

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DO
CARBONO DO SOLO, DESCRITA PELO FATOR K, EM
ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO
BRASIL**

PAULO ALEXANDRE DA SILVA

Engenheiro Agrônomo

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DO
CARBONO DO SOLO, DESCRITA PELO FATOR K, EM
ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO
BRASIL**

PAULO ALEXANDRE DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso

Coorientador: 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 (Ciência do Solo).

2018

Silva, Paulo Alexandre da
S586d Distribuição espacial da estabilidade do carbono do solo, descrita
pelo fator k, em áreas de cana-de-açúcar na região central do Brasil /
Paulo Alexandre da Silva. -- Jaboticabal, 2018
x, 60 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Alan Rodrigo Panosso
Banca examinadora: Eduardo Barreto de Figueiredo, Glauco de
Souza Rolim
Bibliografia

1. Atributos físicos e químicos do solo. 2. Variabilidade espacial. 3.
Componentes principais. 4. Gases do efeito estufa. 5. Respiração do
solo. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias.

CDU 631.4:633.61

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Jaboticabal/SP - Karina Gimenes Fernandes - CRB 8/7418

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

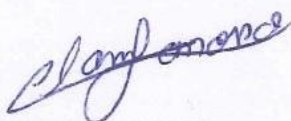
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DO CARBONO DO SOLO, DESCRITA PELO FATOR K, EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL

AUTOR: PAULO ALEXANDRE DA SILVA

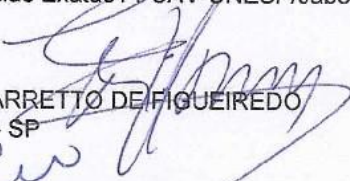
ORIENTADOR: ALAN RODRIGO PANOSSO

COORIENTADOR: NEWTON LA SCALA JUNIOR

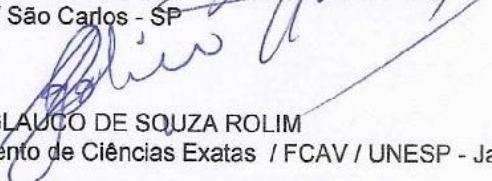
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



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



Prof. Dr. EDUARDO BARRETTO DE FIGUEIREDO
UFSCAR / São Carlos - SP



Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 03 de agosto de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PAULO ALEXANDRE DA SILVA – Filho de José Paulo da Silva e Solange Aparecida Brandão Silva, nasceu em São Carlos, São Paulo, no dia 18 de outubro de 1988. Em fevereiro de 2010, ingressou no curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. Foi bolsista do Programa de Educação Tutorial – PET do MEC, durante o período de agosto de 2011 até dezembro de 2013. Iniciou, em março de 2017, o Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. No mês de julho de 2018, submeteu-se à banca para a defesa de Dissertação, sendo eu aprovado como Mestre em Agronomia.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira, você chega lá”.

(Ayrton Senna)

DEDICO

Primeiramente a Deus, aos meus pais José Paulo da Silva e Solange Aparecida Brandão Silva, os meus grandes exemplos e heróis. Aos meus irmãos Diego Bruno da Silva e Leonardo Augusto da Silva, que sempre me apoiaram, mesmo distantes.

OFEREÇO

In memoriam aos meus amados avôs Lázaro Emílio da Silva e Alípio Paulino Brandão, pelos ensinamentos e pela simplicidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, sem cuja vontade eu não teria realizado e concluído o curso, nem tido a chance de mudar minha vida e a de outras pessoas que estiveram e estarão envolvidas em meu trabalho.

Em segundo lugar, agradeço a duas pessoas que foram fundamentais para que eu concluísse esta fase de minha vida, os meus pais, Solange Aparecida Brandão Silva e José Paulo da Silva, que nestes anos dedicaram cada minuto a minha formação e a de meus irmãos e que, nas horas de dificuldades e turbulências, usaram de palavras, comportamentos e ensinamentos que foram essenciais para o meu crescimento e desenvolvimento.

Também agradeço aos meus irmãos, que sempre estiveram comigo, Diego Bruno e Leonardo Augusto, que nestes últimos anos também estudaram com o objetivo de se formarem em uma universidade de qualidade e agora estão colhendo seus frutos. E meus familiares, que estiveram presentes com gestos ou palavras de apoio, dando-me força para seguir em frente e estar aqui hoje.

A minha namorada Bruna, pela ajuda moral, companhia, carinho, colaboração, palavras de incentivo e paciência, que foram fundamentais para que eu pudesse concluir meu objetivo, e sendo assim muito importante para mim. Agradeço também a sua família, por me tratarem muito bem e ajudarem-me neste processo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso, que através do convívio, de seus conhecimentos e conselhos, ajudou-me no processo de minha formação intelectual para o desenvolvimento deste trabalho e que, nos momentos de dificuldades, esteve ali sempre à disposição para tirar minhas dúvidas com muita paciência e confiança, disposto sempre a ajudar-me e a solucionar os problemas, sendo um parceiro que colaborou muito com meu crescimento pessoal.

Ao professor Newton La Scala Júnior e Nelson José Peruzzi, pelos conselhos, confiança, e, principalmente, por todos os ensinamentos teóricos de física, matemática e emissão dos gases geradores do efeito estufa, que foram determinantes para a execução desta Dissertação.

Aos professores Glauco Rolim e Diego Siqueira, através de cujos ensinamentos teóricos em modelagem, programas estatísticos e seus conhecimentos sobre a

manipulação de dados avaliaram meu exame de qualificação e foram de grande importância para a composição desta Dissertação.

Ao projeto Cursinho Ativo, que me proporcionou diversos ensinamentos, experiências que me ajudaram a crescer e a desenvolver habilidades que usarei em minha vida profissional e pessoal.

Não poderia esquecer daquelas pessoas especiais que, mesmo longe, estiveram sempre presentes e apoiando-me: Marjorie, Eduardo, minhas avós Maria Olga e Teresa, minhas madrinhas Abigail e Sônia e minhas tias Sílvia e Sandra.

Ao grupo de pesquisa CSME, em especial a Maria Elisa, Ludhanna Veras, Katharine Batista, Kamila Meneses e Deise Nogueira, que através da amizade e dos estudos fizeram os dias de trabalho melhores, ajudando-me muito nesta fase com suas experiências.

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

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| RESUMO..... | ii |
| ABSTRACT..... | iii |
| LISTA DAS ABREVIACÕES | iv |
| LISTA DAS TABELAS | viii |
| LISTAS DE FIGURAS | ix |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Emissão de gases causadores do efeito estufa nos sistemas Agrícolas | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1 Constante de decaimento do fator k | 4 |
| 2.2 Gases do Efeito Estufa | 5 |
| 2.3 Agricultura e os Gases do Efeito Estufa | 9 |
| 2.4 A Dinâmica dos Principais Gases Indutores do Efeito Estufa | 12 |
| 2.5 Aspectos Gerais sobre o Fluxo de CO ₂ | 13 |
| 2.6 A Variabilidade Espacial da Emissão de CO ₂ do Solo | 14 |
| 3 OBJETIVO..... | 17 |
| 4 JUSTIFICATIVA | 17 |
| 5 MATERIAL E MÉTODOS..... | 18 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 7 CONCLUSÕES | 48 |
| 8 REFERÊNCIAS | 50 |
| 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 59 |

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ESTABILIDADE DO CARBONO DO SOLO, DESCRITA PELO FATOR K, EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL

RESUMO: A constante de decaimento (k) pode ser usada na tomada de decisão das atividades de manejo do solo e também é um indicativo que descreve a variabilidade da estabilidade do carbono no solo, sendo essa dependente das interações dos atributos físicos, químicos e biológicos. Sua mensuração é dada pela equação: $k = Fm / Estc$, em que: k = constante de decaimento (tempo^{-1}); Fm = Emissão de carbono via CO_2 ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ tempo}^{-1}$); $Estc$ = Estoque de carbono do solo (Mg ha^{-1}). O objetivo do trabalho foi determinar a estrutura da variabilidade espacial das perdas de carbono do solo, expressa pelo fator k , e sua relação com os atributos do solo, em áreas de cana-de-açúcar, na região Centro-Sul do Brasil. Os experimentos foram conduzidos em áreas de plantio comercial de cana-de-açúcar, nos municípios de Motuca (MOT), Guariba (GUA) e Pradópolis (PAD), no Estado de São Paulo, e Aparecida do Tabuado (APT) no Mato Grosso do Sul. As determinações da Fm foram registradas nas áreas de estudo pelo sistema LI-COR (LI-8100). A abordagem multivariada indicou que os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 55% e 68% da variabilidade total contida no conjunto de dados. Os atributos físicos do solo apresentaram correlações significativas com CP1 e indicaram um contraste entre a porosidade livre de água e a umidade do solo. Em CP2, as correlações dos atributos químicos indicaram uma ação conjunta entre a capacidade de troca de cátions e o teor de fósforo disponível do solo. As análises de correlação das áreas PAD e APT apresentaram padrões espaciais do fator k e do CP1 negativos e significativos. Para os padrões espaciais k e CP2 em GUA e APT, ocorreram valores com correlações negativas. Os resultados indicam que o potencial de acúmulo do carbono no solo apresenta alta variabilidade espacial em pequena escala; assim, em uma mesma área, ocorreram alterações nos padrões espaciais do fator k , havendo regiões com potencial para acúmulo ou fonte de carbono em canaviais, sendo estas regiões de manejo específico, dentro da mesma área.

Palavras-chave: atributos físicos e químicos do solo, componentes principais, gases do efeito estufa, respiração do solo, variabilidade espacial.

SPACE DISTRIBUTION OF SOIL CARBON STABILITY, DESCRIBED BY FACTOR K, IN SUGAR CANE AREAS IN THE CENTRAL REGION OF BRAZIL

ABSTRACT: The decay constant (k) can be used in the decision making of the soil management activities and it is an indicative that describe the variability of soil carbon stability, which depends on the interactions of physical, chemical and biological attributes. Their measurement is given by the equation: $k = Fm / Estc$, where: k = decay constant (time^{-1}); Fm = carbon emission via CO_2 determined in the study areas (Mg ha^{-1}); $Estc$ = is the soil carbon stock (Mg ha^{-1}). The objective of this work was to determine the structure of the spatial variability of the soil carbon losses, expressed by the factor k , and its relationship with the soil attributes in sugarcane areas, in the central region of the Brazil. The experiments were carried out in areas of commercial sugarcane plantation, in the municipalities of Motuca (MOT), Guariba (GUA) and Pradópolis - SP (PAD), in the State of São Paulo and Aparecida do Taboado (APT) in Mato Grosso do Sul. The Fm determinations were recorded in the study areas by the LI-COR system (LI-8100). The multivariate approach indicated that the first two main components (CP1 and CP2) explained around 55% to 68% of the total variability contained in the dataset in the areas studied. The soil physical attributes showed significant correlations with CP1 and indicated a contrast between water free porosity and soil moisture. In CP2, the chemical attributes correlations indicated a joint action between the cation exchange capacity and the available soil phosphorus content. The correlation analysis of the PAD and APT areas presented negative and significant spatial patterns of factor k and CP1. For the spatial patterns k and CP2 in GUA and APT, values with negative and significant correlations occurred. The results indicate that the soil carbon accumulation potential presents high spatial variability on a small scale; thus, in the same area, there were changes in the spatial patterns of factor k , with regions with potential for accumulation or carbon source in sugarcane, being these regions of specific management within the same area.

Keywords: soil physical and chemical attributes, main components, greenhouse gases, soil respiration, spatial variability.

LISTA DAS ABREVIações

A - *Altos valores de Fm*

ABC - *Agricultura de Baixo Carbono*

Al - *Alumínio*

APT - *Aparecida do Tatuado*

Aw - *Clima tropical com estação seca de Inverno*

B - *Baixos valores de Fm*

C/N - *Relação entre o carbono e o nitrogênio*

Ca - *Cálcio*

Capes - *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior*

CFCs - *Clorofluorcarbonetos*

CH₄ - *Metano*

CO - *Teor de carbono orgânico oxidável*

CO₂ - *Dióxido de carbono*

CONAB - *Companhia Nacional de Abastecimento*

CP1 - *Componente principal 1*

CP2 - *Componente principal 2*

CPs - *Componentes Principais*

CTC - *Capacidade de troca de cátions*

CV - *Coeficiente de variação*

Dp - *Densidade das partículas*

Dr. - *Doutor*

Ds - *Densidade do solo*

E - *Espessura da camada estudada*

EMBRAPA - *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*

Estc - *Estoque do carbono no solo*

EUA - *Estados Unidos da América*

FBN - *Fixação Biológica de Nitrogênio*

FCO₂ - *Emissão do carbono via CO₂*

Fm - *Emissão do carbono via CO₂ média*

GEE - *Gases do efeito estufa*

GS+ - *Geostatistics Software*

GUA - *Guariba*

H - *Hidrogênio*

HCFCs - *Hidroclorofluorcarbonetos*

ILP - *Integração Lavoura-Pecuária*

ILPF - *Integração Lavoura-Pecuária-Floresta*

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

k - *Constante de decaimento do carbono*

K - *Potássio*

LI-8100 - *LI-COR 8100*

M - *Médios valores de Fm*

Macro - *Macroporosidade*

MCT - *Ministério da Ciência e Tecnologia*

MEC - *Ministério da Educação*

Mg - *Magnésio*

Micro - *Microporosidade*

MOT - *Motuca*

MS - *Mato Grosso do Sul*

N₂O - *Óxido nitroso*

P - *Fósforo disponível no solo*

PAD - *Pradópolis*

PAG - *Potencial de aquecimento global*

PBMC - *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*

PET - *Programa de Educação Tutorial*

PFCs - *Perfluorcarbonetos*

PLA - *Porosidade livre da água*

PLAm - *Porosidade livre da água média*

PmoA - *Metano mono-oxigenase A*

Prof. - *Professor*

PT - *Porosidade total*

PVC - *Policloreto de polivinila*

Q1 - *Quadrante 1*

Q2 - *Quadrante 2*

Q3 - *Quadrante 3*

Q4 - *Quadrante 4*

SB - *Soma de bases*

SF₆ - *Hexafluoreto de enxofre*

SP - *São Paulo*

TDR - *Time Domain Reflectometry*

Tm - *Temperatura média do solo*

Ts - *Temperatura do solo*

Um - *Umidade do Solo*

UNESP - *Universidade Estadual Paulista*

Us - *Umidade do solo*

V - *Índice de saturação por bases*

LISTA DAS TABELAS

| | |
|--|---------|
| Tabela 1: Estimativa brasileira das emissões dos setores globais no ano de 2016.. | 8 |
| Tabela 2: Informações geográficas, clima e histórico das áreas onde foram conduzidos os experimentos na cultura de cana-de-açúcar (<i>Saccharum spp.</i>).. |21 |
| Tabela 3: Estatísticas descritivas da emissão de CO ₂ e dos atributos físicos e químicos do solo para todas as áreas estudadas. | 33 |
| Tabela 4: Coeficientes de correlação linear entre os quadrantes (Q1, Q2, Q3 e Q4) dos mapas de padrões espaciais do fator k e dos componentes principais 1 e 2 nas áreas estudadas de cana-de-açúcar em sistema de cana crua..... | 34 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Variação da temperatura dos continentes e do globo terrestre nos últimos 100 anos..... | 6 |
| Figura 2: Cenário do aumento da temperatura da superfície da Terra no final do século 21..... | 7 |
| Figura 3: Estimativa brasileira da qualidade da Emissão dos GEEs por setores no ano de 2016 | 8 |
| Figura 4: Intensidade de radiação emitida pela Terra em função do comprimento de onda e das faixas de absorção dos principais gases causadores do efeito estufa.. | 13 |
| Figura 5: Áreas experimentais de estudo: a) Motuca (SP), b) Guariba (SP), c) Pradópolis (SP) e d) Aparecida do Tabuado (MS). | 19 |
| Figura 6: Mapas das cidades das áreas experimentais do Estado de São Paulo (Pradópolis, Guariba e Motuca) e Mato Grosso do Sul (Aparecida do Tabuado)..... | 20 |
| Figura 7. Sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (a), sensor de temperatura do solo (b) e câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (c). | 22 |
| Figura 8: TDR - Hydrosense system, dispositivo portátil utilizado para a mensuração da umidade do solo..... | 23 |
| Figura 9: Gráfico Biplot dos componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais com todos os pontos amostrais e as seguintes variáveis: emissão de CO ₂ do solo (Fm), estoque de carbono no solo (Estc), porosidade livre de água (PLA), fósforo disponível (P), macroporosidade (Macro), capacidade de troca de cátions (CTC) e umidade do solo (Um). | 36 |
| Figura 10: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO ₂ no solo para MOT. | 38 |
| Figura 11: Padrões espaciais dos atributos de MOT de k, Fm, Estc, Pla, Um CTC e P para o CP1 e CP2. | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 12: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO ₂ no solo para GUA. | 41 |
| Figura 13: Padrões espaciais dos atributos de GUA de k, Fm, Estc, Pla, Um, P e CTC para o CP1 e CP2 | 42 |
| Figura 14: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO ₂ no solo para PAD | 43 |
| Figura 15: Padrões espaciais dos atributos de PAD de k, Fm, Estc, Pla, Macro CTC e P para o CP1 e CP2..... | 44 |
| Figura 16: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO ₂ no solo para APT | 45 |
| Figura 17: Padrões espaciais dos atributos de APT de k, Fm, Estc, Pla, Um CTC e P para o CP1 e CP2 | 46 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Emissão de gases causadores do efeito estufa nos sistemas

Agrícolas

A mitigação da emissão dos gases do efeito estufa (GEEs) reduz os impactos das mudanças climáticas do planeta. Pesquisas recentes apontam que as concentrações atmosféricas dos gases CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) e N₂O (óxido nitroso) atingiram preocupantes patamares históricos. A concentração de CO₂ equivalente na atmosfera, registrada no ano de 2018, foi próxima de 409 ppm (Global Climate Change, 2018), já o CH₄ foi em torno de 1.855,4 ppb (Esri, 2018) e o N₂O foi de 331,19 ppb (N₂O Levels, 2018), representando aumento dos níveis de emissão desses gases desde a era pré-industrial.

