



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANA STELLA FREIRE GONÇALVES

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTOQUE DE CARBONO EM FUNÇÃO
DA CALAGEM E DO PREPARO DO SOLO NA CANA-DE-AÇÚCAR**

Botucatu

2020

ANA STELLA FREIRE GONÇALVES

**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTOQUE DE CARBONO EM FUNÇÃO
DA CALAGEM E DO PREPARO DO SOLO NA CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor(a) em
Agronomia (Agricultura).

Orientador: Dr. Juliano Carlos Calonego

Coorientadora: Dra. Patrícia Pereira Dias

Botucatu

2020

G635e Gonçalves, Ana Stella Freire
Emissões de gases de efeito estufa e estoque de carbono
em função da calagem e do preparo do solo na cana-de-açúcar
/ Ana Stella Freire Gonçalves. -- Botucatu, 2020
150 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Juliano Carlos Calonego
Coorientadora: Patrícia Pereira Dias

1. Cana-de-açúcar. 2. Gases estufa. 3. Sequestro de
carbono. 4. Solos correção. 5. Preparo do solo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

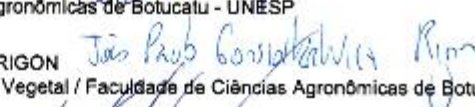
TÍTULO DA TESE: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA E ESTOQUE DE CARBONO EM FUNÇÃO DA CALAGEM E DO PREPARO DO SOLO NA CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: ANA STELLA FREIRE GONÇALVES
ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO
COORIENTADORA: PATRICIA PEREIRA DIAS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO 
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL 
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. JOÃO PAULO GONSIORKIEWICZ RIGON 
Pós-Doutorando - Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Pesquisadora Dr.^a RAFFAELLA ROSSETTO 
Descentralização do Desenvolvimento / APTA - Polo Regional de Desenvolvimento Tecnológico do Centro Sul

Prof. Dr. EDUARDO MARIANO 
Pós-Doutorando - Centro de Energia Nuclear na Agricultura / Universidade de São Paulo

Botucatu, 08 de outubro de 2020

DEDICO

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida,

pela proteção durante toda a minha trajetória de vida;

Aos meus pais, Léia e Aluízio e à minha irmãzinha Aline,

pelo amor incondicional, incentivo e

por serem a minha fortaleza;

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA/UNESP de Botucatu pela oportunidade de cursar o doutorado e pela excelência no ensino;

Ao meu orientador e grande exemplo profissional, Dr. Juliano Carlos Calonego, por todo ensinamento, presteza e sabedoria transmitidos ao longo desses quatro anos, e por todo incentivo e suporte para o desenvolvimento deste projeto de pesquisa;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos (Processo Fapesp 2017/18988-3);

À minha coorientadora Patrícia, pela colaboração na execução do projeto e análise dos dados;

Aos demais professores da faculdade, em especial aos do Departamento de Produção Vegetal (DPV), por todo conhecimento compartilhado ao longo destes anos;

Aos funcionários do DPV, técnicos de laboratório e as secretárias, sempre tão gentis, pela colaboração, atenção e prestação de serviços;

Aos amigos que fiz na pós-graduação, pelo companheirismo e incentivo, em especial à Erilene, que sempre esteve presente nas minhas coletas de campo; ao Carlos Antônio, pelo incentivo constante aos meus estudos; e ao João Paulo Rigon, pela ajuda nas análises de gases;

À toda equipe da cana: Tiara, Murilo, Daniele, Patrícia e Marcela, que foram essenciais na coleta de dados e amostragens em campo;

À todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, e que me mantiveram de pé ao longo desta jornada...

