

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA COMO
TÉCNICA AUXILIAR NA CARACTERIZAÇÃO DA EMISSÃO DE
CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO**

Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia

Engenheira Agrônoma

JABOTICABAL - SÃO PAULO - BRASIL

2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA COMO
TÉCNICA AUXILIAR NA CARACTERIZAÇÃO DA EMISSÃO DE
CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO**

Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior
Co-Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior**

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 (Produção Vegetal).

JABOTICABAL - SP

JULHO - 2012

Bahia, Angélica Santos Rabelo de Souza
B151u Espectroscopia de reflectância difusa como técnica auxiliar na
caracterização da emissão de CO₂ e atributos do solo / Angélica
Santos Rabelo de Souza Bahia. – – Jaboticabal, 2012
ix, 74 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Carlos Eduardo Peregrino Cerri, Marcílio
Vieira Martins Filho
Bibliografia

1. Óxidos de ferro. 2. Respiração do solo. 3. Geoestatística. 4.
Análise multivariada. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.42:519.2

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

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA COMO TÉCNICA AUXILIAR
NA CARACTERIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO

AUTORA: ANGELICA SANTOS RABELO DE SOUZA BAHIA


ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

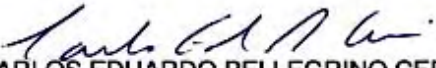
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL) , pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. MARCILIO VIEIRA MARTINS FILHO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI

Departamento de Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP /
Piracicaba/SP

Data da realização: 18 de julho de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANGÉLICA SANTOS RABELO DE SOUZA BAHIA – nascida em 17 de fevereiro de 1984 em São Paulo – SP, graduada em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2009). Foi bolsista de iniciação científica no período de 2005 a 2009. Durante os anos de 2010 e 2012 cursou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela FCAV/UNESP Jaboticabal, com bolsa de estudos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais – PPFMCG. Atua na área de Agronomia, com ênfase em Gênese, Morfologia e Classificação dos Solos, trabalhando principalmente nos seguintes temas: mineralogia, relação solo-paisagem, emissão de CO₂ do solo, variabilidade espacial, geoestatística, análise multivariada, agricultura de precisão e mapeamento de zonas de manejo específico com base em técnicas de quantificação indireta (espectroscopia de reflectância difusa e susceptibilidade magnética). Membro ativo do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Campus de Jaboticabal. No mês de julho de 2012 submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo aprovada como Mestre em Agronomia.

*Porque o que é nascido de Deus vence o mundo; e esta é a vitória
que vence o mundo: a nossa fé.
Quem é que vence o mundo, senão aquele que crê que Jesus é o
Filho de Deus?
1 João 5:4-5*

*Ao meu querido esposo e eterno namorado
Eliel de Souza Bahia,
pelo carinho, amizade, compreensão, apoio
e, sobretudo, pelo amor...*

DEDICO

A toda minha família, em especial à minha amada mãezinha Maria Lúcia dos Santos Frazão (te amo, mamilly) e meus queridos irmãos Alan, Ana Aline e Antônio Olavo, por sempre me apoiarem em todos os momentos da minha vida, me dando forças e incentivando a chegar até aqui.

Aos meus sogros Eliseu e Florentina Bahia, cunhados Gláuber e Ednéia Garcia, Elias e Adriana Bahia, Ediel Bahia e Marciana Munhoz, e aos sobrinhos Erick, Érika, Rafaella e Enzo Gabriel, por estarem presentes em minha vida, me acolhendo e apoiando, desde que cheguei à Jaboticabal.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela benção da vida, pela força, sabedoria, amparo nos momentos difíceis, coragem nos momentos de fraqueza e pela oportunidade de realizar esse feito. Sempre Lhe serei grata.

Ao Prof. Dr. José Marques Júnior e ao Prof. Dr. Newton La Scala Júnior pela orientação, confiança, insistência, paciência, convivência e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira, pelas sugestões e auxílio nas interpretações estatísticas e geoestatísticas, e também pela ótima convivência.

Ao Prof. Dr. Vidal Barrón, da Universidade de Córdoba (Espanha), pela disposição em ensinar a técnica da espectroscopia de reflectância difusa e pela excelente convivência durante sua vinda ao Brasil.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Carlos Eduardo Peregrino Cerri e Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho, pelas correções e sugestões que muito valorizaram o trabalho.

Aos amigos da Iniciação Científica e Pós-Graduação Daniel De Bortoli Teixeira, Livia Arantes Camargo, Diego Silva Siqueira, Ronny Sobreira Barbosa, Alan Rodrigo Panosso, Elton Pereira, Ricardo de Oliveira Bordonal, Rafael Golçaves Peluco, Sísara Rocha Oliveira, Beatriz Coelho França, Frederico Luis Sianci, pelo apoio, troca de experiências, histórias e risadas.

A todos os amigos dentro e fora da universidade, responsáveis por parte da minha formação pessoal, científica e profissional, especialmente aos integrantes do Grupo de Pesquisa CSME.

Aos professores, funcionários, pós-graduandos e amigos dos departamentos de Solos e Adubos e Ciências Exatas.

À Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), pela oportunidade de realização dos meus estudos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos. À Usina São Martinho pela concessão da área de estudos.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
1.2.1 Emissão de CO ₂ do solo em áreas agrícolas.....	3
1.2.2 Espectroscopia de reflectância difusa na determinação indireta de atributos do solo.....	4
1.2.3 Geoestatística.....	6
1.2.4 Estatística multivariada: análise de componentes principais (ACP).....	8
1.3 REFERÊNCIAS.....	10
CAPÍTULO 2. ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO UTILIZANDO A ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA.....	18
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	21
2.2.1 Descrição do local e critério de amostragem.....	21
2.2.2 Caracterização da emissão de CO ₂ e dos atributos do solo.....	22
2.2.3 Espectroscopia de Reflectância Difusa.....	23
2.2.4 Análise dos dados.....	24
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
2.4 CONCLUSÕES.....	33
2.5 REFERÊNCIAS.....	33
CAPÍTULO 3. UTILIZAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE HEMATITA E GOETHITA OBTIDAS PELA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA NO AUXÍLIO DA CARACTERIZAÇÃO DA ANISOTROPIA DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO.....	40
3.1 INTRODUÇÃO.....	42

3.2 MATERIAL E MÉTODOS	45
3.2.1 Descrição do local e critério de amostragem	45
3.2.2 Caracterização da emissão de CO ₂ e dos atributos do solo	45
3.2.3 Espectroscopia de Reflectância Difusa	46
3.2.4 Análise dos dados	47
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.4 CONCLUSÕES.....	63
3.5 REFERÊNCIAS	63
CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74

ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA COMO TÉCNICA AUXILIAR NA CARACTERIZAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO

RESUMO – O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da espectroscopia de reflectância difusa (ERD) no auxílio da caracterização da emissão de CO₂ e atributos do solo. O estudo foi realizado em uma malha irregular de 50 m x 50 m, contendo 89 pontos, com espaçamento mínimo de 0,50 m e máximo de 10 m entre pontos, na camada de 0,00 – 0,10 m de profundidade. Foram realizadas correlações lineares dos minerais hematita (Hm) e goethita (Gt), determinados pela ERD, com a emissão de CO₂ do solo (FCO₂) e outros atributos. A caracterização anisotrópica das variáveis foi realizada para as direções 0°, 45°, 90° e 135° em relação à linha de plantio (0°). Os resultados indicam que a ERD é um método eficiente na identificação e quantificação indireta da Hm e Gt. Os valores de respiração do solo medidos no campo foram correlacionados com os teores de Hm ($R^2 = 0,41$), Gt ($R^2 = 0,42$) e ferro ditionito (Fed) ($R^2 = 0,34$). A porosidade livre de água (PLA) também foi correlacionada com os teores de Hm ($R^2 = 0,41$), Gt ($R^2 = 0,39$) e Fed ($R^2 = 0,46$). A análise de geoestatística indicou a existência de anisotropia de todas variáveis estudadas, inclusive dos atributos mineralógicos, indicando grau de dependência espacial moderada a forte para quase todos os atributos do solo. As variáveis que melhor explicaram as variações anisotrópicas da emissão de CO₂ do solo foram PLA (58%), umidade do solo (54%), Hm (13%), Fed (8%) e temperatura do solo (7%). Esses resultados provam que essa técnica inovadora é uma alternativa atraente para auxiliar a quantificação indireta de atributos do solo e no levantamento da FCO₂, mostrando seu potencial em substituir grande parte das análises laboratoriais convencionais. Além disso, essa metodologia auxilia a verificação rápida do comportamento anisotrópico da FCO₂ e demais atributos do solo, podendo ser utilizado para viabilizar mapeamentos das emissões em grandes áreas, integrando estudos de inventários de gases de efeito estufa em solos agrícolas.

Palavras-chave: anisotropia, análise multivariada, geoestatística, mineralogia, óxidos de ferro, respiração do solo.

DIFFUSE REFLECTANCE SPECTROSCOPY AS AN AUXILIARY TECHNICAL IN THE CHARACTERIZATION OF CO₂ EMISSION AND SOIL ATTRIBUTES

ABSTRACT - The aim of this study was to evaluate the potential of diffuse reflectance spectroscopy characterize the emission of CO₂ and soil attributes. The study was conducted by using an irregular grid 50 × 50 m containing 89 points with minimum spacing 0.50 m up to 10 m between points, to measure CO₂ emissions and other properties in the uppermost layer (0,00 – 0,10 m). Linear correlations were made of hematite and goethite determined by ERD with the CO₂ emission and soil attributes. The characterization of anisotropic variables was carried out for the directions 0°, 45°, 90° and 135° relative to each row (0°). The results indicate that the ERD is an efficient method to identify and quantify indirect Hm and Gt. The values of soil respiration measured in the field were correlated with the levels of Hm ($R^2 = 0.41$), Gt ($R^2 = 0.42$) and iron dithionite (Fed) ($R^2 = 0.34$). The porosity-free water (PLA) was also correlated with the levels of Hm ($R^2 = 0.41$), GT ($R^2 = 0.39$) and Fed ($R^2 = 0.46$). The geostatistical analysis indicated the existence of anisotropy of all variables, including the mineralogical attributes, indicating level of moderate to strong spatial dependence for almost all soil attributes. The variables that best explained the variations of the anisotropic emission of CO₂ from the soil were PLA (58%), soil moisture (54%), Hm (13%), Fed (8%) and soil temperature (7%). These results prove that this innovative technique is an attractive alternative to assist the indirect quantification of soil and lifting of FCO₂, showing its potential to replace much of the conventional laboratory tests. Furthermore, this methodology helps quick check of the anisotropic behavior of FCO₂ and other soil and can be used to facilitate mapping of emissions over large areas, integrating studies of inventories of greenhouse gases in agricultural soils.

Keywords: anisotropy, multivariate analysis, geostatistics, mineralogy, iron oxides, soil respiration.

Capítulo 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

O debate sobre mudanças climáticas estão entre os mais importantes e discutidos na atualidade. Variações e mudanças no clima do planeta são acontecimentos naturais, mas no último século, ações antrópicas como o lançamento de grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE) e aerossóis na atmosfera e as mudanças no uso da terra, como a transformação de florestas em áreas agricultáveis vieram somar-se a essas causas naturais, provocando um desequilíbrio no ciclo biogeoquímico da Terra (FAPESP, 2008).

Pesquisadores em todo o mundo estudam as muitas variáveis envolvidas com as mudanças climáticas globais, suas causas e consequências, a fim de estabelecer possíveis cenários e seus impactos sobre os sistemas naturais da vida na Terra. No Brasil, estudos sobre mudanças climáticas são extremamente importantes, em razão à grande extensão territorial do país, à significativa dependência econômica dos recursos naturais renováveis, às alterações no uso do solo e ao aumento das emissões de GEE, resultante da queima de combustíveis fósseis e processos agrícolas e industriais (FAPESP, 2008). Nesse contexto, o Programa FAPESP de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais - PFPMCG (FAPESP Research Programme on Global Climate Change - RPGCC), no qual essa pesquisa está inserida, tem como objetivo avançar o conhecimento no tema, esperando que os resultados de pesquisa do programa auxiliem na tomada de decisões informadas cientificamente.

Atividades relacionadas à agricultura foram responsáveis por uma emissão global de 5,1 a 6,1 Gt CO₂-eq no ano de 2005, sendo a segunda maior fonte antropogênica de emissões de GEE, representando 10-12% das emissões globais (IPCC, 2007). Os solos agrícolas brasileiros emitiram cerca de 192,9 Mt CO₂-eq nesse mesmo ano, totalizando 9,3% das emissões totais do setor agrícola do país (CERRI et al., 2009), na forma basicamente de N₂O e CH₄. Assim, a caracterização da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) é de grande importância, principalmente em regiões tropicais, para

determinar, de forma quantitativa, o impacto que as práticas de uso e manejo do solo têm no clima do planeta. Além disso, essas pesquisas vislumbram o desenvolvimento de métodos de mitigação dessas emissões visando integrar de forma mais precisa os inventários de GEE. Tais inventários contribuem para entender o balanço de entrada e saída de carbono do solo, possibilitando identificar diferentes regiões com alto potencial de armazenamento de carbono.

Um dos temas contemplados pela agricultura sustentável é a quantificação das emissões em áreas agrícolas (LA SCALA JR, et al., 2000; CERRI et al., 2009; PANOSSO et al., 2009, BRITO et al., 2010; FIGUEIREDO et al., 2010; PANOSSO et al., 2012), principalmente nos solos das regiões tropicais, onde os processos físicos, químicos e biológicos são muito mais intensificados. No entanto, a aquisição das leituras da FCO₂ pelo método convencional, ou seja, com a utilização de um sistema automatizado de fluxo de CO₂ do solo, visando a utilização desses dados em inventários de CO₂, torna-se dificultosa em áreas grandes, pois o custo e o tempo para realizar essas medições são muitas vezes proibitivos. O tempo total de avaliação deve ser pequeno evitando abranger períodos que apresentem diferenças significativas entre as temperaturas inicial e final do experimento o que poderia ocasionar a captação da variabilidade temporal influenciada pelo aumento ou decréscimo da temperatura do solo. Assim, a espectroscopia mostra seu potencial como método alternativo de quantificação indireta dos atributos do solo, sobretudo da FCO₂, principalmente em grandes áreas agrícolas.

LA SCALA JR et al. (2000) observaram correlação significativa entre a respiração do solo com o teor de carbono orgânico e ferro extraído das argilas, atributos esses que se relacionam fortemente a reflectância espectral do solo (TORRENT & BARRÓN, 1993; BARRÓN et al., 2000; DEMATTÊ et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011). Assim, afirmam que a inclusão das características do solo adquiridas pela espectroreflectância poderia melhorar essas relações com FCO₂ na área. A aquisição das leituras da FCO₂, visando inventários de CO₂, torna-se dificultosa em áreas grandes, pois o custo e o tempo para realizar essas medições são muitas vezes proibitivos. O tempo total de avaliação deve ser pequeno evitando abranger períodos que apresentem diferenças

significativas entre as temperaturas inicial e final do experimento o que poderia ocasionar a captação da variabilidade temporal influenciada pelo aumento ou decréscimo da temperatura do solo. Assim, a espectroscopia mostra seu potencial como método alternativo de quantificação indireta dos atributos do solo inclusive, da emissão de CO₂, principalmente em grandes áreas.

Assim, a espectroscopia de reflectância difusa torna-se um método alternativo para estimar atributos do solo (GRIMLEY & VEPRASKAS, 2000), inclusive auxilia na caracterização da FCO₂. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da espectroscopia de reflectância difusa em estimar atributos do solo e no auxílio da caracterização da FCO₂.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1. Emissão de CO₂ do solo em áreas agrícolas

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), o dióxido de carbono (CO₂) é o principal gás do efeito estufa adicional, por representar cerca de 60% do total das emissões de GEE, decorrente do aumento desse gás na atmosfera de 270 ppm (pré-industrial) para 379 ppm (2005). As atividades antrópicas são consideradas as principais responsáveis pelo aumento na concentração desse gás na atmosfera, sendo a combustão de combustíveis fósseis e a mudança no uso da terra as principais fontes dessas atividades.

De acordo com BRITO et al. (2009), a contribuição de atividades relacionadas à agricultura no Brasil é extremamente significativa, sendo responsável por 75% das emissões de CO₂ do país. No entanto, a importância da agricultura neste cenário não está relacionada apenas aos processos de perda de carbono do solo via respiração, mas também está relacionada ao seu potencial de mitigação do carbono atmosférico (BRITO et al., 2009). Calcula-se que o solo consiga estocar cerca de 1500Pg de carbono orgânico, mais de duas vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera (720Pg) e cerca de três vezes mais que o carbono da biota terrestre (LAL, 2001).

Dependendo do uso e manejo, os solos agrícolas podem atuar como fontes ou sumidouros de carbono da atmosfera (USSIRI & LAL, 2009).

Práticas de preparo do solo destroem agregados responsáveis por proteger a matéria orgânica da ação dos microrganismos. Com isso, provocam o aumento da taxa de decomposição e mineralização da matéria orgânica (PANOSSO, 2011). As perdas de carbono na forma de CO₂ devido às práticas de preparo e manejo do solo estão intimamente relacionadas com a intensidade do grau de perturbação provocado pelos implementos agrícolas utilizados (LAL et al., 1995). Assim, o sistema de cana crua, onde os resíduos vegetais são mantidos sobre a superfície do solo, favorece o acúmulo de matéria orgânica e reduz a emissão de gases em comparação ao sistema de colheita de cana queimada (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2007; LUCA et al., 2008). Tendo em vista que o presente trabalho foi realizado em uma área de cana-de-açúcar colhida mecanicamente, esse conhecimento é muito relevante, uma vez que atualmente, mais de 50% da produção total de cana é colhida com máquinas e, essa palha que fica sobre o solo pode funcionar como um mitigador de carbono para a atmosfera.

