atributos físicos e químicos do solo**

A variabilidade ou distribuição espacial de determinado elemento pode ocorrer mais forte em uma direção do que em outra (Isaaks et al., 1989; Yamamoto, 2013).

Para se trabalhar com a anisotropia, se faz importante a representação adequada da variabilidade espacial da área a ser estudada. O uso da geoestatística permite essa representação com a propostas de modelos, com análises minuciosas para identificação estrutural, krigagem ou simulação (Camargo et al., 2001) que auxiliam na interpretação da distribuição espacial dos dados e na tomada de decisão (Srivastava, 1996)

Estudar a variabilidade espacial por meio da geoestatística permite a interpretação dos resultados baseado na estrutura da dos atributos avaliados, levando



em conta a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem (Souza et al., 2009), além de indicar alternativas de uso, possibilitando uma melhor compreensão da variabilidade dos atributos e da influência no ambiente (Silva Neto et al., 2012), por meio da eficiência na detecção e predição de padrões espaciais o uso de metodologias estatísticas aplicadas ao estudo de distribuição espacial vem aumentando consideravelmente (Ushizima et al., 2003).

Porém, monitorar os atributos no solo não é algo simples, estes por sua vez são constituídos de uma complexa interação de fatores pedogenéticos, diferenças em relação à dureza, sofrem influência das condições de clima e relevo, o que causa a variabilidade espacial de seus atributos (Matias et al., 2015).

Considerando que os atributos do solo podem variar de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso por meio da dependência espacial (Vieira, 2010), a caracterização da variabilidade é essencial para um melhor entendimento das interrelações entre atributos e manejo.

Sendo assim, a geoestatística se mostra uma ferramenta eficaz e que pode ser utilizada para fins de manejo do solo, indicando os atributos com dependência espacial, servindo ainda de ferramentas no manejo, através de mapas gerados (Silva et al., 2010; Pelissari et al., 2013).

Com o conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo e da emissão de CO<sub>2</sub> é possível descrever a correlação entre as variáveis (Schaffrath et al., 2008). Assim, na ciência do solo a geoestatística já tem sido aplicada aos estudos das características físicas e químicas do solo (Wojciechowski et al., 2009), e na caracterização espacial e temporal da emissão de CO<sub>2</sub> (Brito et al., 2009).

Assim, entender a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e seus atributos físicos e químicos em áreas agrícolas indicando se um atributo apresenta ou não estrutura espacial (Souza et al., 2004; Grego; Vieira, 2005; Bottega et al., 2013) se faz importante para a realização de intervenções precisas (Carvalho et al., 2012; Pelissari et al., 2013; Aquino et al., 2014).

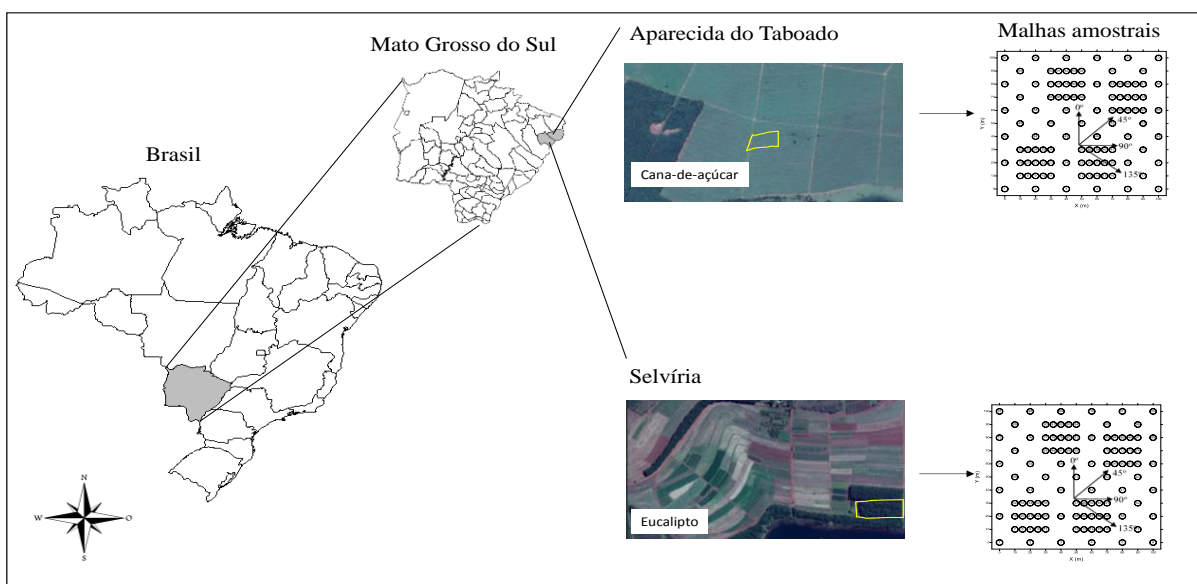
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado a partir de 02 experimentos conduzidos no período de 2014 e 2015 em áreas plantio comercial de cana-de-açúcar no sistema de cana crua e de reflorestamento com eucalipto, que originaram trabalhos sobre a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em cultivos agrícolas diferenciados. Assim, foi utilizado um banco de dados comum referentes aos estudos de Terçariol et al. (2016), Pinotti (2017) e Vicentini (2017).

Após realizadas as análises selecionou-se para as cultura a escala de 5/80m.

#### 3.1 Caracterização da área em estudo

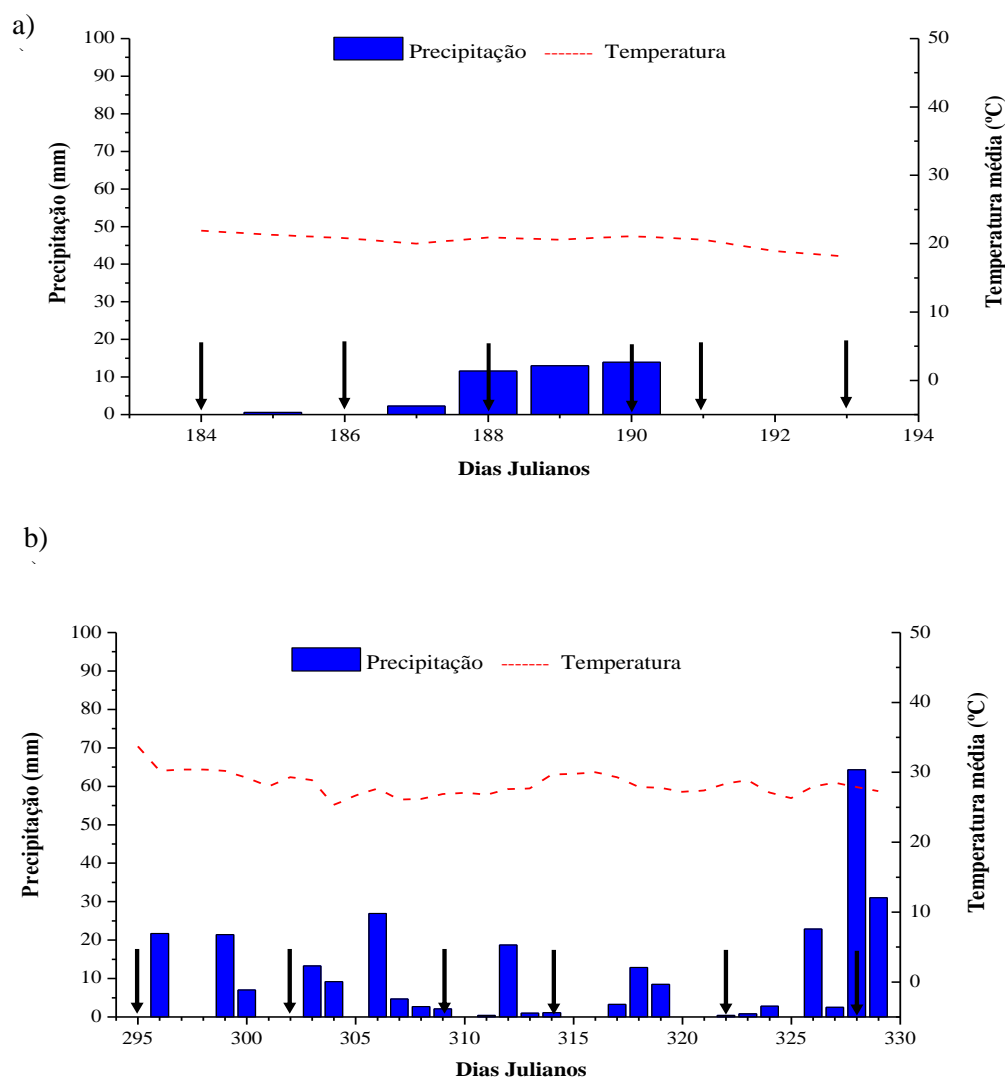
O experimento em área solo sob cultivo de eucalipto, foi realizado na área experimental da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão – Setor de Produção Vegetal, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS/UNESP), localizada no município de Selvíria (MS), no ano de 2015. A localidade apresenta coordenadas geográficas 20° 18' 05" de latitude Sul e 52° 40' 28" de longitude Oeste, apresentando elevação de 360 m acima do nível do mar (Figura 1).



**Figura 1.** Área experimental de cana-de-açúcar e eucalipto com suas respectivas malhas amostrais para a determinação da emissão de CO<sub>2</sub> e demais atributos do solo.

A precipitação média anual da região é de 1.300 mm, com temperatura média de 23,7 °C. O tipo climático é Aw, segundo Köppen, caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e estação seca no inverno.

O experimento foi realizado em área de reflorestamento há 32 anos, onde anteriormente eram cultivadas culturas anuais (Figura 1). A malha amostral de 100 m x 100 m foi instalada, sendo estas constituídas de 102 pontos amostrais (Figura 1), com regiões de adensamento de distâncias mínimas entre pontos de 5 m.



**Figura 2.** Precipitação pluvial e temperatura média durante o período de avaliação dos experimentos em solo sob cultivo de a) cana-de-açúcar e b) eucalipto.

O experimento em área de cana-de-açúcar foi realizado no ano de 2014, no município de Aparecida do Taboado, no estado do Mato Grosso do Sul (Figura 1). A

área apresenta coordenadas geográficas de 20° 16' 03" de latitude Sul e 51° 16' 04" de longitude Oeste, com elevação de 370 m acima do nível do mar.

O clima da região foi classificado como Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e estação seca no inverno segundo a classificação de Köppen. A região apresenta precipitação média anual de 1595 mm.

O estudo foi realizado após à operação de colheita da área, logo nos estágios iniciais da rebrota da cultura. Em seguida, instalou-se um gradeado regular de 100 m×100 m, com 102 pontos amostrais, e distâncias mínimas de separação entre pontos de 5 m nas regiões de adensamento.

Os solos das áreas experimentais foram classificados como Latossolo Vermelho distroférico típico argiloso, com declive homogêneo de 0,025 m m<sup>-1</sup> (Embrapa, 2006).

A temperatura média do ar e os eventos de precipitação durante o período de estudo nas áreas agrícolas são apresentados na figura 2.

### **3.2 Avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo**

As avaliações da emissão de CO<sub>2</sub> do solo foram registradas utilizando o sistema portátil LI-8100 (LI-COR, Nebraska, EUA). O sistema funciona por meio do monitoramento das mudanças na concentração de CO<sub>2</sub> dentro de uma câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho.

Para a obtenção das medidas, a câmara foi colocada sobre colares de PVC previamente instalados no solo em cada ponto da malha amostral (Figura 1), na profundidade de 3 cm. FCO<sub>2</sub> foi computada em cada ponto por um ajuste da concentração de CO<sub>2</sub> do ar dentro da câmara em função de uma regressão parabólica no tempo após o seu fechamento. Simultaneamente as avaliações da emissão de CO<sub>2</sub>, foram medidas a temperatura do solo (Ts) e a umidade do solo (Us).

A Ts foi monitorada por meio de um termômetro, componente do sistema LI-8100. O aparelho consiste em uma haste de 10 cm que foi inserida no solo, próximo aos colares de PVC utilizados na avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>. Para a determinação da Us utilizou-se o TDR (Time Domain Reflectometry - Hydrosense TM, Campbell

Scientific, Austrália), aparelho constituído por uma sonda, apresentando duas hastes de 12 cm, que foram inseridas no solo próximo aos colares de PVC.