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A crescente mecanização nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar eleva a compactação do solo, reduzindo o crescimento radicular, a produtividade e a longevidade do canavial. O preparo profundo do solo em faixa e controle de tráfego podem resultar no melhor enraizamento, aproveitamento de água e nutrientes, com conseqüente aumento da produção de biomassa, principalmente quando acompanhado de calagem adequada. Contudo, essa técnica altera as entradas e as saídas de carbono (C) no solo, podendo afetar os estoques e balanço de C no sistema solo-planta-atmosfera. Objetiva-se com este trabalho avaliar, em área de cultivo de cana-planta, o efeito dos diferentes preparos de solo e dose de calcário aplicados, bem como a interação entre esses fatores, na resposta ao estoque de C do solo, na qualidade da matéria orgânica (MOS) formada, nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e na produtividade de colmos (TCH) e produção de açúcar, estimando o balanço de C no sistema solo-planta-atmosfera. Para tanto, foi realizado um experimento em solo de textura média, utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas por diferentes sistemas de preparo do solo (convencional, profundo e profundo modificado) e as subparcelas, por doses de calcário (0, 1, 2 e 3 vezes a dose recomendada). Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e comparados pelo teste LSD ($p \leq 0,05$) no caso das variáveis qualitativas, e por meio de análise de regressão, no caso de efeito das doses de calcário. Observou-se que o sistema de preparo profundo em faixas, com a aplicação de doses de calcário mais elevada do que a recomendada, promove uma maior emissão de CO_2 , mas em contrapartida garante um maior aporte de C via biomassa aérea e radicular, além de maior produtividade do canavial, o que conseqüentemente, reduz a emissão relativa de GEE. Logo, estudos envolvendo o sistema de preparo profundo em faixas, aliado ao ajuste das recomendações das doses calcário para o Estado de São Paulo, pode ser uma estratégia para sequestrar C em áreas de cultivo de cana-planta.

Palavras-chave: *Sacharum spp.* Controle de tráfego. Dióxido de carbono. Metano. Óxido nitroso. Calcário.

ABSTRACT

The increase in mechanization in the sugarcane cultivation areas increases soil compaction and reduces root growth, productivity, and longevity of the sugarcane field. The deep soil preparation in planting band and traffic control can result in better rooting and water and nutrient use with a consequent increase in biomass production, especially when accompanied by adequate liming. However, this technique alters carbon (C) input and output in the soil and can affect the C stock and balance in the soil–plant–atmosphere system. In an area of cane-plant cultivation, this study aimed to evaluate the effect of different soil preparations and dose of lime application, as well as an interaction between these factors, in the response to the soil C stock, in the organic matter (MOS) formed quality, in the greenhouse gases emissions (GHG) and in stalk productivity (TCH) and sugar production, estimating the C balance in the soil-plant-atmosphere system. To this end, an experiment was carried out on medium textured soil, using a randomized block design, in a split plot scheme, with four replications. The plots consisted by different soil tillage systems (conventional tillage, deep tillage and deep tillage modified) and the subplots by limestone doses (0, 1, 2 and 3-times the recommended dose). The data were subject to variance analysis ($p \leq 0.05$) and compared by the least significant difference (LSD) test ($p \leq 0.05$) in the case of qualitative variables and by means of regression analysis in the case of the limestone dose-related effect. Deep soil preparation in the planting band in conjunction with application of lime doses higher than the recommended values promotes a higher CO₂ emission, but on the other hand guarantees a greater C supply via aerial and root biomass, ensuring greater cane field productivity and consequently, less relative GHG. Therefore, studies involving the deep banded preparation system, combined with the adjustment of limestone dose recommendations for the State of São Paulo, may be a strategy for sequestering C in plant-cane cultivation areas.