1.2.2. Espectroscopia de reflectância difusa na determinação indireta de atributos do solo

O Brasil possui condições favoráveis para a expansão da produção agrícola, uma vez que existem grandes áreas com potencial para a realização da agricultura. No entanto, é necessário conhecer bem o comportamento dos atributos do solo dessas áreas, uma vez que esse conhecimento torna-se imprescindível para a identificação do potencial agrícola e, conseqüentemente a adoção de práticas de manejo economicamente sustentáveis (LOPEZ, 2009).

A agricultura atual exige metodologias mais rápidas e econômicas para a realização das análises do solo, tendo em vista o elevado número de amostras requeridas para a caracterização de áreas de manejo específico (TITTONEL et al., 2008; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006). Com isso, técnicas alternativas de análise dos

constituintes do solo, que aliem rapidez e qualidade nas análises, são necessárias para satisfazer as exigências da agricultura atual.

Muitos pesquisadores utilizam métodos quimiométricos como técnica auxiliar para o levantamento e classificação dos solos (KALAHNE et al., 2000; BEN-DOR et al., 2008; DEMATTÊ et al., 2004). OHNO & BRO (2006) relatam que a quimiometria pode ser utilizada para caracterizar as reações químicas do solo, tais como complexação com metais e sorção de superfícies.

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) é uma técnica alternativa que pode ser utilizada para complementar os métodos convencionais de análise do solo. O potencial do uso dessa técnica na agricultura, especialmente na ciência do solo, tem sido demonstrado por vários autores (TORRENT & BARRÓN, 1993; BARRÓN et al., 2000; DEMATTÊ et al., 2006; BEN-DOR et al., 2008; VISCARRA ROSSEL et al., 2011), mediante a utilização de espectros na faixa do visível (VIS) e infravermelho (NIR). Dessa maneira, a utilização da reflectância difusa inova os métodos convencionais de análise do solo.

A grande vantagem da ERD em relação aos métodos tradicionais está na análise múltipla de constituintes de maneira rápida, com menor custo e necessidade de mão-de-obra, além de não ser poluente por não utilizar produtos químicos ou reagentes e não ser destrutivo (AMORIM, 1996), além de poderem ser analisadas em campo, com a utilização de aparelhos portáteis.

A ERD tem sido utilizada com sucesso por pesquisadores para quantificação de atributos mineralógicos (MONTGOMERY, 1976; STONER & BAUMGARDNER, 1981; TORRENT & BARRÓN, 1993; BARRÓN et al., 2000; DEMATTÊ et al., 2003; DEMATTÊ et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011), no entanto, poucos são os autores que têm demonstrado a relação da FCO₂ com a mineralogia do solo (LA SCALA JR et al., 2000). Nesse sentido, entendendo que a caracterização da FCO₂ possui maior grau de dificuldade e é relativamente onerosa e inviável a utilização dessas metodologias em grandes áreas, principalmente para estudos de variabilidade espacial, a quantificação indireta destes atributos por meio da ERD pode ser uma alternativa mais adequada,

como demonstrado por alguns autores (BARRÓN et al., 2000; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011).

1.2.3. Geoestatística

A análise geoestatística tem sido utilizada por vários autores para a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo (CAMARGO et al., 2008, SIQUEIRA et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2011; PANOSSO et al., 2012). O planejamento agrícola feito com base nas análises geoestatísticas é muito mais preciso e eficaz, pois é respeitada a interação existente entre os atributos do solo com o ambiente.

Dentre as técnicas geoestatísticas que estimam a dependência espacial, a semivariância é a mais utilizada nas pesquisas científicas. Segundo VIEIRA (2000), o semivariograma é o primeiro passo da análise geoestatística e, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca, pode ser estimado por:

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

Em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância experimental para uma distância de separação h , $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h . $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i ; $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$. O variograma descreve a continuidade espacial ou dispersão das variáveis como função das distâncias entre duas localizações (DEUTSCH & JOURNEL, 1998).

O semivariograma é caracterizado por três parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e alcance (a). Ele inicia-se C_0 e cresce à medida que a semivariância aumenta. O C_0 é a descontinuidade do semivariograma próximo à origem, e expressa tanto a variabilidade para uma escala menor que o intervalo de amostragem quanto erro de mensurações (CAMBARDELLA et al., 1994; SALVIANO et al., 1998; OLIVEIRA

et al., 1999). O alcance determina a distância em que a propriedade apresenta dependência espacial, ou seja, expressa a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (ISSAKS & SRIVASTAVA, 1989). VIEIRA (2000) define o alcance da dependência espacial como sendo um parâmetro importante no estudo do semivariograma e representa o raio de um círculo, dentro do qual os valores são tão parecidos uns com os outros que se tornam correlacionados.

O patamar do semivariograma (C_0+C_1) representa a variância espacial independente, ou seja, dados separados por uma distância onde a semivariância não se modifica, são espacialmente independentes entre si (ISSAKS & SRIVASTAVA, 1989). Segundo CAMBARDELLA et al. (1994), a razão entre o C_0 e C_0+C_1 pode ser usada para definir classes distintas de dependência espacial das variáveis do solo, sendo:

- 1) $C_0/(C_0+C_1) < 25 \%$, variável apresenta forte dependência espacial;
- 2) $C_0/(C_0+C_1)$ entre 25 % e 75 %, variável apresenta moderada dependência espacial;
- 3) $C_0/(C_0+C_1) > 75 \%$, variável apresenta fraca dependência espacial.

Cada variável é submetida ao ajuste de modelos matemáticos para definir os semivariogramas. Todos os cálculos de geoestatística dependem do valor do modelo do semivariograma para cada distância especificada (VIEIRA, 2000). Por isso, se o modelo for mal ajustado, todos os cálculos seguintes estarão prejudicados. A escolha do modelo do semivariograma não é um procedimento automático, requer experiência e compreensão das limitações matemáticas da função do modelo (MCBRATNEY & WEBSTER, 1986), além disso, esse processo é um dos aspectos mais importantes das aplicações da teoria das variáveis regionalizadas, podendo provocar ambigüidade e polêmica nessas aplicações.

De acordo com BRITO et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial da FCO₂ por meio da geoestatística, fornece importantes informações sobre sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica do CO₂ entre o solo e a atmosfera, uma vez que as propriedades envolvidas nos processos de produção e transporte de CO₂ também possuem variabilidade espacial. HERBST et al. (2009)

utilizaram técnicas geoestatísticas para determinar as características espaciais da FCO₂ em solo desprovido de vegetação utilizando diferentes gradeados, ajustando modelos esféricos de semivariogramas. XU & QI (2001), estudando a FCO₂ em áreas de *Pinus ponderosa*, concluíram que as melhores propriedades do solo que explicam a variabilidade espacial da FCO₂, e conseqüentemente, utilizadas na modelagem dos semivariogramas, foram o teor de nitrogênio, biomassa microbiana, teor de matéria orgânica, densidade do solo e teor de magnésio trocável.

LA SCALA et al. (2000), estudando a respiração do solo em áreas com mudança nos padrões da variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolo desprovido de vegetação verificaram modelos de emissão similares aos ajustados para o teor de carbono orgânico e capacidade de troca catiônica do solo. SCHWENDENMANN et al. (2003) observaram relações entre FCO₂ e a concentração de fósforo e de biomassa das raízes, além da influência do teor de carbono do solo.

A utilização da geoestatística em dados de atributos do solo, principalmente para a compreensão da respiração do solo, é muito importante para a obtenção de estimativas da propriedade do solo, em locais não amostrados, com erro mínimo (GUIMARÃES et al., 1992), justificando, portanto, sua utilização nesse trabalho.

1.2.4. Estatística multivariada: análise de componentes principais (ACP)

A estatística multivariada é uma técnica estatística que possibilita a análise de um fenômeno levando-se em conta a integração de todos os fatores envolvidos, facilitando sua interpretação (KHATTREE & NAIK, 2000; JOHNSON & WICHERN, 2002). A utilização da multivariada em estudos relacionados à caracterização do solo é necessária, pois os resultados obtidos são baseados na interação do conjunto de dados, favorecendo, por conseguinte, informações mais consistentes em relação aos processos ocorrentes no solo (FIKDALSK & SCAPIM, 2007).

O planejamento agrícola atual está cada vez mais exigente em termos de produção sustentável, de baixo custo e com desempenho máximo. Assim, a utilização somente das análises estatísticas convencionais são insuficientes para a compreensão

das interações dos diversos atributos envolvidos nesse sistema. Segundo SIQUEIRA et al. (2010), a utilização da estatística multivariada vem solucionar esse problema, por possuir maior capacidade de descrever as relações de inter e intradependência nos sistemas agrícolas.

A estatística multivariada é dividida em dois grupos, as técnicas exploratórias e as técnicas de inferência estatística. As técnicas exploratórias são compostas pelas seguintes análises: análise de componentes principais (ACP), análise fatorial, análise de correlações canônicas (ACC), análise de agrupamentos ou cluster, análise discriminante e análise de correspondência. As técnicas de inferência estatística são compostas pelos métodos de estimação de parâmetros, testes de hipóteses e análise de variância, covariância e regressão multivariada.

A ACP é uma das técnicas mais utilizadas pela ciência do solo. Consiste em um método que possibilita explicar a variância do conjunto de dados originais, levando-se em conta um conjunto menor de variáveis, as componentes principais (CP) originadas a partir de combinações lineares entre as variáveis originais, conservando a maior quantidade de informações a despeito dos dados em questão (VICINI, 2005; MANLY, 2008; GUEDES et al., 2010), permitindo a visualização das variáveis de maior poder discriminatório dentro de cada componente principal (SENA et al., 2002), ou seja, atributos que se destacam, por exemplo, nos processos pedogenéticos (SIQUEIRA, 2010).

PANOSSO et al. (2012) utilizaram a ACP para analisar atributos relacionados com a respiração do solo e perceberam que este tipo de análise indicou as relações entre as propriedades físicas e químicas do solo com o fluxo de CO₂ do solo em área sob cultivo de cana-de-açúcar, evidenciando o potencial de utilização da ACP. Portanto, a utilização dessa ferramenta é de extrema valia, uma vez que torna a compreensão das relações entre os diversos atributos do solo, inclusive dados de emissão de CO₂ e espectrais, muito mais fácil, possibilitando a sua utilização na agricultura de precisão.

1.3. REFERÊNCIAS

AMORIM, H. V. **Manual de métodos analíticos para o controle da produção de álcool e açúcar**. 2. ed. Piracicaba: Esalq-USP, 1996.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 139-162.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying profiles in the field using optical means. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1113-1123, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2006.0059>>.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl. 0, p. 19-27, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000500004>>.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, J. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA JR., N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77-83, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000100011>>.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR. J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK J. M.; PARKIN T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-11, 1994.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R.; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 121, p. 95-112, 2004.

DEMATTÊ, J. A. M.; FIORIO, P. R.; CLEMENTE, C.; NANNI, M. R. Sensoriamento remoto na avaliação da evolução intempérica de solos desenvolvidos sobre granodiorito e gnaiss porfirítico. **Magistra**, v. 15, p. 33-43, 2003.

DEMATTÊ, J. A. M.; SOUSA, A. A.; ALVES, M. C.; NANNI, M. R.; FIORIO, P. R.; CAMPOS, R. C. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179–195, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.002>>.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library: and User's Guide**. 2. ed. Oxford University Press, New York, 1998. 369 p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 9-19, 2007.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO – FAPESP. **Contribuições da pesquisa paulista para o conhecimento sobre mudanças climáticas**. São Paulo, 2008. 300 p.

FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. ; ROMÃO, R.; LA SCALA JR, N. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 5, p. 3, 2010.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 64, p. 2174-2180, 2000.

GUEDES, R. V. S.; LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no Estado do Piauí e agrupamento pelo método de ward. **Revista de Geografia**. Recife, v. 27, n. 1, 2010.

GUIMARÃES, E. C.; AQUINO, L. H.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial do pH em água e da argila dispersa em água. **Ciência e Prática**, v. 19, p. 12-17, 1992.

HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J. A.; WEIHRMÜLLER, L.; VANDEBORGHT, J. Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 3, p. 762-771, 2009.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: 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, NY, USA, 2007.

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

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**, 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

KALAHNE, R. M.; AMIN, J.; SOBOTTKA; SAUERBREY, R. Methods of multivariate data analysis applied to the investigation of fen soils. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 420, n. 2, p. 205–216, 2000.

KHATTREE, R.; NAIK, D. N. **Multivariate data reduction and discrimination with SAS Software**. Cary: SAS Institute, 2000. 588p.

LA SCALA JR, N.; MARQUES JR., J.; PEREIRA G. T.; CORÁ J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.

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

LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 71, p. 145-191, 2001.

LOPEZ, L. R. **Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba 2009.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio

em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p. 789-800, 2008.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados - uma introdução**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**. v. 37, p. 617-639, 1986. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x>>.

MONTGOMERY, O. L. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical and genetic characteristics of soil**. 1976. 148f. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University, 1976.

OHNO, T.; BRO, R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 70, p. 2028-2037, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2006.0005>>.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 783-789, 1999.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA JR, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-

and-burn managements. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p. 275-282, 2009.

PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; FERRAUDO, A. S.; PEREIRA, G. T.; MIRANDA, J. G. V.; LA SCALA JR, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production área. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 8-16, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.04.005>>.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.014>>.

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

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n.1, p.111-28, 2003.

SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 171-181, 2002.

SIQUEIRA, D. S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, p. 55-66, 2010.

SIQUEIRA, D. S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 45, p. 1161-1165, 1981.

TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant Soil**, v. 345, p. 187-194, 2011. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0770-6>>.

TITTONEL, P., SHEPHERD, K. D., VANLAUWE, B., GILLER, K. E. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.123, p.137-150, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2007.05.005>>.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurements of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed) **Soil Color**. Soil Science Society of America, Special Publication, 1993. p. 21-33.

USSIRI, A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39-47, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.11.008>>.

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

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria : UFSM, CCNE, 2005. 215 p.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 637-647, 2011. Disponível em: <doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v.7, n.6, p. 667-677, 2001.

CAPÍTULO 2. ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DO SOLO UTILIZANDO A ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi investigar as relações existentes entre a espectroscopia de reflectância difusa com a emissão de CO₂ do solo e outros atributos de um latossolo utilizado para o cultivo de cana-de-açúcar, no sistema de colheita mecanizada. O estudo foi conduzido em uma malha amostral irregular de 50 m x 50 m contendo 89 pontos, com espaçamento mínimo de 0,50 m e máximo de 10 m entre pontos. Foi avaliada a emissão de CO₂ e outras propriedades do solo (0,00 – 0,10 m). Foram considerados os espectros de reflectância registradas a cada 0,5 nm no intervalo de comprimento de onda de 380 a 730 nm, os quais foram analisados por modelos matemáticos para obtenção das concentrações de hematita e goethita em cada um dos pontos investigados. A espectroscopia de reflectância difusa mostrou-se um método eficiente na identificação e quantificação indireta da hematita e goethita. Os valores de respiração do solo medidos no campo foram correlacionados com os teores de hematita ($R^2 = 0,41$), goethita ($R^2 = 0,42$) e ferro ditionito ($R^2 = 0,34$). A porosidade livre de água (PLA) também foi correlacionada com os teores de hematita ($R^2 = 0,41$), goethita ($R^2 = 0,39$) e ferro ditionito ($R^2 = 0,46$). Isso prova que essa técnica inovadora é uma alternativa atraente para auxiliar o levantamento das emissões de CO₂ e na quantificação indireta dos atributos do solo, mostrando seu potencial em substituir grande parte das análises laboratoriais convencionais.

Palavras-chave: ferro ditionito, óxidos de ferro, porosidade livre de água, quantificação indireta, respiração do solo.

2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grandes áreas com potencial para a expansão agrícola, mas com características ainda pouco conhecidas. Sem um estudo adequado desses solos não é possível identificar o seu potencial agrícola, muito menos garantir o crescimento de forma sustentável sem conhecer as práticas de manejo que melhor se adequa ao ambiente agrícola. Para isso, análises de solo convencionais são empregadas para a avaliação das características físicas e químicas, visando caracterizar o potencial agrícola desses solos. Através dessas análises é determinada a fertilidade, classificação, zonas de manejo específico, entre outros. Sabendo-se que grande parte do produto interno bruto (PIB) de países sul-americanos é dependente do setor agrícola, fica clara a importância dessas análises. Contudo, o custo elevado destas torna-se a principal dificuldade para o desenvolvimento sustentável em ciência do solo, além de dificultar a aplicabilidade da agricultura de precisão relacionada com o manejo dos solos (VISCARRA-ROSSEL & MCBRATNEY, 1998).

O sistema de análises por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) tem potencial para substituir grande parte das metodologias convencionais de análises laboratoriais (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; BEN-DOR et al., 2008). Segundo COHEN et al. (2007), existem evidências de que por meio de processos analíticos de reflectância espectral do solo, vários atributos do solo podem ser estimados com grande acurácia, principalmente atributos de difícil determinação.