Todas as avaliações de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us foram realizadas no período da manhã. Para o solo sob cultivo de cana-de-açúcar as avaliações foram realizadas nos dias Julianos 184, 186, 188, 190, 191 e 193, período de 3 a 14 de julho de 2014 e para o eucalipto, realizou-se as avaliações nos dias 295, 302, 309, 314, 322, 329, no período de 22 de outubro a 25 de novembro de 2015.

### **3.3 Avaliação dos atributos químicos e físicos do solo**

As amostras foram coletadas em cada ponto, nas profundidades de 0 a 0,10 m e secas ao ar, antes de serem submetidas a qualquer tipo de análise, em seguida foram destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm. Realizou-se as análises de rotina, como a determinação do teor de MO, Ca e acidez potencial (H + Al) (RAIJ, 2001). Calculou-se a capacidade de troca de cátions (CTC).

A Ds foi determinada por meio de amostras indeformadas coletadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 5,0 cm de diâmetro interno e 4,0 cm de altura (Embrapa, 1997). A porosidade total do solo (PT) foi determinada com base no valor de Ds. A distribuição de poros por tamanho, macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) foi determinada por meio de um funil de placa porosa sob a tensão de 60 cm de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra, nesta condição, corresponde aos microporos. Os macroporos foram calculados por diferença entre PT e Micro (Embrapa, 1997).

### **3.4 Análises estatísticas e processamento de dados**

Os dados foram analisados, por meio da estatística descritiva (média, erro-padrão da média, desvio-padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação, assimetria e curtose).

A dependência espacial de cada propriedade do solo foi determinada pela análise do semivariograma experimental (Webster E Oliver, 1990). A estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação  $h$ , foi determinada pela fórmula:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (\text{Eq.1})$$

Em que  $N$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ,  $Z(x_i)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i$  e  $Z(x_i+h)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i+h$ . A estrutura espacial de superfícies fractais podem ser descrita pela seguinte relação de lei de potência (Vivas-Miranda, 2000):

$$|z(x) - z(x + h)| \propto h^H \quad (\text{Eq.2})$$

Onde  $z$  corresponde ao o valor da propriedade;  $x$  representa a localização espacial;  $h$  é referente a distância de separação e  $H$  é a codimensão fractal ou expoente de Hölder (Huang e Bradford, 1992). Se  $0 < H \leq 1$ , a codimensão fractal é definida como (PALMER, 1988):

$$H = d - D_f \quad (\text{Eq.3})$$

Em que  $D_f$  é a dimensão fractal, e  $d$  é a dimensão Euclidiana do sistema, dentro do qual a distribuição fractal é apresentada, ou seja, valores iguais a 1, 2 e 3 para linhas, áreas e volumes, respectivamente.

Assim, para uma propriedade distribuída no solo, sua dimensão fractal será representada como  $D_f = 3 - H$  (Vivas-Miranda, 2000). Assim, ao compararmos as equações (1) e (2), pode-se dizer que os dados ao apresentarem um comportamento fractal em uma determinada escala, obtém-se a seguinte proporção (Palmer, 1988):

$$\hat{\gamma}(h) \propto h^{2H} \quad (\text{Eq.4})$$

ou

$$\log[\hat{\gamma}(h)] \propto 2H \log[h] \quad (\text{Eq.4a})$$

Sendo identificado pela equação (4a) a inclinação do semivariograma experimental que na escala logarítmica é igual a  $2H$ . Portanto, o expoente  $H$  foi obtido por meio da análise de regressão linear no gráfico da referida equação (Perfect e Kay,

1995):

$$H = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log[\hat{\gamma}(h)]}{2\log[h]} \quad (\text{Eq.5})$$

Se  $H=0$ ,  $D_F=3$ , falta estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita) ou não há nenhuma relação entre a forma com que a propriedade varia no espaço em função de  $h$ , indicando ausência da dimensão fractal; neste caso, a metodologia não se aplica. Já quando  $0 < H < 3$ , a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de estrutura de variabilidade espacial e dependência da propriedade com  $h$  (Palmer, 1988).

Para os ajustes dos modelos aos semivariogramas experimentais baseou-se na menor soma do quadrado do resíduo, maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e na validação cruzada (Isaaks e Srivastava, 1989; Oliver; Webster, 2014), foram estimados os parâmetros para cada variável. Cada valor de semivariância foi calculado com base nos 102 pontos.

Como critério de seleção do modelo, utilizou-se a técnica de validação-cruzada “cross-validation”, onde cada ponto foi removido individualmente e estimado por meio da contribuição dos seus vizinhos.

A validação cruzada fornece o coeficiente de determinação do modelo de regressão ( $R^2$ ), como resultado, ajustando uma reta que passa entre as observações reais e estimadas. Os valores de  $R^2$  variam de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, o ajuste do semivariograma é mais eficiente.

Para a obtenção da krigagem ordinária, considerou-se o semivariograma modelado. A estimativa da krigagem ordinária (KO) no ponto ( $x_0$ ) não amostrado é dada pela equação:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (\text{Eq.6})$$

Em que,  $\hat{z}(x_0)$  é a estimativa da KO no ponto ( $x_0$ ),  $z(x_i)$  os valores vizinhos nos locais  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$  e  $\lambda_i$  os pesos das observações associados aos valores vizinhos. Estes são estimados com base no semivariograma ajustado.

Os resultados obtidos com a krigagem envolvem o erro de estimação, que representa a diferença entre o valor medido e o valor que foi estimado, para um

mesmo local, que foi obtido a partir do modelo esférico utilizado, obtido a partir dos valores do efeito pepita,  $C_0$ , e do patamar,  $C_0 + C_1$ , ao cruzar uma reta que intercepte o eixo y em  $C_0$  e seja tangente aos primeiros pontos próximos de  $h=0$ .

Foi montada a matriz de correlação de efetuando as correlações lineares para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos estudados. E realizadas a construção dos mapas de padrões espaciais.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Estatísticas descritiva da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura do solo e umidade do solo

O fluxo médio de CO<sub>2</sub> do solo para os experimentos foram de 1,71  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 5,66  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para cana-de-açúcar e eucalipto respectivamente. Em estudos realizados em solo sob mesmas culturas, os autores relataram valores de 2,68  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 4,30  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (D'andréa et al., 2011; Tavares et., al 2018), sendo estes valores, diferentes dos encontrados no presente estudo.

O solo sob o cultivo de cana-de-açúcar e eucalipto apresentaram Ts média de 21,85°C e 26,54°C. Estudos realizados comprovaram que as emissões de CO<sub>2</sub> correlacionam-se diretamente com as elevações na temperatura do solo (Acreche et al., 2014; Karhu et al., 2014), esses resultados corroboram com o observado no presente estudo.

Para Us foram observados valores de 9,45 % para cana-de-açúcar e 10,86 % para eucalipto. A umidade do solo pode favorecer ou inibir a produção de CO<sub>2</sub>, esta afeta a respiração, melhora a atividade microbiana, promove o consumo do oxigênio microbiano, bem como a produção e emissão de CO<sub>2</sub> do solo (Xu et al., 2004; Gritsch et al., 2015; Pinotti, 2017; Maccarthy et al., 2018).

O coeficiente de variação (CV) da emissão de CO<sub>2</sub> do solo nas áreas estudadas foi de 28,27 %, para solo sob cultivo de eucalipto e 60,53 % para solo com cana-de-açúcar. De acordo com o critério de classificação para CV, Warrick e Nielsen (1980), o adotam como altos (CV>24 %), médios (12 % < CV < 20 %) e baixos (CV<12 %). Assim, os valores encontrados no presente estudos são considerados altos.

Estudos em área de floresta de eucalipto, floresta de pinheiro e cana-de-açúcar foram encontrados CV máximo de CO<sub>2</sub> 43 %, 48 % e 50 % respectivamente (Teixeira et al., 2013; Shi e Jin, 2016; Pinotti, 2017).

O alto valor de CV observado na (>24) é uma característica da respiração do solo, isso indica a presença de variabilidade espacial, independente do tamanho da área adotada (Teixeira et al., 2013).

**Tabela 1.** Estatística descritiva para a emissão de CO<sub>2</sub> (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), temperatura (°C) e umidade (%) do solo nos dias estudados em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

<b>Emissão de CO<sub>2</sub></b>							
<b>Dia</b>	<b>Média</b>	<b>Med.</b>	<b>EP</b>	<b>Mín/Máx</b>	<b>Curt.</b>	<b>Ass.</b>	<b>CV</b>
<b>184</b>	1,47	1,48	0,06	0,15/3,20	0,98	0,60	39,63
<b>186</b>	1,15	1,10	0,06	0,10/3,81	5,23	1,62	52,28
<b>188</b>	1,23	1,17	0,05	0,32/2,93	1,65	1,07	40,11
<b>190</b>	1,25	1,17	0,06	0,20/4,68	11,63	2,57	47,46
<b>191</b>	3,37	3,06	0,22	0,94/23,22	60,58	6,93	66,71
<b>193</b>	1,80	1,48	0,21	0,20/21,47	77,37	8,29	116,99
<b>Média</b>	<b>1,17</b>						<b>60,53</b>
<b>Temperatura do Solo</b>							
<b>184</b>	24.03	22.90	0.26	19,15/33,34	1.89	1.31	10.76
<b>186</b>	23.12	21.56	0.29	19,42/33,34	1.45	1.39	12.81
<b>188</b>	21.72	21.65	0.12	19,42/30,67	33.38	4.45	5.39
<b>190</b>	22.15	21.87	0.10	20,38/25,56	0.37	0.76	4.45
<b>191</b>	20.06	19.96	0.05	19,09/20,98	-0.99	0.19	2.36
<b>193</b>	20.04	19.34	0.20	16,32/26,09	0.84	1.30	10.33
<b>Média</b>	<b>21.85</b>						<b>7.68</b>
<b>Umidade do Solo</b>							
<b>184</b>	7,20	7,80	0,23	2,60/22,10	14,53	2,35	32,80
<b>186</b>	5,54	6,00	0,18	2,00/17,00	14,53	2,35	32,80
<b>188</b>	9,00	9,00	0,17	6,00/20,00	17,38	3,21	18,96
<b>190</b>	8,38	9,00	0,19	6,00/12,00	0,34	0,51	13,64
<b>191</b>	15,38	15,00	0,25	6,00/22,00	1,54	-0,44	16,13
<b>193</b>	10,94	11,00	0,19	6,00/16,00	0,18	-0,02	17,49
<b>Média</b>	<b>9,45</b>						<b>21,97</b>

*Med*= Mediana; *EP*= Erro padrão da média; *Min*= Mínimo; *Max*= Máximo; *CV*= Coeficiente de Variação (%); *Ass*= Coeficiente de Assimetria; *Cut*= Coeficiente de Curtose.

Em relação aos fluxos diários (FCO<sub>2</sub>) foi registrado os maiores fluxos de 7,18 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (dia 309) para eucalipto e 3,37 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (dia 191) para cana-de-açúcar. Esses fluxos foram observados logo após eventos de precipitação nas áreas estudadas (Figura 2).

Estudo em floresta de transição Amazônia e cerrado e em solo sob campo nativo, respectivamente, obtiveram valores médios de FCO<sub>2</sub> de 5,02 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e 5,48 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (Pinto Júnior et al., 2009; Mantovanneli et al., 2016), valores considerados altos como o encontrado no presente trabalho para área de eucalipto.

**Tabela 2.** Estatística descritiva para a emissão de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura (°C) e umidade (%) do solo nos dias estudados em área sob cultivo eucalipto.