Keywords: *Sacharum spp.* Traffic control. Carbon dioxide. Methane. Nitrous oxide. Limestone.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1 - Localização da área experimental na Usina Barra Grande – Grupo Zillor, no município de Lençóis Paulista - SP, Brasil.45
- Figura 2 - Precipitação pluviométrica e temperaturas mínima e máxima entre janeiro de 2017 e julho de 2018 registradas na Usina Barra Grande - Grupo Zilor, Lençóis Paulista - SP.46
- Figura 3 - Representação do equipamento “Penta”, com a presença de haste subsoladora e enxada rotativa, para realização do preparo profundo (A), com a respectiva aplicação de calcário apenas na faixa de plantio (B).....49
- Figura 4 - Detalhes do procedimento para fracionamento físico da matéria orgânica do solo. A: Agitação das amostras em agitador horizontal. B: Separação das frações, em peneira de malha de 0,053 mm. C: Secagem em estufa a 50°C, em potes de alumínio, da fração particulada retida. D: Fração retida após moagem, para leitura em analisador elementar automático.....52
- Figura 5 - Quociente metabólico (qCO₂) (A) e teor de CBMS (B) avaliados na camada de 0,00 a 0,20m de profundidade, em função de diferentes preparos de solo e doses de calcário, aplicados em um Latossolo Vermelho de textura média, com a cultura da cana-de-açúcar.76
- Figura 6 - Análise de regressão para a produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função da dose de calcário aplicada e do preparo de solo utilizado.78

CAPÍTULO 2

| | |
|---|-----|
| Figura 1 - Representação das câmaras estáticas para coleta das amostras de gases de efeito estufa. | 94 |
| Figura 2 - Posicionamento das câmaras em cada parcela para avaliação das emissões de gases de efeito estufa..... | 95 |
| Figura 3 - Frascos de vidro de 30 mL, vedados com lacres de borracha, utilizados para o armazenamento dos gases CO ₂ , N ₂ O e CH ₄ | 96 |
| Figura 4 - Detalhes das câmaras estáticas instaladas em campo para a coleta de gases. A: Seringa acoplada à válvula, para realização da coleta. B: Pressurização de gases da câmara para a seringa. C: Transferência de gases da seringa para o frasco. Lençóis Paulista – SP, 2017. | 97 |
| Figura 5 - Dados médios para temperatura e umidade do solo por ocasião das 27 épocas de coletas de gases de efeito estufa..... | 99 |
| Figura 6 - Porosidade ocupada por água (POA) na camada de 0,00- 0,05 m, ao longo do cultivo de cana planta, nos preparos de solo: convencional, sem aplicação (A) e com aplicação (B) de calcário, e, em preparo profundo com utilização do penta, sem aplicação (C) e com aplicação (D) de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média..... | 100 |
| Figura 7 - Detalhes do procedimento para determinação do carbono residual em pós-colheita. A: Área em pós-colheita onde foram coletadas as amostras. B: Amostra após moagem em moinho elétrico tipo “Willey” com malha de 1 mm. C: Analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS)..... | 101 |
| Figura 8 - Demonstração da coleta de raízes na área não trafegável (canteiro) e na área de tráfego do maquinário agrícola, nas três distâncias (D0, D25 e D70) e em quatro profundidades. | 102 |
| Figura 9 - Detalhes do procedimento para determinação do carbono aportado pelo sistema radicular. A: Coleta das amostras de raízes da cana-de-açúcar pelo | |

método do trado. B: Separação das amostras após passagem em peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh). C: Amostra após secagem em estufa a 60°C para determinação da matéria-seca e teor de carbono. D: Preparo de amostras para leitura em analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS). 103

Figura 10 - Conteúdo de água no solo na camada de 0,00- 0,20 m, ao longo do cultivo de cana planta, nos preparos de solo: convencional, sem aplicação (A) e com aplicação (B) de calcário, e, em preparo profundo com utilização do penta, sem aplicação (C) e com aplicação (D) de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2018. AA= armazenamento de água; CC = capacidade de campo; PMP= ponto de murcha permanente. 106

Figura 11 - Dados médios coletados de março de 2017 a julho de 2018, para a temperatura de um Latossolo Vermelho de textura média..... 107

Figura 12 - Fluxo de CO₂ (g m⁻² dia⁻¹) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹). 108

Figura 13 - Fluxo de CH₄ (mg m⁻² dia⁻¹) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹). 112