A grande vantagem da ERD em relação aos métodos tradicionais está na análise múltipla de constituintes de maneira rápida, e, portanto menor custo. Além disso, há menor necessidade de mão-de-obra, além de não ser poluente por não utilizar produtos químicos ou reagentes e não ser destrutivo, ou seja, as amostras analisadas pelo espectrofotômetro não sofrem modificações de nenhum tipo, podendo ser utilizadas quantas vezes forem necessárias (AMORIM, 1996), além de poderem ser analisadas em campo, com a utilização de aparelhos portáteis.

A ERD tem sido muito utilizada para a identificação e quantificação de óxidos de ferro em solos e sedimentos (TORRENT et al., 1983; BARRÓN & TORRENT, 1986;

TORRENT & BARRÓN, 1993; VISCARRA-ROSSEL et al., 2009; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011), no estudo dos efeitos da matéria orgânica nos solos (STONER & BAUMGARDNER, 1981; DEMATTÊ et al., 2003; DEMATTÊ et al., 2006), além de ter participação ativa na interpretação de resultados da análise de dados de sensoriamento remoto, como em índices de vegetação (LYMBURNER et al., 2000). HUETE (1996) destaca a importância dos estudos espectrais em laboratório como base para a análise de dados obtidos a partir de satélites orbitais. Se tais análises eram justificáveis quando os sistemas sensores apresentavam baixa resolução espectral, atualmente são mais importantes, em vista de sistemas com maior capacidade de discriminação espectral.

LA SCALA JR et al. (2000) acreditam que haja uma correlação significativa entre a respiração do solo e carbono orgânico, capacidade de troca catiônica e o teor de ferro extraído de argilas. Mas, afirmam que a inclusão das características do solo adquiridas pela espectroreflectância poderia melhorar essas relações com a respiração do solo. MARQUES JR. et al. (2010) estudando um latossolo no sudeste do Brasil, observaram que à medida que acontecia mudanças na constituição e na concentração dos teores de ferro (Fe_2O_3) do solo da transeção, a respiração do solo diminuía. Além disso, observaram também que mudanças na cor do solo de amarelo para vermelho promoveu significativa diminuição da respiração do solo. Esse conhecimento, se associado a leituras da espectroreflectância e ao estudo da variabilidade por meio da geoestatística, pode gerar mapas do potencial de emissão de CO_2 das áreas agrícolas.

Os resultados de todas essas pesquisas têm demonstrado a espectroscopia de reflectância difusa como uma técnica inovadora na quantificação indireta dos atributos do solo inclusive, da emissão de CO_2 do solo (FCO2), mostrando seu potencial em auxiliar as análises convencionais. Portanto, o objetivo deste trabalho foi investigar as relações existentes entre a espectroscopia de reflectância difusa com a emissão de CO_2 do solo e outros atributos em um latossolo utilizado para o cultivo de cana-de-açúcar, no sistema de colheita mecanizada.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Descrição do local e critério de amostragem

Este trabalho dá continuidade aos estudos de PANOSSO et al. (2012), que trabalharam com a caracterização da dimensão fractal e anisotrópica da FCO₂ em uma área de cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada. O solo estudado foi um Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), segundo critérios da EMBRAPA (2006), textura muito argilosa, localizado numa região de transição arenito/basalto, relacionado aos arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina e basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. O estudo foi realizado em um gradeado irregular de 50 m x 50 m, contendo 89 pontos, com espaçamento mínimo de 0,50 m e máximo de 10 m entre pontos, na camada de 0,00 – 0,10 m de profundidade (Figura 1). A disposição dos pontos foi orientada em relação à linha de plantio da cultura, onde 0° é o sentido da linha, 90° o sentido da declividade do terreno, 45° e 135° sentido da operação de eliminação da soqueira utilizada para a reforma do canavial.

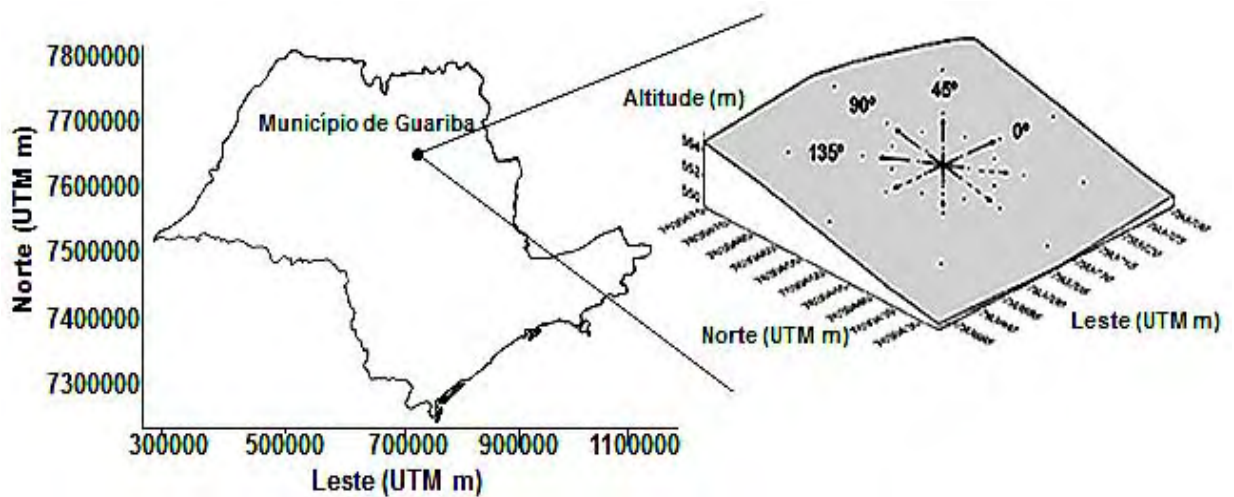


Figura 1. Representação esquemática da área experimental indicando o posicionamento dos 89 pontos constituintes do gradeado.

2.2.2. Caracterização da emissão de CO₂ e dos atributos solo

A caracterização da emissão de CO₂ do solo (FCO₂), bem como metodologias utilizadas para a caracterização dos demais atributos utilizados nesse estudo, como Ts e Us encontram-se detalhadas em PANOSSO et al. (2012). Os teores de ferro ditionito (Fed) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo metodologia de MEHRA & JACKSON(1960), sendo a dosagem do ferro realizada através da espectrofotometria de absorção atômica. Os óxidos de ferro extraídos pelo oxalato de amônio (Feo) seguiu a metodologia citada por CAMARGO et al. (1986).

Foram feitas as seguintes análises de rotina: determinação do teor de matéria orgânica (MO) de P disponível, K, Ca, Mg e H + Al. Foram calculadas a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e a porcentagem de saturação por bases (V%). Cálcio, magnésio e potássio trocáveis e fósforo disponível foram extraídos, utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ, 2001). O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: CaCl₂ 1N (EMBRAPA, 1997).

A análise granulométrica (areia, silte e argila) foi realizada por meio do método da pipeta, empregando-se NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação, por 16 horas (EMBRAPA, 1997).

A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras indeformadas, retiradas com anel volumétrico segundo EMBRAPA (1997). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor da densidade. A determinação da macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) foi realizada utilizando-se de funil de placa porosa sob a tensão de 0,6 m de altura de coluna d'água, em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra, nesta condição, corresponde aos microporos, e os macroporos foram calculados por diferença (EMBRAPA, 1997). A porosidade livre de água (PLA) foi calculada pela diferença entre a porosidade total (VTP) e a fração da porosidade preenchida por água, equivalente à umidade do solo (Us) definida previamente, pela expressão $PLA = VTP - Us$.

O carbono orgânico total (CO) foi determinado por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, segundo método

modificado de WALKLEY & BLACK (1934). O estoque de carbono (EstC) foi calculado pela expressão $EstC = (CO \times Ds \times E) / 10$, em que EstC é o estoque de carbono ($Mg\ ha^{-1}$); CO é o teor de carbono orgânico oxidável ($g\ kg^{-1}$); Ds é a densidade do solo ($kg\ dm^{-3}$), e E a espessura da camada estudada (cm).

2.2.3. Espectroscopia de Reflectância Difusa

A cor e as características mineralógicas a ela relacionadas foram determinadas por espectroscopia de reflectância difusa (ERD), em amostras de TFSA (diâmetro < 2,0 mm) (BARRÓN & TORRENT, 1986; TORRENT & BARRÓN, 1993). Foi tomado aproximadamente 1 g de TFSA em almofariz de ágata até obtenção de coloração constante do material. Informações mais detalhadas sobre a metodologia são apresentadas por TORRENT & BARRÓN (1993) e BARRÓN et al. (2000). A aquisição dos dados espectrais das amostras de solo foi realizada em um espectrofotômetro Lambda 950 UV/VIS/NIR, que coleta dados espectrais no intervalo de 250 a 2500 nm, equipada com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro. Os dados foram coletados na faixa de 380 a 730 nm (visível) com resolução espectral de 0,5 nm. Como padrão de referência, foi utilizado o espectralon, feito de teflon altamente refletivo. Foi calculada a segunda derivada da função Kubelka-Munk dos espectros de reflectância difusa, segundo KOSMAS et al. (1984) e SCHEINOST et al. (1998), pela seguinte equação:

$$f(R) = (1 - R)^2 / 2R = k/s \quad (1)$$

Em que R é a reflectância difusa da amostra, k é o coeficiente de absorção e s o coeficiente de espalhamento. Posteriormente, foram determinadas as amplitudes das bandas associadas aos comprimentos de onda entre 425 e 450 nm e entre 530 e 575 nm, relacionadas aos minerais goethita (Gt) e hematita (Hm), respectivamente. Com o valor das amplitudes das bandas de absorção da Gt e Hm (Figura 2) foi feita a

correlação com a quantidade estimada dos referidos minerais, segundo SCHEINOST et al. (1998).

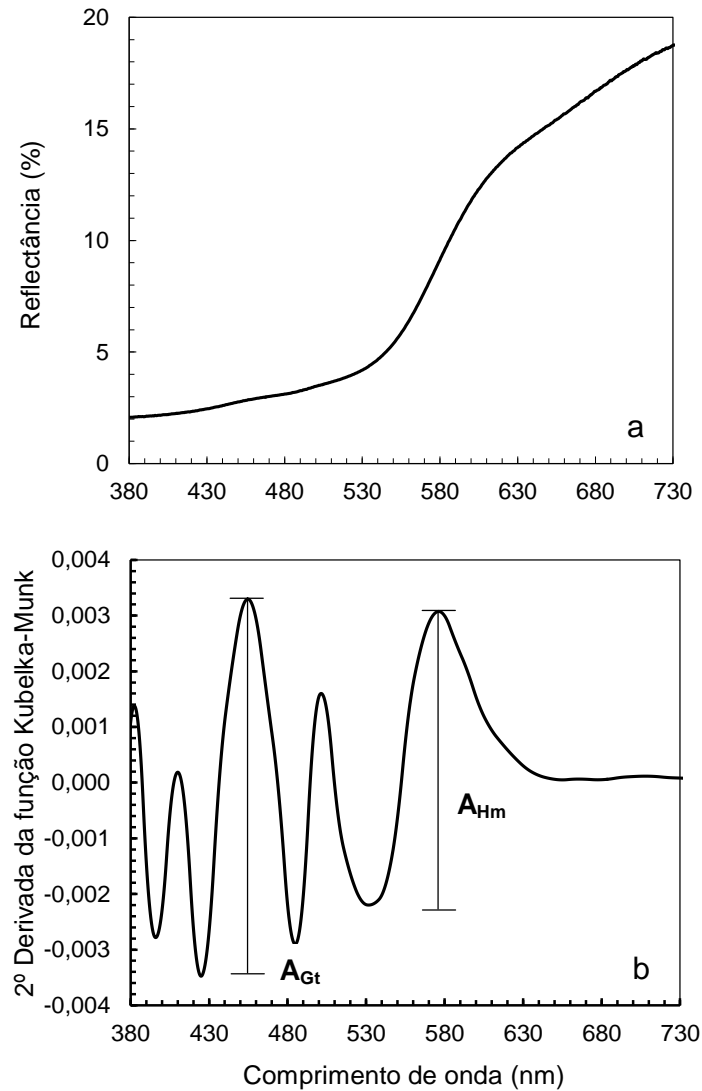


Figura 2. Espectro de reflectância difusa (a) e correspondente segunda derivada da função Kubelka-Munk (b), com a indicação da medida da amplitude atribuída à goethita (A_{Gt}) e hematita (A_{Hm}).

2.2.4. Análise de dados

Os dados foram submetidos à estatística descritiva calculando-se a média, desvio padrão, máximo, mínimo e coeficiente de variação. Do total de pontos avaliados,

90% foram utilizados na construção de um modelo linear simples e 10% foram utilizados na validação externa dos modelos, procedimento adotado por vários autores (CERRI et al., 2004; SIQUEIRA et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2011). Atualmente são exigidos dos modelos, testes que comprovem sua precisão. Além do valor do coeficiente de determinação (R^2) obtido pelo ajuste da curva de regressão, é necessária a validação externa do modelo. Este processo consistiu em separar do banco de dados original cerca de 10 a 15% das observações sobre uma variável, construir o modelo sem essas observações e utilizá-las para validar o modelo, comparando resultados observados com os estimados. Este processo confere um maior rigor ao modelo construído, diminuindo a incerteza de sua aplicabilidade em ambientes semelhantes. Os valores observados e estimados foram utilizados para o cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE).

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2 \right\}^{0,5} \quad (2)$$

Em que, n é o número de valores utilizados na validação, $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $\hat{z}(x_i)$ é o valor estimado da propriedade no ponto i . Menores valores de RMSE estão relacionados a uma maior acurácia nas estimativas.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização dos atributos do solo na área de estudo é apresentada na Tabela 1. Observa-se uma variação bastante ampla das amostras em relação a algumas propriedades importantes, mesmo utilizando-se de uma área de amostragem pequena. Segundo SOUZA et al. (2007) a variabilidade dos atributos do solo pode ser inferida por meio do coeficiente de variação (CV). De acordo com a classificação de WARRICK & NIELSEN (1980) os atributos MO, CTC, pH, areia, silte, argila, Ds, VTP, Microporos, Ts, CO e AGt/(AGt+AHm) se enquadram na classe baixa ($CV \leq 12\%$), Ca, H+Al, SB, V (%), Us, Hm e Fed enquadram-se na classe moderada ($12\% < CV < 24\%$)

e P, K, Mg, Macroporos, PLA, FCO₂, Gt, Feo e Feo/Fed enquadram-se na classe alta (CV ≥ 24%).

Tabela 1. Valores médios, desvio padrão, mínimos, máximos e coeficiente de variação para os atributos (89 pontos), na profundidade de 0,00 - 0,10 m.

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV
MO (g dm ⁻³)	24,21	2,27	20,00	30,00	9,37
P (mg dm ⁻³)	18,07	7,14	10,00	70,00	39,52
K (mmol _c dm ⁻³)	5,79	1,82	2,70	12,50	31,46
Ca (mmol _c dm ⁻³)	27,74	6,58	16,00	49,00	23,70
Mg (mmol _c dm ⁻³)	11,62	3,07	6,00	21,00	26,42
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	58,60	11,82	38,00	88,00	20,18
SB (mmol _c dm ⁻³)	44,72	10,00	4,70	76,40	22,37
CTC	103,97	9,45	83,80	133,10	9,09
V (%)	43,13	9,40	4,96	66,78	21,80
pH	4,60	0,25	4,00	5,30	5,48
Areia (g kg ⁻¹)	142,34	3,61	132,50	152,50	2,54
Silte (g kg ⁻¹)	253,11	18,58	210,50	305,00	7,34
Argila (g kg ⁻¹)	604,54	18,94	547,00	651,50	3,13
Ds (g cm ⁻³)	1,17	0,06	1,01	1,28	5,48
VTP (%)	42,78	2,35	37,83	47,63	5,49
Macroporos (%)	6,60	3,12	1,79	16,11	47,30
Microporos (%)	36,18	1,97	30,23	40,07	5,44
PLA (%)	15,42	5,72	1,81	27,03	38,08
Ts (°C)	25,99	0,58	24,30	27,75	2,23
Us (%)	27,77	4,56	20,38	45,13	16,41
CO (g kg ⁻¹)	6,88	0,71	5,41	8,64	10,38
FCO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)	2,19	0,78	0,79	4,87	35,73
Hm (g kg ⁻¹)	103,15	17,60	47,40	133,58	17,07
Gt (g kg ⁻¹)	42,17	10,35	18,11	113,81	24,55
Fed (g kg ⁻¹)	105,64	17,08	48,94	129,59	16,17
Feo (g kg ⁻¹)	6,99	2,63	0,89	10,77	37,61
Feo/Fed	0,08	0,02	0,01	0,12	35,45
AGt/(AGt+AHm)	0,49	0,06	0,31	0,80	11,73

N = 89. CV = coeficiente de variação; MO = matéria orgânica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica; V%= saturação por bases do solo; Areia = teor de areia; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; Ds = densidade do solo; VTP = volume total de poros; PLA= porosidade livre de água; Ts = temperatura média do solo; Us = umidade média do solo; CO = carbono orgânico total; FCO₂= emissão de CO₂ média do solo; Hm = teor de hematita determinado pela espectroscopia; Gt = teor de goethita determinado pela espectroscopia; Fed = ferro ditionito; Feo= ferro oxalato.

O valor do CV de FCO₂ está de acordo com aqueles reportados na literatura (LA SCALA Jr. et al., 2000; PANOSSO et al., 2011). Esses valores podem ser considerados um primeiro indicativo da variabilidade espacial dessa propriedade. Entretanto, de acordo com FANG et al. (1998), este não é suficiente para a comparação das emissões de CO₂ em diferentes estudos, principalmente pela falta de informações disponíveis a respeito dos pontos amostrais.