As condições climáticas afetam a intensidade da emissão de CO₂ do solo, interferindo diretamente no processo de respiração das raízes, na atividade microbiana e, conseqüentemente, na produção de CO₂ nos solos agrícolas (Tsai et al., 1992; Schlömer et al., 2013; Xie et al., 2015). Segundo a literatura, outras propriedades do solo também interferem no processo de produção de CO₂, sendo elas: a densidade do solo, os atributos do solo (Teixeira et al., 2012), a textura e a porosidade livre de água (Panosso et al., 2011), a temperatura do solo (Ussiri e Lal, 2009), o preenchimento de água nos poros (Smart e Peñuelas, 2005; Linn e Doran, 1984) e a umidade do solo (La Scala, et al., 2006; Moitinho et al., 2013).

A constante de decaimento do carbono (k) carrega informações sobre o potencial de emissão de CO₂ (dióxido de carbono) em um ponto específico da área de estudo, determinada pela estabilidade do carbono, podendo ser usada para a tomada de decisão em relação às atividades de uso e manejo do solo. A constante de decaimento é mensurada pela equação: $k = Fm / Estc$, em que: k = constante de decaimento (tempo⁻¹); Fm = emissão de carbono via CO₂ determinado nas áreas de estudo (Mg ha⁻¹ tempo⁻¹); $Estc$ = estoque de carbono do solo (Mg ha⁻¹).

O Brasil é um grande produtor de alimentos e o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área plantada na safra de 2017/2018 em torno de 8,74 milhões de hectares e produção de 635,6 milhões de toneladas. Os Estados de São Paulo e Mato

Grosso do Sul apresentam grande importância nesse cenário, produzindo cerca de 61,8% (5,22 milhões de hectares) da cana-de-açúcar (CONAB, 2017).

O uso adequado das práticas de manejo do solo é de grande importância para o processo de mitigação da emissão dos GEEs no solo. As pesquisas apontam que as práticas usadas na reforma do canavial, como a calagem para a correção do pH do solo (Marcelo et al., 2012; Silva et al., 2013; Figueiredo et al., 2014) e o preparo intensivo (Silva-Olaya et al., 2013; Iamaguti et al., 2015) promovem perdas expressivas do carbono presente no solo, na forma de CO₂, principalmente em períodos curtos; assim, como consequência, observam-se alterações dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, além das variações de umidade e de temperatura do solo (Salton e Mielniczuk, 1995; La Scala et al., 2006; Moitinho et al., 2013).

A geoestatística estima as dependências espaciais dos valores médios e dos pontos não amostrados. Por meio da krigagem, são gerados mapas para o zoneamento e manejo específico das áreas, ajudando no trabalho agrícola. Também se tem a otimização do georreferenciamento para as propriedades físicas, químicas (Montanari et al., 2010; Corrêa et al., 2015) e biológicas do solo, que possuem uma grande variação espaçotemporal, correlacionando-se com o potencial produtivo do solo. Segundo Brito et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial da emissão de CO₂ pela geoestatística traz informações relevantes sobre a distribuição espacial, auxiliando na compreensão da dinâmica do CO₂ entre a atmosfera e o solo.

As interações da umidade e da temperatura do solo influenciam nas variações temporais da emissão de CO₂ do solo, principalmente em estações do ano em que os teores de água no solo são baixos (Panosso et al., 2011). Schwendenmann et al. (2003), estudando a variação espaçotemporal do fluxo de CO₂ em áreas florestais, obtiveram que o fator principal que explicou as variações temporais do fluxo de CO₂, foi a quantidade de água no solo. Os autores concluem que o fluxo, a difusão e a taxa de produção de CO₂ diminuíram quando o solo apresentava elevada umidade.

Conclui-se que o processo de emissão do gás CO₂ do solo para a atmosfera é complexo e depende das condições edafoclimáticas locais e da grande variabilidade no tempo e no espaço. Para a determinação do padrão espaçotemporal da emissão de CO₂, muitos autores utilizam técnicas geoestatísticas em áreas com vegetação

(Rochette et al., 1991; Fang et al., 1998; Xu e Qi, 2001; Panosso et al., 2009; Brito et al., 2010; Konda et al., 2010) e em solos desprovidos de vegetação (La Scala et al., 2000; Herbst et al. 2009; Teixeira et al., 2011), porém são necessários mais estudos e o uso de técnicas mais apuradas para a compreensão do fenômeno.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Constante de decaimento do fator k

De acordo com La Scala et al. (2008), o processo de emissão de CO₂ do solo pode ser descrito por um modelo matemático, por meio das perdas de C-CO₂ no solo, em períodos curtos, logo após o preparo do solo. O modelo pressupõe que o decaimento de C na matéria orgânica prontamente decomponível é uma equação de primeira ordem, sendo este influenciado pelo cultivo e pelos tipos de preparo do solo, podendo ser descrita por uma única função analítica, denominada de constante de decaimento (k). A constante de decaimento (k) é um indicativo que pode ser usado para descrever a variabilidade da estabilidade do carbono presente em solos agrícolas, sendo que essa é dependente das interações dos atributos físicos, químicos e biológicos, influenciada pela temperatura e pela umidade do solo, respectivamente (Parton et al., 1994). O k é mensurado pela equação: $k = Fm / Estc$, em que: k = constante de decaimento (tempo⁻¹); Fm = emissão de carbono via CO₂ determinado nas áreas de estudo (Mg ha⁻¹ tempo⁻¹); Estc = Estoque de carbono do solo (Mg ha⁻¹).

Os solos tropicais mostram que as emissões de CO₂ são dependentes da temperatura e da umidade do solo (Meir et al., 1996), influenciando diretamente no armazenamento do carbono no mesmo (Galdos et al., 2009; Ussiri e Lal, 2009). De forma geral, a umidade do solo correlaciona-se positivamente com a variabilidade temporal e negativamente com a variabilidade espacial no estudo da emissão de CO₂ (Xu e Qi, 2001; Epron et al., 2004 e 2006; Kosugi et al., 2007; LA SCALA et al., 2010). Além disso, a temperatura e a disponibilidade de água afetam diretamente as taxas metabólicas dos microrganismos decompositores do solo (Six et al., 2006).

2.2 Gases do Efeito Estufa

O efeito estufa é um processo natural que acontece devido à incidência da radiação solar na superfície do globo terrestre, que logo é refletida e absorvida pela atmosfera e redirecionada para a Terra, mantendo condições adequadas de temperatura para a sobrevivência dos seres vivos.

Os principais gases causadores do efeito estufa (GEE) são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonetos (CFCs), hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e o vapor d'água (Forster et al., 2007). Os gases que causam maior impacto para o efeito estufa são CO_2 , CH_4 e N_2O , que representam cerca de 50; 15,5 e 5% do forçamento radioativo provocador do efeito estufa, respectivamente (IPCC 2007).

No decorrer dos anos, houve aumento na concentração destes três gases na atmosfera, grande parte devido à ação do homem, intensificando o efeito estufa do planeta. Na era pré-industrial, que foi até 1750, a concentração de CO_2 era de 280 ppm (partes por milhão); já em 2018, aumentou para 409 ppm (Global Climate Change, 2018). No mesmo período, para o CH_4 houve o aumento de 715 para 1855,4 ppb (partes por bilhão) (Esrl, 2018); e o N_2O , de 270 ppb para 331,9 ppb (N_2O Levels, 2018). Sendo assim, é importante monitorar os processos naturais de respiração, as erupções vulcânicas e a liberação dos gases dos oceanos e dos solos para a atmosfera. Além disso, também são necessárias a diminuição do desmatamento e a queima dos combustíveis fósseis, visando a promover a mitigação da emissão dos gases causadores do efeito estufa.

Outro agravante é que o potencial de aquecimento global (PAG) do CH_4 e N_2O é superior no período de 100 anos, quando comparado com o CO_2 . Determina-se o PAG através da relação entre a capacidade de absorção da radiação infravermelha e o tempo de vida na atmosfera de cada gás, em função do CO_2 . O PAG do CH_4 , N_2O e CFCs, quando comparado com o CO_2 , é 25; 298 e 6.200 a 7.200 vezes maior que o CO_2 , para o período de permanência de 100 de anos (IPCC, 2007).

O Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013) mostrou que a temperatura do ar próximo à superfície

terrestre, até o final do século XXI, terá aumento sistemático com variação aproximada de 2 °C (no cenário de baixa emissão) a 4 °C (no cenário de alta emissão). Usando modelos biogeográficos ou modelos de biomas, os pesquisadores estimam grandes variações devido ao aquecimento do planeta, tendo como expectativas futuras nos biomas brasileiros o aumento de suas temperaturas, a alteração do regime de chuvas e, conseqüentemente, as mudanças no processo produtivo da agricultura (Pivetta, 2013). Na Figura 1, observa-se a variação da temperatura do planeta nos últimos 100 anos.

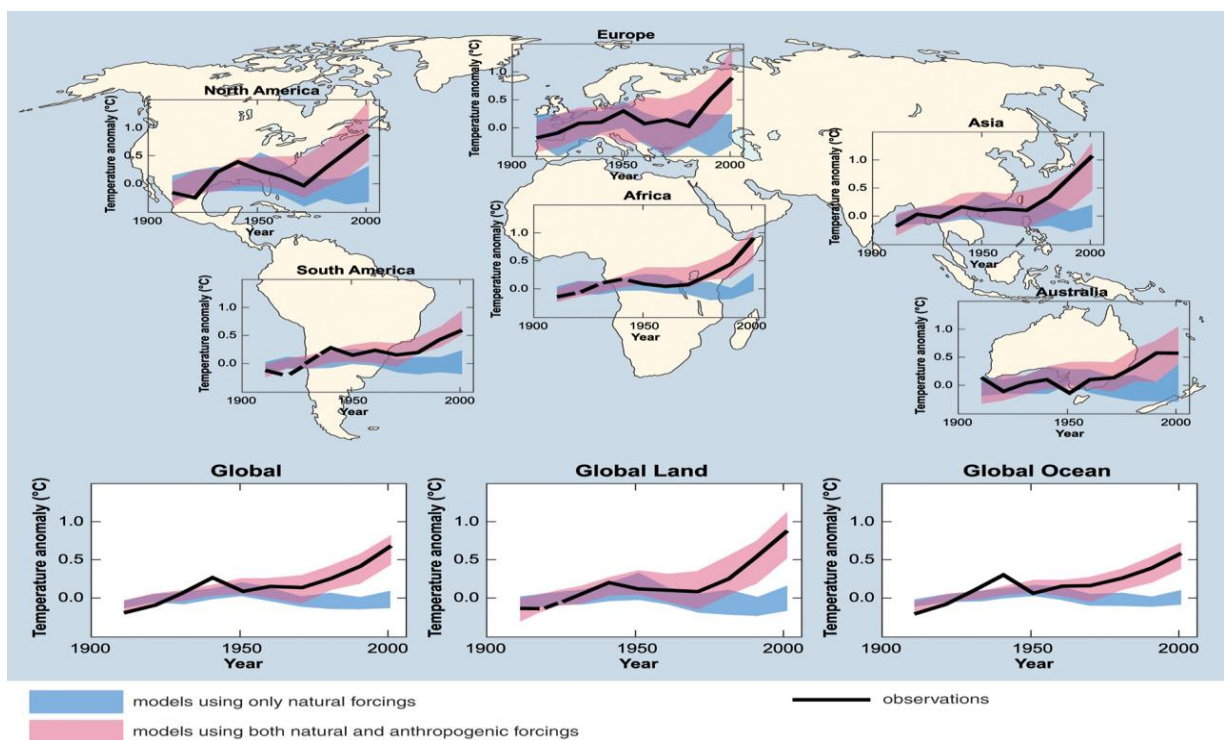


Figura 1: Variação da temperatura dos continentes e do globo terrestre nos últimos 100 anos.

Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em <<http://www.ipcc.ch/graphics/syr/spm4.jpg>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

Segundo previsões realizadas pelo IPCC (2007), no período de 1980 a 1999, as mudanças de temperatura provocadas pelo efeito estufa mostram que o aumento da concentração dos gases indutores desse processo na atmosfera poderá registrar, no final do século 21, o aumento de até 7,5°C na temperatura em alguns locais do planeta Terra e isso pode ser visto na Figura 2.

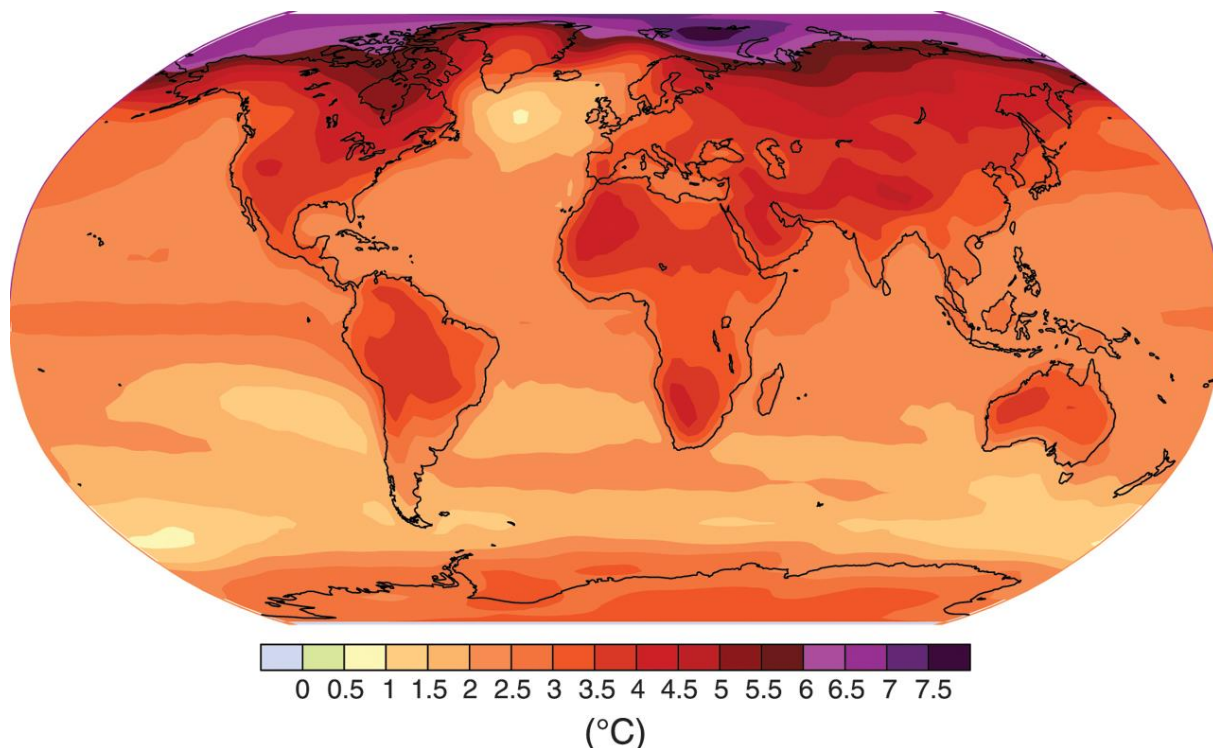


Figura 2: Cenário do aumento da temperatura da superfície da Terra no final do século 21.

Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponível em <<http://www.ipcc.ch/graphics/syr/spm6.jpg>>. Acesso em: 06 de jun. 2018.

A emissão de GEE é favorecida por diversas atividades antrópicas. Entre 1970 e 2004, o principal setor responsável por esse processo foi o de geração de energia, com 49%, seguido do industrial (19,4%), da degradação florestal e do desmatamento (17,4%), da construção civil (7,9%) e do tratamento de resíduos (2,8%). A agricultura colaborou nesse período com 13,5% da emissão global de GEE, sendo a quarta atividade mais impactante (IPCC, 2007).

No Brasil, a emissão de GEE é diferente da realidade mundial, onde o setor energético tem baixa participação nesse processo (MCT, 2004; Cerri et al., 2009). Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), no ano de 2016 as mudanças do uso do solo e floresta (54%) e a agropecuária (23%) totalizavam 77%, sendo os principais responsáveis pela emissão de GEE no país, enquanto o setor energético era responsável por 16% da emissão brasileira de GEE (SEEG, 2016) (Figura 3 e Tabela 1).

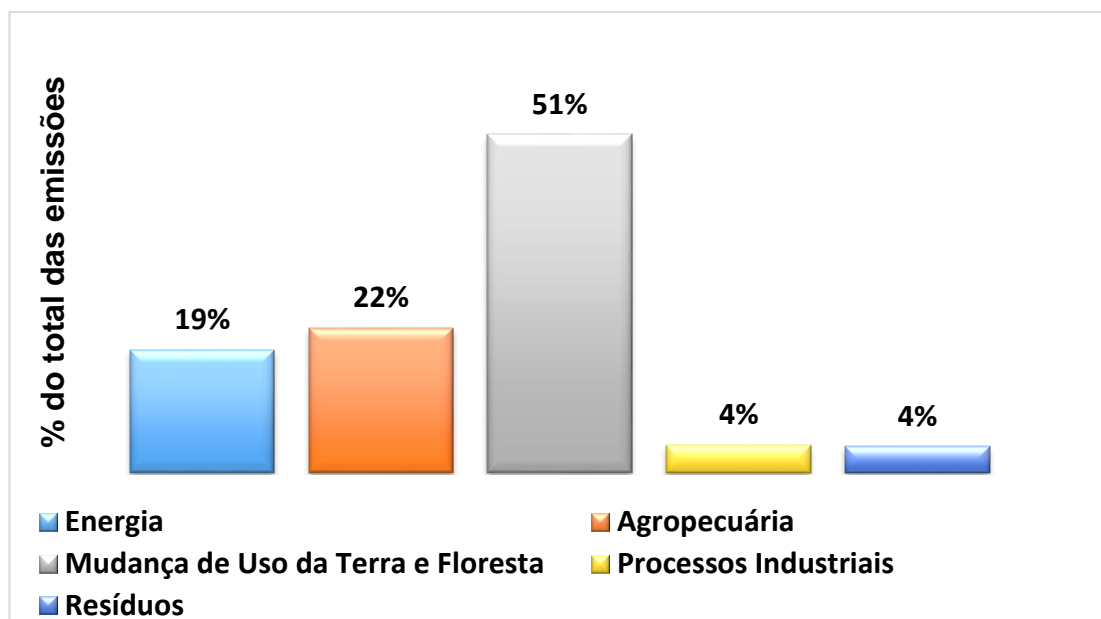


Figura 3: Estimativa brasileira da qualidade da Emissão dos GEEs por setores no ano de 2016.