Figura 14 - Resistência mecânica à penetração (MPa) depois da colheita da cana-de-açúcar, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do preparo do solo e presença de calcário.....119

| | |
|--|-----|
| Figura 15 - Fluxo de N ₂ O (mg m ⁻² dia ⁻¹) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário (5,2 Mg ha ⁻¹). | 114 |
| Figura 16 - Macroporos em área de cana-de-açúcar, submetida aos preparos convencional (PC) e profundo (PP), na presença (com) ou ausência de calcário (sem), em um Latossolo Vermelho de textura média. | 115 |
| Figura 17 - Emissão Relativa de Carbono (ERC) em área de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em um Latossolo Vermelho de textura média..... | 115 |
| Figura 18 - Resistência média à penetração de raízes nas camadas de 0,00 a 0,70m de profundidade, em áreas de canteiro (A) e de tráfego do maquinário agrícola (B), com a cultura da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média. | 119 |
| Figura 19 - Porcentagem de distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar nas diferentes profundidades de coleta, de 0,00 a 0,80 metros de profundidade, em um Latossolo Vermelho de textura média..... | 120 |
| Figura 20 - Distribuição média da biomassa radicular de cana-de-açúcar aportada no perfil de 0,00 a 0,80m de profundidade para os preparo profundo (A) e convencional (B), com e sem a utilização de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média..... | 121 |
| Figura 21 – Compartimentos de C do sistema solo-planta-atmosfera, considerando os preparos convencional e profundo, sem e com a aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média. | 128 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

- Tabela 1 - Caracterização química e física do Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2017.47
- Tabela 2 - Caracterização do calcário utilizado em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2017.48
- Tabela 3 - Análise de variância e teste de médias para o estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) aportado no perfil de 0,00 – 1,00m de profundidade, na cultura da cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho de textura média.57
- Tabela 4 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) aportado para cada profundidade (m) de coleta de um Latossolo Vermelho de textura média, na cultura da cana-de-açúcar.60
- Tabela 5 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) aportado para cada profundidade de coleta de solo na cultura da cana-de-açúcar nos diferentes tipos de preparo, em um Latossolo Vermelho de textura média.61
- Tabela 6 - Probabilidades dos valores de F e coeficientes de variação (CV) dos teores de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COM), nitrogênio total (NT), relação C/N do solo e relação COP/COT nas camadas de 0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e diferentes doses de calcário.63
- Tabela 7 - Teores de carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados.65

| | |
|---|----|
| Tabela 8 - Teores de carbono orgânico particulado (COP) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados..... | 67 |
| Tabela 9 - Teores de carbono orgânico associado a minerais (COAM) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados..... | 69 |
| Tabela 10 - Grau de labilidade da MOS (COP/COT) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados. | 71 |
| Tabela 11 - Teores de carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), quocientes microbiano (q_{MIC}) e metabólico (q_{CO_2}), nas camadas de 0,00 a 0,20 m de profundidade..... | 73 |
| Tabela 12 - Produtividade em toneladas de colmos por hectare (TCH) e açúcar total recuperável (ATR), em área de produção de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista – SP, 2018..... | 77 |

CAPÍTULO 2

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Características físicas do perfil do solo (0,00 a 1,00m de profundidade), em área de preparo convencional (PC) e preparo profundo (PP), sem e com a aplicação de calcário, de um Latossolo Vermelho de textura média. | 109 |
| Tabela 2 - Emissão de C-CO ₂ , C-CH ₄ e N-N ₂ O (kg ha ⁻¹) por ciclo de cana planta (430 dias), em áreas de preparo convencional (PC) e preparo profundo | |