Os gráficos de correlação entre os teores de Hm e Gt estimados pela ERD e FCO₂ são apresentados na Figura 3. Os resultados mostram que foram encontradas correlações positivas da respiração do solo com esses atributos mineralógicos, obtendo coeficiente de determinação de 0,41 ($p < 0,05$) para hematita e 0,42 ($p < 0,05$) para goethita.

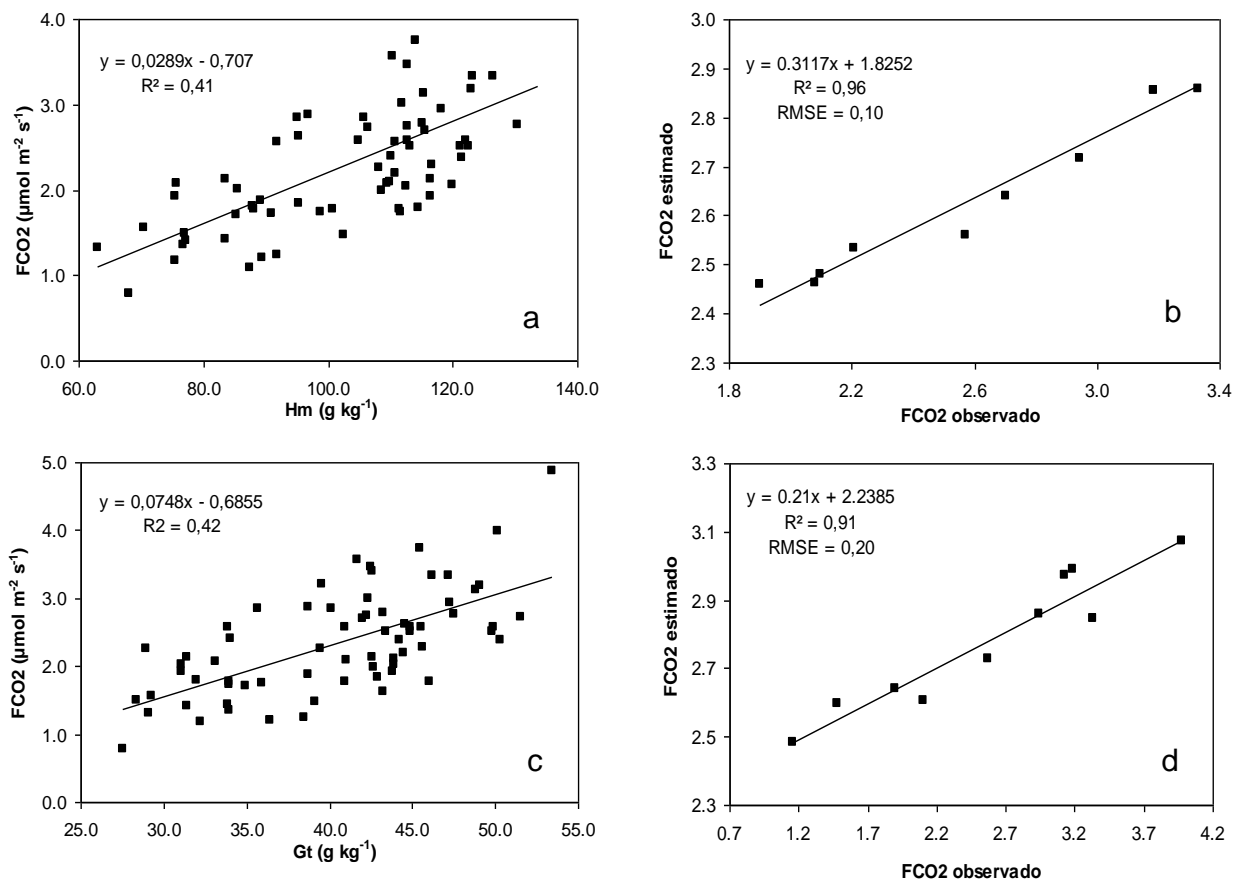


Figura 3. Modelos de regressão linear das observações e correspondente validação externa da FCO₂ com os teores de hematita (a, b) e goethita (c, d).

Os resultados mostram que essa técnica de quantificação indireta de atributos do solo pode ser utilizada como importante ferramenta no mapeamento de áreas com diferentes potenciais de emissão de CO₂, concordando com LA SCALA JR et al. (2000) e MARQUES JR et al. (2010). O custo e o tempo envolvidos nas medições da FCO₂ com a utilização dos equipamentos convencionais são muitas vezes proibitivos e inviáveis para o monitoramento de grandes áreas, uma vez que a respiração do solo apresenta variação espaço-temporal, o que reflete na variabilidade espacial do mapeamento. Assim, a ERD poderia ser uma ferramenta útil para aplicação na agricultura de precisão, potencial seqüestro de carbono e modelagem em nível de paisagem, visando inventários das emissões de CO₂.

Para avaliar se as variações espectrais observadas podem ser relacionadas com os valores de FCO₂ analisou-se o gráfico de valores medidos pelo método de referência (FCO₂ observado, medidos no campo) versus valores preditos (FCO₂ estimado pela ERD), obtendo-se os gráficos de validação externa, com coeficientes de correlação de 0,96 e 0,91 para teor de hematita e goethita, respectivamente (Figura 3b e 3d). A raiz quadrada do desvio quadrático médio (RMSE) fornece informação quanto à acurácia do modelo para cada variável (CHIRICO et al., 2007). Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. Segundo HENGL (2007), valores de RMSE < 0,71 indicam que os modelos captaram mais de 50% da variabilidade dos pontos utilizados para a validação externa. Assim, os valores indicam que os modelos gerados são bons em prever os valores destas propriedades, uma vez que os resultados da validação propiciam coeficiente de correlação linear próximos a uma unidade, entre valores preditos e observados.

Os valores de ferro determinados com citato-bicarbonato-ditionito (Fed), que estima o ferro encontrado nos compostos cristalinos, variaram entre 48,94 e 129,59 g kg⁻¹, com um valor médio de 105,64 g kg⁻¹ (Tabela 1). Para verificar a eficácia da ERD em estimar minerais do solo, foi realizada a correlação entre os teores de Fed, determinado em laboratório, com a soma dos teores de Hm e Gt estimados pela ERD (Figura 4). Os teores de Fed foram previstos com precisão pela técnica, com um coeficiente de determinação de 0,98, evidenciando sua capacidade de prever

propriedades relacionadas aos óxidos de ferro, como a Hm e a Gt, concordando com BARRÓN et al. (2000) e DEMATTÊ et al. (2006). HERNÁNDEZ et al. (1998) observaram que teores de Fed foram diretamente relacionados com o teor de argila dos solos, indicando que uma alta proporção dos óxidos de ferro dos solos estudados encontra-se associada às frações de granulometria mais fina, ou seja, fração argila, onde se concentram a Hm e Gt, corroborando o presente estudo.

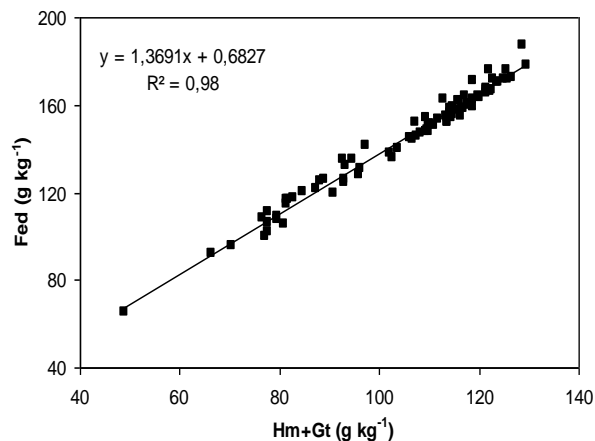


Figura 4. Modelo de regressão linear do Fed com a soma dos teores de hematita e goethita, estimados pela espectroscopia de reflectância difusa.

Como a emissão de CO₂ do solo correlacionou-se com os teores de Hm e Gt, houve uma correlação desta emissão com os teores de Fed (Figura 5). Com esses resultados percebe-se uma relação diretamente proporcional entre Fed e FCO₂, diferentemente do acontecido no trabalho de LA SCALA JR. et al. (2000). Uma possível explicação para este efeito deve-se pelo fato de haver diferenças entre os óxidos de ferro, estabilidade da matéria orgânica, tipos de radicais presentes em sua estrutura e cristalinidade dos minerais dos solos estudados.

Alguns estudos sugerem uma relação mais complexa entre os minerais da fração argila e a atividade biológica dos solos (CAMARGO, 2009; LA SCALA JR. et al., 2000; MARQUES JR. et al., 2010). INDA JÚNIOR et al. (2007) verificaram que estabilidade dos complexos organominerais foi diretamente relacionada aos teores de carbono orgânico e à mineralogia da fração argila. Além desses fatores, os teores de ferro do solo são considerados importantes a fim de inferir impactos das práticas de preparo e

manejo em solos tropicais e subtropicais. Assim, são necessários estudos adicionais, utilizando principalmente a ERD, para elucidar a relação de conteúdo de ferro e perda de CO₂ nas diferentes classes de solos, principalmente pelo fato de haver características distintas dos solos brasileiros.

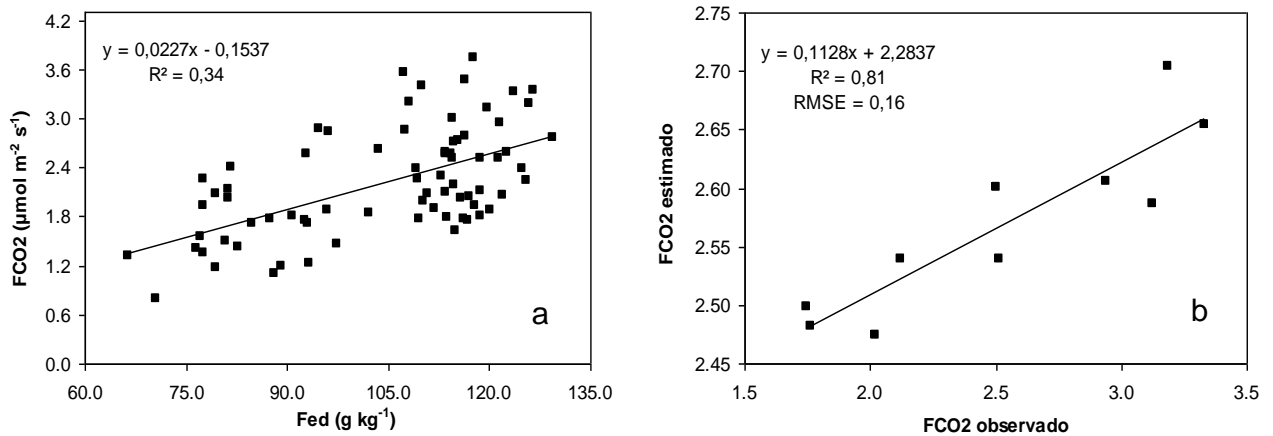


Figura 5. Modelo de regressão linear das observações (a) e correspondente validação externa (b) da respiração do solo (FCO₂) com o Fed.

Os valores de ferro determinados com oxalato de amônio (Feo), que estima o ferro encontrado nos compostos amorfos e em formas orgânicas, variaram entre 0,89 e 10,77 g kg⁻¹, com um valor médio de 6,99 g kg⁻¹. Percebe-se que os teores de Feo são menores que o Fed. De fato, a relação Feo/Fed para esse solo foi de 0,08. Essa relação é considerada como uma medida do grau de desenvolvimento de certos solos e de sua idade, bem como do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro (BLUME & SCHWERTMANN, 1969; FINE & SINGER, 1989). Os baixos valores encontrados indicaram que esses óxidos de ferro são predominantemente cristalinos, condizentes com a natureza latossólica das amostras. Geralmente, uma maior cristalinidade indica um maior desenvolvimento dos solos, ou seja, avançado estágio de intemperismo, e conseqüentemente um menor valor dessa relação (BLUME & SCHWERTMANN, 1969; FINE & SINGER, 1989). LUQUE (2008), trabalhando com solos mediterrâneos, encontrou valores semelhantes da relação Feo/Fed (0,07), indicando a predominância de óxidos de ferro cristalinos em relação aos amorfos e conseqüentemente, alto grau de intemperismo dos solos estudados.

Com base nos resultados das correlações, a espectroscopia de reflectância difusa se mostrou uma técnica com poder preditor de algumas propriedades importantes no estudo de latossolos, como óxidos de ferro e Fed. Esta capacidade preditiva já vem sendo observada também em outros tipos de solos, com propriedades físicas, químicas e mineralógicas diferentes (LUQUE, 2008; TORRENT & BARRÓN, 1993).

A quantificação indireta dos atributos do solo vem se destacando na ciência do solo como uma alternativa para viabilizar a caracterização detalhada dos atributos do solo e da planta, com potencial para aplicação em áreas agrícolas, urbanas e ambientais. Segundo KÄMPF & CURI (2000), os óxidos de ferro são importantes indicadores das condições ambientais, sendo estes minerais abundantes nos solos tropicais e de forte expressão no comportamento espectral dos solos. Assim, a ERD mostra-se como promissora medida qualitativa e quantitativa para auxiliar no mapeamento de áreas específicas de manejo. DEMATTÊ et al. (2006), comparando a análise de solo convencional com a ERD, concluíram que é possível estimar atributos diagnósticos do solo utilizando dados espectrais de laboratório. FERNANDES et al. (2004) relataram que a reflectância difusa foi eficiente na identificação de óxidos de ferro de treze tipos de solos.

No entanto, como o solo é um corpo natural e complexo, apresentando grande variabilidade de seus atributos, são necessárias mais informações que esclareçam a aplicabilidade dessa nova técnica. Esse tipo de informação é de extrema importância, visto que parte da variabilidade da produção agrícola está associada, dentre outros fatores, com os atributos do solo (MARQUES JR et al., 2010; SIQUEIRA et al, 2010;) e da paisagem (SOUSA JUNIOR et al., 2008).

Observou-se certa relação entre a PLA e os teores de Hm, Gt e Fed, mesmo que apresentando valores de coeficientes de determinação não muito altos (Figura 6). Provavelmente, esse fato seja resultante da relação existente entre a oxigenação e os microagregados do solo, uma vez que esses óxidos de ferro fazem parte da fração argila dos solos. A microagregação do solo é formada pela complexação das partículas

de argila, metais polivalentes como o ferro e colóides orgânicos, sendo esses últimos responsáveis pela ação cimentante, ocupando a parte central do agregado.

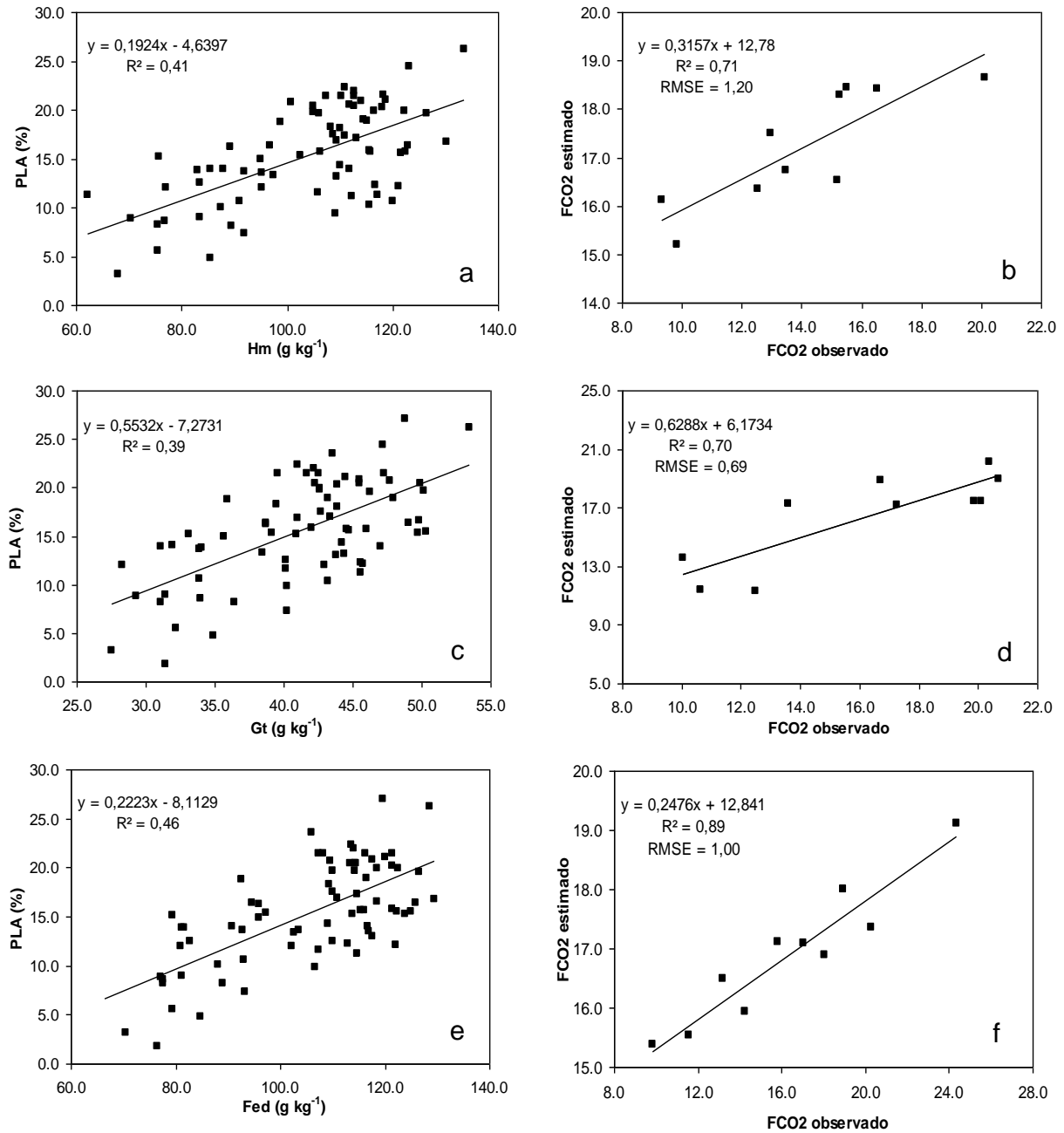


Figura 6. Modelo de regressão linear das observações e correspondente validação externa da porosidade livre de água (PLA) com os teores de Hm (a, b), Gt (c, d) e Fed (e, f).