Tabela 1: Estimativa brasileira das emissões dos setores globais no ano de 2016.

| Setores | Emissões (tCO₂ e GWP AR5) |
|---|---|
| Energia | 423.477.076 |
| Agropecuária | 499.347.537 |
| Mudança de Uso da Terra e Floresta | 1.167.484.337 |
| Processos Industriais | 95.574.731 |
| Resíduos | 91.971.998 |
| Total | 2.277.855.679 |

No Brasil, os setores das mudanças do uso da terra e de floresta, e a agropecuária são os principais responsáveis pelo processo de emissão dos GEEs. O uso das práticas agrônômicas de manejo que visam a promover o processo sequestro de carbono é muito importante, pois pode fazer dos solos agrícolas uma fonte natural de armazenamento dos GEEs. A cana-de-açúcar, por meio da cobertura formada pela palhada, proporciona uma condição que favorece o acúmulo de carbono no solo (Galdos et al., 2009), colaborando assim com a mitigação dos GEEs, envolvida na produção agrícola do etanol e do açúcar. Estudos recentes com diferentes tipos de preparo do solo (convencional, subsolagem localizada e subsolagem convencional) indicaram distintas perdas de carbono, via emissão de CO₂, mostrando maiores emissões no preparo convencional (2.864,3 kg de CO₂ ha⁻¹), seguidos das

subsolagens: convencional (1.970,9 kg CO₂ ha⁻¹) e localizada (1.707,7 kg CO₂ ha⁻¹) (Iamaguti et al., 2015).

Contudo, para que as medidas mitigadoras sejam efetivas, é de suma importância o conhecimento e a aplicação das práticas agrícolas conservacionistas, melhorando assim a produção e diminuindo os impactos gerados pelo setor sucroenergético em relação ao balanço das emissões dos GEEs gerados pelo setor agrícola.

2.3 Agricultura e os Gases do Efeito Estufa

Na agricultura, as práticas agrícolas ligadas às alterações do manejo, do uso do solo e da queima dos combustíveis fósseis estão intimamente relacionadas aos gases do efeito estufa (Vermeulen et al., 2012; Gilbert, 2012; Smith et al., 2014). Muitas vezes, essas atividades geram impactos nocivos ao meio ambiente, como as emissões de metano na agropecuária, do óxido nitroso em solos fertilizados e o desmatamento. Estima-se que aproximadamente 1/4 dos GEEs sejam oriundos da agricultura praticada em todo o planeta (Lamb et al., 2016). Por isso, a importância do uso adequado de técnicas de produção, visando a manejar da melhor forma possível as áreas agrícolas e fornecendo assim menores quantidades de GEE para a atmosfera.

Entre os anos de 1995 e 2010, a agricultura mundial contribuiu com cerca de 24% das emissões de CO₂, 85% de N₂O e 55% de CH₄, conforme o quarto relatório do IPCC (2007). As médias anuais da emissão CO₂ tiveram taxa de crescimento de 1,94 ppm quando comparado com o período de 1960 a 2005, com média em torno de 1,46 ppm (ESRL, 2016).

O clima está ligado diretamente ao desenvolvimento da agricultura, e uma pequena alteração pode gerar grande mudança no processo produtivo. No mundo, estima-se que o aquecimento global e o aumento de GEE podem gerar impactos positivos ou negativos na produção agrícola, apesar de os efeitos negativos serem mais evidentes, conforme estudo em contribuição ao grupo II de trabalho do IPCC. Os autores relatam que os efeitos positivos são: a extensão da produção agrícola devido à diminuição dos impactos do congelamento em regiões limitadas pela temperatura e

também aos benefícios da fertilização de CO₂ da matéria orgânica sobre as culturas. Já os efeitos negativos são aqueles relacionados com o desequilíbrio do regime de precipitação, com a baixa umidade do solo e com os extremos de calor (Porter et al., 2014).

Segundo Tilman et al. (2011), a demanda de alimentos no mundo deverá aumentar 100% até 2050, aumentando também a demanda por recursos naturais e por novas áreas agrícolas. Vermeulen et al. (2012) concluem que a probabilidade de inundações devido à elevação da temperatura vai dificultar a capacidade dos agricultores no processo de distribuição e de armazenagem segura dos alimentos, podendo trazer problemas e o risco de doenças alimentares. Segundo os autores, a população de baixa renda e os pequenos produtores estão mais sujeitos às alterações climáticas. Devido à sua limitada capacidade de investimento em equipamentos e nas tecnologias adaptadas para os riscos climáticos crescentes.

Thornton (2012) mostrou que a produção das mais comuns commodities, como o trigo, o milho e o arroz, devido ao aquecimento global e às alterações do clima, deverá passar por mudanças no processo produtivo, principalmente no controle fitossanitário, filotécnico e nutricional.

No final do ano de 2009, foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, que estabeleceu o “Plano para a consolidação de uma economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura”. O Plano da Agricultura de Baixo Carbono (ABC), publicado no ano de 2015, é formado por sete programas ligados às tecnologias de mitigação e às ações de adaptação às mudanças climáticas. Esse plano abrange todo o território brasileiro e espera-se que até 2020 sejam cumpridos os compromissos firmados na COP-15, compostos pelas seguintes ações:

- Recuperar 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, realizando o manejo adequado e a adubação;
- Ampliar o uso dos sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e de Sistemas Agroflorestais (SAFs) em 4 milhões de hectares;
- Aumentar a utilização do Sistema Plantio Direto (SPD) em 8 milhões de hectares;
- Expandir o uso da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) em 5,5 milhões de hectares;

- Incentivar as ações de reflorestamento no Brasil, aumentando a área com Florestas Plantadas, a produção de fibras, de madeira e de celulose em 3,0 milhões de hectares;
- Usar tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos de animais para geração de energia e produção de composto orgânico (ABC, 2015).

O Brasil é um grande celeiro mundial, com grande relevância nas exportações de alimentos e na segurança alimentar do planeta. Porém, ainda são utilizadas práticas agrícolas no processo de produção inadequadas, que geram GEE e que colaboram com aproximadamente 70% da emissão de CO₂ equivalente produzido no País (Cerri et al., 2013), ranqueando o Brasil como o 4º maior emissor mundial (IPCC, 2014).

O Brasil também é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. A área plantada na safra de 2017/2018 foi de 8,74 milhões de hectares e a produção em torno de 635,6 milhões de toneladas. O Estado de São Paulo é responsável por 54% da cana-de-açúcar processada e também é o maior polo sucroalcooleiro do País (4.553,6 mil hectares), seguido por Goiás, com 11% (919,3 mil hectares); Minas Gerais, com 10,2% (818,1 mil hectares); Mato Grosso do Sul, com 7,8% (665,4 mil hectares); Paraná, com 6% (597,3 mil hectares); Alagoas, com 2,4% (307,4 mil hectares); Mato Grosso, com 2,5 % (224,8 mil hectares), e Pernambuco, com 1,7% (222,5 mil hectares). Estes estados somam 95,6% da produção nacional. Os 4,4% restantes são oriundos dos demais estados produtores (CONAB, 2017).

Sabendo da importância da cultura da cana no cenário nacional, atrelados à preocupação com os impactos gerados nas emissões de CO₂ devido ao manejo do solo e às atividades agrícolas de cultivo nos sistemas de produção (La Scala et al., 2006; Razafimbelo et al., 2006; Galdos et al., 2009; Figueiredo et al., 2010; Panosso et al., 2011; Silva-Olaya et al., 2013; Bicalho et al., 2014; Iamaguti et al., 2015), diversas práticas agrícolas são sugeridas para diminuir a concentração de GEE na atmosfera, como o uso do sistema de plantio direto, a redução de queimadas, o controle e a redução de desmatamento e a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis, potencializando o acúmulo de carbono no solo, que também é conhecido como sequestro de carbono. Segundo Smith et al. (2008), o potencial de

mitigação de GEE proveniente do setor agrícola pode atingir valores de 5.500-6.000 Mt CO₂ - eq. ano⁻¹ até o ano de 2030.

Globalmente, os solos com até 1 m de profundidade podem conter aproximadamente até 1.500 GtC (gigatonelada de carbono) (Bruce et al., 1999; Machado, 2005). São estimados que o incremento de 10% no acúmulo de carbono no solo compensaria 30 anos de emissões de CO₂ de origem antropogênica (Kirschbaum, 2000). Dessa forma, o entendimento do ciclo do carbono nos ecossistemas agrícolas é imprescindível e de suma importância para contribuir com as reduções das emissões de GEE em áreas agrícolas.

2.4 A Dinâmica dos Principais Gases Indutores do Efeito Estufa

O efeito estufa é um processo natural que acontece devido à capacidade que alguns gases da atmosfera possuem de absorver o infravermelho térmico e refletirem-nos em várias direções em um curto espaço de tempo. Cada um desses gases tem a capacidade de absorver infravermelho em comprimentos específicos de onda, formando uma ampla faixa de absorção da radiação térmica emitida pela calota terrestre (cerca de 70% da radiação emitida pela Terra são absorvidas pelos gases da atmosfera e reemitidas em direções aleatórias) (Baird e Cann, 2011; Leite, 2010). Na Figura 4, verificam-se para os principais gases causadores do efeito estufa, as faixas de absorção de radiação e sua superposição.

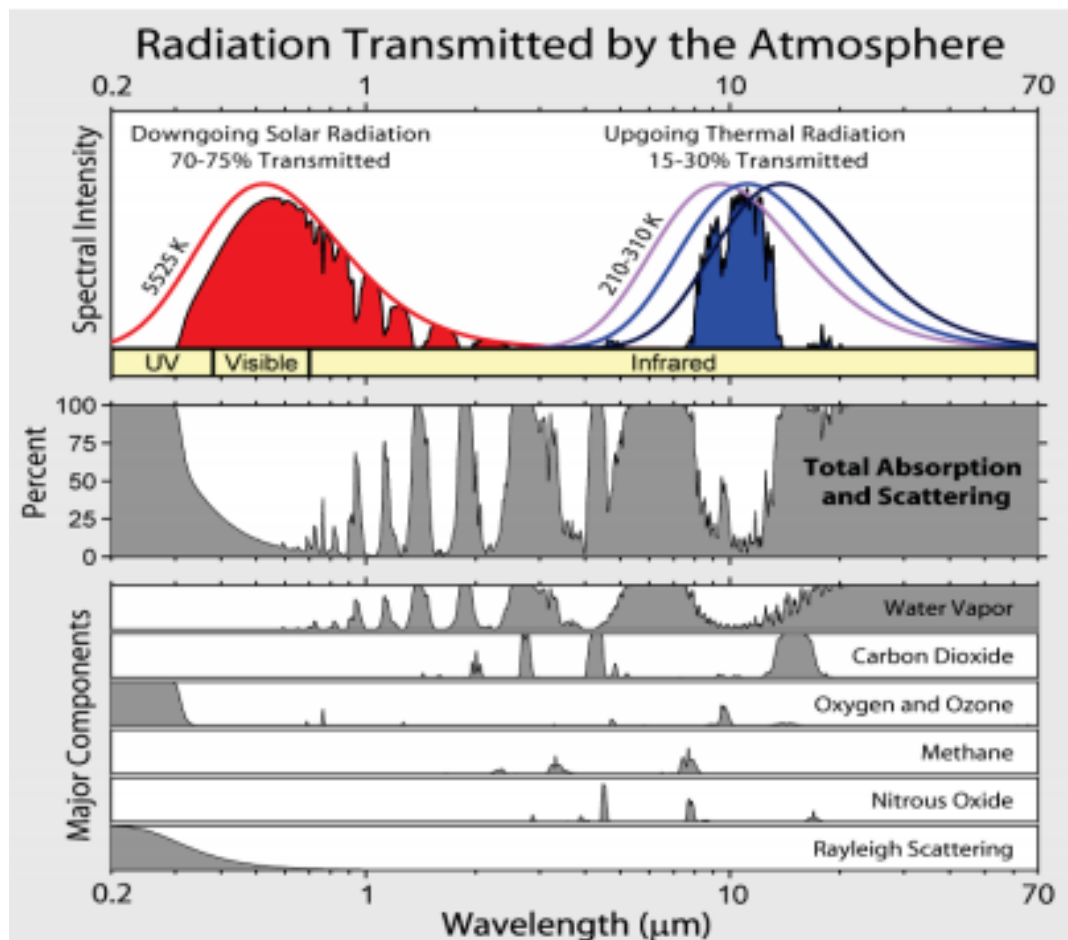


Figura 4: Intensidade de radiação emitida pela Terra em função do comprimento de onda e das faixas de absorção dos principais gases causadores do efeito estufa.

Fonte: Global Warming Art. Disponível em http://www.globalwarmingart.com/wiki/File:Atmospheric_Transmission.png/. Acesso em: 06 jan. 2018.

2.5 Aspectos Gerais sobre o Fluxo de CO_2

Na Terra, pode-se encontrar o carbono em cinco compartimentos: atmosférico, oceânico, pedológico, biótico e geológico. O maior reservatório de carbono do Planeta é o geológico, com aproximadamente 90.000.000 de petagramas de carbono (Pg), porém apenas 0,005% é usado na ciclagem do carbono. Esta fração efetiva está na forma de carvão, óleo e gás (Lal, 2004). O compartimento oceânico apresenta 38.000

Pg de carbono, seguido do pedológico com 2.500 Pg. Os menores reservatórios estão presentes no compartimento biótico e atmosférico, com 560 e 760 Pg de carbono, respectivamente. No compartimento pedológico, o banco de carbono dos primeiros 30 cm de solo é de 800 Pg (Cerri et al., 2006), mesma quantidade estocada no compartimento atmosférico. Segundo Eswaran et al. (1993), em solos com até 1 metro de profundidade, estima-se o armazenamento de 1.576 Pg de carbono. Manejos conservacionistas que buscam a mínima movimentação do solo favorecem a permanência deste carbono estocado, impedindo sua emissão para a atmosfera (Lal, 2004).

De acordo com Denman et al. (2007), as indústrias, o uso de combustíveis fósseis e as mudanças do uso da terra são as principais fontes de emissão de CO₂ da atmosfera. Além das atividades ligadas ao homem, o carbono do solo pode ser emitido para a atmosfera por meio da decomposição de resíduos orgânicos e também pelas respirações dos seres vivos e das raízes das plantas (Carvalho et al., 2010). A respiração radicular totaliza 20% do aumento da concentração de CO₂ no solo (quando comparado com a atmosfera) e 80% são provenientes da atividade biológica do solo. Por causa disso, vê-se que a concentração de CO₂ no solo é maior do que na atmosfera (Melillo et al., 2002).

O transporte da molécula de CO₂ no solo acontece primeiramente devido ao processo de difusão; assim o gás flui de uma região de maior concentração para uma de menor (Ball e Smith, 1991), onde a umidade e a temperatura do solo são os fatores que mais interferem no fluxo de CO₂ (Duiker e Lal, 2000).

2.6 A Variabilidade Espacial da Emissão de CO₂ do Solo

Segundo Dasselaar et al. (1998), a estatística clássica mostra que a variabilidade ao redor da média é aleatória e espacialmente independente. Já a geoestatística, com o auxílio da estatística descritiva, estima a dependência espacial dos valores médios e dos pontos não amostrados. A krigagem ou a cokrigagem usa a geoestatística e gera mapas que podem ser usados como ferramenta para o zoneamento e o manejo adequado para cada área, melhorando assim os resultados da produção agrícola. Além disso, nos pontos não amostrados e amostrados, tem-se

a otimização do georreferenciamento para as propriedades físicas, químicas (Montanari et al., 2010; Corrêa et al., 2015) e biológicas do solo, e sua correlação com o potencial produtivo do solo.

A geoestatística vem sendo utilizada para representar e interpretar o padrão espacial das variáveis regionais. Essas variáveis apresentam um componente estrutural, um componente aleatório e um erro residual (Burrough, 1987). Segundo Zhao et al. (2009), os atributos do solo apresentam grande variação no tempo e no espaço. Essa variabilidade ao longo das superfícies é dependente da escala e é contínua, visto que os atributos do solo são resultantes das combinações de várias interações dos processos químicos, físicos e biológicos em múltiplas escalas (Parkin, 1993).

No entanto, a variabilidade das propriedades do solo, corriqueiramente, indica um componente espacialmente dependente, isto é, a variabilidade pode ser descrita como uma função da distância de separação entre as amostras (Trangmar et al., 1985; Isaaks e Srivastava, 1989). De acordo com Brito et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial da emissão de CO₂, por meio da geoestatística, disponibiliza informações relevantes sobre sua distribuição espacial, auxiliando a compreensão da dinâmica do CO₂ entre a atmosfera e o solo. Não se deve esquecer da importância no processo de eficiência, sustentabilidade e rentabilidade da agricultura, através da otimização dos sistemas produtivos das culturas, proporcionada pela minimização do efeito da variabilidade e da adoção do manejo específico para cada área (Souza et al., 2004; Teixeira et al., 2012).

As ferramentas da geoestatística são usadas por muitos autores em solos com ausência de vegetação (La Scala et al., 2000; Herbst et al. 2009; Teixeira et al., 2011) e com a presença de vegetação (Rochette et al., 1991; Fang et al., 1998; Xu e Qi, 2001; Panosso et al., 2009; Brito et al., 2010; Konda et al., 2010), para a determinação das características espaciais da emissão de CO₂.

Nos processos de transporte e de produção de CO₂, existe o envolvimento de propriedades que possuem grande variabilidade espacial, tornando complexa sua explicação para as variações espaciais. Estudando a dependência espacial das emissões de CH₄, N₂O e CO₂, a variabilidade espacial e suas interações com as propriedades do solo, Dasselaar et al. (1998) observaram valores altos de coeficiente

de variação (CV) para as emissões, com uma fraca relação entre as propriedades do solo. No entanto, os autores chegaram à conclusão de que alterações significativas na variabilidade espacial das emissões, em um curto espaço de tempo, mostram que os principais fatores controladores desta variabilidade apresentam grande dinâmica, ou as emissões são extremamente sensíveis às mínimas alterações destes fatores, como, por exemplo, a umidade do solo.

Analisando a variabilidade temporal e espacial da respiração solo na cultura do milho, Fang et al. (1998), avaliaram a variabilidade espacial da respiração do solo no estado da Flórida, EUA. Em áreas de *Pinus elliotti*, foi observado que a maioria da variabilidade espacial do fluxo de CO₂ no solo pode ser explicada pelas mudanças da biomassa dos organismos vivos e mortos associados à porosidade total. Já Rochette et al. (1991) concluíram que os padrões espaciais da respiração do solo eram distintos de acordo com o teor de água no solo, sendo bastante influenciados pela ocorrência de chuvas, principalmente depois dos períodos de seca.