| | |
|--|-----|
| modificado (PP), sem e com aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média. | 110 |
| Tabela 3 - Biomassa de raízes (kg ha^{-1}), teor (g kg^{-1}) e acúmulo de carbono (kg ha^{-1}), no perfil de 0,00 a 0,80 m de profundidade na cultura da cana-de-açúcar, cultivada em Latossolo Vermelho de textura média. | 117 |
| Tabela 4 - Teor (g kg^{-1}) e acúmulo (Mg ha^{-1}) de carbono em colmos de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo e das doses de calcário aplicadas, em um Latossolo Vermelho de textura média. | 122 |
| Tabela 5 - Aporte de matéria seca (Mg ha^{-1}), teor de C (g kg^{-1}) e de N (g kg^{-1}), acúmulo de C (kg ha^{-1}) e de N (kg ha^{-1}) e, relação C/N em palhada de cana-de-açúcar, cultivada em Latossolo Vermelho de textura média. | 124 |
| Tabela 6 - Balanço de C-CO ₂ em área de produção de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em Latossolo Vermelho de textura média. | 126 |
| Tabela 7 - Estoque de C (Mg ha^{-1}) no perfil do solo (0,00 a 1,00 m de profundidade), em área de produção de cana-de-açúcar, após as operações de preparo de solo e aplicação de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média..... | 127 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO GERAL..... | 23 |
| REVISÃO DE LITERATURA..... | 26 |
| Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de produção agrícola | 26 |
| Mitigação das emissões de CO ₂ e sequestro de carbono | 27 |
| Mitigação das emissões de N ₂ O..... | 29 |
| Mitigação das emissões de CH ₄ | 32 |
| Dinâmica de carbono em áreas de cultivo de cana-de-açúcar | 33 |
| Manejo do solo em área de produção de cana-de-açúcar | 36 |
| Preparo de solo | 36 |
| Calagem..... | 38 |
| CAPÍTULO 1 - ESTOQUE DE CARBONO E MICROBIOLOGIA DO SOLO COMO INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO | 42 |
| 1.1 INTRODUÇÃO | 43 |
| 1.2 MATERIAL E MÉTODOS | 44 |
| 1.2.1 Caracterização e localização da área experimental..... | 45 |
| 1.2.2 Instalação e condução do experimento | 46 |
| 1.2.3 Tratamentos e delineamento experimental | 48 |
| 1.2.4 Avaliações | 50 |
| 1.2.4.1 Estoque de C no solo | 50 |
| 1.2.4.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo | 51 |
| 1.2.4.3 Determinação dos fatores microbiológicos..... | 53 |
| 1.2.4.4 Produtividade de colmos | 56 |
| 1.2.5 Análise estatística..... | 56 |
| 1.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 56 |
| 1.3.1 Estoque de carbono no solo..... | 56 |
| 1.3.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo | 62 |
| 1.3.3 Determinação dos teores de carbono da biomassa microbiana do solo | 72 |
| 1.3.4 Produtividade de colmos e açúcar total recuperável | 77 |
| 1.3 CONCLUSÕES | 80 |
| REFERÊNCIAS..... | 81 |

| | | |
|------------|--|------------|
| | CAPÍTULO 2 – EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E BALANÇO DE CARBONO NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA..... | 89 |
| 2.1 | INTRODUÇÃO..... | 90 |
| 2.2 | MATERIAL E MÉTODOS | 91 |
| 2.2.1 | Caracterização e localização da área experimental..... | 91 |
| 2.2.2 | Instalação e condução do experimento | 91 |
| 2.2.3 | Tratamentos e delineamento experimental..... | 92 |
| 2.2.4 | Avaliações | 93 |
| 2.2.4.1 | Coleta de gases de efeito estufa (CO ₂ , N ₂ O, CH ₄) | 93 |
| 2.2.4.2 | Determinação do aporte de C pelos restos culturais da cana em pós-colheita..... | 100 |
| 2.2.4.4 | Sistema radicular da cana-de-açúcar | 101 |
| 2.2.4.5 | Balanço de C-CO ₂ | 104 |
| 2.2.4.6 | Determinação da Emissão Relativa de Ceq (ERC)..... | 104 |
| 2.2.5 | Análise estatística..... | 111 |
| 2.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 105 |
| 2.3.1 | Emissão de gases de efeito estufa (CO ₂ , N ₂ O, CH ₄) | 105 |
| 2.3.2 | Aporte de carbono e biomassa do sistema radicular | 117 |
| 2.3.3 | Aporte e exportação de carbono via colmo..... | 122 |
| 2.3.4 | Aportes de matéria seca, carbono e nitrogênio pela palha | 123 |
| 2.3.5 | Balanço de carbono (C-CO ₂) | 126 |
| 2.4 | CONCLUSÕES..... | 129 |
| | REFERÊNCIAS | 130 |
| | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 140 |
| | REFERÊNCIAS | 141 |