Quando o solo está livre de água, a passagem dos gases no solo é facilitada, aumentando assim o fluxo de CO₂ liberado para a atmosfera (Lei de Fick). Com isso, a FCO₂ em solos desprovidos de vegetação, emissão esta que advém diretamente da atividade microbiana, estaria sendo afetada, provavelmente, pela presença de óxidos de ferro constituintes das argilas desse solo.

Os resultados encontrados mostram que a avaliação da ERD pode ser uma alternativa promissora na determinação indireta de atributos do solo. A alta sensibilidade dessa metodologia é interessante no que se refere à identificação e mapeamento de ambientes com características específicas da região tropical, principalmente em regiões que apresentem alto teor de ferro, como alguns

Olatossolos de basalto.

2.4. CONCLUSÕES

A espectroscopia de reflectância difusa, além de ser um método eficiente na identificação e quantificação indireta da hematita e goethita, foi correlacionada com os valores de respiração do solo medidos no campo, teores de ferro ditonito do solo e porosidade livre de água. Isso prova que essa técnica inovadora é uma alternativa atraente para auxiliar o levantamento das emissões de CO₂ e na quantificação indireta dos atributos do solo, mostrando seu potencial em substituir grande parte das análises laboratoriais convencionais.

2.5. REFERÊNCIAS

AMORIM, H. V. **Manual de métodos analíticos para o controle da produção de álcool e açúcar**. 2. ed. Piracicaba: Esalq-USP, 1996.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.;

SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.139-162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 499-510, 1986.

BEN-DOR, E.; TAYLOR, R. G.; HILL, J.; DEMATTE, J. A. M.; WHITING, M. L.; CHABRILLAT, S.; SOMMER S., Imaging spectrometry for soil applications. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 97, 2008. p. 321-392.

BLUME, H. P.; SCHWERTMANN, U. Genetic evaluation of profile distribution of aluminium, iron, and manganese oxides. **Soil Science Society America Journal**, Madison , v. 33, p. 438-444. 1969.

CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila e atributos físicos de um argissolo em curvaturas de relevo**. 2009. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGR, J. A.; VALADARES, L. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, 96 p. 1986 (Boletim Técnico 106).

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 51-68, 2004.

CHIRICO, G. B.; MEDINA, H.; ROMANO, N. Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods. **Journal of Hydrology**, Orlando, v. 334, n. 3-4, p. 405-422, 2007.

COHEN, J.; BARLOW, M.; KUSHNER, P.; SAITO, K. Stratosphere- troposphere coupling and links with Eurasian land- surface variability. **Journal of Climate**, v. 20, p. 5335-5343, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1175/2007JCLI1725.1>>.

DEMATTÊ, J. A. M.; FIORIO, P. R.; CLEMENTE, C.; NANNI, M. R. Sensoriamento remoto na avaliação da evolução intempérica de solos desenvolvidos sobre granodiorito e gnaiss porfirítico. **Magistra**, v. 15, p. 33-43, 2003.

DEMATTÊ, J. A. M.; SOUSA, A. A.; ALVES, M. C.; NANNI, M. R.; FIORIO, P. R.; CAMPOS, R. C.; Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179-195, 2006.

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. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. p. 306.

FANG, C.; MONCRIEFF J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant Soil**, v. 205, p. 135-146, 1998.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 28, p. 245-257, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200003>>.

FINE, P.; SINGER, M. J. Contribution of ferromagnetic minerals to oxalate-dithionite-extractable iron. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 53, p. 191-196, 1989.

HENGL, T. A. **Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables**. JRC Scientific and Technical Reports, Italy, 2007. 165 p.

HERNAÁNDEZ, J.; MEURER, E. J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 223-230, 1998.

HUETE, A. R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations. **Photo Interpretation**, v. 34, n. 2, p. 101-118, 1996.

INDA JR., A. V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; SALTON, J. C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1301-1307, 2007.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1. p. 107-138.

KOSMAS, C. S.; CURI, N.; BRYANT, R. B. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. **Soil Science Society America Journal**, v. 48, p. 401-405, 1984.

LA SCALA JR, N., MARQUES JR, J., PEREIRA, G. T., CORÁ, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1469-1473, 2000.

LYMBURNER, L.; BEGGS, P. J.; JACOBSON, C. R. **Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bethesda, v. 66, n. 2, p. 183-191, 2000.

LUQUE, E. C. L. **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Clay minerals and its influence on soil respiration in southern Brazil. **Geophysical Research Abstract**, v. 12, 2010.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: SWINEFORD, A. D. A. (Ed.) **National conference on clays and clay mineral**, Washington, Proceedings Pergamon Press, p. 317-342, 1960.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil Tillage Lage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.

PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; FERRAUDO, A. S.; PEREIRA, G. T.; MIRANDA, J. G. V.; LA SCALA JR, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production área. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 8-16, 2012.

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

SCHEINOST, A. C.; CHAVERNAS, A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to nearinfrared range to identify and quantify Fe oxides in soils. **Clays Clay Minerals**, v. 46, p. 528-536, 1998.

SIQUEIRA, D. S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, p. 55-66, 2010.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 45, p. 1161-1165, 1981.

TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant Soil**, v. 345, p. 187-194, 2011. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-011-0770-6>>.

TORRENT, J., BARRÓN, V. Laboratory measurement of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J.M. & CIOLKOSZ, E.J. Ed. Soil color. **Soil Science Society America Journal**, Madison, 1993. p. 21-33. (Special publication, 31).

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; FECHTER, H.; ALFEREZ, F. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, v. 6, p. 354-358, 1983.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; CATTLE, S.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by VIS-NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, n. 3-4, p. 253-266, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; MCBRATNEY, A. B. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of clay and water content. **Geoderma**, Amsterdam, v. 85, p. 19-39, 1998.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 637–647, 2011. Disponível em: <doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 2, p. 319-344.

CAPÍTULO 3. UTILIZAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE HEMATITA E GOETHITA OBTIDAS PELA ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA NO AUXÍLIO DA CARACTERIZAÇÃO DA ANISOTROPIA DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO

RESUMO - Em áreas de cana-de-açúcar colhidas mecanicamente as variações da emissão de CO₂ do solo são parcialmente explicadas pelas variações da porosidade livre de água do solo, expressa em termos da porosidade menos o preenchimento por água. Essas emissões tem indicado uma anisotropia no terreno, resultado de fatores pedológicos diversos, mas especialmente relacionada às práticas de preparo e manejo do solo, que afetam propriedades físicas controladoras da dinâmica do carbono do solo em ambiente agrícola. A hematita e goethita estimadas pela espectroscopia de reflectância difusa poderiam ser eficazes no auxílio prático da caracterização da emissão de CO₂ do solo. Dessa forma, objetivou-se primeiramente verificar se os atributos mineralógicos hematita, goethita e ferro ditionito apresentam anisotropia, com base na análise geoestatística e, posteriormente, caracterizar a anisotropia da FCO₂ em função dos teores de hematita e goethita estimados pela espectroscopia de reflectância difusa em área de cana-de-açúcar sob colheita mecânica na região sudeste do Brasil. O estudo foi conduzido em uma malha amostral irregular de 50 m x 50 m contendo 89 pontos, com espaçamento mínimo de 0,50 m e máximo de 10 m entre pontos. Foi avaliada a emissão de CO₂ e outras propriedades do solo dos 89 pontos (0,00 – 0,10 m). Foram considerados os espectros de reflectância registradas a cada 0,5 nm no intervalo de comprimento de onda de 380 a 730 nm, os quais foram analisados por modelos matemáticos para obtenção das concentrações de hematita e goethita em cada um dos pontos investigados. A análise de geoestatística indicou a existência de anisotropia de todas variáveis estudadas, inclusive dos atributos mineralógicos hematita, goethita e ferro ditionito, indicando grau de dependência espacial moderada a forte para quase todos os atributos do solo. As variáveis que melhor explicaram as variações anisotrópicas da emissão de CO₂ do solo foram PLA (58%), Us (54%), Hm (13%), Fed (8%) e Ts (7%). Esses resultados evidenciam o potencial de utilização da espectroscopia de reflectância difusa nos estudos de emissão

de CO₂, uma vez que a determinação da variável PLA é muito laboriosa e pouco operacional, se comparado com facilidade e praticidade da aquisição dos dados espectrais. Assim, esta metodologia pode ser utilizada para viabilizar mapeamentos da emissão de CO₂ em grandes áreas, podendo integrar estudos de inventários de gases de efeito estufa em solos agrícolas.

Palavras-chave: análise multivariada, geoestatística, óxidos de ferro, quantificação indireta, respiração do solo.

3.1. INTRODUÇÃO

A quantificação da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) tem sido tema de pesquisas que vislumbram o desenvolvimento de métodos de mitigação dessas emissões visando integrar de forma mais precisa os inventários de gases de efeito estufa. Tais inventários contribuem para entender o balanço de entrada e saída de carbono do solo, possibilitando identificar diferentes regiões com alto potencial de armazenamento de carbono. Um dos temas contemplados pela agricultura sustentável é a quantificação das emissões em áreas agrícolas (LA SCALA JR, et al., 2000; CERRI et al., 2009; PANOSSO et al., 2009, BRITO et al., 2010; FIGUEIREDO et al., 2010; LA SCALA JR et al., 2010; PANOSSO et al., 2012), principalmente nos solos das regiões tropicais, onde os processos físicos, químicos e biológicos são muito mais intensificados.

A cultura da cana-de-açúcar tem mostrado importância nas discussões sobre mudanças climáticas, pois é uma planta extremamente eficiente na fixação do carbono atmosférico, via fotossíntese (CO₂). O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, com 623 milhões de toneladas produzidas em 2011, em uma área plantada de aproximadamente 8 milhões de hectares, sendo o estado de São Paulo o maior produtor com 52,2% da produção brasileira (CONAB, 2011). No entanto, as mudanças nas práticas de manejo da cultura da cana-de-açúcar, no Sudeste do Brasil, têm sido consideradas mais importantes que a atual expansão da fronteira agrícola (CERRI et al. 2007; LA SCALA JR et al., 2010), uma vez que grandes áreas estão sendo convertidas de um sistema de manejo da queima para colheita mecanizável. Com isso, mecanismos intergovernamentais de redução de emissões globais podem resultar em investimentos no Brasil, a fim de incentivar a produção agrícola sustentável, com menor emissão de gases de efeito estufa.

O solo é um reservatório natural de carbono devido às suas características físicas e químicas. Diferentes locais possuem aptidões ou capacidades diferenciadas para FCO₂, representando uma das principais vias de perda do carbono estocado no solo. O mapeamento dessas características pode auxiliar na elaboração de mapas da FCO₂ e elaboração de inventários mais precisos da emissão de gases de efeito estufa.

Uma das táticas utilizadas para esse mapeamento é a geoestatística. Estudos recentes (BRITO et al., 2009; HEBSTER et al., 2009; BARRIOS et al., 2011; PANOSSO et al., 2012) mostram que a caracterização da variabilidade espacial da FCO₂, incluso anisotropia, por meio da geoestatística, fornece informações relevantes a respeito da sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica de saída do carbono do solo através do CO₂ trocado com a atmosfera.

Estudos mostram que existe considerável variabilidade dos atributos do solo em unidades taxonômicas homogêneas, com a FCO₂ inclusa (LA SCALA JR et al. 2000; BRITO et al. 2009; TEIXEIRA et al. 2011; PANOSSO et al. 2012). A variabilidade existente dentro dessas classes de solo podem ter alterações em diferentes direções. Muitas vezes essa tendência de variabilidade em um sentido é condicionada por fatores de formação do solo, principalmente o relevo. SOUZA et al. (2003) estudando um latossolo brasileiro notaram que os atributos químicos e granulométricos do solo comportam-se de maneira variável em direções diferentes. PANOSSO et al. (2012) mostra que para a utilização correta dessas ferramentas para fins de quantificação da FCO₂ em solos com cultivo mecanizado de cana-de-açúcar, o comportamento anisotrópico dos atributos do solo deve ser considerado.

Os diversos atributos do solo, além de possuírem dependência espacial, podem apresentar, muitas vezes, variações na estrutura de variabilidade em diferentes direções da superfície dos solos (anisotropia). Tal anisotropia, resultado de fatores pedológicos diversos, em áreas agrícolas, pode ser também resultante das práticas de preparo e manejo do solo, que afetam propriedades diretamente relacionadas à dinâmica do carbono no ambiente agrícola (BENBI & BRAR, 2009; LA SCALA JR et al., 2009; BOECKX et al., 2011). Variações no estoque de carbono do solo ocorrem principalmente na camada de 0,00 a 0,30 m de profundidade e são causadas principalmente pelas modificações na estrutura da matéria orgânica do solo por meio de processos como erosão, escoamento superficial, lixiviação (DOUMBIA et al., 2009) e às perdas por mineralização, via FCO₂ (PANOSSO et al., 2011). Assim, as ações humanas relacionadas ao manejo do solo podem interferir no fluxo de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (BOECKX et al., 2011).

A utilização da geoestatística como ferramenta auxiliar de mapeamento muitas vezes é deixada de lado pelos setores produtivos porque exige grande amostragem de pontos. Esse mesmo problema se aplica no estudo da anisotropia e, em alguns casos, tem o agravante de um atributo não apresentar anisotropia. Uma alternativa para aumentar o número de pontos e variáveis com maior aptidão para detectar a anisotropia e outros aspectos da variabilidade espacial de propriedades diversas do solo é a utilização da espectroscopia de reflectância difusa (ERD). O sistema de análises por ERD tem potencial para substituir grande parte das metodologias convencionais de análises laboratoriais (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006). Sua grande vantagem em relação aos métodos tradicionais está na análise múltipla de constituintes e por ser rápido e barato (BARRÓN & TORRENT, 1986; TORRENT & BARRÓN, 1993; BARRÓN et al., 2000)

LA SCALA JR et al. (2000) observaram correlação significativa entre a respiração do solo com o teor de carbono orgânico e ferro extraído das argilas, atributos esses que se relacionam fortemente a reflectância espectral do solo (DEMATTÊ et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011). Assim, naturalmente afirmam que a inclusão das características do solo adquiridas pela espectroreflectância poderia melhorar essas relações com FCO₂ na área. A aquisição das leituras da FCO₂, visando inventários de CO₂, torna-se dificultosa em áreas grandes, pois o custo e o tempo para realizar essas medições são muitas vezes proibitivos. O tempo total de avaliação deve ser pequeno evitando abranger períodos que apresentem diferenças significativas entre as temperaturas inicial e final do experimento o que poderia ocasionar a captação da variabilidade temporal influenciada pelo aumento ou decréscimo da temperatura do solo. Assim, a espectroscopia mostra seu potencial como método alternativo de quantificação indireta dos atributos do solo inclusive, da FCO₂, principalmente em grandes áreas.

Esta pesquisa tem como hipótese que a hematita e goethita estimadas pela ERD poderiam auxiliar a caracterização da emissão de CO₂ do solo. Dessa forma, objetivou-se primeiramente verificar se os atributos mineralógicos hematita, goethita e ferro ditonito apresentam anisotropia, com base na análise geoestatística e, posteriormente, utilizar os teores de hematita e goethita, estimados pela espectroscopia de reflectância

difusa, no auxílio da caracterização da anisotropia da FCO₂ em área de cana-de-açúcar sob colheita mecânica na região sudeste do Brasil.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Descrição do local e critério de amostragem

Este trabalho dá continuidade aos estudos de PANOSSO et al. (2012), que trabalharam com a caracterização da dimensão fractal e anisotrópica da FCO₂ em uma área de cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada. O solo estudado foi um Latossolo Vermelho Eutroférrico (LVef), segundo critérios da EMBRAPA (2006), textura muito argilosa, localizado numa região de transição arenito/basalto, relacionado aos arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina e basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. O estudo foi realizado em um gradeado irregular de 50 m x 50 m, contendo 89 pontos, com espaçamento mínimo de 0,50 m e máximo de 10 m entre pontos, na camada de 0,00 – 0,10 m de profundidade (Figura 1). A disposição dos pontos foi orientada em relação à linha de plantio da cultura, onde 0° é o sentido da linha, 90° o sentido da declividade do terreno, 45° e 135° sentido da operação de eliminação da soqueira utilizada para a reforma do canavial.

3.2.2. Caracterização da emissão de CO₂ e dos atributos do solo

A caracterização da emissão de CO₂ do solo (FCO₂), bem como metodologias utilizadas para a caracterização dos demais atributos utilizados nesse estudo: temperatura do solo (Ts), umidade do solo (Us), porosidade livre de água (PLA) e densidade do solo (Ds), encontram-se detalhadas em PANOSSO et al. (2012). Os teores de ferro ditionito (Fed) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo metodologia de MEHRA & JACKSON (1960), sendo a dosagem do ferro realizada através da espectrofotometria de absorção atômica.