Rayment e Jarvis (2000) realizaram estudos em área de floresta boreal, no Canadá, com as variações espaçotemporais do fluxo de CO₂ e observaram grau alto de autocorrelação entre valores de respiração do solo quando se mediu em locais separados por distância menores de 1 m, sendo que a maior parte da heterogeneidade, vista em distâncias maiores do que 1 m, era oriunda das variações da microtopografia da área experimental.

A interação da umidade e da temperatura do solo influencia fortemente nas variações temporais da emissão de CO₂ do solo, principalmente em estações do ano em que o teor de água no solo é baixo (Panosso et al., 2011). Schwendenmann et al. (2003), estudando a variação espaçotemporal do fluxo de CO₂ em florestas, demonstraram que o fator principal indicado como explicação para as variações temporais no fluxo de CO₂ foi a quantidade de água presente no solo. Os autores concluíram que o fluxo, a difusão e a taxa de produção de CO₂ diminuíram quando o solo apresentava elevada umidade.

Herbst et al. (2009), para mensurar as características espaciais da emissão de CO₂ em solo desprovido de vegetação, usaram técnicas da geoestatística e também constataram relações entre o conteúdo de água do solo e as variabilidades da emissão de CO₂. Teixeira et al. (2012) e Panosso et al. (2011) desenvolveram ensaios em

áreas de cana-de-açúcar e observaram que a variabilidade espaçotemporal da emissão de CO₂ do solo foi mais bem explicada pelo atributo físico do solo: porosidade livre de água (PLA).

Segundo estudos de Xu e Qi (2001), avaliando o fluxo de CO₂ no solo em *Pinus ponderosa*, concluíram que, apesar de a temperatura e umidade do solo serem utilizadas na previsão da variabilidade temporal do fluxo de CO₂ do solo, elas são impróprias para explicar as variações espaciais do fluxo de CO₂ do solo. Propriedades do solo, como teor de magnésio trocável, biomassa microbiana, conteúdo de nitrogênio, teor de matéria orgânica e densidade do solo, apresentaram as melhores variáveis para a modelagem da variabilidade espacial do fluxo de CO₂ no solo.

3 OBJETIVO

O objetivo desta Dissertação foi determinar a estrutura multivariada da variabilidade espacial das perdas de carbono, via emissões de CO₂, nos solos agrícolas cultivados com cana-de-açúcar, e sua relação com os atributos físicos e químicos do solo, em áreas comerciais localizadas nos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

4 JUSTIFICATIVA

O entendimento aprimorado da distribuição espacial da estabilidade do carbono no solo pode interferir na escolha das técnicas de produção e nos manejos específicos do solo cultivados com cana, proporcionando a redução dos efeitos das mudanças climáticas globais, por meio da mitigação dos GEEs para a atmosfera.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Os estudos foram conduzidos em áreas com a cultura da cana-de-açúcar, localizadas nos municípios de Motuca, Guariba e Pradópolis, no Estado de São Paulo, e em Aparecida do Tabuado, no Estado do Mato Grosso do Sul. As áreas de cana-de-açúcar estavam sob o sistema de manejo de cana crua (colheita mecanizada), em que os resíduos vegetais (folha e colmos) permanecem na superfície do solo após a colheita. Nas quatro áreas estudadas, foram avaliadas a emissão de CO₂, a umidade e a temperatura do solo com relação aos atributos físicos e químicos do solo (Panosso et al., 2012; Teixeira et al., 2013; Bicalho et al., 2014).

As classificações dos solos foram realizadas conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). As áreas estudadas no Estado de São Paulo foram definidas como Latossolo Vermelho eutroférico. Em Motuca, a textura do solo foi definida como muito argilosa (teor de argila superior a 60%). Em Guariba e Pradópolis, a textura do solo foi argilosa (teor de argila entre 35 e 60%). Já no Mato Grosso do Sul, em Aparecida do Tabuado, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico com textura argilosa.

A classificação climática foi definida de acordo com a metodologia de Köppen. O clima das áreas estudadas no Estado de São Paulo foi definido como Aw, com temperatura média anual de 22,2 °C. Já em Aparecida do Tabuado – MS, o clima foi o mesmo, Aw, porém a temperatura média anual foi de 23,7 °C. Logo abaixo, nas Figuras 5 e 6 e na Tabela 2 é possível observar os aspectos gerais das áreas experimentais e suas principais características, divididas conforme as localidades avaliadas neste estudo.



Figura 5: Áreas experimentais de estudo: a) Motuca (SP), b) Guariba (SP), c) Pradópolis (SP) e d) Aparecida do Tabuado (MS).

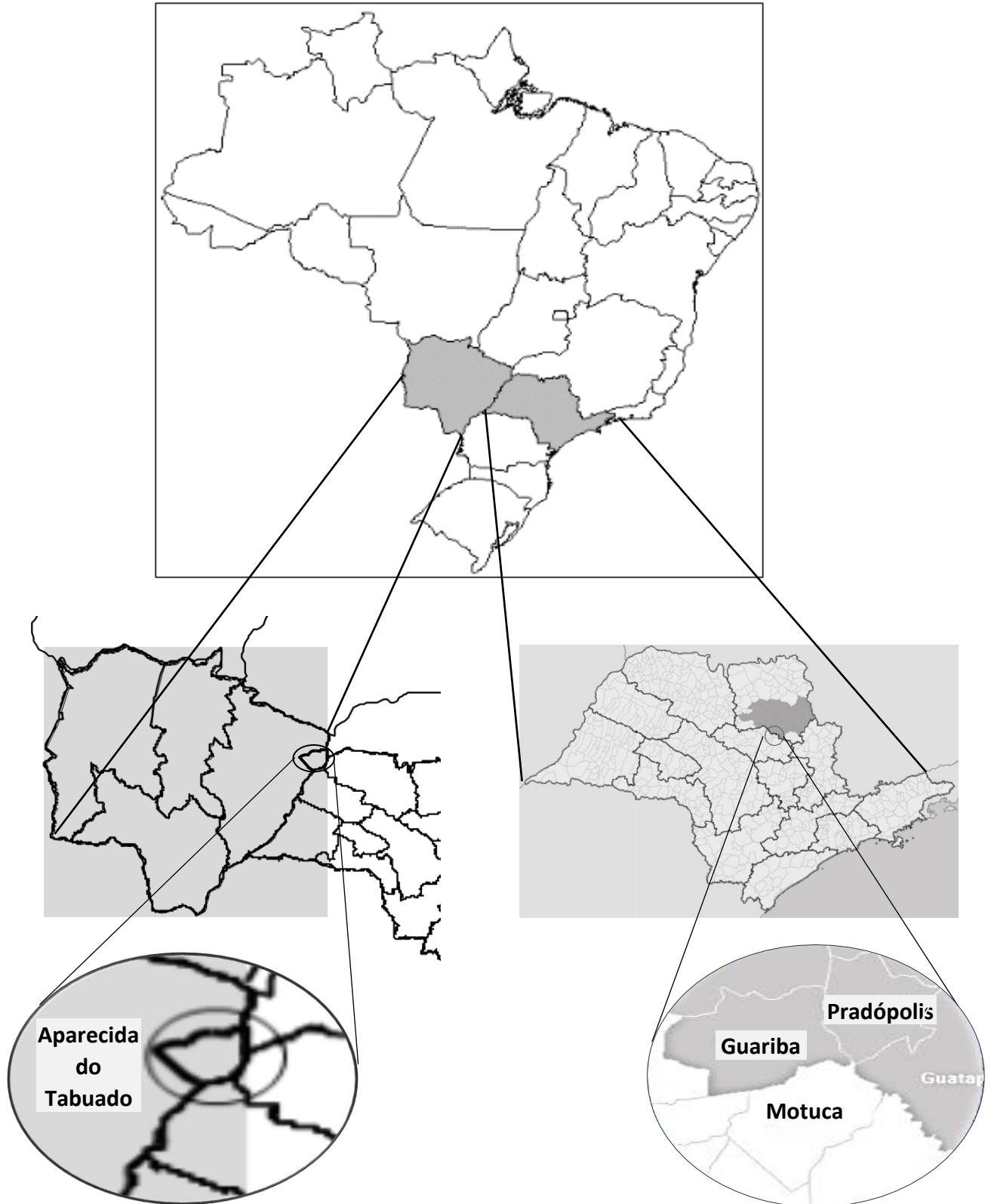


Figura 6: Mapas das cidades das áreas experimentais do Estado de São Paulo (Pradópolis, Guariba e Motuca) e Mato Grosso do Sul (Aparecida do Tabuado).

Tabela 2: Informações geográficas, clima e histórico das áreas onde foram conduzidos os experimentos na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).

| Área de estudo | Cidade | Coordenadas Geográficas | Elevação (m) ¹ | Amostrais coletados (n) |
|----------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| MOT | Motuca | 21° 24' S e 48° 09' O | 550 | 89 |
| GUA | Guariba | 21° 21' S e 48° 11' O | 620 | 141 |
| PAD | Pradópolis | 21° 20' S e 48° 08' O | 515 | 133 |
| APT | Aparecida do Tabuado | 20° 16' S e 51° 16' O | 370 | 102 |

¹ Elevação acima do nível do mar.

As emissões de CO₂ do solo (Fm) foram registradas no início do desenvolvimento das culturas, por meio do sistema LI-COR (LI-8100) (Figura 7). A medição foi realizada através das alterações na concentração de CO₂ dentro da câmara (Figura 7c), que foram monitoradas pelo sistema por meio da espectroscopia, na região do infravermelho. As câmaras utilizadas para medições no solo possuem o volume interno de 854,2 cm³, com área de contato circular de 83,7 cm². Previamente no solo, foram inseridos colares de PVC em cada ponto da malha, na profundidade de 3 cm, onde a câmara foi colocada para a coleta das informações. O fluxo de CO₂ foi medido em cada ponto, através de um ajuste da concentração de CO₂ do ar no interior da câmara, em função de uma regressão parabólica no tempo, após o seu fechamento.

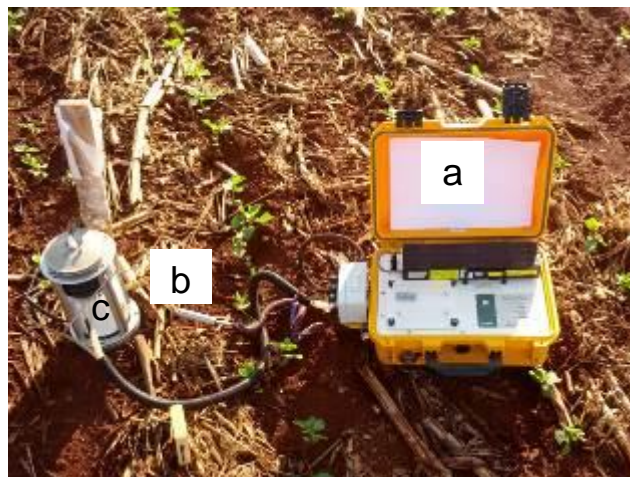


Figura 7: Sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (a), sensor de temperatura do solo (b) e câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (c).

Durante as avaliações da respiração do solo, foi realizado o monitoramento da temperatura do solo (T_s) por meio de um sensor térmico integrado ao sistema da LI-8100 (Figura 7b). O sensor possui haste de 0,20 m que foi inserida no interior do solo, em torno dos colares de PVC. A umidade do solo (U_s) foi medida pelo equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry - Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália, Figura 8). O aparelho de TDR é formado por uma sonda que apresenta duas hastes de 0,12 m, que são introduzidas no interior do solo, próximas aos colares de PVC. De modo geral, em todos os experimentos, as medições da F_m , T_s e U_s foram realizadas no período da manhã, porém em Motuca foram realizadas algumas avaliações no período da tarde. Também as avaliações foram feitas no início do estágio de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, que posteriormente resultaram em médias finais no encerramento dos períodos de avaliação para cada item avaliado (F_m , T_m e U_m), conforme observados na Tabela 2.



Figura 8: TDR - Hydrosense system, dispositivo portátil utilizado para a mensuração da umidade do solo.

Após a finalização das avaliações de Fm, temperatura e umidade, foram coletadas as amostras de solo na profundidade de 0 a 0,10 m e secas ao ar, quando finalizados os períodos de avaliações. Posteriormente, as amostras foram destorroadas e passadas pela peneira com malha de 2 mm. Para a determinação dos atributos químicos do solo, as seguintes análises de rotina foram realizadas: a determinação do teor de matéria orgânica, de P disponível, K, Ca, Mg e H + Al. Foram calculadas a soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (CTC). O índice de saturação por bases (V) foi mensurado através da relação entre SB e CTC. Conforme o método da resina trocadora de íons (Raij, 2001), determinaram-se as extrações de cálcio, magnésio e potássio trocáveis e fósforo disponível.

A densidade do solo (D_s) e a densidade de partículas do solo (D_p) foram obtidas em amostras indeformadas, coletadas com um amostrador adaptado a cilindros, com dimensões médias de 4,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro interno (EMBRAPA, 1997). A porosidade total do solo (PT) foi mensurada por meio do valor da densidade. A classificação dos poros em macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) foi realizada usando-se um funil de placa porosa sob a tensão de 60 cm de altura de coluna d'água em saturação amostral prévia. O volume de água que permaneceu na amostra, após este processo, corresponde aos microporos, e os macroporos foram calculados pela diferença (EMBRAPA, 1997).

O estoque de carbono foi calculado para a profundidade de 0,10 m e, com base na massa de solo equivalente, para contabilizar as variações da densidade do solo, nas diferentes áreas de estudo pela equação 1:

$$Estc = (CO \times Ds \times E) \times 0,1 \quad (1)$$

Em que:

Estc = estoque de carbono ($Mg \text{ ha}^{-1}$);

CO = teor de carbono orgânico oxidável ($g \text{ kg}^{-1}$);

Ds = densidade do solo ($kg \text{ dm}^{-3}$);

E = espessura da camada estudada (0,10 m).

Para a determinação do decaimento ou a constante de decaimento k (tempo^{-1}), realiza-se o seguinte cálculo expresso pela equação 2:

$$k = \frac{Fm}{EstC} \quad (2)$$

Em que:

k = constante de decaimento (tempo^{-1});

Fm = emissão de carbono CO_2 determinado nas áreas de estudo ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ tempo}^{-1}$);

Estc é o estoque de carbono do solo ($Mg \text{ ha}^{-1}$).

Para a análise das componentes principais, foram avaliados os seguintes conjuntos de atributos do solo: umidade do solo (Um), porosidade livre de água do solo (PLA), macroporosidade do solo (Macro), teor de fósforo disponível no solo (P) e capacidade de troca de cátions do solo (CTC). Para a análise dos resultados, foram utilizados os componentes principais (CPs), que apresentaram os autovalores maiores do que a unidade (Kaiser, 1958).

Análise Geoestatística

O variograma é uma técnica de suporte básica aos métodos de krigagem, que possibilita representar, quantitativamente, a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (Huijbregts, 1975), para duas variáveis regionalizadas, X e Y, em que $X = Z(x)$ e $Y = Z(x+h)$. Assim, descreve-se o mesmo atributo (por exemplo, o teor de potássio no solo) mensurado em duas diferentes posições, em que x mostra a posição

em duas dimensões, com componentes (x_i, y_i) , e h um vetor distância (direção e módulo), separando os pontos.

A dependência espacial para F_m foi estimada pela análise do variograma experimental (Webster e Oliver, 1990), e essa determinação da semivariância, em uma distância conhecida, foi calculada pela equação 3:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Em que:

$\hat{\gamma}(h)$ = variograma;

h = distância de separação entre pares de pontos;

$N(h)$ = números 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 $x_i + h$.

Para ajustar o melhor modelo matemático aos variogramas experimentais, foi utilizada a técnica da validação cruzada, que por meio do método de interpolação da krigagem ordinária, tem-se a remoção de cada observação do conjunto de dados, estimando seu valor. O modelo estabelecido foi aquele que melhor estimou os valores observados, ou seja, aquele em que, por meio de uma equação de regressão linear entre esses valores, estimaram-se os valores mais próximos da bissetriz – intercepto igual a zero e coeficiente angular igual à unidade (Isaaks e Srivastava, 1989).

Os modelos teóricos utilizados:

a) Modelo Exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \{1 - \exp[-3(h/a)]\} \quad (4)$$

Se $h > 0$.

b) Modelo Esférico:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2}(h/a) - \frac{1}{2}(h/a)^3 \right] \quad (5)$$

Sendo $0 < h < d$, e $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1$, no qual $h > a$.

c) Modelo Gaussiano:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \{1 - \exp[-3(h/a^2)]\} \quad (6)$$

Em que: $0 < h < d$, e d a máxima distância na qual o variograma foi definido.

Para todos os modelos, tem-se:

h = distância de separação entre pares de pontos;

a = alcance é a distância entre as amostras que espacialmente são correlacionadas;

C_0 = efeito pepita que demonstra a descontinuidade do semivariograma para menores distâncias do que a menor distância entre os pontos;

C_1 = é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais foram usados para estimar os atributos analisados nos locais não amostrados, e a técnica de krigagem ordinária foi utilizada na construção de mapas dos padrões espaciais:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

Em que:

Z^* = o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ;

N = o número de valores medidos $Z(x_i)$ envolvidos na estimativa;

λ_i = os pesos associados a cada valor medido $Z(x_i)$.

Análises estatísticas Multivariadas

Antes da avaliação, determinou-se a padronização dos dados para que cada variável mostrasse variância unitária e média nula. O objetivo da padronização foi minimizar as diferenças entre os grupos, produzindo, assim, o mesmo peso nos cálculos do coeficiente de similaridade entre os pontos amostrais. Ou seja, a não padronização resultaria em soluções inconsistentes das técnicas usadas, visto que a maior parte das medidas de distância, posteriormente citadas, é vulnerável às escalas

diferentes ou às magnitudes das variáveis. Na conjuntura das análises multivariadas, as análises estatísticas foram classificadas como técnicas de interdependência, pois ocorre simultaneamente à análise de todas as variáveis em conjunto, em que não é definida nenhuma variável como independente ou dependente (Hair et al., 2005; Val et al., 2008). Para uma matriz de dados com p atributos (variáveis disponíveis no conjunto de dados), sendo $j = 1, 2, \dots, p$ e com n pontos amostrais (objetos) de modo que $i = 1, 2, \dots, n$. Seguindo essas considerações, tem-se o processo de padronização:

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \overline{X_j}}{S_j} \quad (8)$$

Em que:

X_{ij} = é o valor do i -ésimo objeto e j -ésimo atributo;

Z_{ij} = valor padronizado na matriz de dados;

$\overline{X_j}$ = média aritmética da variável j ;

S_j = desvio padrão da variável j .