Dia	Emissão de CO <sub>2</sub>						
	Média	Med	EP	Min/Máx	Curt	Ass	CV
<b>295</b>	4,37	4,27	0,10	1,93/8,26	1,48	0,77	24,17
<b>302</b>	4,98	4,74	0,14	2,29/11,62	3,92	1,31	28,89
<b>309</b>	7,18	6,99	0,18	2,90/12,66	0,52	0,41	25,57
<b>314</b>	7,07	6,80	0,19	3,03/16,90	6,78	1,81	27,49
<b>322</b>	5,20	4,85	0,19	1,72/14,96	6,50	1,88	36,62
<b>329</b>	5,21	5,15	0,14	2,57/10,37	1,66	0,85	26,85
<b>Média</b>	<b><u>5,60</u></b>						<b><u>28,27</u></b>
Temperatura do Solo							
<b>295</b>	27,43	27,50	0,03	26,40/28,00	1,01	-0,46	0,98
<b>302</b>	26,46	26,50	0,02	25,70/27,10	0,28	-0,42	0,95
<b>309</b>	26,23	26,30	0,03	25,10/26,80	2,10	-0,65	1,03
<b>314</b>	26,81	26,80	0,03	26,10/27,50	0,53	-0,30	1,10
<b>322</b>	27,06	27,10	0,03	25,90/27,80	0,80	-0,33	1,24
<b>329</b>	25,22	25,30	0,03	24,30/25,90	0,02	-0,26	1,40
<b>Média</b>	<b><u>26,54</u></b>						<b><u>1,12</u></b>
Umidade do Solo							
<b>295</b>	6,27	6,00	0,13	2,00/9,00	0,54	-0,66	21,53
<b>302</b>	9,19	9,00	0,18	5,00/13,00	-0,40	-0,07	19,66
<b>309</b>	12,67	12,00	0,27	7,00/21,00	0,72	0,89	21,21
<b>314</b>	8,40	8,00	0,19	4,00/15,00	1,34	0,77	22,92
<b>322</b>	10,18	10,00	0,19	7,00/16,00	0,07	0,52	19,03
<b>329</b>	18,44	18,00	0,37	12,00/31,00	1,64	1,02	20,34
<b>Média</b>	<b><u>10,86</u></b>						<b><u>20,78</u></b>

*Med*= Mediana; *EP*= Erro padrão da média; *Min*= Mínimo; *Max*= Máximo; *Ass*= Coeficiente de Assimetria; *Curt*= Coeficiente de Curtose; *CV*= Coeficiente de Variação (%).

As condições climáticas podem motivar uma maior intensidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, causando variações diárias (D'andréa et al., 2010; Santos et al., 2012).

Dessa forma, a precipitação exerce influência sobre a FCO<sub>2</sub>, fato já descritos em outros trabalhos realizados (Morell et al., 2010; Panosso et al., 2011; Moitinho et al., 2015; Berger et al., 2018), bem como a respiração da microbiota e das raízes e a oxidação da matéria orgânica (Ryan e Law, 2005). Segundo Tavares et al. (2016), isso se dá devido a variabilidade espacial FCO<sub>2</sub> estar correlacionada com os espaços porosos preenchido com ar.

## 4.2 Dimensão Fractal ( $D_F$ ) de $FCO_2$ do solo e demais atributos químicos e físicos do solo

Em solo sob cultivo de cana-de-açúcar observou-se anisotropia para os atributos  $FCO_2$ ,  $D_s$ , Ca, H+Al, CTC, e PT, no entanto, a microporosidade (Micro), assume um caráter anisotrópico, enquanto a macroporosidade (Macro) apresenta dependência espacial.

Os valores de  $D_F$  para  $FCO_2$  foram superiores a 3 com o aumento das direções, isso pode ser observado direções no  $0^\circ$  a  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $180^\circ$  no gráfico de rosas (Figura 3a), o que caracteriza uma anisotropia. Somente na direção de  $90^\circ$  se observa a presença de estrutura de variabilidade espacial.

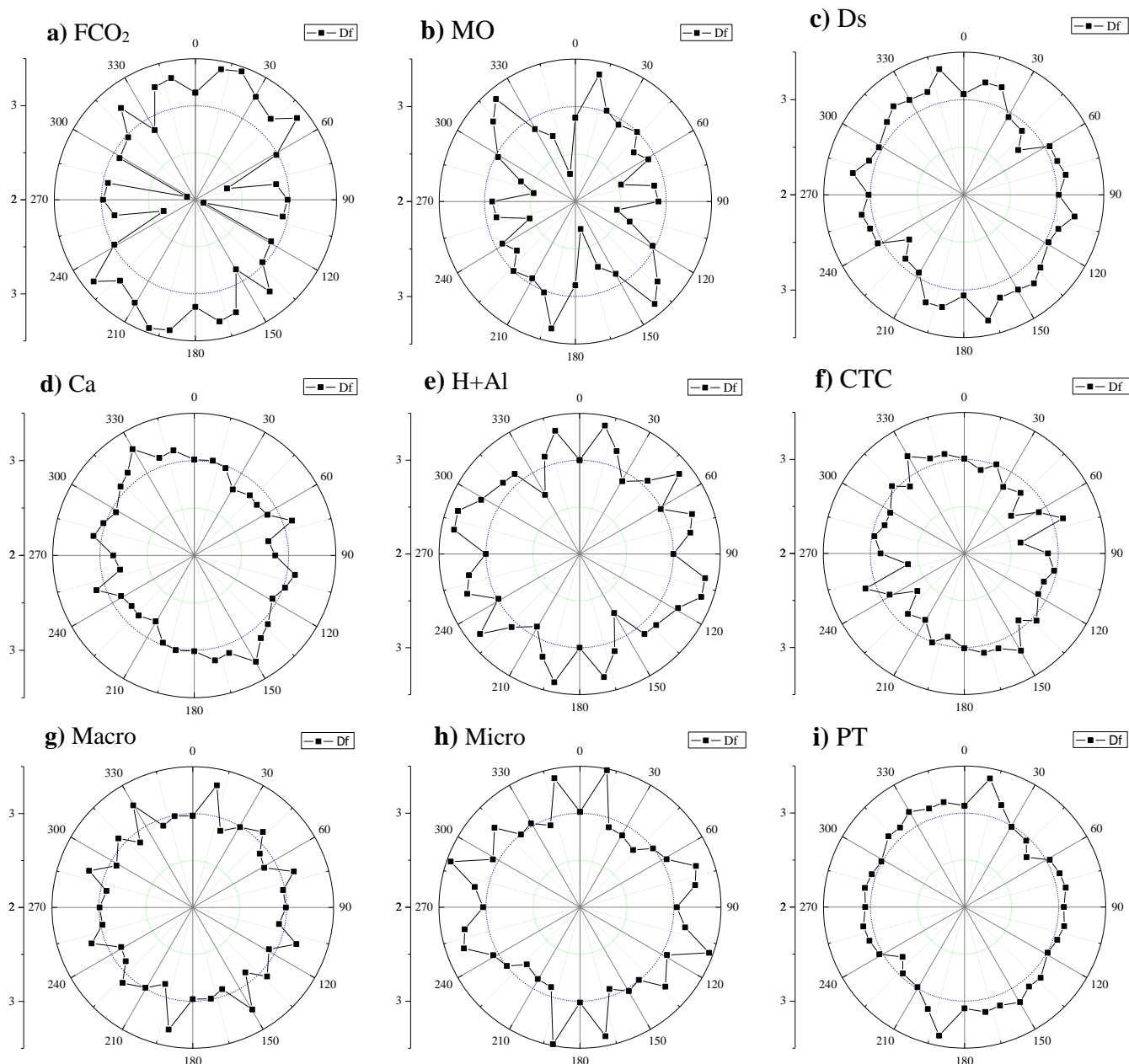
A anisotropia observada nas propriedades físicas do solo, pode ser resultado do intenso tráfego de máquinas, o que conseqüentemente ocasiona uma anisotropia da estrutura de variabilidade espacial da emissão de  $CO_2$  do solo, principalmente nos ângulos iniciais de estudo ( $0^\circ$ ) (Usowicz e Lipiec, 2009).

Além disso, Panosso et al. (2012), estudando a dimensão fractal da emissão de  $CO_2$  em área de cana-de-açúcar, verificaram que diversos fatores intrínsecos na formação e práticas de manejo do solo durante o processo produtivo da cultura são responsáveis pela anisotropia que afeta as emissões de  $CO_2$  solo.

Em área de cana-de-açúcar, foram observados que os atributos físicos e químicos do solo, exceto a macroporosidade e a microporosidade, não se correlacionam com os diferentes fluxos de  $CO_2$  (Tavares et al., 2016).

A  $D_F$  para MO mostrou a anisotropia na direção  $0^\circ$  e na direção de  $150^\circ$  (Figura 3b), observou-se valores menores que 3 para as demais direções, o que indica a existência de dependência espacial na área estudada.

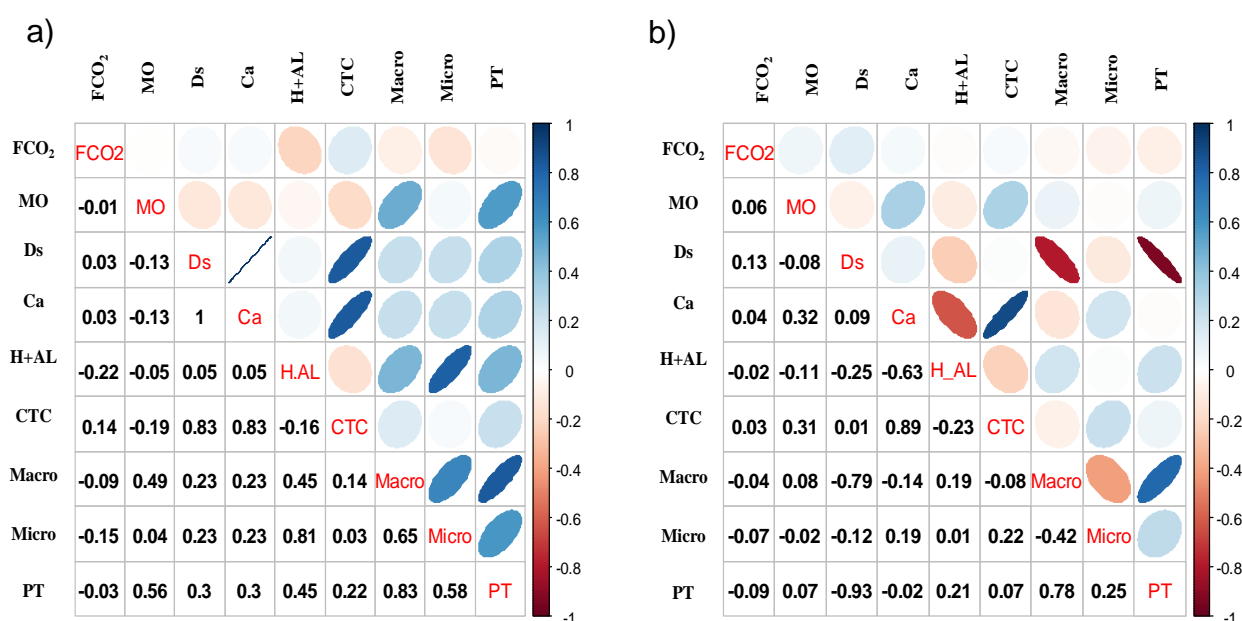
A caracterização do fluxo de  $CO_2$  é um processo muito difícil de ser relacionado com propriedades do solo, com a fertilidade, matéria orgânica ou até mesmo influências ambientais, sendo necessário períodos maiores de análises para a obtenção de resultados mais expressivos (D'Andrea et al., 2010).



**Figura 3.** Gráfico de rosas da Dimensão fractal ( $D_F$ ) do fluxo médio de  $\text{CO}_2$  e dos demais atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes direções com escala de 5/80m **a)** fluxo médio de  $\text{CO}_2$  do solo; **b)** Teor de matéria orgânica do solo; **c)** densidade do solo; **d)** cálcio; **e)** acidez potencial; **f)** Capacidade de troca catiônica; **g)** Macroporos; **h)** Microporos; **i)** Porosidade total.