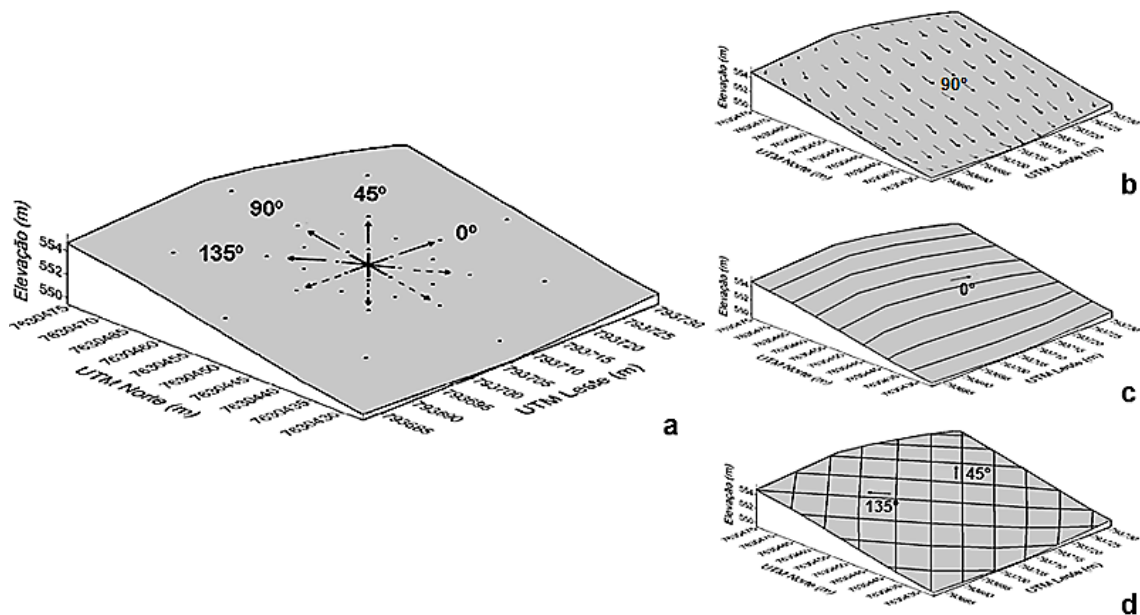


Figura 1. Representação esquemática da área experimental indicando: a) o posicionamento dos 89 pontos constituintes do gradeado (50 x 50 m); b) sentido da declividade do terreno; c) sentido das seguintes operações de manejo da cana-de-açúcar: subsolagem, adubação, plantio e colheita; d) sentidos da eliminação da soqueira realizada para renovação do canavial.

3.2.3. Espectroscopia de Reflectância Difusa

A cor e as características mineralógicas a ela relacionadas foram determinadas por espectroscopia de reflectância difusa (ERD), em amostras de TFSA (diâmetro < 2,0 mm) (BARRÓN & TORRENT, 1986; TORRENT & BARRÓN, 1993). Foi tomado aproximadamente 1 g de TFSA em almofariz de ágata até obtenção de coloração constante do material. Informações mais detalhadas sobre a metodologia são apresentadas por TORRENT & BARRÓN (1993) e BARRÓN et al. (2000). A aquisição dos dados espectrais das amostras de solo foi realizada em um espectrofotômetro Lambda 950 UV/VIS/NIR, que coleta dados espectrais no intervalo de 250 a 2500 nm, equipada com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro. Os dados foram coletados na faixa de 380 a 730 nm (visível) com resolução espectral de 0,5 nm. Como

padrão de referência, foi utilizado o espectralon, feito de teflon altamente refletivo. Foi calculada a segunda derivada da função Kubelka-Munk dos espectros de reflectância difusa, segundo KOSMAS et al. (1984) e SCHEINOST et al. (1998), pela seguinte equação:

$$f(R) = (1 - R)^2 / 2R = k/s \quad (1)$$

Em que R é a reflectância difusa da amostra, k é o coeficiente de absorção e s o coeficiente de espalhamento. Posteriormente, foram determinadas as amplitudes das bandas associadas aos comprimentos de onda entre 425 e 450 nm e entre 530 e 575 nm, relacionadas aos minerais goethita (Gt) e hematita (Hm), respectivamente. Com o valor das amplitudes das bandas de absorção da Gt e Hm foi feita a correlação com a quantidade estimada dos referidos minerais, segundo SCHEINOST et al. (1998).

3.2.4. Análise de dados

A estatística descritiva foi conduzida utilizando o programa SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC, EUA). Análise de variância foi utilizada a fim de comparar os dados das diferentes direções da malha amostral: 0° (sentido da linha de plantio), 90° (sentido da declividade do terreno), 45° e 135° (sentidos da operação de eliminação da soqueira utilizada para a reforma do canal). A caracterização da variabilidade espacial dos atributos estudados foi realizada por meio da análise geoestatística (WEBSTER & OLIVER, 1990), com base nos princípios estabelecidos pela hipótese intrínseca. A estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação h , foi determinada pela fórmula:

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

Em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância experimental para uma distância de separação h , $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $N(h)$ é o número de pares de pontos separados

pela distância h . $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no ponto x_i ; $Z(x_i + h)$ é o valor da variável Z no ponto $x_i + h$. O variograma descreve a continuidade espacial ou dispersão das variáveis como função das distâncias entre duas localizações (DEUTSCH & JOURNEL, 1998). Neste estudo foram considerados variogramas isotrópicos e anisotrópicos. Os variogramas foram ajustados aos seguintes modelos matemáticos teóricos:

a) modelo esférico:

$$\begin{cases} \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; & \text{se } 0 < h < a \\ \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1; & \text{se } h \geq a \end{cases} \quad (3)$$

b) modelo exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right]; \text{ se } 0 < h < d \quad (4)$$

Na qual, d é a máxima distância do variograma.

Os parâmetros dos modelos estimados são conhecidos por efeito pepita (C_0), patamar (C_1) e alcance (a). O efeito pepita é resultante da soma de duas componentes: erro amostral e erro decorrente da variabilidade existente em escala inferior àquela medida. O patamar representa a semivariância na qual o modelo de variograma atinge o valor do alcance, sendo essa próxima à variância amostral dos dados. O alcance indica o limite de dependência espacial entre amostras, desta forma, amostras espaçadas acima deste valor não apresentam dependência espacial entre si (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas experimentais baseou-se na validação cruzada e no coeficiente de determinação (R^2) obtido para o ajuste do modelo. Na validação cruzada, valores observados e estimados são utilizados para o cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE) (CERRI et al., 2004; BOURENNANE et al., 2007; CHIRICO et al., 2007; BOURENNANE et al., 2010; TEIXEIRA et al., 2011), dada pela equação:

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2 \right\}^{0,5} \quad (5)$$

Em que, n é o número de valores utilizados na validação, $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $\hat{z}(x_i)$ é o valor estimado da propriedade no ponto i . Menores valores de RMSE estão relacionados a uma maior acurácia nas estimativas. Os cálculos da semivariância e os subsequentes ajustes dos modelos aos variogramas experimentais foram realizados no programa GS+ 7.0 (GAMMA DESIGN SOFTWARE).

A estatística multivariada foi conduzida no programa STATISTICA 7.0 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA). A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada a fim de agrupar variáveis com o mesmo comportamento com intuito de identificar possíveis fontes de variação. A ACP é uma técnica estatística multivariada, que condensa as variáveis medidas em novas variáveis não medidas, na tentativa de avaliar o poder discriminatório das variáveis originais. Foram considerados os componentes principais cujos autovalores foram superiores à unidade (KAISER, 1958). A representação bidimensional de CP1 x CP2, conhecido como biplot, permitiu a visualização da estrutura das propriedades do solo e explicação da variabilidade máxima de todo o conjunto de propriedades do solo estudado. O efeito da direção foi testado com uma análise de variância dos escores de cada componente principal.

Para o melhor entendimento das relações existentes entre FCO2 e os diversos atributos do solo, foi conduzida análise de regressão linear múltipla para o conjunto e para cada direção (0°, 45°, 90° e 135°). As regressões foram ajustadas utilizando-se o método da seleção de variáveis por etapas, conhecido como stepwise, o qual busca determinar o melhor subconjunto de variáveis de entrada para compor um modelo. O modelo começa com todas as variáveis do conjunto e remove de forma gradativa as que são estatisticamente menos significativas. Esse processo ocorre até que as variáveis restantes sejam todas estatisticamente relevantes, ou seja, até que não haja melhora no desempenho do modelo ou não haja variáveis a serem retiradas. Essa técnica supõe que algumas variáveis não contribuem de forma significativa para a

resposta de todo o conjunto (DEMUTH et al., 2008). Nesse estudo, FCO₂ foi considerada variável dependente e os demais atributos, variáveis independentes. O nível de significância do teste F para entrada ou saída de uma variável no modelo já existente foi $p = 0,10$. A análise de regressão linear múltipla foi conduzida utilizando o programa SAS 9.0 (SAS Institute, Cary, NC, EUA).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor médio de FCO₂ observado na direção 0° (1,72 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) foi inferior (Teste t-Student; $p < 0,05$) às emissões em outras direções, conforme descrito por PANOSSO et al. (2012). As maiores médias foram verificadas nas direções 45° e 135° (2,42 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Essas médias foram semelhantes aos observados em outros estudos conduzidos em latossolos sobre o cultivo de cana-de-açúcar (LA SCALA et al., 2000; LA SCALA et al., 2003; BRITO et al., 2009; PANOSSO et al., 2009; SILVA-OLAYA, 2010; TEIXEIRA et al., 2011). XU & QI (2001) encontraram altos valores de FCO₂ em estudos realizados em solos florestais (4,7; 3,4 e 4,2 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), superiores a KONDA et al. (2008), que relataram valores de FCO₂ ao redor de 0,739 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em áreas de cultivo de leguminosas. Os valores médios das propriedades do solo, inclusive Us, PLA, Ds (descrito por PANOSSO et al., 2012), Fed, Hm e Gt (Tabela 1) também apresentaram diferenças significativas para as diferentes direções. A Ts foi a única propriedade que apresentou valores similares para as direções, que segundo PANOSSO et al. (2009), provavelmente está relacionada à cobertura do solo com resíduos da cultura, característica do manejo adotado, impedindo a incidência direta da radiação solar e promovendo a homogeneização da temperatura do solo.

Os coeficientes de variação (CV) observados para os atributos estudados foram diferentes conforme as direções analisadas. Para FCO₂, os valores de CV variaram de 24,4 a 41,1%, nas direções de 90° e 45°, respectivamente (PANOSSO et al., 2012), que estão de acordo com valores citados na literatura (ROCHETTE et al., 1991; DASSELAAR et al., 1998; LA SCALA et al., 2000; SCHWENDENMANN et al., 2003; KONDA et al., 2008) . HERBST et al. (2009) estudando um solo agrícola desprovido de

vegetação registraram valores de CV de aproximadamente 33%, com uma estrutura heterogênea da respiração do solo em um grid pequeno de 13 x 14 m. Conforme descrito por PANOSSO et al. (2012), os valores de CV para Us variaram de 9,6 a 21,7% e para PLA de 21,5 a 68,5%, nas direções 90° e 0°, respectivamente, para ambas variáveis; Ds apresentou CV de 2,7 a 6,38%, nas direções 0° e 45° respectivamente; Os valores de CV para Ts variaram de 1,6% (nas direções 0° e 45°) a 2,8% (direções 90°). Os valores de CV são um primeiro indicador da variabilidade espacial, no entanto, de acordo com FANG et al. (1998), este não é suficiente para a comparação das emissões de CO₂ em diferentes estudos, principalmente pela falta de informações disponíveis a respeito dos pontos amostrais. A heterogeneidade dos atributos em cada direção mostra a importância da caracterização espacial dessas propriedades com o auxílio da geoestatística (PANOSSO et al., 2009; HERBST et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2011), sendo essas variações o primeiro indicativo de um possível comportamento anisotrópico dos atributos.

Tabela 1. Médias das propriedades do solo e coeficiente de variação (CV) para as diferentes direções de estudo (0,0 a 0,1 m).

Propriedade	0°		45°		90°		135°	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
Fed (g kg ⁻¹)	81,16 b	13,3	112,59 a	9,8	110,73 a	11,3	115,12 a	6,9
Hm (g kg ⁻¹)	80,32 b	15,4	113,79 a	10,9	105,62 a	12,7	112,80 a	7,6
Gt (g kg ⁻¹)	32,83 b	14,7	45,07 a	13,1	41,59 a	14,4	44,71 a	9,2

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si (Tukey, P < 0,05). N = 89; Fed = ferro ditionito; Hm = hematita; Gt = goethita.

De acordo com os critérios de classificação da variabilidade espacial das propriedades do solo, proposto por WARRICK & NIELSEN (1980), os CVs encontrados para FCO₂ podem ser considerados altos (CV > 24%) para todas as direções. PLA apresentou altos valores de CV, exceto para a direção 90°, quando CV foi considerado moderado (12% < CV ≤ 24%). Os valores de CV para Us foram considerados moderados para as direções 0° e 135° e baixos (CV ≤ 12%) para as direções 45° e 90°. Gt apresentou moderados valores de CV, exceto para a direção 135°, quando o valor de CV foi considerado baixo (9,2%). Para Ds, Ts e Fed, os valores de CV foram baixos,

com exceção para Fed na direção 0°, quando CV foi moderado (13,3%). Hm, por sua vez, apresentou moderados valores de CV para as direções 0° e 90° e baixos para 45° e 135°.

Estudos geralmente se concentram na caracterização dos padrões de variabilidade espacial considerando o grid amostral como isotrópico. No entanto, espera-se que o manejo do solo em áreas agrícolas resulte em um comportamento anisotrópico dos atributos do solo. Assim, a caracterização da estrutura de variabilidade e dependência espacial dos atributos estudados foi determinada ajustando-se modelos de variogramas teóricos isotrópicos e anisotrópicos, ou seja, para cada direção, a fim de observar se esses atributos do solo apresentam comportamento anisotrópico.

A análise geoestatística mostrou que todas as variáveis analisadas apresentaram dependência espacial, expressa por meio dos ajustes dos modelos de variogramas, nas diferentes direções da malha amostral. Isso indica a existência de anisotropia das variáveis, inclusive dos atributos mineralógicos, concordando com KÄMPF & CURI (2000), que relatam a influência ambiental na formação e nas características distintas desses minerais. O ajuste anisotrópico apresenta uma melhora de tanto a tanto para todas as variáveis, com exceção da temperatura (Tabela 2; Figura 2).

O modelo de melhor ajuste aos variogramas dos atributos FCO₂, Ts, Us (135°), PLA, Ds, Fed (isotrópico, 0° e 135°) e Gt (isotrópico, 0° e 45°) foi o esférico, enquanto o modelo exponencial se ajustou aos variogramas dos atributos Us (isotrópico, 0°, 45° e 90°), Fed (45° e 90°), Hm e Gt (135°). Os modelos esféricos e exponenciais descrevem fenômenos relativamente irregulares, com variograma com comportamento linear próximo da origem, sendo que os modelos exponenciais ajustam-se melhor a fenômenos mais erráticos a pequenas distâncias do que modelos esféricos (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

Para vários autores (VIEIRA, 2000; SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2002), o modelo esférico é o que melhor se ajusta aos atributos estudados em ciência do solo. TEIXEIRA et al. (2011) também ajustaram modelos esféricos aos variogramas de FCO₂ na mesma classe de solo deste estudo, enquanto para a Ds, o modelo exponencial apresentou o melhor ajuste. CAMARGO et al. (2010) citaram os modelos esféricos e

exponenciais para o estudo variográfico dos atributos mineralógicos em um solo de mesma classificação.

Tabela 2. Modelos e parâmetros dos variogramas teóricos simples ajustados aos dados das propriedades do solo, nas diferentes direções de estudo.