A análise de agrupamentos (*Cluster*) é feita através da escolha de um coeficiente que classifica os dados (pontos amostrais) em grupos, com a condição de que estes sejam exclusivamente semelhantes (homogêneos) dentro de um grupo; e entre vários grupos, sejam heterogêneos entre si (grupos dissemelhantes). Dentro desta análise, propõem-se dois métodos: o não hierárquico e o hierárquico. O método de analisar indivíduos e de observar a similaridade entre eles, é dado por um coeficiente de semelhança. Nos estudos dos dados, foi realizado abordando a mais usual *distância euclidiana*, que indica a distância entre dois objetos, dentro de um espaço n -dimensional:

Propriedades:

Para a distância, é necessário exigir a positividade, ou seja:

- $d_{ij} \geq 0, \forall i, j = 1, \dots, n$;
- $d_{ii} = 0, \forall i, j = 1, \dots, n$;

E também que ele mantenha a simetria, que é dada por:

$$\bullet d_{ij} = d_{ji}, \forall i, j = 1, \dots, n;$$

Tendo isso, para a análise de agrupamentos, os dados dos valores de p para as variáveis X_1, X_2, \dots, X_p em n pontos amostrais:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (9)$$

Em que:

x_{ik} : é o valor da variável X_k para o ponto amostral i ;

x_{jk} : é o valor da mesma variável X_k para o ponto amostral j .

Após os cálculos, foi montada uma matriz com os valores da distância entre os pontos das amostras. Essa matriz de semelhança usou os coeficientes de similaridade ou dissimilaridade para unir os objetos próximos. O processo de agrupamento hierárquico é realizado através do cálculo da distância entre os pontos amostrais, visando a dividi-los em grupos de forma que eles se associem gradualmente e que a cada associação todos os objetos estejam em um único grupo. Neste trabalho, foi a metodologia de agregação de classes, Ward, método de variância mínima. Para calcular a distância, o método usado é a soma de quadrados entre os dois grupos feitos sobre todas as variáveis. Em cada etapa do procedimento de agrupamento, a soma interna de quadrados é reduzida sobre todas as partições que podem ser mostradas pela combinação de dois grupos do estágio anterior, sendo este método o mais adequado para dados de origem biológica.

A análise das componentes principais (ACP) é uma técnica que visa a transformar grandes grupos de variáveis, a minimizar e a reorganizar em um conjunto menor, sem perder as possíveis informações iniciais e não correlacionados (os conhecidos componentes principais). Essas componentes principais formam combinações lineares das variáveis originais, criando eixos ortogonais (\perp), onde são plotados em gráficos bidimensionais ou tridimensionais. A análise aumenta a variância, evidenciando o poder discriminatório de cada variável, onde os primeiros componentes possuem mais informações e os últimos possuem menos informações.

Para mensurar os componentes principais, tem-se que:

$$AX = \lambda X \Rightarrow AX - \lambda X = 0 \Rightarrow (A - \lambda I)X = 0 \quad (10)$$

Em que:

A = é a matriz de correlações ou matriz de variância e covariâncias A_{ij} ,
 $i = 1, \dots, p$ e $j = 1, \dots, n$;

X = (autovetor) é um vetor desconhecido formado por cada X_i , $i = 1, \dots, p$;

λ = (autovalor) constante λ_i , $i = 1, \dots, p$.

A resolução da equação característica da matriz A que determina as componentes principais é dada por:

$$\det [A - \lambda I] = 0 \quad (11)$$

Por meio dos cálculos da equação 9, vemos a equação característica que contém raízes, e essas raízes são os autovalores, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$. Para obter os autovetores X_i deve-se substituir para cada autovalor λ_i na Equação 8.

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{ip} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Conhecendo os valores dos autovetores, podem-se determinar os coeficientes normalizados das componentes principais que são formados por:

$$a_{ij} = \frac{X_i}{\|X\|} \quad (13)$$

Em que:

a_{ij} = cada coeficiente normalizado do componente principal, sendo: $i = 1, \dots, p$
e $j = 1, \dots, n$. X_i : valores do Autovetor;

$$\|X\| = \text{cálculo do módulo do autovetor, que é dado por: } \sum_{i=1}^p \sqrt{(X_i)^2}.$$

Portando, os componentes principais são formados por:

$$CP1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p$$

$$CP2 = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p$$

⋮

$$CPn = a_{1n}X_1 + a_{2n}X_2 + \dots + a_{pn}X_p$$

Neste trabalho, o critério que determinou a seleção das componentes principais foi aquele que mostrou autovalor igual ou maior que 1, que nada mais é do que a quantidade relevante de informação captada (Kaiser, 1958). Conforme esse critério e os cálculos usando o CP, a variância em cada um foi dada pela equação:

$$CP_i = \frac{\lambda_i}{\text{Traço}[C]} 100 \quad (14)$$

Em que:

CP_i = A porcentagem da variância total contida em cada componente;

λ_k = o autorvalor da matriz A de correlação;

$\text{Traço}[C]$: é a soma dos autovalores, $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_i$.

Através das componentes encontrados, é possível construir gráficos mostrando a nova distribuição das unidades. Esses CPs atuam como eixos, e as coordenadas são fornecidas por cada grupo original aplicado na equação do componente, onde podemos obter a localização no espaço.

De um componente principal, tem-se k variáveis,

$$\bullet CP1 = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p$$

$$\text{Unidade (1)} = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p$$

$$\text{Unidade (2)} = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p \dots$$

$$\text{Unidade (k)} = a_{11}X_1 + a_{21}X_2 + \dots + a_{p1}X_p$$

$$\bullet \text{CP2} = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p$$

$$\text{Unidade (1)} = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p$$

$$\text{Unidade (2)} = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p \dots$$

$$\text{Unidade (k)} = a_{12}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{p2}X_p$$

A estrutura multivariada presente no conjunto inicial foi medida pela análise das componentes principais a qual agrupa a informação relevante em um conjunto menor de latentes variáveis ortogonais que são os componentes principais (autovetores) gerados por combinações lineares das variáveis originais, por meio dos autovetores da matriz de covariância. Cada par de componentes principais gera uma representação bidimensional do espaço amostral original, denominado biplot, onde é possível verificar a estrutura das variáveis por meio do direcionamento dos feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade (Figura 9).

As estatísticas descritivas e multivariadas da emissão de CO₂ do solo e dos atributos físicos e químicos foram mensuradas no software livre R (R Development Core Team, 2016). As análises geoestatísticas foram feitas no programa GS+ versão 10 (Gamma Design Software LLC, Plainwell, MI, EUA), e a construção dos mapas dos padrões espaciais de Fm foi realizada no programa Surfer versão 9 (Golden Software Inc, Golden, CO, EUA).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação dos valores mensurados para os estoques de carbono do solo (Estc) foram entre 2,62 e 18,6 Mg ha⁻¹, sendo que os maiores valores observados foram na área de GUA (Tabela 3). Em contrapartida, o fator k, que é a representação da estabilidade do carbono, ficou entre 0,25 e 8,17×10⁻³ tempo⁻¹ nas áreas avaliadas. A área que indicou os menores valores de k foi GUA (Tabela 3), quando comparada com as outras áreas. Observa-se que as regiões com baixa estabilidade do carbono estão associadas a valores de k maiores, isto é, carbono prontamente decomponível à ação

microbiana, onde os pontos amostrais são tidos como fontes potenciais de emissão de CO₂. No entanto, regiões com maior estabilidade do carbono mostram menores valores de k, consideradas eventualmente zonas de acúmulo ou potenciais sumidouros de carbono no solo.

Na análise de componentes principais, foram escolhidos atributos para maximizar a variabilidade dos dados para os componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), para que cada área avaliada apresentasse variabilidade acumulativa maior que 50% (Tabela 4). Para essas análises, não foram selecionadas as variáveis como o fator k, emissão de CO₂ e estoque de carbono.

Tabela 3: Estatísticas descritivas da emissão de CO₂ e dos atributos físicos e químicos do solo para todas as áreas estudadas.

| Atributos do solo | Motuca | | | | Guariba | | | |
|--------------------------|-------------------|-----------|------------------|-----------|-----------------------------|-----------|------------------|-----------|
| | Média | DP | Máx / Mín | CV | Média | DP | Máx / Mín | CV |
| Fm | 2,19 | 0,78 | 4,87 / 0,79 | 35,73 | 1,55 | 0,75 | 3,55 / 0,34 | 48,03 |
| Um | 27,77 | 4,56 | 45,13 / 20,38 | 16,41 | 19,68 | 2,78 | 27,14 / 15,29 | 14,11 |
| PLA | 15,02 | 5,72 | 27,03 / -3,42 | 38,08 | 33,97 | 5,06 | 46,36 / 22 | 14,90 |
| Ds | 1,17 | 0,06 | 1,28 / 1,01 | 5,48 | 1,50 | 0,14 | 1,86 / 1,11 | 9,17 |
| Macro | 6,60 | 3,12 | 16,11 / 1,79 | 47,30 | 14,72 | 4,87 | 28,13 / 6,47 | 33,09 |
| PT | 42,78 | 2,35 | 47,63 / 37,83 | 5,49 | 53,89 | 4,33 | 65,15 / 43,67 | 8,03 |
| P | 18,07 | 7,14 | 70 / 10 | 39,52 | 23,21 | 4,45 | 35,26 / 12 | 19,17 |
| CTC | 103,97 | 9,45 | 133,1 / 83,8 | 9,09 | 108,55 | 5,53 | 122,24 / 94,66 | 5,10 |
| Estc | 8,03 | 0,77 | 9,72 / 6,67 | 9,62 | 12,85 | 1,91 | 18,6 / 8,76 | 14,82 |
| K | 2,72 | 1,05 | 6,71 / 0,94 | 38,49 | 1,21 | 0,60 | 2,89 / 0,25 | 49,79 |
| | Pradópolis | | | | Aparecida do Tabuado | | | |
| Fm | 1,32 | 0,59 | 3,47 / 0,5 | 44,95 | 1,71 | 0,64 | 5,18 / 0,73 | 37,49 |
| Um | 9,25 | 0,86 | 11,5 / 7,5 | 9,30 | 9,46 | 1,16 | 15,18 / 5,98 | 12,23 |
| PLA | 40,50 | 4,10 | 51,13 / 29,36 | 10,14 | 39,14 | 1,16 | 42,62 / 33,42 | 2,95 |
| Ds | 1,45 | 0,12 | 1,71 / 1,17 | 7,89 | 1,47 | 0,12 | 1,75 / 1,21 | 8,00 |
| Macro | 19,61 | 6,63 | 37,06 / 4,04 | 33,80 | 10,62 | 4,87 | 22,53 / 3,33 | 45,82 |
| PT | 49,74 | 4,36 | 59,99 / 38,48 | 8,77 | 43,05 | 4,55 | 54,22 / 32,06 | 10,58 |
| P | 26,26 | 12,34 | 83,26 / 13,07 | 47,00 | 9,05 | 2,81 | 24,67 / 5,33 | 31,00 |
| CTC | 83,28 | 11,81 | 122,68 / 55,67 | 14,18 | 58,73 | 8,27 | 81,08 / 38,72 | 14,08 |
| Estc | 8,39 | 1,50 | 17,85 / 4,67 | 17,94 | 6,47 | 1,22 | 12,08 / 2,62 | 18,82 |
| K | 1,62 | 0,83 | 5,34 / 0,42 | 51,37 | 2,66 | 1,05 | 8,17 / 1,2 | 39,49 |

Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si, pelo teste *t-Student*, significativo ao nível de 5% de probabilidade. DP = desvio padrão; Máx = Máximo; Mín = Mínimo; CV = coeficiente de variação (%); Fm = Fator de emissão de CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Um = umidade do solo (%); PLA = porosidade livre de água (%); Ds = densidade do solo (kg dm^{-3}); Macro = macroporosidade (%); PT = fósforo total (mg dm^{-3}); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}); CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); Estc = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); k = constante de decaimento ($10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$).

Tabela 4: Coeficientes de correlação linear entre os quadrantes (Q1, Q2, Q3 e Q4) dos mapas de padrões espaciais do fator k e dos componentes principais 1 e 2 nas áreas estudadas de cana-de-açúcar em sistema de cana crua.

| Quadrantes | Motuca | | Guariba | | Pradópolis | | Aparecida do Tabuado | |
|--------------------|--------|-------|---------|--------|------------|-------|----------------------|--------|
| | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 |
| Fator k | | | | | | | | |
| Q1 | 0.69* | 0.67* | -0.47 | 0.59* | -0.37 | 0.06 | -0.52* | -0.63* |
| Q2 | 0.67* | 0.24 | 0.66* | -0.60* | 0.11 | -0.42 | -0.51* | 0.14 |
| Q3 | 0.69* | 0.30 | -0.07 | -0.07 | -0.24 | -0.25 | 0.06 | 0.83* |
| Q4 | 0.81* | 0.70* | 0.15 | 0.48 | -0.06 | -0.36 | -0.62* | -0.57* |
| Estoque de carbono | | | | | | | | |
| Q1 | -0.39 | -0.23 | 0.15 | -0.60* | 0.38 | -0.11 | -0.09 | 0.21 |
| Q2 | -0.51* | -0.07 | 0.24 | -0.06 | -0.46 | 0.10 | 0.40 | -0.26 |
| Q3 | -0.44 | 0.11 | -0.19 | -0.10 | 0.31 | 0.00 | -0.32 | -0.83 |
| Q4 | 0.27 | 0.36 | 0.12 | 0.00 | 0.16 | 0.15 | 0.36 | -0.11 |

* significativo ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste *t-Student*.

A representação gráfica biplot mostra a correlação das variáveis com os componentes principais (Figura 9). Neste estudo, foram considerados os dois primeiros componentes principais, CP1 e CP2, cujos autovalores são superiores à unidade (Kaiser, 1958). O primeiro componente principal, CP1, explicou 39,0% da variância total das propriedades do solo, enquanto 27,7 % foram explicados por CP2, os quais conseguiram manter, em conjunto, 66,7 % da variabilidade das propriedades do solo. Também foi observada a formação de dois grupos distintos: grupo I, menos agrupado (ou seja, maior dispersão dos pontos na representação bidimensional), localizado no lado esquerdo do gráfico biplot de pontos, principalmente formado pelas amostras provenientes das áreas experimentais MOT e GUA, e grupo II, localizado à direita do primeiro componente principal e formado pelas áreas de PAD e APT.

O poder discriminatório de cada variável dentro do componente foi medido pelas correlações lineares entre cada atributo do solo e o respectivo componente principal. No banco de dados, havia outras variáveis, porém somente as que apresentaram correlação foram indicadas no gráfico. No primeiro componente principal e por ordem de importância, os atributos que apresentaram maiores coeficientes de correlação foram a umidade do solo – Um (-0,94), a porosidade livre de água – PLA (0,87) e a capacidade de troca de cátions – CTC (-0,73). No segundo componente e por ordem de importância, têm-se as variáveis fósforo disponível – P (0,78) e Macroporosidade - Macro (0,63). Analisando-se as correlações dos atributos do solo com cada área de estudo, observa-se que MOT e GUA apresentaram maior umidade e CTC. Já para PAD e APT, tem-se pouco CTC e umidade, porém maior PLA.

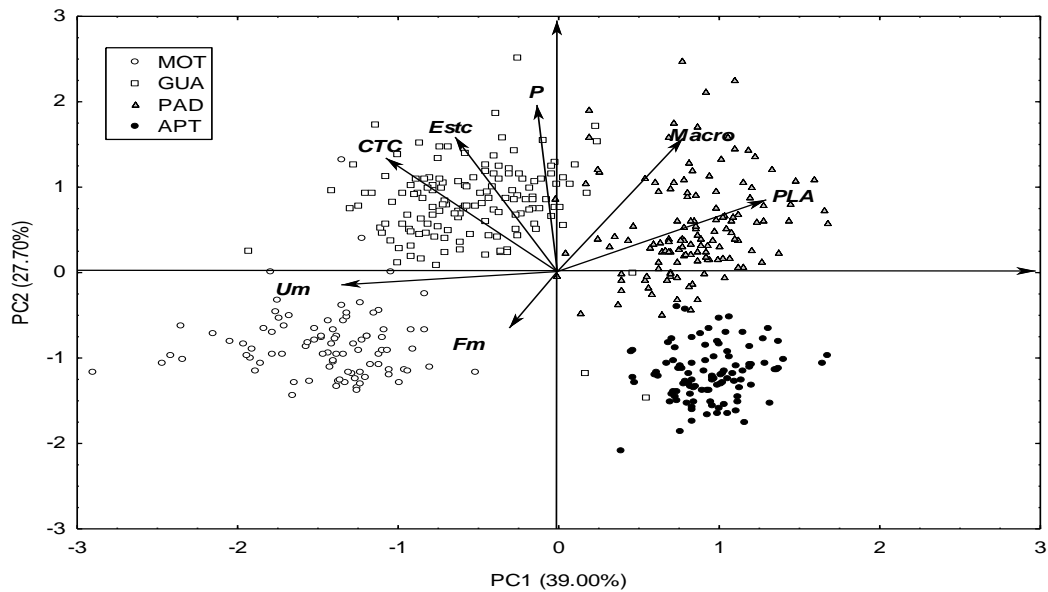


Figura 9: Gráfico Biplot dos componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais com todos os pontos amostrais e as seguintes variáveis: emissão de CO₂ do solo (Fm), estoque de carbono no solo (Estc), porosidade livre de água (PLA), fósforo disponível (P), macroporosidade (Macro), capacidade de troca de cátions (CTC) e umidade do solo (Um).