Os índices de correlação da  $\text{FCO}_2$  foram semelhantes tanto para os dados iniciais (Figura 4a), quanto para os dados fractais (Figura 4b), sendo correlacionados positivamente ( $p > 0,05$ ) com MO, Ds, Ca, CTC. Já os atributos como H+Al, Macro, Micro e PT se correlacionaram negativamente com  $\text{FCO}_2$  ( $p > 0,05$ ). De acordo com Carbonell-Bojollo et al. (2012) a estabilidade dos agregados e a textura do solo são

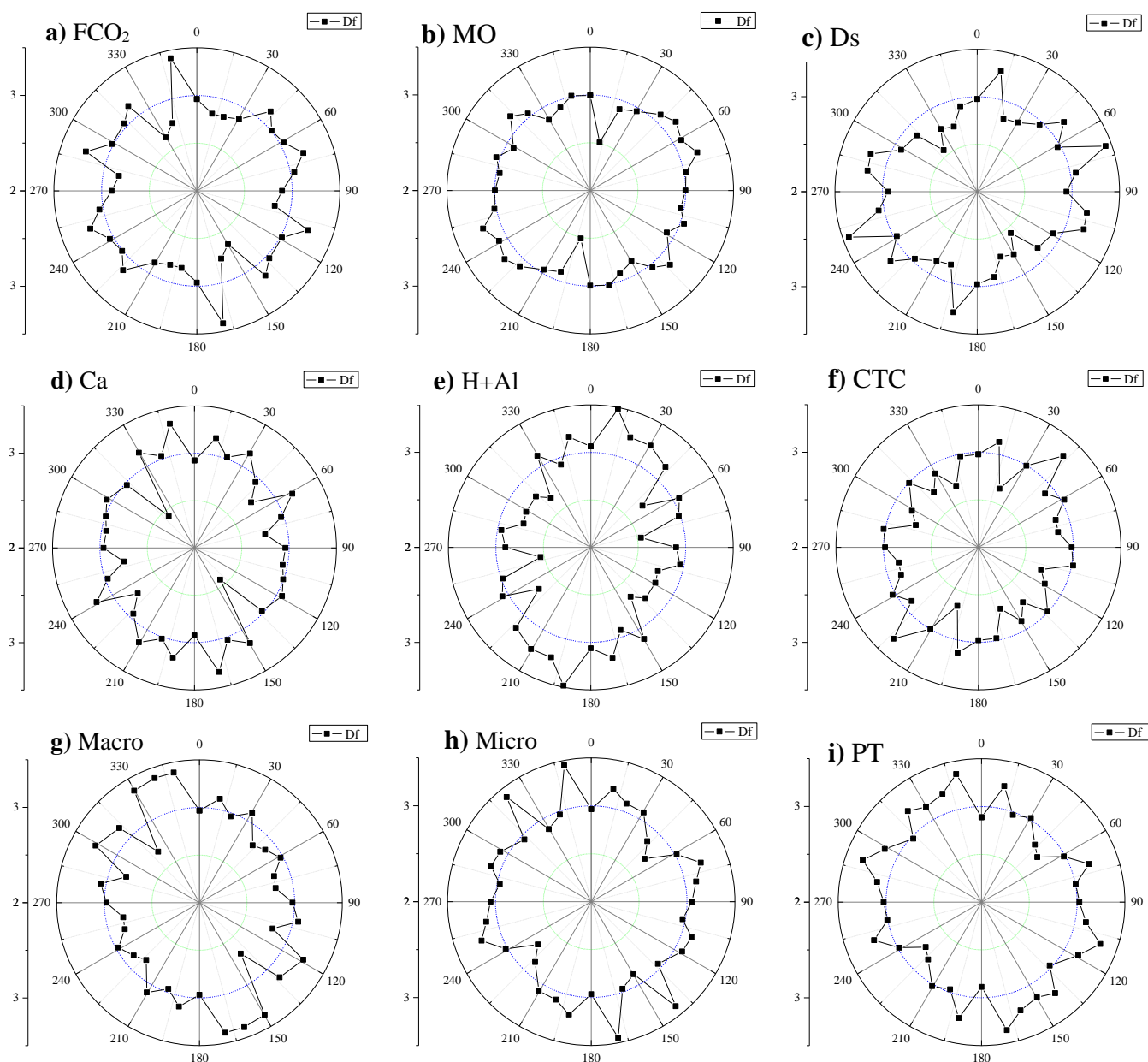
atributos que influenciam o sequestro de carbono e as emissões de CO<sub>2</sub> do solo (Brito et al., 2009), sobretudo por refletir o tamanho dos poros. Quanto a CTC, esta é um importante atributo relacionado à MO, pois controla a liberação de vários nutrientes para o solo e favorece a manutenção da MO e da fertilidade do solo. (Ronquim, 2010), já a Ds é um outro atributo que afeta a movimentação do CO<sub>2</sub> no solo (Epron et al., 2004; Brito et al., 2009; Teixeira et al., 2013).



**Figura 4.** Matriz de correlação da área de cana-de-açúcar a) dados brutos b) dados fractais.

Em resultados contrários aos encontrados neste estudo, trabalhos anteriores verificaram que a densidade do solo aumentou com a diminuição do teor de matéria orgânica (Silva et al., 2005; Braida et al., 2006).

O solo sob cultivo de eucalipto apresentou valores de  $D_F$  para FCO<sub>2</sub> inferiores a 3 nas direções iniciais. Porém, com aumento do grau dos ângulos os valores de  $D_F$  mostram uma diminuição. Estudo sobre a variabilidade espacial e temporal de CO<sub>2</sub> em um Latossolo Vermelho eutrófico, mostrou uma tendência geral de diminuição de  $D_F$  ao longo dos dias avaliados, onde o aumento das escalas evidenciava uma melhor estrutura de variabilidade (Bicalho et al., 2016). Para atributos como MO, Ca, Macro, Micro e PT a anisotropia também foi observada (Figuras 5b, 5d, 5g-i).



**Figura 5.** Gráfico de rosas da Dimensão fractal ( $D_F$ ) do fluxo médio de  $\text{CO}_2$  e dos demais atributos do solo sob cultivo de eucalipto em diferentes direções com escala de 5/80m **a)** fluxo médio de  $\text{CO}_2$  do solo; **b)** Teor de matéria orgânica do solo; **c)** densidade do solo; **d)** cálcio; **e)** acidez potencial; **f)** Capacidade de troca catiônica; **g)** Macroporos; **h)** Microporos; **i)** Porosidade total.

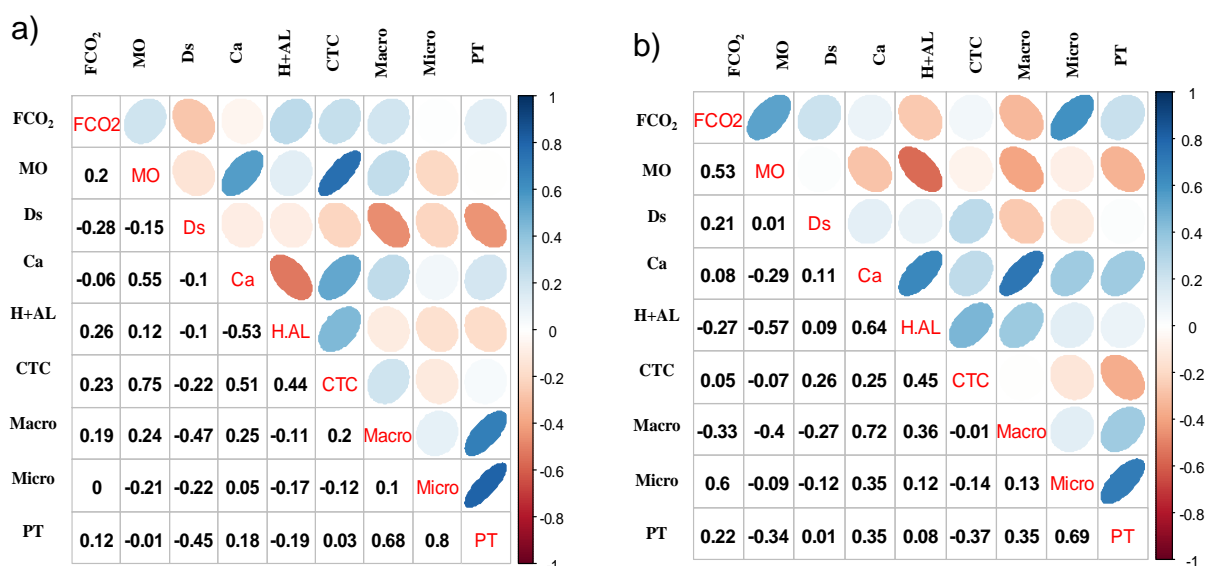
Estudos anteriores mostraram que os espaços porosos quando ocupados por água podem limitar o oxigênio no solo, o que acarreta na diminuição de  $\text{FCO}_2$  (Fang e Moncrieff, 1999; Dilustro et al., 2005; Kang et al., 2006; Tavares et al., 2018).

O atributo MO com exceção dos ângulos de 30°, 120° e 150° apresentou anisotropia em todos os outros ângulos (Figura 5b). Em estudo da influência do relevo

na variação anisotrópica de atributos químicos relataram a presença de anisotropia para Ca e MO bem como para outros atributos, condicionado principalmente pela forma da paisagem e pelas práticas de manejo adotadas (Souza et al., 2006).

Embora encontrado anisotropia nas direções de 0°, 90° e 120° (Figura 9c), o atributo Ds apresentou valores de  $D_F$  inferiores a 3 na maioria das direções, predominando o arranjo espacial, indicando isotropia. Um comportamento parecido foi observado para H+Al que apresentou valores maiores que 3 nas direções iniciais admitindo a anisotropia, no entanto, com o aumento dos ângulos, os valores  $D_F$  diminuíram e apresentaram estrutura de variabilidade na área estudada (Figura 5e).

A análise de correlação dos dados iniciais (Figura 6a) diferiu da correlação dos dados fractais (Figura 6b). Para os dados fractais, com exceção dos atributos H+Al e Macro, no solo sob cultivo de eucalipto foram observadas correlação positivas para todos os outros atributos ( $p < 0,05$ ). Trabalhos anteriores têm apontado relação entre a emissão de CO<sub>2</sub> e diversos atributos, dentre eles a densidade do solo, porosidade livre de água, microporosidade e oxigenação do solo (Smart e Peñuelas, 2005; Chen et al., 2010; Teixeira et al., 2012).



**Figura 6.** Matriz de correlação da área de eucalipto a) dados brutos e b) dados fractais

Outros autores avaliando a variação espacial e temporal da respiração do solo em floresta no Congo encontraram correlação negativa entre a densidade do solo e a emissão de CO<sub>2</sub> em solo sob cultivo de eucalipto (Epron et al., 2004), observações



similares foram relatadas em estudo realizado em solo sob plantação de pinus na Califórnia. (Xu e Qi, 2001), resultados opostos do encontrado nesse estudo.

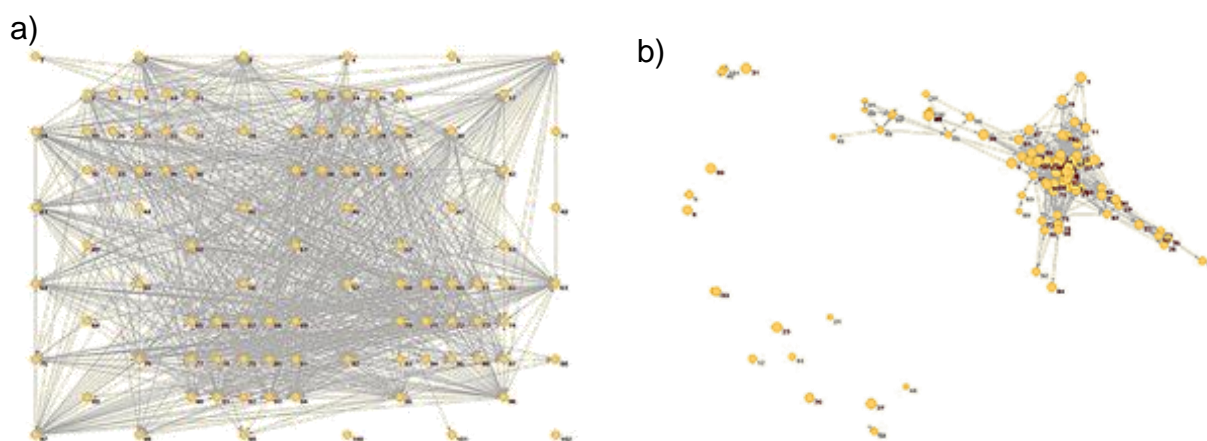
### 4.3 Variabilidade espacial de CO<sub>2</sub>, MO e Ds.

A rede de correlação temporal dos 102 pontos das duas malhas amostrais está apresentada nas figuras 7 e 8. Na área de cana-de-açúcar (Figura 7), observou-se que a maioria dos pontos correlacionados apontam para uma mesma direção, demonstrando uma homogeneidade do sistema.