		Modelos	C_0	C_0+C_1	C_0/C_0+C_1	A	R^2	RMSE	MR
FCO2	ISO	Esf.	0,06	0,16	0,39	3,60	0,99	0,13	-
	0°	Esf.	0,02	0,27	0,07	6,18	0,91	0,10	23,08
	45°	Esf.	0,02	0,11	0,24	4,12	0,84	0,13	0,00
	90°	Esf.	0,04	0,12	0,37	2,80	0,75	0,12	7,69
	135°	Esf.	1,00E-07	0,18	5,60E-07	3,75	0,96	0,13	0,00
Ts	ISO	Esf.	0,12	0,28	0,43	2,00	0,96	0,06	-
	0°	Esf.	1,00E-07	0,23	4,35E-07	3,10	0,95	0,09	-50,00
	45°	Esf.	0,05	0,17	0,30	2,30	0,86	0,10	-66,67
	90°	Esf.	0,12	0,34	0,35	3,50	0,93	0,12	-100,00
	135°	EPP	0,19	0,19	1,00	-	-	-	-
Us	ISO	Exp.	0,01	0,02	0,43	4,90	0,95	2,78	-
	0°	Exp.	3,70E-03	0,02	0,25	3,00	0,69	0,82	70,50
	45°	Exp.	2,00E-03	0,01	0,15	2,50	0,76	0,62	77,70
	90°	Exp.	1,70E-03	0,01	0,12	3,00	0,83	0,65	76,62
	135°	Esf.	3,70E-03	0,02	0,16	1,50	0,79	0,89	67,99
PLA	ISO	Esf.	11,00	25,00	0,44	4,00	0,81	1,11	-
	0°	Esf.	6,00	24,20	0,25	2,50	0,96	0,94	15,32
	45°	Esf.	14,00	42,00	0,33	7,80	0,98	1,01	9,01
	90°	EPP	24,44	24,44	1,00	-	-	-	-
	135°	Esf.	16,00	39,00	0,41	4,60	0,94	1,09	1,80
Ds	ISO	Esf.	1,40E-03	2,70E-03	0,52	3,00	0,90	0,05	-
	0°	Esf.	3,20E-04	2,11E-03	0,15	4,50	0,83	0,01	80,00
	45°	Esf.	1,00E-07	3,50E-03	2,86E-05	2,00	0,84	0,01	80,00
	90°	Esf.	3,80E-04	2,90E-03	0,13	3,00	0,92	0,01	80,00
	135°	Esf.	8,00E-04	2,80E-03	0,29	3,40	0,90	0,01	80,00
Fed	ISO	Esf.	109,00	264,00	0,41	2,20	0,82	3,93	-
	0°	Esf.	13,00	220,00	0,06	2,00	0,93	3,81	3,05
	45°	Exp.	80,00	300,00	0,27	2,60	0,85	2,92	25,70
	90°	Exp.	8,00	300,00	0,03	2,35	0,99	2,23	43,26
	135°	Esf.	150,00	315,00	0,48	4,00	0,72	2,18	44,53
Hm	ISO	Exp	45,00	248,00	0,18	1,60	0,93	4,82	-
	0°	Exp	0,00	270,00	0,00	3,50	0,86	4,78	0,83
	45°	Exp	90,00	269,00	0,33	2,30	0,81	3,04	36,93
	90°	EPP	176,10	176,10	1,00	-	-	-	-
	135°	Exp	135,00	280,00	0,48	3,00	0,72	2,48	48,55
Gt	ISO	Esf.	0,02	0,05	0,41	2,90	0,84	4,41	-
	0°	Esf.	0,00	0,03	0,00	2,60	0,92	1,78	59,64
	45°	Esf.	0,01	0,05	0,21	3,00	0,80	1,71	61,22
	90°	EPP	0,05	0,05	1,00	-	-	-	-
	135°	Exp.	0,01	0,06	0,17	4,50	0,58	1,05	76,19

C_0 =efeito pepita; C_0+C_1 =patamar; C_0/C_0+C_1 =grau de dependência espacial; A=alcance (m); RMSE= raiz do erro quadrático médio; MR=melhora relativa (%); Exp.=modelo exponencial; Esf.=modelo esférico; EPP = efeito pepita puro.

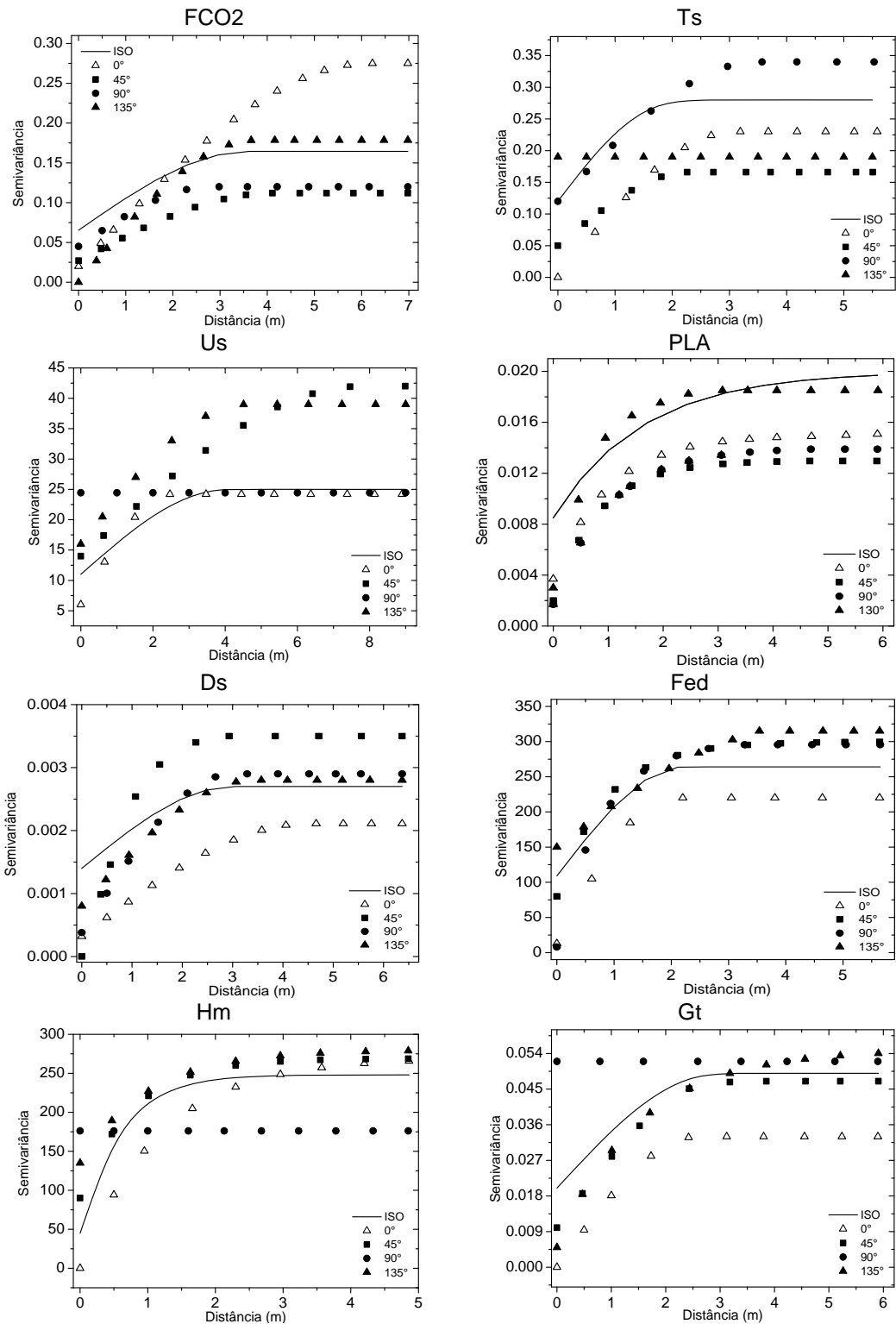


Figura 2. Variogramas teóricos da emissão de CO₂ do solo e das demais propriedades para as diferentes direções de estudo.

Algumas direções específicas de alguns atributos não apresentaram estrutura de variabilidade espacial definida na escala de amostragem adotada, como a Ts (135°), PLA (90°), Hm (90°) e Gt (90°), evidenciando o efeito pepita puro (EPP) (VIEIRA, 2000). Conforme se pode observar na figura 2, as linhas horizontais retas dos variogramas em cada atributo indicam que não foi possível o ajuste de um modelo teórico aos dados de variância. Para a caracterização desses atributos, seria necessária a utilização de uma grade de amostragem com espaçamento menor.

A análise da relação C_0/C_0+C_1 para os atributos estudados, permitiu a classificação do grau de dependência espacial que, segundo CAMBARDELLA et al. (1994), é considerado forte se essa razão for $< 0,25$, moderado quando essa razão estiver entre $0,25$ e $0,75$, e fraco se a razão for $> 0,75$ (Tabela 2). A maioria dos atributos estudados apresentou dependência espacial moderada a forte. Somente os atributos que não apresentaram estrutura de variabilidade espacial (EPP) mostraram grau de dependência fraco. Assim, a forte dependência espacial dos atributos do solo pode ser atribuída a fatores intrínsecos ao solo, condicionado principalmente pelas formas de paisagem (SOUZA et al., 2003; BRITO et al., 2010; CAMARGO et al., 2010), textura e mineralogia (CAMBARDELLA et al., 1994), em contrapartida, os atributos com fraca dependência espacial são mais influenciados por fatores extrínsecos, tais como as práticas de preparo e manejo do solo adotadas (CAMBARDELLA et al., 1994; LA SCALA et al., 2000; BARRIOS et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2011; PANOSSO et al., 2012). Neste sentido, observa-se que um latossolo sob cultivo há mais de trinta anos com cana-de-açúcar não pode ser considerado homogêneo, uma vez que se observou variabilidade espacial para todos os atributos estudados, mesmo em um malha amostral pequena, confirmando, portanto, o comportamento anisotrópico dessas variáveis.

Os valores do alcance mostram uma heterogeneidade na distribuição espacial dos atributos avaliados em cada grid amostral (isotrópico e direções) (Tabela 2). Os valores de alcance foram superiores ao menor valor de espaçamento utilizado no grid amostral (0,5 m), indicando que as amostras estão espacialmente relacionadas (VIEIRA, 2000). Os maiores valores de alcance foram registrados para FCO2 (direção 0°) e PLA (direção 45°) e o menor para atributos com EPP. Como o alcance define a distância a

partir da qual as amostras de um determinado atributo são consideradas independentes (TRANGMAR et al., 1985), estes resultados mostram que para a captação da variabilidade espacial dos atributos estudados não devem ser tomadas medições a distâncias menores que os alcances, pois essas amostras estão correlacionadas espacialmente. Ressalta-se que o maior (6,18 m) e menor (2,80 m) valor dos alcances registrados para FCO₂ coincidiram com o maior (3,50 m) e menor (EPP) valor dos alcances registrados para Hm, nas direções 0° e 90°, respectivamente, indicando uma possível relação do padrão de variabilidade espacial entre essas propriedades do solo.

Os valores de alcance para FCO₂ encontrados nesse estudo estão de acordo com os encontrados por KOSUGI et al. (2007), que detectaram faixas entre 4,40 e 24,70 m em um grid amostral isotrópico de mesmo tamanho em área de floresta. OLIVEIRA JR et al. (2011) encontraram um alcance superior a esse estudo para teores de Hm (77,70 m) e Gt (28,90 m) estimados por técnica de difração de raios X, em uma malha maior que esse estudo (12,88 ha) com espaçamento regular de 30 m.

A raiz quadrada do desvio quadrático médio (RMSE) fornece informação quanto à acurácia do modelo para cada variável (CHIRICO et al., 2007). Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. Segundo HENGL (2007), valores de $RMSE < 0,71$ indicam que os modelos captaram mais de 50% da variabilidade dos pontos utilizados para a validação externa. A melhora relativa (MR) indica quanto que os variogramas anisotrópicos são melhores que os isotrópicos em captar a variabilidade espacial apresentada pela variável. Observa-se que todas as variáveis apresentaram melhora significativa com os variogramas anisotrópicos, exceto Ts, indicando comportamento anisotrópico desta variável (Tabela 2).

A análise de componentes principais (ACP) foi utilizada para identificar o poder discriminatório das variáveis (Tabela 3). Os autovalores extraídos de dois componentes foram superiores a um (KAISER, 1958). As variáveis foram agrupadas em um modelo com dois componentes principais que explicaram 73,4% da variabilidade total. A CP1 apresentou correlação com o grupo das variáveis físicas do solo (Ds, Us e PLA), correlacionadas ao processo de transporte de CO₂ do solo para a atmosfera (FANG & MONCRIEFF, 1999) e com os atributos mineralógicos do solo (Fed, Hm e Gt). A CP2

apresentou correlação com os atributos mineralógicos Gt e Fed. As variáveis Ds, Us e Ts foram responsáveis pela discriminação desse grupo, localizado à direita de CP1 (correlação positiva). Por outro lado, as variáveis FCO2, PLA, Fed, Hm e Gt localizaram-se à esquerda de CP1 (correlação negativa), podendo ser consideradas antagonistas aos pontos localizados na direção de 0°. As variáveis PLA (-0,87), Hm (-0,86), Fed (-0,82), Gt (-0,80), Us (0,75), FCO2 (-0,73) e Ds (0,58), nessa ordem, foram as que apresentaram poder discriminatório em CP1; as variáveis Gt (-0,53) e Fed (-0,52) foram as únicas com poder discriminatório em CP2.

Tabela 3. Coeficientes de correlação entre as propriedades do solo e os dois primeiros componentes principais, análise de variância e teste de comparações múltiplas para as variáveis em diferentes direções.

Atributos	Componentes Principais			
	PC1		PC2	
	Correlação	Ranking	Correlação	Ranking
FCO2	-0,73*	11,9	0,37	9,7
Ds	0,58*	7,6	-0,35	8,6
Ts	0,45	4,6	-0,38	10,1
Us	0,75*	12,8	-0,37	9,9
PLA	-0,87*	16,9	0,35	8,8
Fed	-0,82*	15,1	-0,52*	19,0
Hm	-0,86*	16,8	-0,45	14,2
Gt	-0,80*	14,3	-0,53*	19,7
Autovalores		4,5		1,4
Variância explicada (%)		55,7		17,7
Variância acumulada (%)		55,7		73,4
Análise de Variância				
<i>F</i>		6,55		1,03
<i>p</i>		<0,0001		0,383
Comparação de médias				
0°		a		a
45°		b		a
90°		b		a
135°		b		a

N = 89; correlações precedidas por asterisco (>0,50 em valor absoluto) foram consideradas na interpretação do componente principal; FCO2 = emissão de CO₂ média do solo; Ds = densidade do solo; Ts = temperatura média do solo; Us = umidade do solo; PLA= porosidade livre de água; Fed = ferro ditionito; Hm = hematita; Gt = goethita. .

A análise de variância dos escores de CP1 (Tabela 3) mostrou que a direção foi um fator significativo ($F = 6,55$; $p = 0,000$), indicando que as relações entre as variáveis com maior poder discriminatório na CP1 são distintas de acordo com as direções do gradeado. A análise de comparação múltipla indicou diferença significativa ($p < 0,05$) dessa relação para a direção de 0° , quando comparada às demais direções. PANOSSO et al. (2012) encontraram resultados similares, porém utilizando-se de muito mais propriedades do solo do que no presente trabalho. Dessa forma, a ERD foi um método eficaz na determinação da anisotropia da FCO2 e de todas as variáveis significativamente correlacionadas à CP1, que são: Ds, Us, PLA, Fed, Hm e Gt.

A representação bidimensional das duas componentes principais evidencia uma nítida diferença entre as amostras do sentido da linha do plantio (0°) e as amostras das demais direções, mostrando uma possível homogeneidade da FCO2 nessa direção (Figura 3).

Pensando nas relações de causa-efeito, nota-se que houve um contraste, dentro da CP1, entre os atributos considerados diagnósticos (Fed, Hm e Gt) e atributos considerados secundários (Ds, Us e Ts), devido à posição desses no biplot. Esse comportamento evidencia as relações existentes entre esses atributos e o padrão de variabilidade espacial, corroborando com a suposição de que os atributos pedogenéticos estão relacionados com a variabilidade espacial de atributos físicos. GHIDIN et al. (2006) relataram que hematita, goethita e gibbsita foram responsáveis pelo aumento na macroporosidade, porosidade total e redução na densidade do solo, para Latossolo Bruno ácrico e Latossolo Vermelho distrófico. PANOSSO et al (2012) relataram que as variações da FCO2 foram explicadas pela variação da PLA, no entanto, este estudo mostra que essas variações de FCO2 são melhores explicadas pela variabilidade dos atributos mineralógicos do solo, o que foi evidenciado pela geoestatística e ACP.

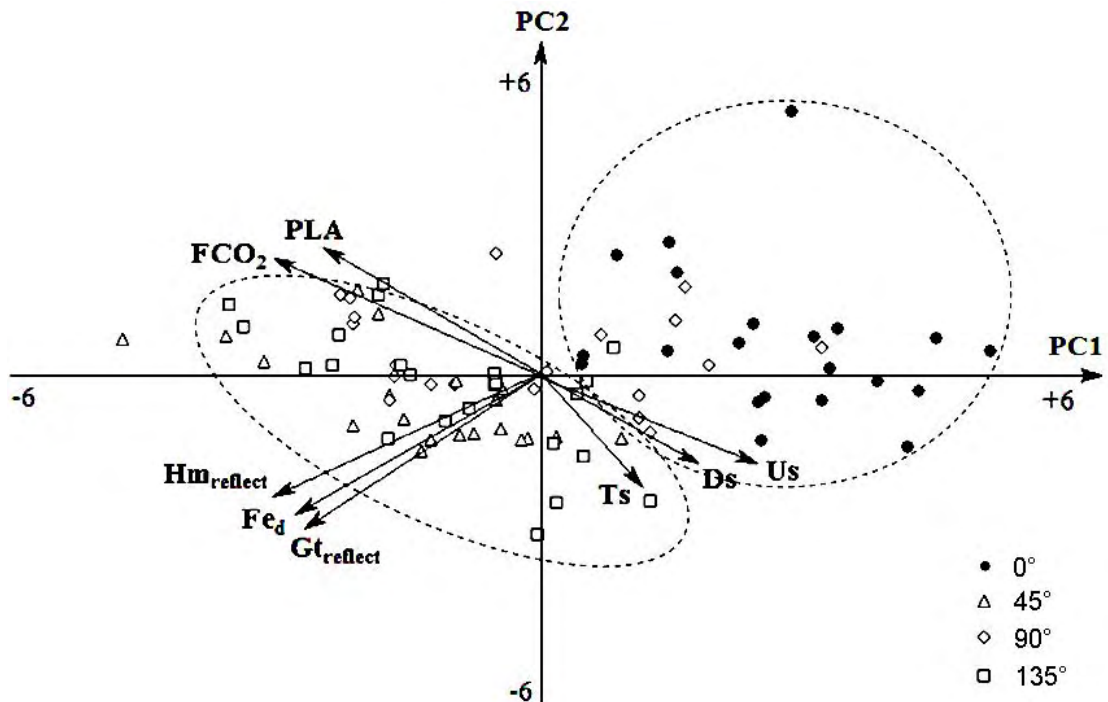


Figura 3. Representação bidimensional dos componentes principais 1 e 2 (biplot) da análise de componentes principais FCO₂ = emissão de CO₂ média do solo; PLA = porosidade livre de água; Ts= temperatura média do solo; Ds = densidade do solo; Us = umidade média do solo; Fed = ferro ditionito; Hm = hematita; Gt = goethita.