Também foram realizadas as análises de agrupamentos, que é uma ferramenta da estatística multivariada utilizada no processo de identificação e de formação de grupos homogêneos, a partir dos acessos experimentais (observações) de cada região de estudo. Para a formação dos agrupamentos, foram obtidas três classes, os quais foram divididos em função dos quartis do fluxo médio de CO₂ (Fm) para cada área em questão. Em seguida, foi realizada a análise de correlação linear simples com os atributos do solo. O critério utilizado para a classificação de cada observação foi: Classe de emissão A) representa os valores acima de 75% das observações (altos valores de Fm); Classe de emissão M) entre 25 e 75% (médios valores de Fm); Classe de emissão B) representa os valores abaixo de 25% (baixos valores Fm).

De maneira geral, foi observado um contraste entre os pontos de altas (A) e baixas (B) emissões em todas as regiões estudadas (Figuras 10, 12, 14), exceto em Aparecida do Tabuado - MS (Figura 16). Essas características são correlacionadas com os atributos dos solos. Nas análises das componentes principais, foi observado que os atributos dos solos que mais influenciaram no processo de Fm foram a PLA, a

Um, CTC e P. Quando comparadas essas informações com a análise de agrupamentos, fica evidenciado que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA, CTC, P e negativamente com Um; sendo que, para os pontos de maior emissão, tem-se alta PLA, CTC, P. Já para menores valores de Fm, observam-se maiores valores de Um. Moitinho (2017) caracterizou o padrão da variabilidade espacial da emissão de CO₂ e dos atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em área de cana-de-açúcar após as atividades de reforma e obteve a formação de grupos diferenciados dentro de uma mesma área de estudo, sendo que, em alguns agrupamentos, a emissão de CO₂ do solo foi influenciada pela relação C/N do solo e, em outros, pela abundância do gene *pmoA* - *metano monooxigenase A* (relacionado ao ciclo do carbono), enzimas desidrogenase, urease e amilase.

No estudo da área experimental MOT, o CP1 explicou 43,35% da variância total dos dados utilizados, em vista de que o CP2 explicou 21,03%, totalizando 64,38% (Figura 10). As variáveis com maior importância, isto é, as que mais contribuíram para o CP1 e com poder maior de discriminação foram a PLA, com correlação positiva ($r = 0,98$), e a Um, com correlação negativa ($r = -0,90$). Por sua vez, o CP2 apresentou correlação positiva para as variáveis relevantes: P ($r = 0,84$) e CTC ($r = 0,42$). Claramente, observa-se na interpretação de CP1 um contraste entre PLA e a Um, e CP2 como um nível de fertilidade do solo, expressa por CTC e P (Figura 10). Panosso et al. (2012) avaliaram as propriedades do solo e a variabilidade espacial no sistema de conversão de cana queimada para crua, em circunstâncias semelhantes a este estudo ACP e observaram que CP1 explicou 36,6% da variabilidade total. Na mesma Figura 10, observa-se a formação de um contraste entre os pontos de altas (A) e baixas (B) emissões. Nas análises dos componentes principais, foi constatado que os atributos dos solos que mais influenciaram no processo de Fm foram a PLA e a Um, evidenciando que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA e negativamente com Um, sendo que para os pontos de maior emissão, tem-se alta PLA, já para menores valores de Fm observam-se maiores valores de Um.

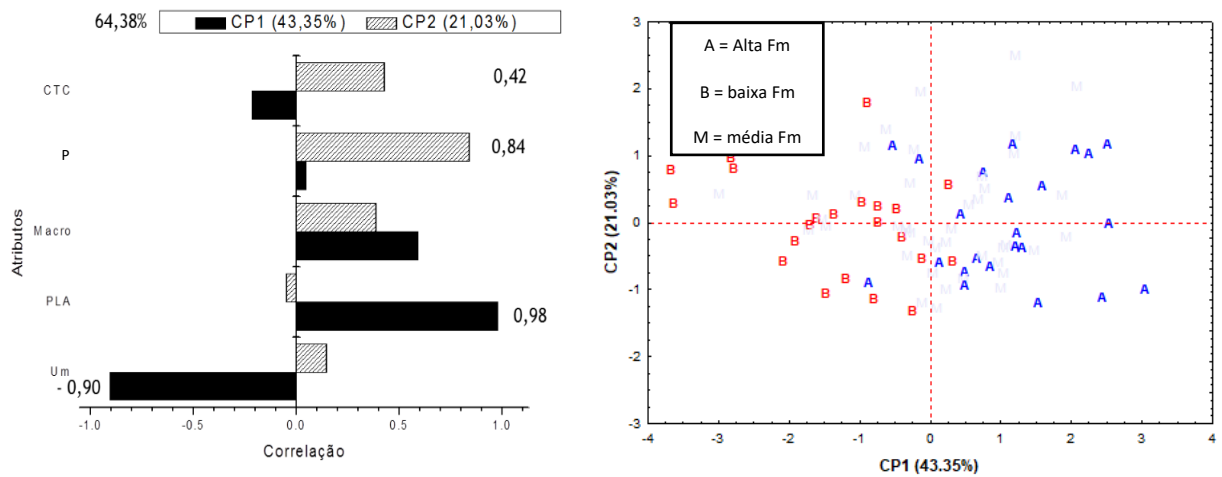


Figura 10: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO₂ no solo para MOT.

Os valores medidos do fator k variaram de $1,4$ a $3,9 \times 10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$, com Estc variando de $7,2$ a $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$. A região II (Figura 11) mostra que existe uma associação espacial dos pontos amostrais com maiores valores do fator k , valores menores de Estc e valores maiores de Fm, sendo assim uma região para a atmosfera de fonte de carbono. Na região III, foram observados valores menores de k , de Fm e maiores estoques de carbono, expressando uma região de potencial acúmulo de carbono nessa área. Na Tabela 4, podem ser vistos o estudo da correlação linear entre os padrões dos componentes principais e os padrões de variabilidade do k .

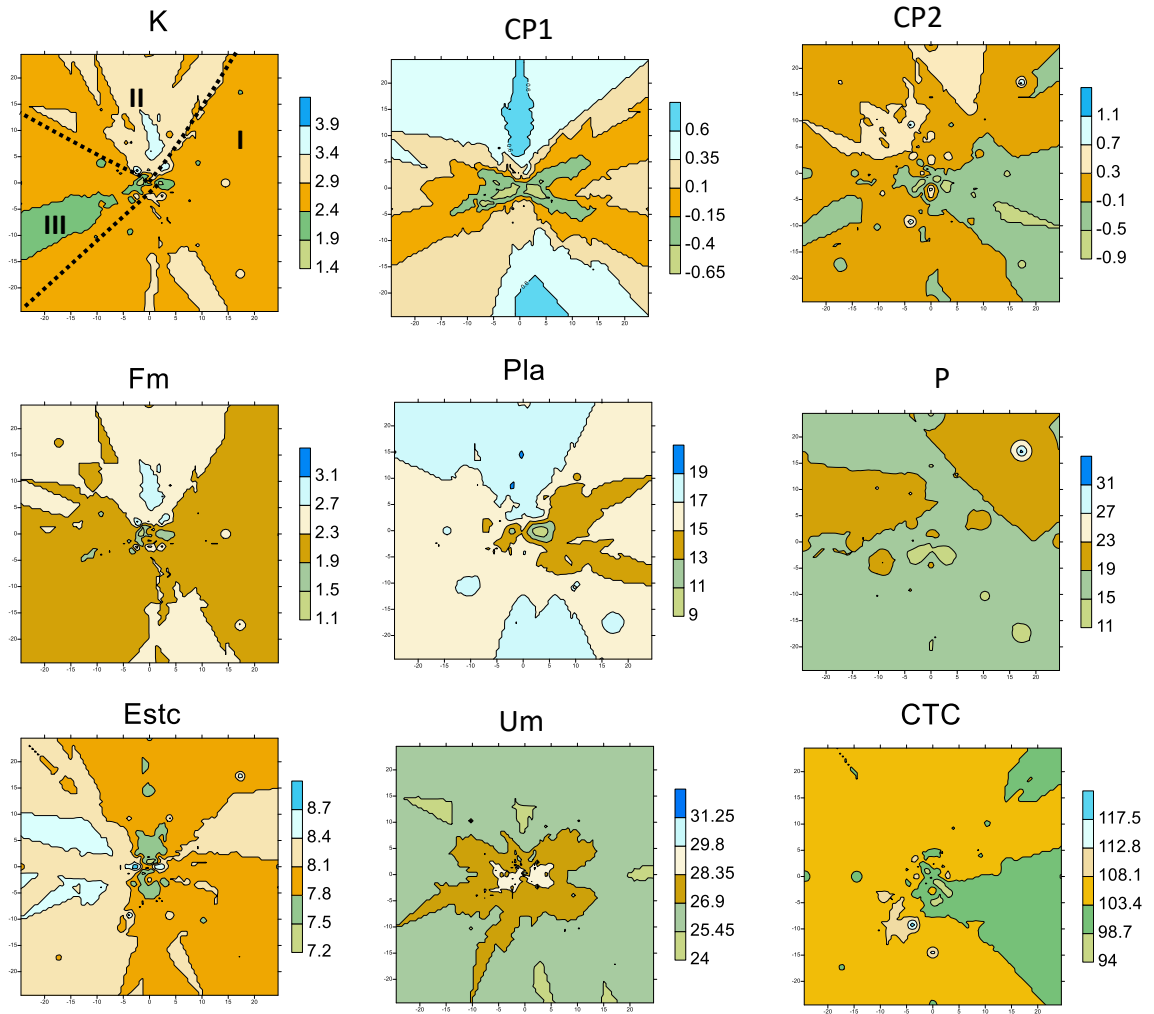


Figura 11: Padrões espaciais dos atributos de MOT de k, Fm, Estc, Pla, Um CTC e P para o CP1 e CP2.

k = constante de decaimento ($10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$); Fm = Fator de emissão de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Estc = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); CP1 = componente principal 1; PLA = porosidade livre de água (%); Um = umidade do solo (%); CP2 = componente principal 2; CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}).

Os resultados mostram uma significativa correlação do CP1 com o k, sendo esta uma variável que pode ser usada para a determinação de zonas de específicos manejos dentro de uma mesma área de estudo (região II), em razão de que os valores maiores de CP1 estiveram ligados aos menores valores de Um do solo e aos maiores valores de PLA. Além disso, estas variáveis foram responsáveis pela variabilidade espacial de Fm nesta área de estudo, interferindo diretamente no processo de

transporte do gás no interior do solo. Para a CP2, foram observados valores de correlação significativos somente entre os quadrantes Q1 e Q3 (Tabela 4), mostrando a formação da zona de manejo denominada região I (Figura 11).

Os fatores que determinaram os padrões de variabilidade espacial de Fm foram principalmente o teor de fósforo disponível no solo e a CTC do solo, em que essas variáveis estão relacionadas ao processo de produção do gás do solo, e também pelo aumento da atividade microbiana.

No estudo da área experimental GUA, o CP1 explicou 33,25% da variância total dos dados usados na área estudada do experimento; já o CP2 explicou 22,04%, totalizando 55,29% (Figura 12). As variáveis que mais colaboraram para o CP1, isto é, aquelas com poder discriminante maior foram, a Um, com correlação positiva ($r = 0,61$), e a PLA, com correlação negativa ($r = -0,80$). O CP2 demonstrou uma correlação negativa e significativa para as variáveis CTC ($r = -0,60$) e P ($r = -0,73$). Da mesma forma que ocorreu no estudo da área experimental MOT, pode-se analisar o CP1 como um contraste entre a umidade do solo e a porosidade livre de água, e CP2 com relação à fertilidade do solo, indicada pela capacidade de troca de cátions e o teor de fósforo disponível no solo (Figura 12).

Também na mesma figura, a análise de agrupamentos mostra que há a formação de uma região de sobreposição, localizada mais ao centro, e entre as extremidades, o contraste dos pontos de altas (A) e baixas (B) emissões. Nas análises, foi observado que os atributos dos solos que mais influenciaram no processo de Fm foram a PLA e a Um, semelhante à MOT, evidenciando que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA e negativamente com Um, sendo que, para os pontos de maior emissão, tem-se alta PLA; já para menores valores de Fm observam-se maiores valores de Um.

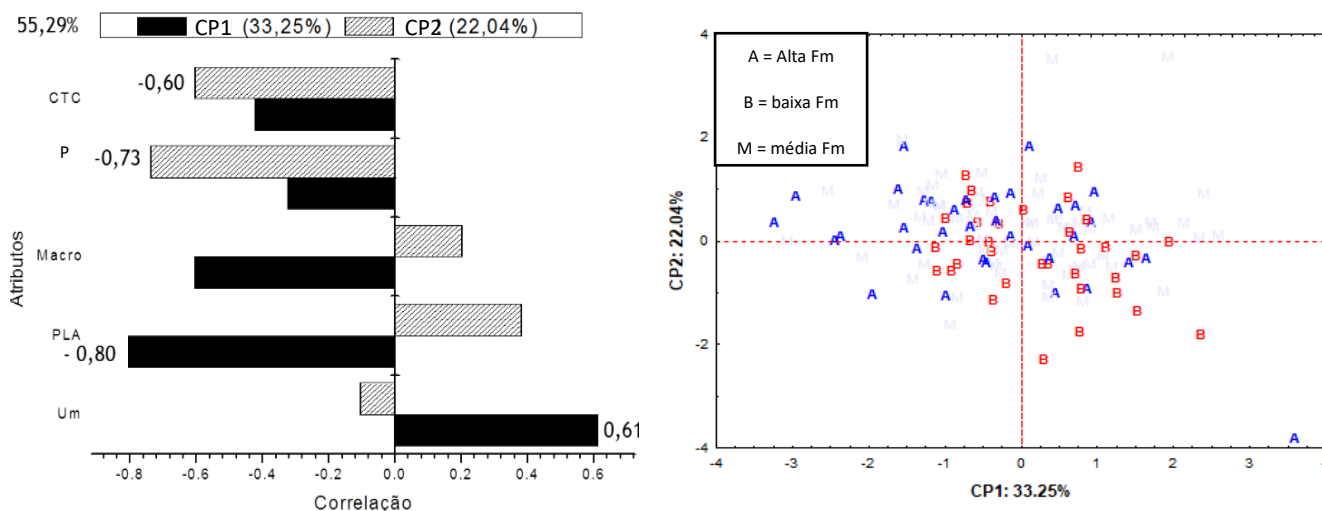


Figura 12: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO₂ no solo para GUA.

No estudo de GUA, os valores do fator k estiveram entre $0,65$ e $1,65 \times 10^{-3}$ tempo⁻¹, e o estoque de carbono (Estc) variou de 10 a 16 Mg ha⁻¹. A continuidade das isolinhas (a despeito da continuidade espacial) foi parecido para os mapas de k e CP1. A avaliação da correlação linear simples entre os padrões espaciais de k e CP1 (Tabela 4) mostrou valor positivo e significativo ($r = 0,66$) apenas para o segundo quadrante da área de estudo. Para a região (II), tem-se que a análise de componentes principais pode discriminar os atributos responsáveis pelos padrões de variabilidade da perda de carbono no solo, onde a PLA e a Um do solo foram para a emissão fatores limitantes.

Foram observados para CP2 valores de correlação relativos entre os padrões de estabilidade do carbono e CP2, positivos para a região I e negativos para a região II (Figura 13). Tal efeito foi evidenciado pela complexidade do fenômeno, que mostra a correlação em espaço, tempo e escala com os atributos do solo estudados (La Scala et al., 2009; Allaire et al., 2012; Bicalho, 2016). Conforme a Figura 13, os resultados demonstraram que, para a zona de manejo denominada I, as maiores perdas de carbono do solo estiveram ligadas a menores valores de P. Logo, na zona de manejo II, aconteceu o inverso, onde menores de valores de P foram associados aos valores menores de perda de carbono no solo.

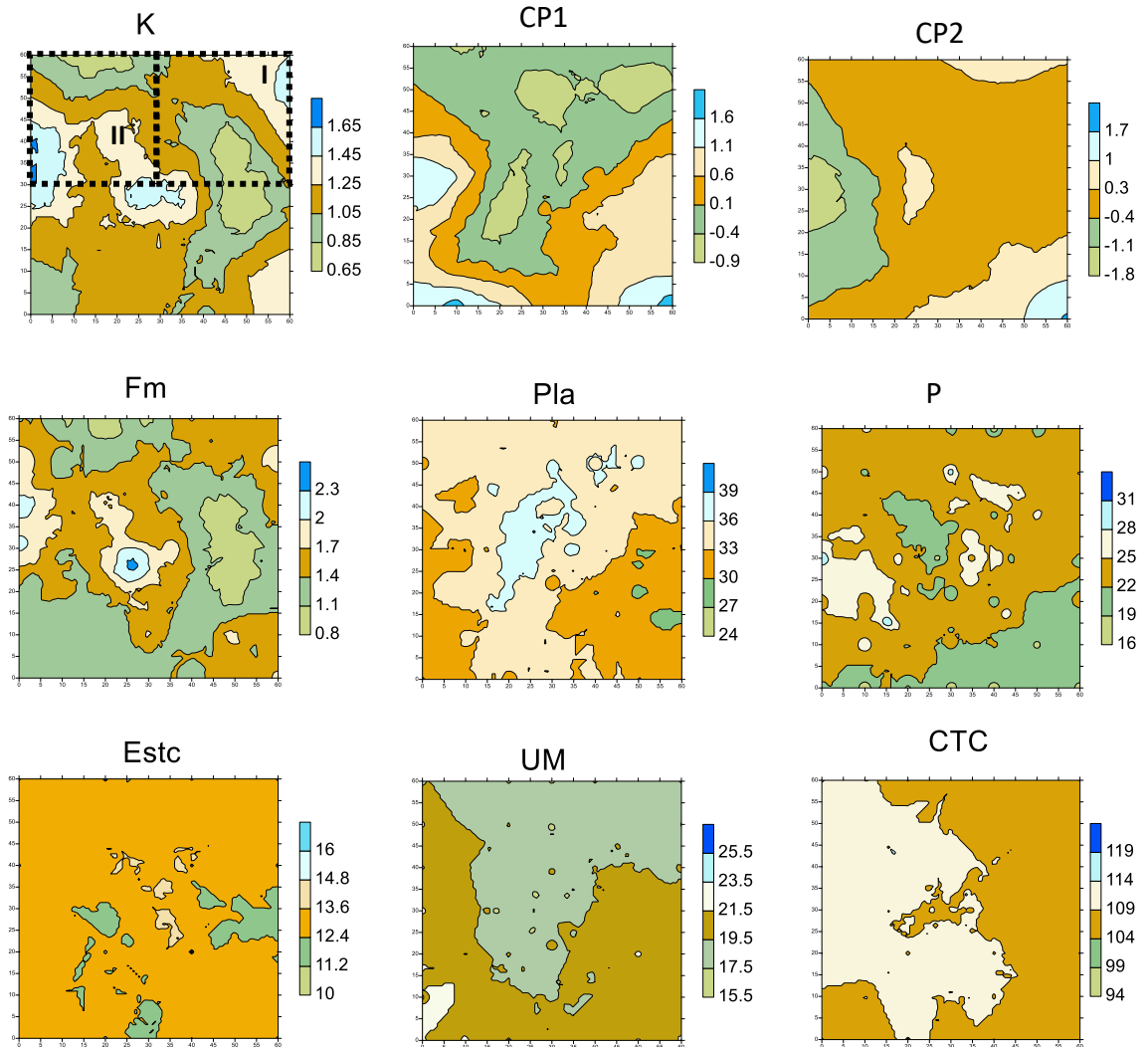


Figura 13: Padrões espaciais dos atributos de GUA de k, Fm, Estc, Pla, Um, P e CTC para o CP1 e CP2.

k = constante de decaimento ($10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$); Fm = Fator de emissão de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Estc = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); CP1 = componente principal 1; PLA = porosidade livre de água (%); Um = umidade do solo (%); CP2 = componente principal 2; CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}).