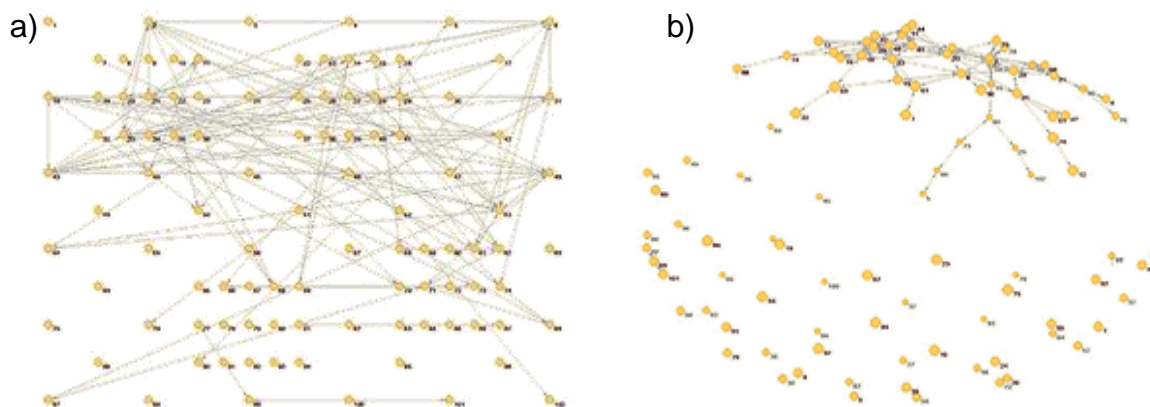
La Scala Jr et al. (2009), estudando a dimensão fractal e anisotropia da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, também observou pontos correlacionados apontando para as mesmas direções onde uma estrutura de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> foi determinada.

A rede de correlação linear da área de cana-de-açúcar apresentou maior número de pontos com conexão, sendo os pontos mais representativos o ponto 50 e 94 (critérios  $\geq 45$ ), com média de aresta de 18,31.

Assim, a rede dispõe de pontos menos isolados, resultado diferente da área de eucalipto (Figura 8), que apresentou pontos mais isolados, e outros quase/ou sem nenhuma conexão sendo os pontos mais representativos o ponto 33 e 53 (critérios  $\geq 11$ ), com média de aresta de 1,09, demonstrando maior heterogeneidade do sistema.



**Figura 7.** Rede de correlação linear da variabilidade temporal dos 102 pontos da área de cana-de-açúcar, a) pontos amostrais, b) pontos de conexão.



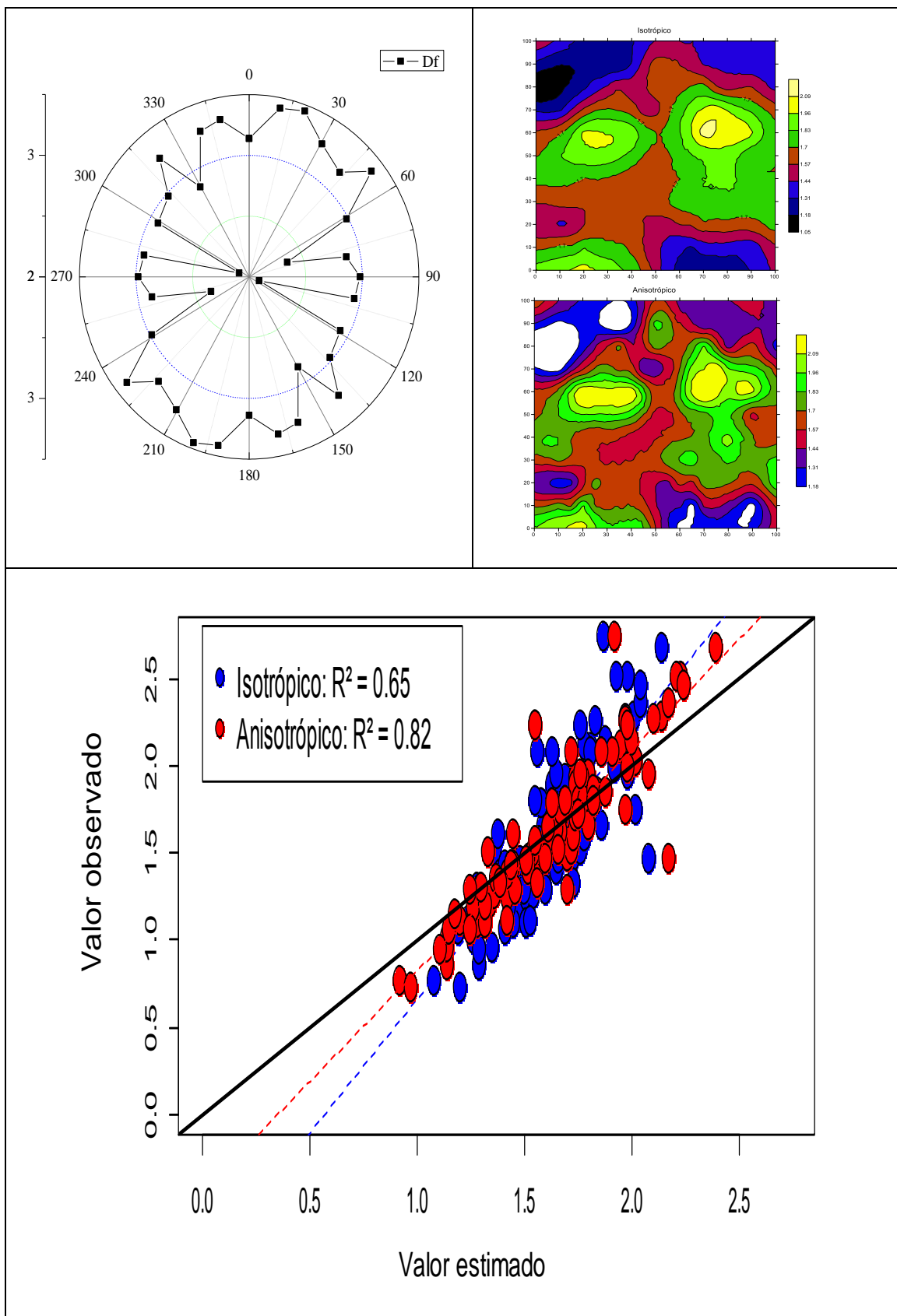
**Figura 8.** Rede de correlação linear da variabilidade temporal dos 102 pontos da área de eucalipto, a) pontos amostrais, b) pontos de conexão.

Foi observado que os mapas de padrões espaciais isotrópicos, anisotrópicos e os resultados da validação cruzada para área de cana-de-açúcar as correlações apresentaram valores altos, o que reflete a confiabilidade das estimativas realizadas.

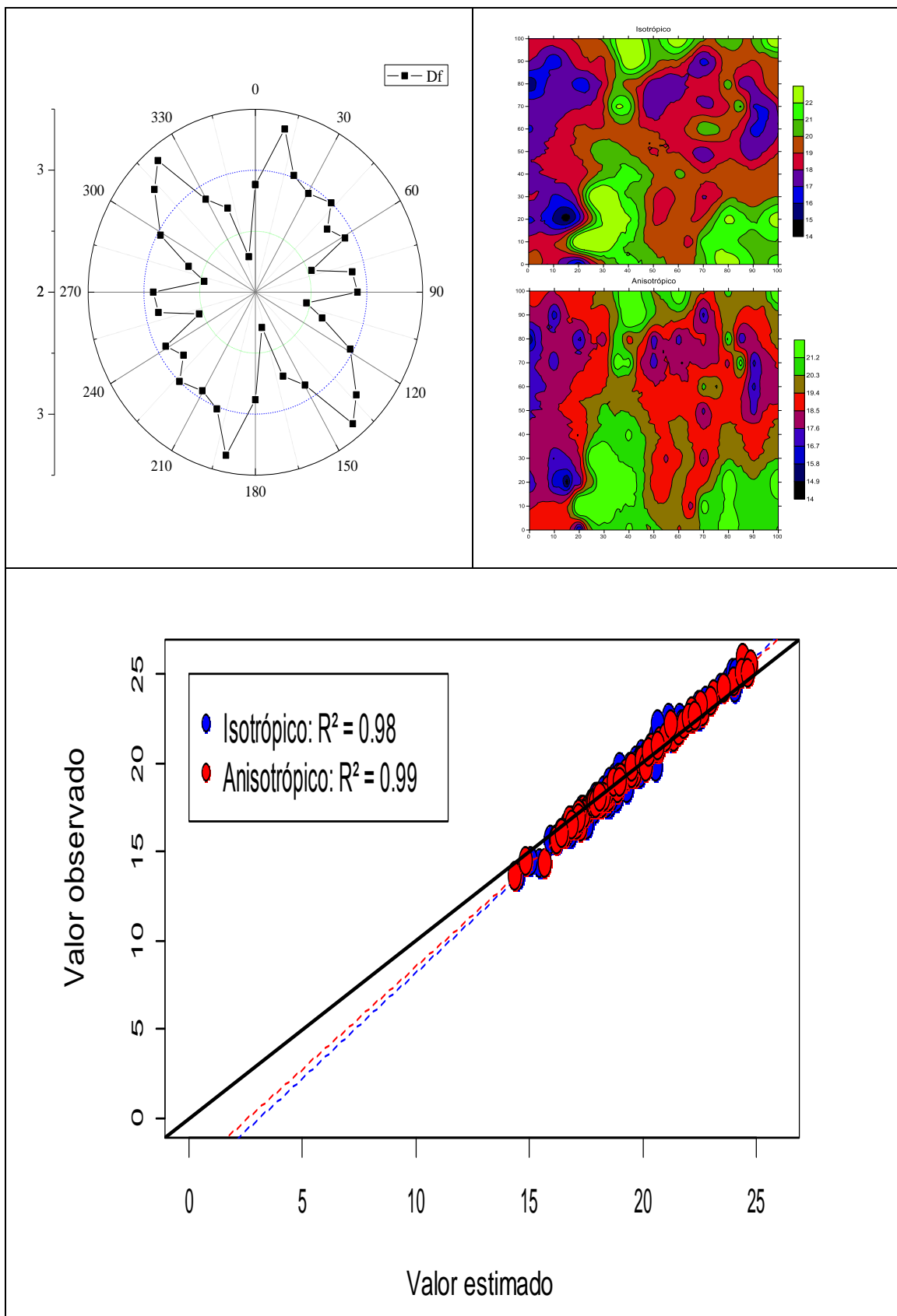
Os resultados anisotrópicos apresentaram-se maiores do que seus correspondentes isotrópicos (Figuras 9 a 14).

Em área de cana de açúcar (Figuras 9 a 11), a validação cruzada mostrou desempenho satisfatório para as variáveis estudadas, fato reforçado pelo aumento do coeficiente de determinação na emissão de  $\text{CO}_2$  (0,82), na MO (0,99), e também para Ds (0,94).

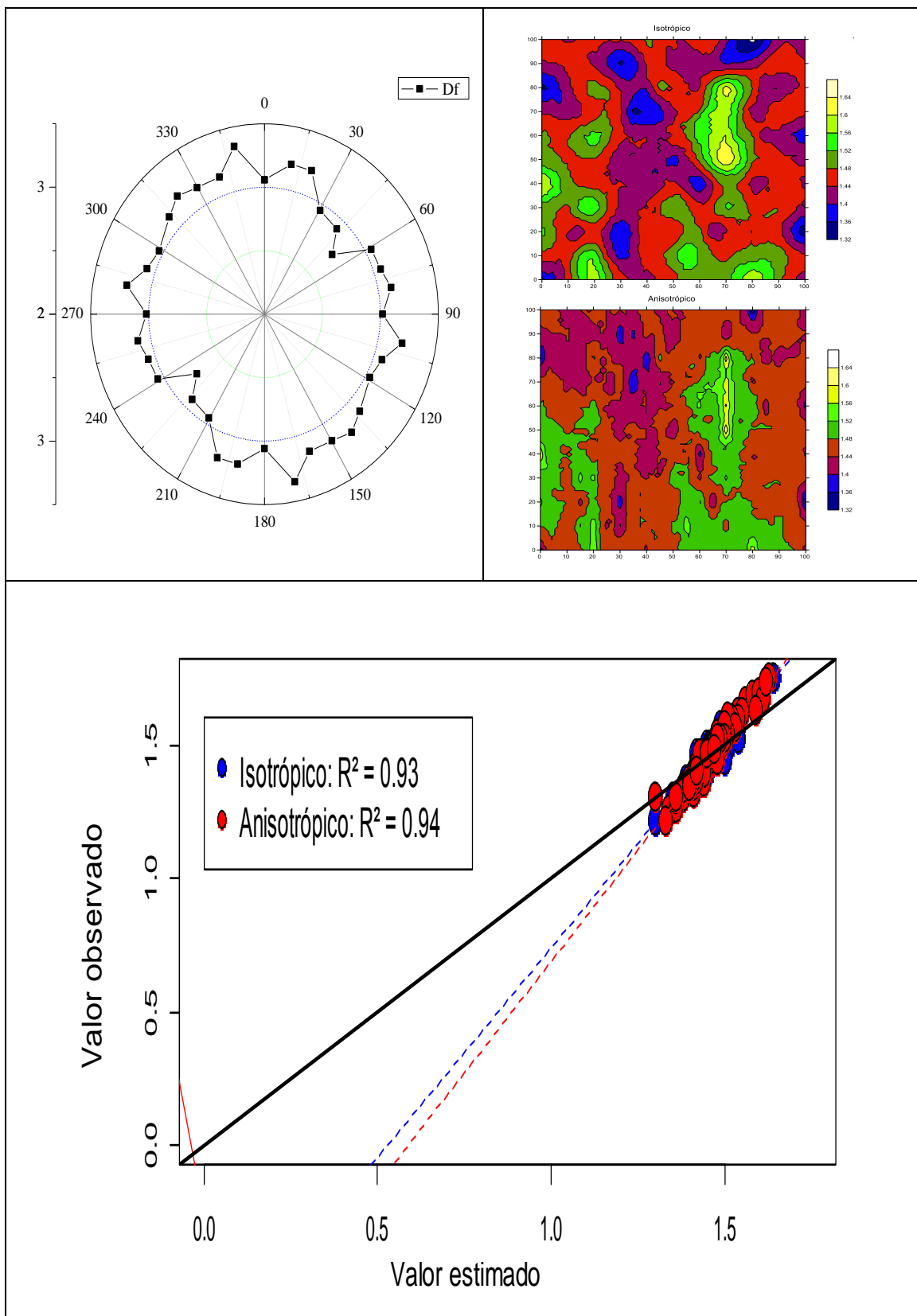
Em área de eucalipto (Figuras 12 a 14), foi observado resultados semelhantes a área de cana-de-açúcar. Quando comparados os padrões isotrópicos e anisotrópicos o coeficiente de determinação apresentou melhoras em todas as variáveis da área, com valores de 0,98 para emissão de  $\text{CO}_2$ , 0,94 para MO e 0,96 para Ds.