Nesse estudo observa-se que a variabilidade espacial dos atributos do solo está intimamente ligada às direções de coleta das amostras na malha amostral. Assim, pode-se chamar de grupos anisotrópicos os pontos relacionados à determinada direção do grid. O manejo que segue o sentido da linha de plantio, principalmente colheita e preparo do solo, influenciou a anisotropia nessa direção (0°), ficando evidenciado na separação dos pontos correspondentes no biplot (Figura 4), podendo afirmar que as variáveis físicas Us, Ds e a Ts se enquadram dentro do grupo anisotrópico de 0° a 90°, ou seja, esses atributos apresentam um padrão de variação característico nessas direções do que em outras. Percebe-se também uma tendência de distribuição dos demais pontos numa mesma região do gráfico (lado esquerdo), principalmente das direções 45° e 135°, sendo os atributos relacionados a esse lado do biplot (FCO₂, PLA, Fed, Hm e Gt) denominados de grupo anisotrópico de 45° a 135°. Esse fato pode ser

reflexo da ação antrópica na anisotropia da FCO₂, uma vez que nessas direções é realizada a eliminação da soqueira da cana-de-açúcar, comprovando que o manejo poderia, também, provocar alterações na anisotropia natural da FCO₂ e demais atributos do solo.

Foi realizada uma análise de regressão linear múltipla para seleção das propriedades que melhor explicaram as variações espaciais da FCO₂ em todo o grid, ou seja, considerando todos os pontos presentes (isotrópico) e nas diversas direções (anisotrópicos). O método de seleção stepwise consiste em uma técnica estatística que seleciona variáveis que mais contribuem para compor um modelo. Essa técnica supõe que algumas variáveis não contribuem de forma significativa para a resposta de todo o conjunto (DEMUTH et al., 2008) (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos do solo que melhor explicam as variações espaciais de FCO₂ médio ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) em todo o gradeado (Isotrópico) e nas diferentes direções de avaliação (Anisotrópico).

Variável	Parâmetro	EP	P	R ²
Isotrópico				
Intercepto	4,06934	1,50625	0,0085	
PLA	-2,58574	1,18660	<0,0001	0,48
Ds	0,07759	0,01306	0,0323	0,51
Anisotrópico				
0°				
Intercepto	1,24495	0,18013	<0,0001	
PLA	0,05042	0,01603	0,0053	0,34
45°				
Intercepto	-3,31064	1,19554	0,0131	
PLA	0,12639	0,03220	<0,0001	0,58
Hm	0,03177	0,01176	0,0151	0,71
90°				
Intercepto	-0,51746	0,88817	0,5678	
PLA	0,06870	0,03208	0,0039	0,38
Fed	0,01493	0,00929	0,1264	0,46
135°				
Intercepto	16,32179	5,82682	0,0123	
Us	-0,12312	0,04138	0,0002	0,54
Ts	-0,40854	0,24658	0,1159	0,61

EP = Erro-padrão da estimativa dos parâmetros; R² = Coeficiente de determinação.

Observa-se que a variável PLA foi selecionada pelo método stepwise em quase todos os casos avaliados (isotrópico e anisotrópico), sendo considerada como um importante parâmetro controlador da FCO₂ em áreas de cana crua. Outros atributos do solo, tais como Ts, Fed e Hm também foram selecionados para o modelo, como fatores que explicam as variações espaciais de FCO₂. Atributos do solo, relacionados à temperatura, estrutura e porosidade, têm sido citados como controladores dos padrões de variabilidade espacial da emissão de CO₂ (EPRON et al., 2006; XU & QI, 2001).

No caso isotrópico, PLA, que explicou 48% da variabilidade de FCO₂, foi a primeira unidade selecionada. Em seguida, Ds foi a segunda selecionada, aumentando o coeficiente de determinação (R^2) de FCO₂ a 51%. Ou seja, 51% da variabilidade espacial da FCO₂ foi explicada pelo modelo ajustado contendo apenas essas duas variáveis. O parâmetro Ds foi positivo, enquanto PLA foi negativo. Segundo PANOSSO et al. (2012), o parâmetro estimado para a PLA poderia estar relacionado com a difusividade do gás, o qual é melhorado com valores mais elevados de PLA (KOSUGI et al., 2007).

Quando a análise foi aplicada nas diferentes direções, no caso anisotrópico, os valores de R^2 variaram, com destaque para a direção 45°, aonde o modelo chegou a explicar 71% da variação espacial da FCO₂. Na direção de 0° apenas a PLA entrou no modelo, explicando sozinha 34% da variabilidade de FCO₂, apresentando parâmetro estimado positivo (Tabela 3). Para a direção 45°, as variáveis PLA e Hm entraram no modelo da regressão, explicando 71% da variabilidade de FCO₂. O parâmetro positivo estimado pela Hm, determinado pela ERD, pode estar relacionado ao possível efeito dos minerais de argila do solo na FCO₂ (LA SCALA JR et al., 2000). Em um estudo anterior realizado no mesmo grid amostral, PANOSSO et al. (2012) observou que 74% da variabilidade espacial de FCO₂ foi explicado pelos atributos PLA e areia. Mesmo que o R^2 encontrado por esses autores tenha sido superior ao do presente estudo, nota-se que um atributo mineralógico foi capaz de explicar a variabilidade da FCO₂. Além disso, a metodologia para quantificar Hm é muito mais prática e rápida se comparada com a metodologia para quantificar atributos físicos.

Para a direção 90°, as variáveis PLA e Fed nessa ordem, fizeram parte da regressão, sendo responsáveis por explicar 46% da variabilidade da FCO₂. Por último, para a direção de 135° somente as variáveis Us e Ts foram selecionadas, que nessa ordem entraram na construção do modelo explicando 61% das variações espaciais da FCO₂. A propriedade Fed apresentou parâmetro estimado positivo para essa direção, comprovando a complexa relação entre FCO₂ e propriedades químicas do solo (EKBLAD & NORDGREN, 2002; SAVIN et al., 2001).

Para a direção de 135°, os parâmetros estimados para a umidade e temperatura do solo foram negativos, sendo essas propriedades dois dos principais fatores relacionados à atividade microbiana do solo e geralmente apresentam correlação positiva com FCO₂ (RYU et al., 2009). Assim, os resultados estão de acordo com MARTIN & BOLSTAD (2009), na qual relatam que as variações espaciais da respiração do solo em pequenas escalas podem ser a soma dos efeitos da temperatura e da umidade do solo, além das propriedades físicas, biológicas e químicas de cada ponto amostral.

A análise de regressão linear múltipla aplicada aos dados de FCO₂ indicaram a existência de diferentes modelos para as diferentes direções, sugerindo mais uma vez a existência de anisotropia, indicando uma complexa relação entre a FCO₂ e as propriedades do solo. A variável porosidade livre de água do solo foi àquela selecionada para as quase todas as direções e inclusive para o caso isotrópico, indicando para área de cana crua, que ela é considerada de grande importância na caracterização das variações espaciais e FCO₂.

O principal resultado deste trabalho está relacionado às variações da hematita e goethita, estimadas pela ERD, e sua relação com FCO₂. Esse fato evidencia o potencial de utilização da ERD muito mais prática, rápida e precisa no auxílio do mapeamento da FCO₂, visto que a aquisição das leituras dessas emissões é cara e exige tempo. Além disso, FCO₂ sofre variação diurna influenciada pelo aumento ou decréscimo da temperatura do solo, podendo interferir na sua caracterização, o que inviabiliza o mapeamento de grandes áreas visando integrar estudos de inventários de

gases de efeito estufa. Assim, a utilização da ERD nessa caracterização torna-se uma alternativa ainda mais atraente para a viabilização dos mapeamentos em grandes áreas.

3.4. CONCLUSÕES

A análise de geoestatística indicou a existência de anisotropia de todas variáveis estudadas, inclusive dos atributos mineralógicos hematita, goethita e ferro ditionito, indicando grau de dependência espacial moderada a forte para quase todos os atributos do solo. As variáveis que melhor explicaram as variações anisotrópicas da emissão de CO₂ do solo foram PLA (58%), Us (54%), Hm (13%), Fed (8%) e Ts (7%). Esses resultados evidenciam o potencial de utilização da espectroscopia de reflectância difusa nos estudos de emissão de CO₂, uma vez que a determinação da variável PLA é muito laboriosa e pouco operacional, se comparado com facilidade e praticidade da aquisição dos dados espectrais. Assim, esta metodologia pode ser utilizada para viabilizar mapeamentos da emissão de CO₂ em grandes áreas, podendo integrar estudos de inventários de gases de efeito estufa em solos agrícolas.

3.5. REFERÊNCIAS

BARRIOS, M. R. **Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem e indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 139-162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 499-510, 1986.

BENBI, D. K.; BRAR, J. S. A 25-year record of carbon sequestration and soil properties in intensive agriculture. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 29, n. 2, p. 257-265, 2009.

BOECKX, P.; NIEULAND, K. V.; CLEEMPUT, O. V. Short-term effect of tillage intensity on N₂O and CO₂ emissions. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 31, n. 3, p. 453-461, 2011.

BOURENNANE, H.; DOUAY, F.; STERCKEMAN, T.; VILLANNEAU, E.; CIESIELSKI, H.; KING, D.; BAIZE, D. Mapping of anthropogenic trace elements inputs in agricultural topsoil from Northern France using enrichment factors. **Geoderma**, Amsterdam, v. 157, n. 3-4, p.165-174, 2010.

BOURENNANE, H.; KING, D.; COUTURIER, A.; NICOULLAUD, B.; MARY, B.; RICHARD, G. Uncertainty assessment of soil water content spatial patterns using geostatistical simulations: An empirical comparison of a simulation accounting for single attribute and a simulation accounting for secondary information. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 205, n. 3-4, p. 323-335, 2007.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl. 0, p. 19-27, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0006-8705201000050004>>.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, J. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA JR., N. Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**,

Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77-83, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000100011>>.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 617-630, 2010.

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

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Viçosa, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 51-68, 2004.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 1, p. 83-99, 2007.

CHIRICO, G. B.; MEDINA, H.; ROMANO, N. Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods. **Journal of Hydrology**, Orlando, v. 334, n. 3-4, p. 405-422, 2007.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2011**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_12_08_11_00_54_08.pdf. Acesso em 25 de março de 2012.

DASSELAAR, A.V.P.V.; CORRÉ, W.J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, Å.K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON; L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.62, n.33, p. 810-17, 1998.

DEMATTÊ, J. A. M.; SOUSA, A. A.; ALVES, M. C.; NANNI, M. R.; FIORIO, P. R.; CAMPOS, R. C.; Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 135, p. 179-195, 2006.

DEMUTH, R.; GRÄSEL, C.; PARCHMANN, I.; RALLE, B. **Chemie im Kontext – Von der Innovation zur nachhaltigen Verbreitung eines Unterrichtskonzepts** [Chemie im Kontext – From an innovation to a sustainable dissemination of a teaching and learning approach]. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann, 2008.

DEUTSCH, C. V., JOURNAL, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide**. 2. ed. Oxford University Press, New York, 1998. 369 p.

DOUMBIA, M.; JARJU, A.; SÈNE, M.; TRAORÉ, K.; YOST, R.; KABLAN, R.; BRANNAN, K.; BERTHE, A.; YAMOAH, C.; QUERIDO, A.; TRAORÉ, P.C.S.; BALLO, A. Sequestration of organic carbon in West African soils by Aménagement en Courbes de Niveau. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 29, n. 2, p. 267-275, 2009.

EKBLAD, A.; NORDGREN, A. Is growth of soil microorganisms in boreal forests limited by carbon or nitrogen availability? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 242, n. 1, p. 115-122, 2002.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. p. 306.

EPRON, D.; BOSCH, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, New York, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FANG, C.; MONCRIEF, J. B. A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 95, n. 4, p. 225-236, 1999.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. ; ROMÃO, R.; LA SCALA JR, N. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. **Carbon Balance and Management**, v. 5, p. 3, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/1750-0680-5-3>>.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Toposseqüências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 307-319, 2006.

HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J.A.; WEIHRMÜLLER, L.; VANDEBORGHT, J. Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 3, p. 762-771, 2009.

HENGL, T. A. **Practical Guide to Geostatistical Mapping of Environmental Variables**. JRC Scientific and Technical Reports, Italy, 2007. 165 p.

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

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Urbana, v.23, n.3, p. 187-200, 1958.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 107-138.

KONDA, R., OHTA, S., ISHIZUKA, S., ARIA, S., ANSORI, S., TANAKA, N., HARDJONO, A. Spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from Acacia mangium plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 40, p. 3021-3030, 2008.

KOSMAS, C.S.; CURI, N. & BRYANT, R.B. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 48, p. 401-405, 1984.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; LTOH, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSUO, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A. R. Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 147, n. 1-2, p. 35-47, 2007.

LA SCALA JR, N.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000.

LA SCALA JR., N; MENDONÇA, E. S.; SOUZA, J. V.; PANOSSO, A. R.; SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. R. G. Spatial and temporal variability in soil CO₂-C emissions and relation to soil temperature at King George Island, Maritime Antarctica, Maritime Antarctica. **Polar Science**, v. 4, p. 479-487, 2010.

LA SCALA JR, N.; PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; GONZALEZ, A.P.; MIRANDA, J.G.V. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, n. 4, p. 353-358, 2009.

LA SCALA JR, N.; PEREIRA, G. T.; PANOSSO, A. R. Variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ num agrossistema desprovido de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 88-95, 2003.

MARTIN, J.G.; BOLSTAD, P.V. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 41, n. 3, p. 530-543, 2009.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: Swineford, A.D.A. (Ed) **National conference on clays and clay mineral**. Washington, 1960. p. 317-342.

OLIVEIRA JR., J. C. DE; SOUZA, L. C. P.; MELO, V. F.; ROCHA, H. O. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de solos da formação Guabirotuba, Curitiba (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1481-1490, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000500002>>.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p. 275-282, 2009.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil Tillage Lag Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.

PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; FERRAUDO, A. S.; PEREIRA, G. T.; MIRANDA, J. G. V.; LA SCALA JR, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production área. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 8-16, 2012.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 71, n. 2, p. 189-96, 1991.

RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M.; MA, S. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. **Forest Ecology and Management**, Kidlington, v. 257, n. 4, p. 1324-1332, 2009.

SAVIN, M. C.; GORRES, J. H.; NEHER, D. A.; AMADOR, J. A. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 4-5, p. 429-438, 2001.

SCHEINOST, A. C.; CHAVERNAS, A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near infrared

range to identify and quantify Fe oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Chantilly, v. 46, n. 5, p. 528-536, 1998.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SILVA-OLAYA, A. M. **Emissão de dióxido de carbono após diferentes sistemas de preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar**. 2010. 101. f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Piracicaba, 2010.

SOUZA, C. K.; MARQUES JR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um latossolo em Jaboticabal – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 486-495, 2003.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.

TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant Soil**, v. 345, p. 187-194, 2011.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurements of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J.M.; CIOLKOSZ, E.J. (Ed) **Soil Color**. Soil Science Society of America, Special Publication, 1993. p. 21-33.

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

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

VISCARRA-ROSSEL, R. A., CATTLE, S., ORTEGA, A., FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by VIS-NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 150, n. 3-4, p. 253–266, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 637-647, 2011. Disponível em: < doi: 10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 2, p. 319-344.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press. 1990. 316 p.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v.7, n.6, p. 667-677, 2001.

CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho indica a existência da relação entre os atributos mineralógicos hematita e goethita, estimadas pela espectroscopia de reflectância difusa (ERD), e ferro ditionito, extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, com a emissão de CO₂ do solo (FCO₂). Os resultados mostram que essa técnica prática, rápida e precisa é uma alternativa atraente para auxiliar a quantificação indireta de atributos do solo especialmente da FCO₂, mostrando seu potencial em substituir grande parte das análises laboratoriais convencionais. Além disso, a ERD auxilia a verificação rápida do comportamento anisotrópico da FCO₂ e demais atributos do solo, podendo ser utilizado para viabilizar mapeamentos das emissões em grandes áreas, integrando estudos de inventários de gases de efeito estufa em solos agrícolas.

No âmbito de pesquisa sobre mudanças climáticas, esse trabalho vem corroborar com a idéia de que o manejo vem provocando mudanças no comportamento dos atributos estudados, inclusive mineralógicos, e que há necessidade de estudos focados em técnicas alternativas para a caracterização dos diversos atributos do solo, a fim de satisfazer as exigências da agricultura atual

Pesquisas em grandes áreas utilizando a ERD são necessárias para validar os resultados obtidos neste trabalho, associando, inclusive, aos modelos de paisagem e melhor planejamento do procedimento amostral, já que se pôde conhecer o padrão de variabilidade espacial dos atributos estudados. Além disso, seria interessante gerar um banco espectral dos solos da região, e até mesmo do estado e/ou país para servir como técnica alternativa para a validação de mapas elaborados por meio do sensoriamento remoto.