No estudo da área experimental PAD, o CP1 explicou 42,65% da variância total dos dados usados, e o CP2 explicou 26,64%, totalizando 69,29%, conforme a Figura 14. As variáveis com maior poder discriminante, isto é, aquelas que mais influenciaram o CP1 foram a macroporosidade do solo (Macro) e a PLA, com correlação negativa de $r = -0,96$ e $r = -0,92$, respectivamente, indicando uma conjunta

ação dos atributos ligados à porosidade do solo preenchida com ar. O CP2 mostrou significativa correlação positiva para as variáveis CTC ($r = 0,76$) e P ($r = 0,71$). Assim como os casos anteriores, a análise de agrupamentos na Figura 14 mostra a formação de um contraste entre os pontos de altas (A) e baixas (B) emissões. Nas análises dos componentes principais, que foram constatados para os atributos do solo que mais influenciaram no processo de Fm, foram a Macro e a PLA, evidenciando que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA e a Macro. Já para os valores de B, tem-se uma correlação positiva com P e CTC, sendo que, para os pontos de maior emissão tem-se alta Macro e PLA, já para menores valores de Fm observa-se maiores valores de CTC e P.

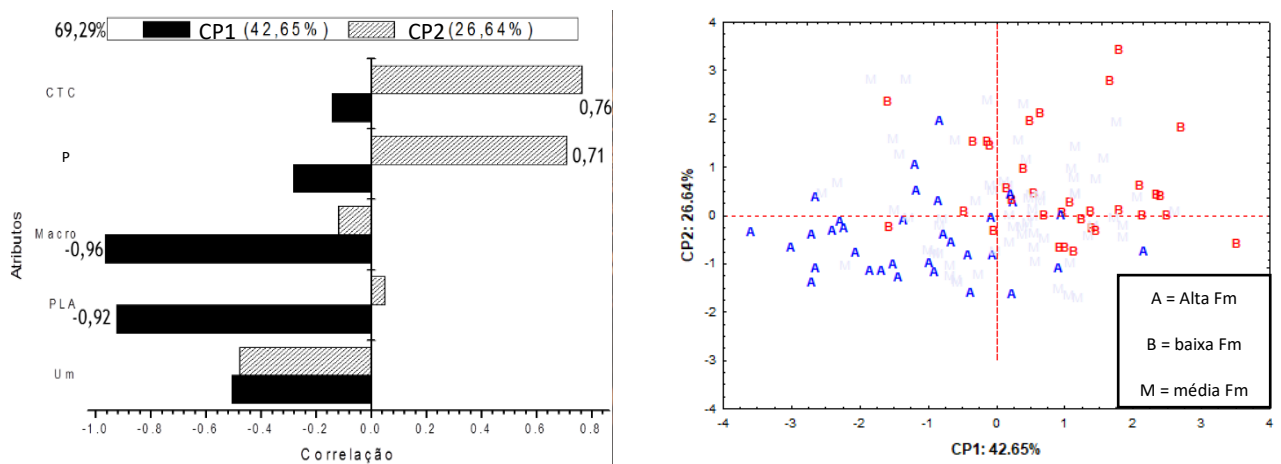


Figura 14: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO₂ no solo para PAD.

De forma semelhante ao que aconteceu nas áreas estudadas anteriormente, o CP2 pode ser determinado como um indicativo de fertilidade do solo, mostrada pela capacidade de troca de cátions e o teor de fósforo disponível no solo. Os valores do fator k para essa área de estudo ficaram entre 1 e $2,40 \times 10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$, com estoque de carbono (Estc) variando de $6,2$ a $10,2 \text{ Mg ha}^{-1}$. Na Figura 15, na região I observa-se a associação espacial dos pontos com valores maiores do fator k , da emissão de CO₂ (Fm) e valores menores de Estc, sendo assim considerada uma região de emissão de carbono. Já a região III indicou valores maiores de estoques de carbono

e menores de k , apontando que essa região tem potencial para acumular carbono nessa área.

Quando se definem duas zonas de manejo específico do solo, vê-se que os resultados da interpretação da correlação entre os padrões espaciais dos mapas de variabilidade (Tabela 4) mostram uma correlação significativa e negativa do fator k com CP1, para os quadrantes 1 e 3, respectivamente. Dessa forma, os valores maiores de CP1 estavam ligados aos menores valores de PLA e de Macro do solo, onde essas variáveis resultaram na variabilidade espacial de Fm nesta área de estudo, especialmente naquelas associadas ao processo de transporte do gás no interior do solo. Já para o CP2, não foram observados significativos valores de correlação entre os quadrantes (Tabela 4).

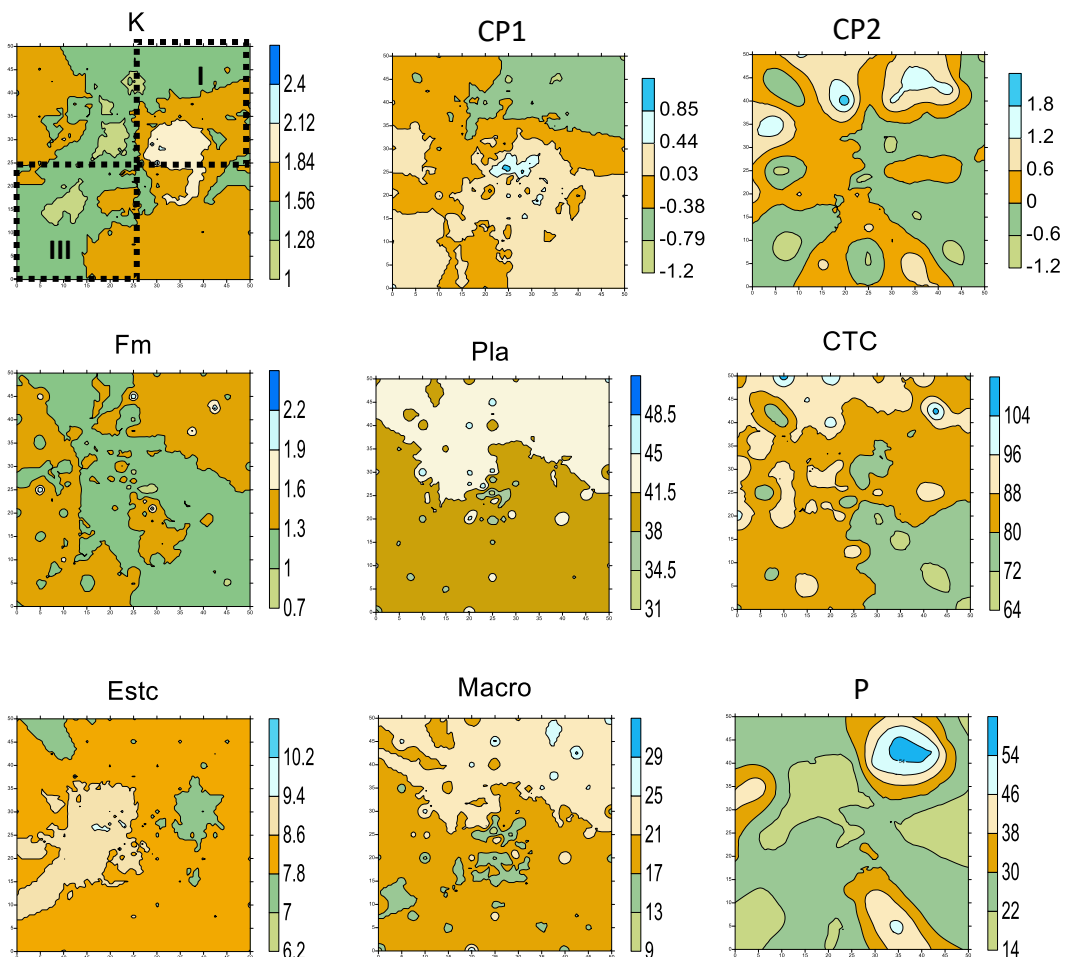


Figura 15: Padrões espaciais dos atributos de PAD de k , Fm, Estc, Pla, Macro CTC e P para o CP1 e CP2.

k = constante de decaimento ($10^{-3} \text{ tempo}^{-1}$); Fm = Fator de emissão de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Estc = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); CP1 = componente principal 1; PLA =

porosidade livre de água (%); Macro = macroporosidade do solo (%); CP2 = componente principal 2; CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}).

No estudo da área experimental APT, o CP1 explicou 40,57% da variância total dos dados usados, ao passo que o CP2 explicou 23,66%, totalizando 64,23% (Figura 16). As variáveis com maior poder discriminante, isto é, aquelas que mais influenciaram o CP1, foram a Um, com correlação negativa ($r = -0,98$), e a PLA, com correlação positiva ($r = 0,97$). Logo, o CP2 mostrou correlação negativa para as variáveis CTC ($r = -0,70$) e P ($r = -0,69$), mostrando conjunta ação desses dois atributos do solo (Figura 16). Na análise de agrupamentos, observa-se a formação de uma região de sobreposição, localizada mais ao centro, com pontos de altas (A) e baixas (B) emissões. Nas análises dos componentes principais foi observado que os atributos dos solos que mais influenciaram no processo de Fm foram a PLA e a Um, semelhante à MOT e GUA. Porém, o fator que foi determinante para a variação da estabilidade do carbono no solo, foram os atributos químicos CTC e P, evidenciando que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA, CTC e P, e negativamente com Um, sendo que, para os pontos de maiores emissões, tem-se alta PLA, CTC e P; já para menores valores de Fm, observam-se maiores valores de Um.

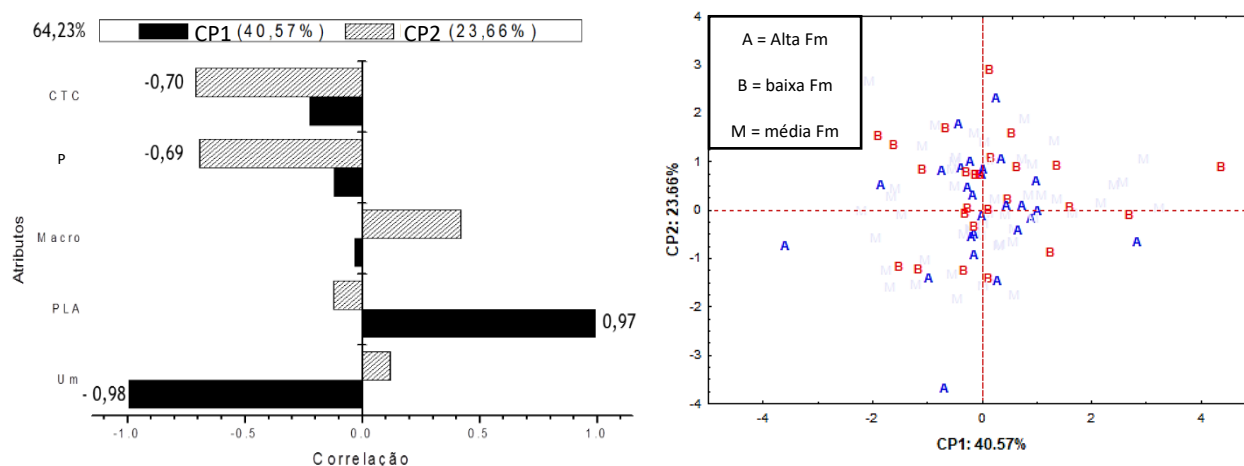


Figura 16: Análise dos componentes principais indicando o coeficiente de correlação entre os componentes principais e as variáveis em três classes de grupos de emissão de CO_2 no solo para APT.

Os valores do k na área de estudo de APT ficaram entre de 2 e $3,15 \times 10^{-3}$ tempo⁻¹, com $Estc$ variando de 5,8 a $7,05 \text{ Mg ha}^{-1}$. A região IV do mapa de padrão espacial do k mostrou, dentro da área estudada, uma zona de acúmulo de carbono (Figura 17), visto que os mapas de variabilidade apresentam menores valores de k , ligados aos maiores valores de estoque de carbono na área. Já a região II aponta maiores valores do fator k , isto é, uma região de pouca estabilidade do carbono, ligados aos valores menores de $Estc$ na área. A região tem potencial para ser fonte de emissão de carbono para a atmosfera. No entanto, a região I foi considerada intermediária quando comparadas essas duas regiões, pois mostrou valores menores de k ligados às emissões maiores e valores maiores de estoque de carbono, apresentando a influência de outros atributos do solo.

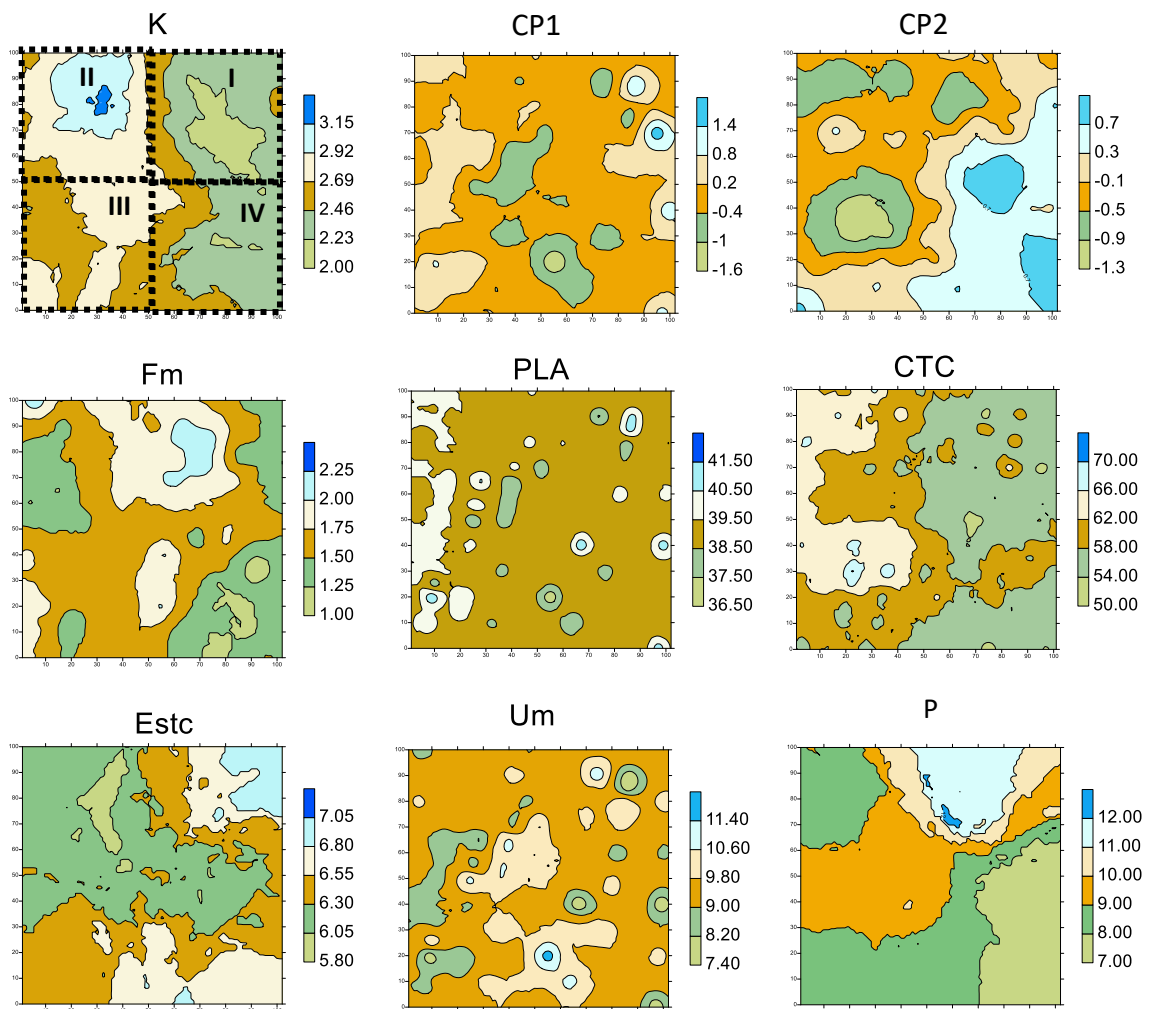


Figura 17: Padrões espaciais dos atributos de APT de k , Fm , $Estc$, Pla , Um , CTC e P para o $CP1$ e $CP2$.

k = constante de decaimento (10^{-3} tempo $^{-1}$); F_m = Fator de emissão de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Estc = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); CP1 = componente principal 1; PLA = porosidade livre de água (%); U_m = umidade do solo (%); CP2 = componente principal 2; CTC = capacidade de troca de cátions ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$); P = fósforo disponível (mg dm^{-3}).

A avaliação da correlação entre os padrões de variabilidade (Tabela 4) mostrou correlação negativa e significativa para a CP1 no primeiro quadrante, isto é, na região I. Logo, valores maiores de k estão ligados aos valores menores de CP1 , que mostram os valores maiores de umidade do solo nessas áreas. Diferentemente dos demais resultados, para essa região, a umidade do solo foi o fator limitante à atividade microbiana.