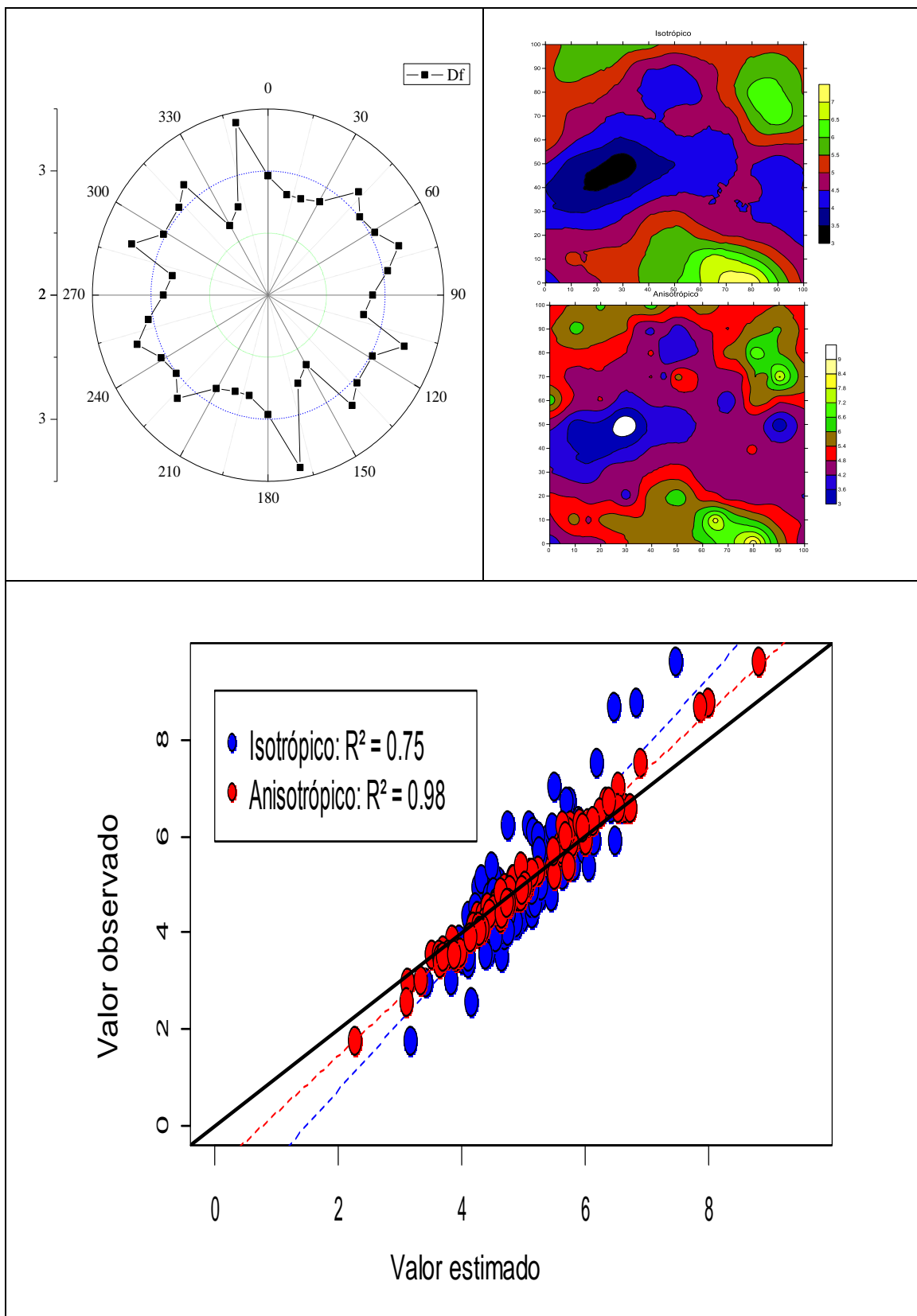
**Figura 9.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para emissão de CO<sub>2</sub> do solo em área de cana-de-açúcar a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



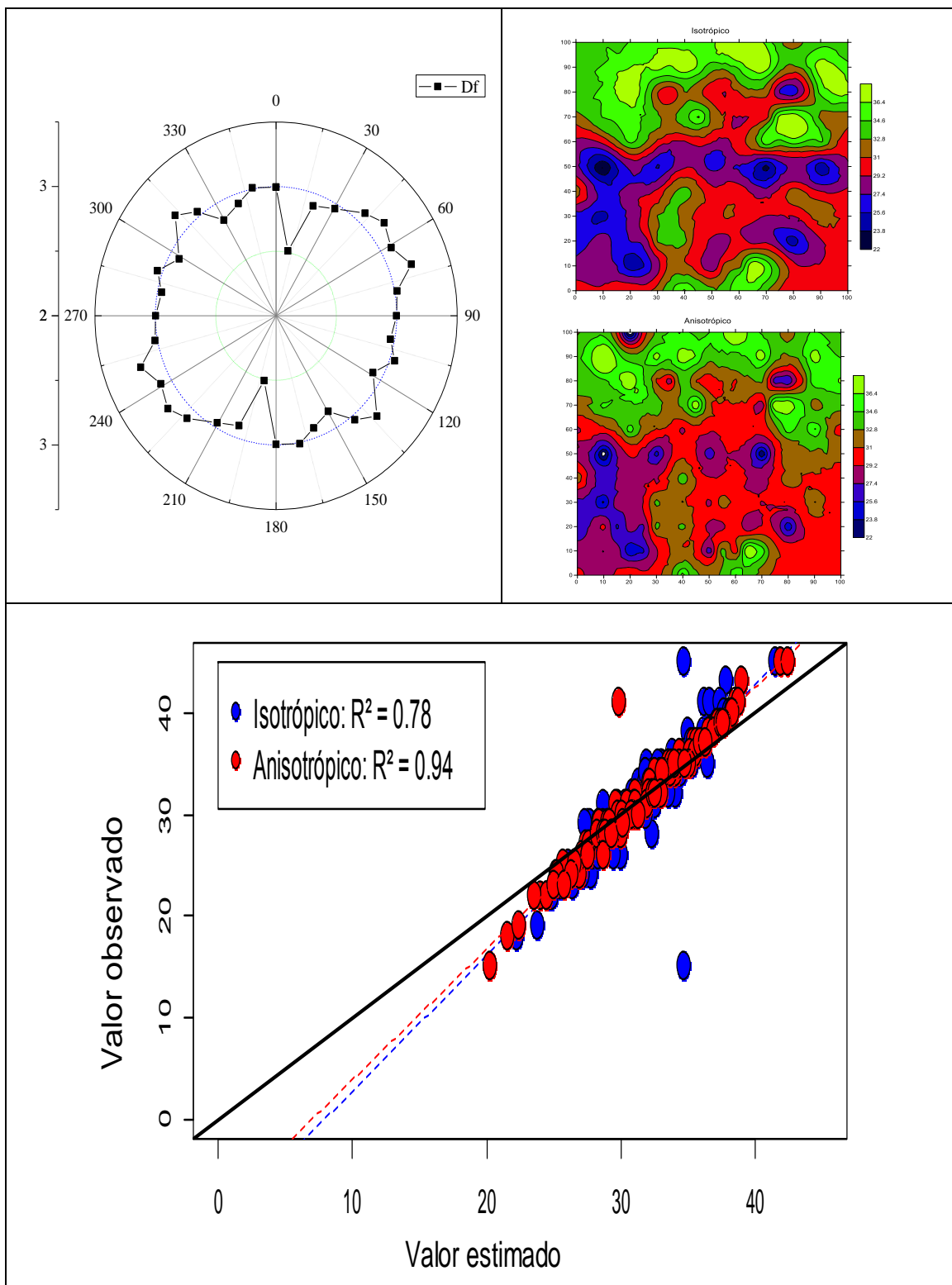
**Figura 10.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para MO do solo em área de cana-de-açúcar a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



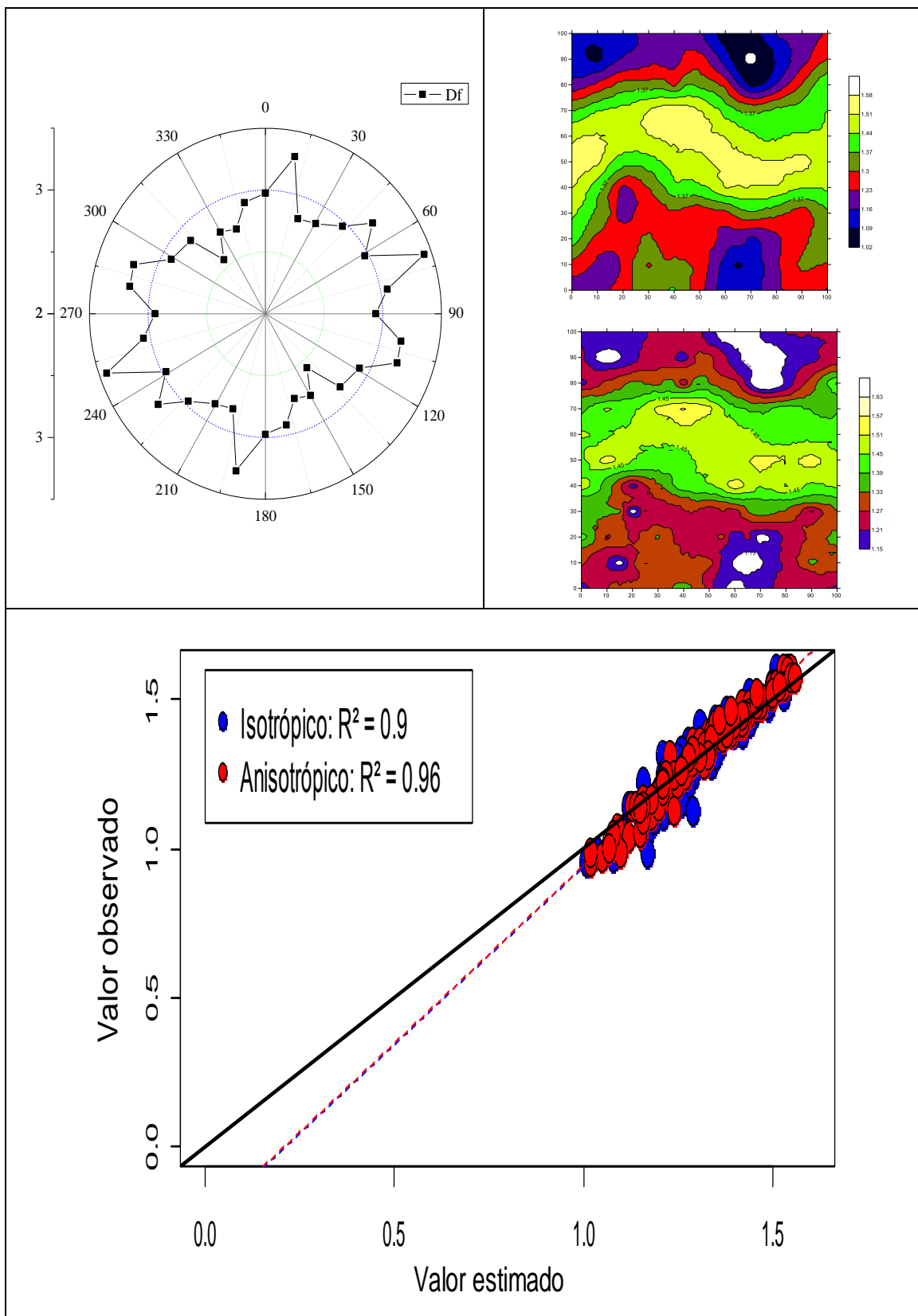
**Figura 11.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para  $D_s$  em área de cana-de-açúcar a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



**Figura 12.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para emissão de CO<sub>2</sub> do solo em área eucalipto a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



**Figura 13.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para MO do solo em área eucalipto a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



**Figura 14.** Padrões espaciais e diagrama de dispersão da validação cruzada para  $D_s$  em área eucalipto a) mapa isotrópico, b) mapa anisotrópico c) validação cruzada.



## 5 CONCLUSÕES

O CO<sub>2</sub> do solo apresentou variação espacial associada a diferentes atributos químicos e físicos do solo.

Para os atributos do solo, na área de cana-de-açúcar, com exceção da MO e Macro, todos os outros atributos apresentaram características anisotrópica. No solo sob cultivo de eucalipto a dependência espacial foi observada em Ds, H+Al e CTC, sendo a anisotropia encontrada para todos os outros atributos.

As variáveis FCO<sub>2</sub>, MO e Ds variaram mais intensamente numa direção do que em outra, fato relacionado a anisotropia de cada variável, e comprovado pela validação cruzada que evidenciou ganhos com a melhora do R<sup>2</sup> para as variáveis nas duas áreas de estudo.

## 6 REFERÊNCIAS

Allaire SE, Lange SF, Lafond JA, Pelletier B, Cambouris AN, Dutilleul P (2012) Multiscale spatial variability of CO<sub>2</sub> emissions and correlations with physico-chemical soil properties. **Revista Geoderma** 170, 251-260.

Almeida LS, Guimarães EC. (2016) Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p.195-203.

Andres RJ, Boden, TA, Breon FM (2012) A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion. **Journal of Biogeosciences** 9-1845-1871.

Aquino RED, Campos MCC, Marques Júnior J, Oliveira IAD, Mantovaneli BC, Soares MDR (2014) Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 397-406.

Artur AG, Oliveira DP, Costa MC, Romero RE, Silva MV, Ferreira TO (2014) Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, 18(2)

Beare MH, Gregorich EG, St-Georges P (2009) Compaction effects on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production during drying and rewetting of soil. **Soil Biology and Biochemistry** 41, 611-621.

Berger S, Bliedernicht J, Linstädter A, Canak K, Guug S, Heinzeller D, Salack S (2018) The impact of rain events on CO<sub>2</sub> emissions from contrasting land use systems in semi-arid West African savannas. **Science of the total environment**, 647, 1478-1489.

Bicalho SDE, Moitinho MR, Bortoli DT, Panosso AR, Spokas KA, La Scala NJ (2017) Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. **Soil Science Society of America Journal**, 81(5), 1168-1178.

Biswas A, Zeleke TB, Si BC (2012) Multifractal detrended fluctuation analysis in examining scaling properties of the spatial patterns of soil water storage. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 19, n. 2, p. 227-238.

Boscaro D, Pezzuolo A, Sartori L, Marinello F, Mattioli A, Bolzonella D, Grigolato S (2018) Evaluation of the energy and greenhouse gases impacts of grass harvested on riverbanks for feeding anaerobic digestion plants, **Journal of Cleaner production**, 172-4099-4109.

Bottega EL, Bottega SP, Silva AS, Queiroz DM, Souza CMA, Rafull LZL (2011) Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. *Agrária*. 2011; 6:331-336.

Bottega EL, Queiroz DMD, Pinto FDADC, Souza CMAD (2013) Spatial variability of soil attributes in no a no-tillage system with crop rotation in the Brazilian savannah. **Revista Ciência Agronômica**, 44(1).

Braida JÁ, Reichert JM, Veiga M, Reinert DJ (2006) Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 30:605-614.

Brito LF, Marques Júnior J, Pereira GT, Souza ZM (2009) Soil CO<sub>2</sub> emission of sugarcane fields as affected by topography. **Scientia Agricola**.66:77-83.

Cajazeira ,J.P.; E Assis Junior, R.N. De. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, 42 (2) : 258-267. 2011.

Camargo ECG, Felgueiras CA, Monteiro AMV (2001) A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 10, 395-402.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.58, p.1501-1511.

Campos MCC, Cardozo NP, Marques Júnior J (2006) Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.6, p.104-114.

Carbonell-Bojollo RM, Torres MARR, Rodríguez-Lizana A, Ordóñez-Fernández R (2012) Influence of soil and climate conditions on CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. **Water, Air, & Soil Pollution**, 223(6), 3425-3435, 2012.

Carvalho JRP, Silveira PM, Vieira SR (2012) Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 37(8), 1151-1159.

Carvalho MP, Takeda EY, Freddi OS (2003) Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.695-703. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.538-547, 2012 547.

Cavalcante EGS, Alves MC, Souza ZM, Pereira GT (2007) Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1329-1339.

Cerri CC, Bernoux M, Cerri CEP, Lal R (2006) Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin American. In: Lal, R.; Cerri, C. C.; Bernoux, M.; Etchevers, J. D.; Cerri, C. E. P. (Eds.). Carbon sequestration in soils of Latin American. New York: The Haworth Press, 2006. v. 1, p.41-47.

Cerri CEP, Galdos MV, Carvalho JLN, Feigl BJ, Cerri, CC (2013) Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. **Scientia Agricola**. 70:361–36.

Corrêa AR, Montanari R, Laura VA, Melotto AM, Silva ENSD, Pellin D MP, Santos ASD (2015) Aspects of the silvopastoral system correlated with properties of a typic quartzipsamment (entisol) in Mato Grosso do Sul, BRAZIL. **Revista Brasileira de Ciência Solo**. 39:438–445.

Costa DCC, Souza Bispo J, Oliveira GM, Angelotti F, Dantas BF (2017) Emergência e crescimento inicial de *Amburana cearensis* sob aumento da temperatura e dióxido de carbono. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. 2:212-219.

Cunha JM, Campos MCC, Gaio DC, Souza ZM, Soares MDR, Silva DMP, Simões EL (2018) Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. **Catena**, Amsterdam, v. 162, p. 148–156.

D'andrea AF, Silva MLN, Freitas DAF, Curi N, Silva CA (2010) Variações de curto prazo no fluxo e variabilidade espacial do CO<sub>2</sub> do solo em floresta nativa. **Pesquisa Florestal Brasileira**. 30: 85.

D'andréa AF, Silva MLN, Freitas DAF, Curi N, Silva CA (2011) Variabilidade Espacial do Fluxo de CO<sub>2</sub> do Solo em Povoamento de Eucalipto. **Floresta**. 41.

Dilustro JJ, Collins B, Duncan L, Crawford C (2005) Moisture and soil texture effects on soil CO<sub>2</sub> efflux components in southeastern mixed pine forests. **Forest Ecology and Management**. 204:87-97.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPq; 1997.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília; 2006.

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

Epron D, Nouvellon Y, Roupsard O, Mouvondy W, Mabilala A, Saint-André L, Joffre R, Jourdan C, Bonnefond J, Berbigier P, Hamel O (2004) Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, v.202, p.149-160.

Fang C, Moncrief JB (1999) A model for soil CO<sub>2</sub> production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**,95:225- 236.

Faostat. Database Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy 2017. disponível em: <http://www.fao.org/faostat>), acesso em Janeiro de 2019.

Ferrari JMS, Gabriel CPC, Silva TBG, Mota FD, Gabriel Filho LRA, Tanaka EM (2018) Análise da variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em diferentes profundidades/analysis of the spatial variability of resistance to soil penetration at different depths. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 164-175.

Fóti S, Balogh J, Herbst M, Papp M, Koncz P, Bartha S, Acosta M (2016) Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO<sub>2</sub> efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. **Revista Catena**. 143:78–89.

Gomes NM, Faria MA, Silva AM, Mello CR, Viola MR. (2007) Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p.427-435.

Grego CR, Vieira SR (2005) Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 29:169-177.

Gritsch C, Zimmermann M, Zechmeister-Boltenstern S (2015) Interdependencies between temperature and moisture sensitivities of CO<sub>2</sub> emissions in European land ecosystems. **Biogeosciences**, v. 12, n. 20, p. 5981-5993.

IEA. World Energy Balances. Production, consumption, import, export 1971–2015. Disponível em <http://data.iea.org/payment/products/117-world-energy-balances-2017-edition.aspx>. Acesso em janeiro de 2019.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores - Relatório Anual 2016. Brasília, 2016. Acesso em: 11 out. 2018. Disponível em:[https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2016.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016.pdf).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: **The physical science basis**. Geneva, Suíça: IPCC, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: **Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, 2014.

Isaaks EH, Srivastava RM. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University, 592 p. 1989.

Jassal RS, Black TA, Drewitt GB, Novak MD, Gaumont-Guay D, Nestic Z (2004) A model of the production and transport of CO<sub>2</sub> in soil: predicting soil CO<sub>2</sub> concentrations and CO<sub>2</sub> efflux from a forest floor. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 3-4, p. 219-236.

Kang S, Lee D, Lee J, Running SW (2006) Topographic and climatic controls on soil environments and net primary in a rugged temperate hardwood forest in Korea. **Ecological Research**, v.21, p.64-74.

Karhu K, Auffret MD, Dungait JA, Hopkins DW, Prosser JI, Singh BK, Gouriveau F (2014) Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, 513(7516), 81.

La Scala Jr N, Panosso AR, Pereira GT, Gonzalez AP, Miranda JGV (2009) Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**. 23(4):353-358.

La Scala N, Sá Mendonça E, Souza JV, Panosso AR, Simas FN, Schaefer CE (2010) Spatial and temporal variability in soil CO<sub>2</sub>-C emissions and relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica. **Polar Science**. 4:479-487.

Lal R (1997) Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub> enrichment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 1-2, p. 81-107.

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

Lima FV, Silva Silvino G, Souza Melo RS, Lira EC, Souza Ribeiro T (2015) Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**. 28(4):53-63.

Maccarthy DS, Zougmore RB, Akponikpè PBI, Koomson E, Savadogo P, Adiku SGK (2018). Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Different Land-Use Systems: A Case Study of CO<sub>2</sub> in the Southern Zone of Ghana. **Applied and Environmental Soil Science** v. 2018.

Mantovanelli BC, Costa Campos MC, Coutinho Alho L, Santos Silva PC, Pinheiro Silva DA, Cunha JM, Silva DMP, Rodrigues Soares MD (2016). Distribuição espacial da emissão de CO<sub>2</sub> e atributos do solo sob campo nativo na região de humaitá, Amazonas. **Sociedade & Natureza**, 28(2), 273-284.

Manzione RL, Zimback CRL. (2011) Análise Espacial Multivariada Aplicada na Avaliação da Fertilidade do Solo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 19, n. 3, p.227- 235.

Maraseni TN, Qu JS (2016) An international comparison of agricultural nitrous oxide emissions. **J. Clean. Prod.** , 135-1256 – 1266.

Marraccini E, Debolini M, Bene CB, Rapey H, Bonari E (2012) Factors affecting soil organic matter conservation in Mediterranean hillside winter cereals legumes cropping systems. **Italian Journal of Agronomy**, v. 7, n. 3, p. 38.