Para os padrões espaciais, o k foi significativamente correlacionado aos padrões de CP2 , negativo para os quadrantes 1, 3 e 4; sendo assim; a zona de manejo denominada região III (Figura 17), onde os valores maiores de CP2 apontam as regiões de maior fertilidade do solo, mostrada pelos altos valores de P e CTC , e conseqüentemente, valores maiores de fator k , estabilidade do carbono baixa no solo. Já as regiões I e IV apresentaram valores maiores de scores de CP2 , de fertilidade do solo menor e menores valores de k , isto é, regiões de maior estabilidade do carbono no solo (menor emissão de CO_2 para a atmosfera).

7 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que dentro de uma mesma área, existiram mudanças nos padrões espaciais do fator de decaimento do carbono no solo, ocorrendo em áreas de cana-de-açúcar regiões com potencial para o acúmulo ou o sequestro de carbono no solo.

Foi observado que os atributos físicos e químicos do solo estão ligados ao processo de transporte e à produção de CO₂ no solo, respectivamente. Os coeficientes de correlação significativos foram demonstrados entre os componentes principais, e os mapas do fator k, em todas as áreas estudadas, onde os atributos físicos do solo foram os principais responsáveis pela emissão de CO₂, por meio da perda de carbono do solo em áreas de cana-de-açúcar, no sistema de cana crua. Já para a área de cana-de-açúcar no município de Aparecida do Tabuado - MS, os fatores químicos do solo foram os principais responsáveis pelas alterações nos padrões espaciais da estabilidade do carbono no solo, em contraste com os atributos físicos observados nas áreas do Estado de São Paulo.

A análise de componentes principais indicou a formação de grupos, mostrando um contraste entre os pontos de altas (A) e baixas (B) emissões, em todas as regiões estudadas, em detrimento da utilização dessa variável na análise, exceto para a área de Aparecida do Tabuado (MS). Quando comparados os atributos do solo com a emissão de CO₂, ficou evidenciado que os valores de maiores emissões representados por A estão correlacionados positivamente com a PLA, CTC, P e negativamente com Um, sendo que, para os pontos de maior emissão tem-se alta PLA, CTC e P. Já para menores valores de Fm, observam-se maiores valores de Um. Dessa forma, seria possível determinar zonas de manejo específico, determinadas pelas relações entre a estabilidade do carbono no solo e as componentes principais, visando a melhorar o rendimento das práticas agrícolas, principalmente as que estão ligadas ao preparo do solo, ao uso de insumos agrícolas, ao acúmulo de MO na forma de palhada, ao manejo hídrico e à umidade do solo, visando a promover a maior conservação e sequestro de carbono no solo.

Contudo, para o isolamento dos fatores, são necessários novos estudos com o tempo de conversão do canavial para o sistema de cana crua, com a longevidade do

canavial, pontos que interferem nos processos de acúmulo de carbono no solo, e estudos que comparem a qualidade desse carbono, considerando o grau de humificação da matéria orgânica do solo.

8 REFERÊNCIAS

ABC (2015) **Agricultura de Baixo Carbono**. Disponível em <<http://www.agricultura.sp.gov.br/media/13376-plano-abc-publicacao.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Allaire SE, Lange SF, Lafond JA, Pelletier B, Cambouris AN, Dutilleul P (2012) Multiscale spatial variability of CO₂ emissions and correlations with physico-chemical soil properties. **Geoderma**, 170:251-260.

Baird C e Cann M. **Química Ambiental**. Tradução de Marco Tadeu Grassi, Márcia Matiko Kondo, Maria Cristina Canela e Felix José Nonnenmacher. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.

Ball BC e Smith KA (1991) **Gas movement**. In: Smith KA e MULLINS CE (Ed.). **Solis analysis: physical methods**, New York: Marcel Dekerp. p. 511-549.

Bicalho ES, Panosso AR, Teixeira DDB, Miranda JGV, Pereira GT, La Scala N (2014) Spatial variability structure of soil CO₂ emission and soil attributes in a sugarcane area. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 189:206-215.

Bicalho ES (2016) **Soil greenhouse gas emissions and their relations to soil attributes in a sugarcane area**. 80 f. Dissertação de Doutorado em Agronomia, UNESP Jaboticabal.

Brito LF, Marques JRJ, Pereira GT, La Scala N (2010) Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. Campinas, **Bragantia**, 69:19–27.

Brito LF, Marques JRL, Pereira GT, Souza ZM, La Scala JRN (2009) Soil CO₂ emission of sugarcane field as affected by topography. Piracicaba, **Scientia Agricola**, 66:77-83.

Bruce, JP, Frome, Haites E, Janzen H, Lal R (1999) Carbon sequestration in soils. Ankeny, **Journal of Soil and Water Conservation**, 54:382–389.

Burrough PA (1987) **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon, 193 p.

Carvalho JLN (2010) Greenhouse gas mitigations in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, 67.

Cerri CC, Bernoux M, Cerri CEP, Lal R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: Lal R, Cerri CC, Bernoux M, Etchevers JD, Cerri CEP (Ed.) (2006) Carbon sequestration in soils of Latin America. New York: **The Haworth Press**, 1:41-47.

Cerri CC, Maia SMF, Galdos MV, Cerri CEP, Feigl BJ, Bernoux M (2009) Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. Piracicaba, **Scientia Agricola**, 66:831-843.

Cerri CEP, Galdos MV, Carvalho JLN, Feigl BJ, Cerri CC (2013) Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. Piracicaba, **Scientia Agricola**, 70:361–368.

CONAB (2017) **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília. Disponível em < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Corrêa AR, Montanari R, Laura VA, Melotto AM, Silva ENSD, Pellin DMP, Santos ASD (2015) Aspects of the silvopastoral system correlated with properties of a typic quartzipsamment (entisol) in Mato Grosso do Sul, BRAZIL. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:438–447.

Dasselaar AVPV, Corre WJ, Prieme A, Klemedtsson AK, Weslien P, Stein A, Klemedtsson L, Oenema O (1998) Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. Madison, **Soil Science Society America Journal**, 62:810-817.

Denman KL, Brasseur G, Chidthaisong A, Ciais P, Cox PM, Dickinson RE, Hauglustaine D, Heinze C, Holland E, Jacob D, Lohmann U, Ramachandran S, Silva Dias PL da, Wofsy SC, Zhang X (2007) Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Ed.). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 499-588.

Duiker SW e Lal R (2000) Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in Central Ohio. Amsterdam, **Soil and Tillage Research**, 54:21-30.

EMBRAPA (1997) **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPQ, p. 212.

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

Epron D, Nouvellon Y, Roupsard O, Mouvondy W, Mabilia A, Saint-Andre L, Joffre R, Jourdan J, Bonnefond JM, Berbigier P, Hamel O (2004) Spatial and temporal variations of soil respiration in a eucalyptus plantation in Congo. *Forest, Ecology and Management* 202:149-160.

Esrl (2016) Recent monthly average Mauna Loa CO₂. **Earth system research**. Disponível em <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Esrl (2018) Trends in Atmospheric Methane. **Earth system research**. Disponível em <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/>. Acesso em: 26 set. 2018.

Eswaran H, Berg EVD, Reich P (1993) Organic carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**, 57:192-194.

Fang C, Moncrieff JB, Gholz HL, Clark KL (1998) Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. Dordrecht **Plant and Soil**, 205: 135-146.

Figueiredo CC, Resck DVS, Carneiro MAC (2010) Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native Cerrado. Viçosa-MG, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:907-916.

Figueiredo EB, Panosso AR, Reicosky DC, La Scala N (2014) Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum spp.*) replanting in southern Brazil. Chichester, **Global Change Biology**, 7:316–327.

Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC, Myhre G, Nganga J, Prinn R, Raga G, Schulz M, Van Dorland R (2007) Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (Ed.). Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press **Cambridge**, p. 129-234.

Galdos MV, Cerri CC, Cerri CEP (2009) Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. Amsterdam, **Geoderma**, 153:347-352.

Gilbert N (2012) One-third of our greenhouse gas emissions come from agriculture. London, **Nature**.

Global Climage Change. Disponível em <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Hair JF, Tatham RL, Anderson RE, Black WC (2005) trad. Adonai Schlup Sant'Anna e Anselmo Chaves Neto. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 5^a ed.

Herbst M, Prolingheuer N, Graf A, Huisman JA, Weihrmüller L, Vandeborgh J (2009) Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. Madison, **Vadose Zone Journal**, 8:762–771.

Huijbregts CJ (1975) Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS JC, McCULLAGH MJ (Eds.) Display and analysis of spatial data. New York: **Journal Wiley**, 38-53.

Iamaguti JL, Moitinho MR, Teixeira DD, Bicalho EDS, Panosso AR, La Scala N (2015) Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. Campina Grande, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19:497–504.

Intergovernmental 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, United Kingdom and New York, NY, USA, **Cambridge**.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change (2014) **Mitigation. Contribution of Working Group III. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**.

Isaaks EH e Srivastava RM (1989) **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, p. 561.

Kaiser HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. New York, **Psychometrika**, 23:187-200.

Kirschbaum, MUF (2000) Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? Dordrecht, **Biogeochemistry**, 48:21–51.

Konda R, Ohta S, Ishizuka S, Heriyanto J, Wicaksono A (2010) Seasonal changes in the spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from Acacia mangium plantation soils in Indonesia. Oxford, **Soil Biology & Biochemistry**, 42:1512–1522.

Kosugi Y, Mitani T, Itoh M, Noguchi S, Tani M, Matsuo N, Takanashi S, Ohkubo S, Nik AR (2007) Spatial and temporal variation in soil respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, 147:35-47.

La Scala Jr N, Mendonça ES, Souza JJ, Panosso AR, Simas FNB, Schaefer CEGR (2010) Spatial and temporal variability in soil CO₂ -C emissions and relation to soil temperature at King George Island, Maritime Antarctica. **National Institute of Polar Research**, 4:479-487.

La Scala N, Bolonhezi D, Pereira GT (2006) Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, 91:244-248.

La Scala N, Lopes A, Spokas K, Bolonhezi D, Archer DW, Reicosky DC (2008) Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, 99:108-118.

La Scala N, Marques JRJ, Pereira GT, Corá JE (2000) Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. Oxford, **Soil Biology and Biochemistry**, 32:1459–1462.

La Scala N, Panosso AR, Pereira GT, Gonzalez AP, Miranda JGV (2009) Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, 23:353-358.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Washington, **Science**, 304:1523-1627.

Lamb A, Green R, Bateman I, Broadmeadow M, Bruce T, Burney J, Goulding K (2016) The potential for land sparing to offset greenhouse gas emissions from agriculture. London, **Nature Climate Change**.

Leite VDPO **Transporte de CO₂ no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Rio Claro, 2010. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Linn DM e Doran JW (1984) Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. Madison, **Soil Science Society of American Journal**, 48:1267-1272.

MACHADO PLOA (2005) Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. São Paulo, **Química Nova**, 28:329–334.

Marcelo AV, Cora JE, La Scala N (2012) Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:45–50.

MCT (2004) **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Coordenação Geral de Mudanças Globais de Clima**, Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, DF, Brasil, p. 271.

Meir P, Grace J, Miranda A, Lloyd J (1996) Soil respiration in Amazônia and in cerrado in central Brazil. Amazonian Deforestation and Climate. eds. J. C. H. Gash, C. A. (eds.), Chichester, UK, **Amazon Deforestation and Climate**, John Wiley and Sons, 319-330.

Melillo JM, Steudler PA, Aber JD, Newkirk K, Lux H, Bowles FP, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S (2002) Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Washington, **Science**, 298:2173-2176.

Moitinho MR (2017) **Variabilidade da emissão de CO₂ do solo sob diferentes manejos em áreas de cana-de-açúcar**. 126 f. Dissertação (Doutorado em Agronomia) – Unesp, Jaboticabal.

Moitinho MR, Padovan MP, Panosso AR, La Scala N (2013) Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. Viçosa-MG, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1720-1728.

Montanari R, Carvalho MP, Andreotti M, Dalchiavon FC, Lovera LH, Honorato MAO (2010) Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. Viçosa-MG, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1811–1822.

N₂O LEVELS. Disponível em < <http://www.n2olevels.org/>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Panosso AR, Marques J, Milori DMBP, Ferraudo AS, Barbieri DM, Pereira GT, La Scala N (2011) Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. Amsterdam, **Soil Tillage Research**, 111:190–196.

Panosso AR, Marques JRJ, Pereira GT, La Scala N (2009) Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slashand-burn managements. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, 105:275–282.

Panosso AR, Perillo LI, Ferraudo AS, Pereira GT, Miranda JGV, La Scala JrN (2012) Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, 124:8-16.

Parkin TB (1993) Spatial variability of microbial processes in soil – a review. Madison, **Journal of Environmental Quality**, 22:409–417.

Parton WJ, Woomeer PL, Martin A (1994) Modeling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems. In: WOOMEER PL, SWIFT MJ (Eds). The biological management of tropical soil fertility. **Chichester : John Wiley & Sons**, 171-188.

PBMC (2013) Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao **Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** – Sumário Executivo GT1. PBMC.

Pivetta M (2013) Extremos do clima. São Paulo, **Revista Pesquisa FAPESP (online)**, 16p.

Porter Jr, Xie L, Challinor AJ, Cochrane K, Howden SM, Iqbal MM, Lobell DB, Travasso MI (2014) Food security and food production systems. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma

B, Kissel ES, Levy AN, Maccracken S, Mastrandrea PR, White LL (Eds.]). United Kingdom and New York, Cambridge University Press, **Cambridge**, 485–533.

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

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

Rayment MB e Jarvis PG (2000) Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. Oxford, **Soil Biology and Biochemistry**, 32:35-45.

Razafimbelo T, Barthès B, Larré-Larrouy MC, De Luca EF, Laurent JY, Cerri CC, Feller C (2006) Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. Amsterdam, **Agriculture Ecosystem & Environment**, 115: 285–289.

Rochette P, Desjardins RL, Pattey E (1991) Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. Ottawa, **Canadian Journal of Soil Science**, 71:189-196.

Salton JC e Mielniczuk J (1995) Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:313–319.

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

Schwendenmann L, Veldkamp E, Brenes T, O'brien JJ, Mackensen J (2003) Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. Dordrecht, **Biogeochemistry**, 64:111-28.

SEEG (2016) **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**. Disponível em <<http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg/>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Silva EF, Moitinho MR, Teixeira DDB, Pereira GT, La Scala N (2013) Soil CO₂ emission associated with liming in area of conversion of orange for sugarcane in Jaboticabal, **Engenharia Agrícola**, 34: 885–898.

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

Six J, Frey SD, Thies RK, Batten KM (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. Madison, **Soil Science Society America Journal**, 70:555–569.

Smart DR e Peñuelas J (2005) Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. Amsterdam, **Applied Soil Ecology**, 28:247-57.

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

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, Mccarl B, Ogle S, O'mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, Mcallister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J (2008) Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Rockville*, **Biological Sciences**, 363:789–813.

Souza ZM, Marques JJ, Pereira GT, Bento MJC (2004) Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de- -açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 28:51-58.

Teixeira DB, Bicalho ES, Panosso AR, Perillo LI, Iamaguti JL, Pereira GT, La Scala N (2012) Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. Viçosa-MG, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 36:1466-1475.

Teixeira DB, Bicalho ES, Cerri CEP, Panosso AR, Pereira GT, La Scala JRN (2013) Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO₂ emissions in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 167:33-37.

Teixeira DDB, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, La Scala N (2011) Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. Dordrecht, **Plant and Soil**, 345:187–194.

Thornton P (2012) **Recalibrating food production in the developing world: global warming will change more than just the climate**. CCAFS Policy Brief n. 6. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).

Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort BL (2011) Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Washington-DC, **Proceedings of the**

National Academy of Sciences of the United States of America, 108:20260–20264.

Trangmar BB, Yost RS, Uehara G (1985) Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. San Diego, **Advances in Agronomy**, 38:45-94.

Tsai SM, Baraibar AVL, Romani VLM (1992) Efeitos de fatores físicos e químicos sobre os microrganismos do solo umidade e aeração. In: CARDOSO EJBN, TSAI SM, NEVES MCP (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, p. 60–89.

Ussiri AN e Lal R (2009) Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. Amsterdam, **Soil & Tillage Research**, 104:39-47.

Val JE, Ferraudo AS, Bezerra LAF, Corrado MP, Lobo RB, Freitas MAR, Paneto JCC (2008) Nellore bull selection alternatives using multiple traits of economic importance. **Arquivo Brasileiro De Medicina Veterinária E Zootecnia**, 60:705-712.

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

Webster R e Oliver MA (1990) **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, p. 316.

Xie SP, Deser C, Vecchi GA, Collins M, Delworth TL, Hall A, Watanabe M (2015) Towards predictive understanding of regional climate change. London, **Nature Climate Change**, 5:921–930.

Xu M e Qi Y (2001) Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. Oxford, **Global Change Biology**, 7:667-677.

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

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A constante de decaimento pode ser dependente dos atributos do solo e também usada como um indicativo no processo de emissão de CO₂, implicando diretamente na escolha do manejo específico do solo nas áreas agrícolas. Atrelado a isso, as reduções nas emissões adicionais de CO₂ do solo podem contribuir para mitigar os efeitos sobre a temperatura na Terra, diminuindo as oscilações nas precipitações e melhorando o planejamento das atividades agrícolas.

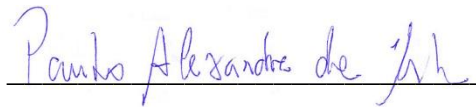
Os resultados mostram que, dentro de uma mesma área, existiram mudanças nos padrões espaciais do k , ocorrendo em áreas de cana-de-açúcar regiões com potencial para acúmulo ou emissão adicional de carbono. O uso de mapas gerados pelos componentes principais e a análise de agrupamentos indicaram que os atributos físicos do solo foram responsáveis pelas regiões de maiores emissões de CO₂, por meio da perda de carbono do solo em áreas de cana-de-açúcar no sistema de cana crua.

Contudo, a validação de uma metodologia para a medição da emissão de CO₂ e sua classificação em níveis de classes seriam muito interessantes, pois essa técnica poderia ser expandida para outros sistemas produtivos, e a partir desses dados gerados, usá-los como mais um indicativo de escolha para o melhor manejo das culturas, a fim de proporcionar o maior rendimento no uso dos insumos agrícolas, visando a obter menores emissões de CO₂ para a atmosfera e a diminuição dos impactos climáticos sobre a Terra.

Jaboticabal, 27 de setembro de 2018



Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso
Orientador



Paulo Alexandre da Silva
Orientando