Matias SSR, Nóbrega JCA, Nóbrega RSA, Andrade FR, Baptistel AC (2015) Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@ambiente On-line**, Boa Vista-RO, v. 9, n. 1, p. 17-26.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala JN (2013) Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO<sub>2</sub>. **Rev Bras Ciênc Solo**. p. 1720-1728.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, Teixeira DDB, Ferraudo AS, La Scala JN (2015) On the spatial and temporal dependence of CO<sub>2</sub> emission on soil properties in sugarcane (*Saccharum spp.*) production. **Soil & Tillage Research**. 148:127–132.

Montanari R, Carvalho MDP, Andreotti M, Dalchiavon FC, Lovera LH, Honorato MADO (2010) Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1811-1822.

Morell FJ, Álvaro-Fuentes J, Lampurlanés J, Cantero-Martínez C (2010) Soil CO<sub>2</sub> fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: effects of tillage systems and nitrogen fertilization. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 139, n. 1-2, p. 167-173.

Noetzold R, Silva LM, Schoninger EL, Tomé PCDT, Carvalho Alves M (2018) Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo durante cinco safras. **Revista Brasileira de Geomática**, 6(4), 328-345.

Oertel C, Matschullat J, Zurba K, Zimmermann F, Erasmi S (2016) Greenhouse gas emissions from soils—A review. **Chem. Erde-Geochem**. 76, 327–352.

Oliver MA, Webster R (2014) A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, p. 56-69.

Pachauri RK, Meyer L A (2014) **Synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Geneva: IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change, 2014. 151 p.

Pachepsky Y, Crawford JW (2004) Fractal analysis. In: HILLEL, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Waltham: **Academic Press**, v. 2, p. 85-98.

Palmer MW (1988) Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. **Vegetatio**. 75:91-102.

Panosso AR, Marques Jr J, Milori DMBP, Ferraudo AS, Barbieri DM, Pereira GT, La Scala JN (2011) Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil Tillage Research**, 111:190–196.

Panosso AR, Perillo LI, Ferraudo AS, Pereira GT, Miranda JGV, La Scala J N (2012) Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in a mechanically harvested sugarcane production area. **Soil & Tillage Research**. 124:8-16.

Panosso AR, Ribeiro CER, Zanini JR, Pavani LC, Pereira GT, Júnior NLS (2009). Spatial variability of CO<sub>2</sub> emission, temperature and moisture of a bare oxisol submitted to different wetting levels. **Semina**. 30:1017-1033.

Pelissari AL, Caldeira SF, Ebling AA, Behling A, Figueiredo Filho A (2013) Modelagem geoestatística da dinâmica e distribuição espacial da área basal em povoamento de teca. **Enciclopédia Biosfera, Goiânica**, v. 9, n. 16, p. 1454.

Pereira G, Nascimento N (2017) Cenário das Exportações Brasileiras de Soja: uma análise do mercado chinês. **Caderno Científico Cecies-Gestão**.

Pérez LD, Millán H, González-Posada M (2010) Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A pre-fractal approach. **Soil and Tillage Research**. 110:77-86.

Perfect E, Kay BD (1995) Applications of fractals in soil and tillage research: a review. **Soil and Tillage Research**. 36:1–20.

Pezzuolo A, Basso B, Marinello F, Sartori L (2014) Using Salus model for medium and long term simulations of energy efficiency in different tillage systems. **Applied Mathematical Sciences**, 8-129-132.

Pezzuolo A, Dumont B, Sartori L, Marinello F, Antoni MM, Basso B (2017) Evaluating the impact of soil conservation measures on soil organic carbon at the farm scale. **Comput. Electron. Agric**, 135-175-182.

Pinotti CR (2017) **Variabilidade espaço-temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo em área de eucalipto no Cerrado do Mato Grosso do Sul**. Dissertação de Mestrado. Unesp, Ilha Solteira.

Pinto-Junior OB, Sanches L, Dalmolin AC, Nogueira JSD (2009) Soil efflux CO<sub>2</sub> in mature transitional tropical forest Amazônia and pasture area. **Acta Amazonica**, 39(4), 813-821.

Piovezan, R., Acorinthe, J. P. O., Polizelli, N., Visockas, A., Canteiro<sup>1</sup>, C. L., De Azevedo, T. S., & Von Zuben, C. J. (2016). Perfil epidemiológico e análise especial do risco da dengue da área urbana de santa bárbara d'oeste-SP, durante o período de 1995 a 2010. **Revista Geografia**. V. 39, N 3, P. 525-539.



Raij BV (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: **Instituto Agrônomo** 285 p.

Rakotovao NH, Razafimbela TM, Rakotosamimanana S, Randrianasoloc Z, Randriamalalad JR, Albrechte A (2017) Carbon foot print of small holder farms in Central Madagascar: The integration of agroecological practices. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 140, n. 3, p. 1165–1175.

R-Development-Core-Team, 2016. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: RFoundation for Statistical Computing, 2016. (ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>).

Ronquim CC (2010) Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**.

Ryan MG, Law BE (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, 73(1), 3-27.

Sá JCM, Lal R, Cerri CC, Lorenz K, Hungria M, Carvalho PCF (2017) Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, New York, v. 98, P. 102–112.

Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Avitabile V, Farrell EP (2006) Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands. **Plant and Soil**, 287(1-2), 161-176.

Santos D, Souza EG, Nóbrega L, Bazzi CL, Gonçalves A (2012) Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental** 16:843-848.

Sartori F, Lal R, Ebinger MH, Parrish DJ (2006) Potential soil carbon sequestration and CO<sub>2</sub> offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Philadelphia, v. 25, n. 5, p. 441–472.

Savva Y, Szlavecz K, Carlson D, Gupchup J, Szalay A, Terzis A (2013) Spatial patterns of soil moisture under forest and grass land cover in a suburban area, in Maryland, USA. **Geoderma**. 192:202–210.

Schaffrath VR, Tormena CA, Fidalski J, Andrade Gonçalves AC (2008) Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4.

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

Schwartz RC, Baumhardt RL, Evett SR (2010) Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 221-229.

Shi B, Jin G (2018) Variability of soil respiration at different spatial scales in temperate forests. **Biology and fertility of soils**, v. 52, n. 4, p. 561-571.

Silva AF, Zimback CRL, Oliveira RBD (2010) Cokrigagem na estimativa da evapotranspiração em Campinas (SP). **Tékhn e Lógos**, Botucatu, São Paulo, v. 2, n. 1.

Silva MAS, Mafra ÁL, Albuquerque JÁ, Bayer C, Mielniczuk J (2005) Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciencia Rural**. 35:544-552.

Silva Neto SP, Santos AC, Leite RLL, Dim VP, Neves Neto DN, Silva JEC (2012) Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Biosciencia**. J., 28:41-53.

Silva VR, Reichert JM, Reinert DJ (2004) Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406.

Silva-Olaya AM, Cerri CEP, La Scala JN, Dias CTS, Cerri CC (2013) Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters** 8(1), 015014.

Siqueira Coelho D, Cortez JW, Olszewski N (2012) Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, **Brasil. Rev Bras Ciênc Solo**. 36:755-764.

Smart DR, Peñuelas J (2005) Short-term CO<sub>2</sub> emissions from planted soil subject to elevated CO<sub>2</sub> and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**. 28;247–57.

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

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H (2007) Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 118, n. 1–4, p. 6–28.

Souza ZM, Campos MCC, Cavalcante IHL, Marques Júnior J, Cesarin LG, Souza SR (2006) Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134.

Souza ZM, Marques Júnior J, Pereira GT (2004) Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob o cultivo da cana. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 937-944.

Souza ZM.; Marques Júnior, J. & Pereira, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciencia Rural**, 40:48-56, 2009.

Srivastava, R. Mohan. Describing spatial variability using geostatistical analysis (1996) In: **Geostatistics for environmental and geotechnical applications**. ASTM International, 1996.

Tavares RLM, Oliveira SRDM, Barros FMMD, Farhate CVV, Souza ZMD, La Scala Jr N (2018) Prediction of soil CO<sub>2</sub> flux in sugarcane management systems using the Random Forest approach. **Scientia Agricola**, 75(4), 281-287.

Tavares RLM, Siqueira DS, Panosso AR, Castioni GAF, Souza ZMD, Scala Jr, NL (2016) Soil management of sugarcane fields affecting CO<sub>2</sub> fluxes. **Scientia Agricola**, 73(6), 543-551.

Teixeira DD, Marques Jr J, Siqueira DS, Vasconcelos V, Carvalho Jr OA, Martins ÉS, Pereira GT (2017) Sample planning for quantifying and mapping magnetic susceptibility, clay content, and base saturation using auxiliary information. **Geoderma**, 305, 208-218.

Teixeira DDB, Bicalho EDS, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, La Scala N (2013) Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola**. 70(3):195-203.

Terçariol MC, Brancaglioni VA, Júnior JPA, Montanari R, Teixeira Filho MCM, Bolonhezi AC, Panosso A. R (2016) Spatial variability of soil co<sub>2</sub> emission in soybean and sugarcane areas in mato grosso do sul cerrado, Brazil. **Journal of Geospatial Modelling**, 2(1), 45-66.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In **Advances in agronomy Academic Press**. (Vol. 38, pp. 45-94).

Ushizima TM, Bernardi JVE, Landim PMB (2003) Estudo da distribuição espacial do angico (*Anadenanthera peregrina*) na Floresta Estadual "Edmundo Navarro de Andrade"- Rio Claro, SP, Brasil, empregando metodologia geoestatística. **Holos Environment**, v. 3, n. 1, p. 59-73.

Usowicz B, Lipiec J (2009) Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction:the fractal approach. **Ecological Complexity**. 6:263-271.2009.

Vasconcelos RFB, Cantalice JRB, Oliveira VS, Costa YDJ, Cavalcante DM (2010) Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 309-316.

Vermeulen SJ, Campbell BM, Ingram JSI (2012) Climate change and food systems. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 37, p. 195– 222.

Vicentini ME (2017) **Emissão de CO<sub>2</sub> do solo em áreas de floresta plantada no Cerrado do Mato Grosso do Sul**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Unesp, Ilha Solteira

Vieira SR (2010) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais RF, Alvares VH, Schaefer CEGR. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1:1-54.

Vieira SR, Dechen SCF, Siqueira GM, Dufrac G (2011) Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois Latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, v. 70, p. 185-195.

Vieira SR, Lombardi Neto F (1995) Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do estado de São Paulo. **Bragantia**, v.54, p.405-412.

Vivas-Miranda J. Análisis fractal del microrrelieve del suelo [tese]. Coruña: Universidad de la Coruña; 2000.

Warrick AW, Nielsen DR(1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D. **Applications of soil physics**. 1980;319-344.

Webster R, Oliver MA (1990) Statistical methods in soil and land resource survey. New York: Oxford University Press, 1990. 328 p.

Western AW, Grayson RB, Blöschl G, Willgoose GR, McMahon TA. (1999). Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. **Water Resources Research**, v.35, p.797-810.

Wojciechowski JC, Shumacher MV, Pires CAF, Madruga PRA, Kilca RV, Brun EJ, Silva CRS, Vaccaro S, Rondon Neto RM (2009) Geoestatística aplicada ao estudo físico – químico do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 383-391.

Xie SP, Deser C, Vecchi GA, Collins M, Delworth TL, Hall A, Watanabe M (2015). Towards predictive understanding of regional climate change. **Nature Climate Change**, 5(10), 921.

Xu M, Qi Y (2001) Soil surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**. 7:667-677.

Xu X, Song C, Miller BG, Scaroni AW (2004) Influence of moisture on carbon dioxide separation from simulated flue gas by a novel molecular basket adsorbent. **Preprint Papers. American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry**, 49(1), 300.

Yamamoto JK, Landim PMB (2013) Geoestatística: conceitos e aplicações. São Paulo: **Oficina de Textos**.

Yiqi L, Zhou X (2006) Soil Respiration and the Environment. Academic Press, **Elsevier**, San Diego.

Zanão Júnior LA, Lana RMQ, Carvalho-Zanão MP, Guimarães EC. (2010) Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa. v. 57, n. 3, p.429-438.

Zhang R, Myers DE, Warrick AW (1992) Estimation of the spatial distribution of soil chemicals using pseudo-cross-variograms. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 5, p. 1444-1452.

Zhao Y, Xu X, Darilek JI, Huang B, Sun W, Shi X. (2009) Spatial variability assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, a case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China. **Environmental Geology**. 57:1089–1102.

Zonta JH, Brandão ZN, Medeiros JC, Sana RS, Soffiati V. (2014) Variabilidade espacial da Fertilidade do Solo em área cultivada com Algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p.595-602