INTRODUÇÃO GERAL

Produzida comercialmente em todo o mundo, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma importante fonte de biomassa usada na produção de açúcar, indispensável à alimentação humana, e para a produção de álcool, destinado à fabricação de bebidas ou utilizado como combustível para o abastecimento dos carros, também conhecido como etanol (MARTINS, 2004). Além disso, as usinas vem utilizando o bagaço para a geração de energia elétrica e, em menor escala, para a produção de biogás e de álcool, o famoso etanol celulósico.

Com uma produção estimada de 631 milhões de toneladas para a safra 2020/21, a cultura confere aos canaviais brasileiros produtividade média de 75 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2020). Contudo, observa-se que esta produtividade encontra-se abaixo do seu potencial produtivo, que pode ultrapassar a 300 Mg ha⁻¹, indicando a necessidade de novas práticas que aumentem a rentabilidade do setor.

A crescente adoção da colheita mecanizada nas áreas de cultivo com cana-de-açúcar tem aumentado a compactação do solo, acarretando danos aos atributos físicos, químicos e biológicos do mesmo, com reflexos negativos na produtividade (SOUZA et al. 2005). O intenso manejo altera os processos biogeoquímicos que regulam o destino do carbono (C) e nitrogênio (N) presentes no solo, contribuindo para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e alterando o balanço de C do sistema (TAVARES et al., 2015). Atrelado a isso, a intensa prática de calagem, posto a acidez dos solos tropicais, é uma dentre tantas práticas que contribuem para a emissão de C do solo (FUENTES et al., 2006).

Dentre os vários setores responsáveis pela emissão de GEE no Brasil, o setor agrícola é o segundo principal emissor no país. Segundo o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2018 a agricultura emitiu cerca de 500 milhões de toneladas de equivalente de dióxido de carbono (tCO₂eq), dentre os quais, 136 milhões de tCO₂eq foram provenientes dos solos agrícolas e 19 milhões de tCO₂eq provenientes da prática de calagem, englobando 60% das emissões brasileiras totais (SEEG, 2019).

Dada a relevância da agricultura para a economia nacional, a transição do atual

modelo de produção agrícola para um modelo de baixa emissão de C é essencial. Logo, a escolha do sistema de preparo do solo e o uso adequado de corretivos de acidez são considerados fatores primordiais para viabilizar os custos de produção, garantir altas produtividades, maior longevidade e máximo retorno econômico dos canaviais, além da baixa emissão de GEE. Neste sentido, discute-se sobre a adoção de práticas de manejo conservacionistas, capazes de aumentar o influxo de C no solo, favorecendo a sua estabilização na matéria orgânica (MOS), reduzindo as perdas de CO₂.

Contudo, além da adoção de práticas adequadas de manejo, para reduzir a emissão de C-CO₂ é necessário considerar alguns fatores do solo, como a umidade e temperatura, que controlam a atividade microbiana, a respiração radicular e os processos químicos de decomposição (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). O aumento desses fatores leva à maiores taxas de respiração do solo como resposta ao aumento do metabolismo microbiano, podendo responder por até 50% das emissões de óxido nitroso (N₂O) (GROFFMAN et al., 2009), CO₂ e metano (CH₄) (LUDWIG et al., 2001; TANG et al., 2003).

Neste contexto, a fim de mitigar os processos de degradação do solo e emissão de GEE, visando a qualidade do solo e a alta produtividade dos canaviais, tem-se utilizado máquinas de preparo profundo canteirizado, que definem as zonas de tráfego e permitem a incorporação de corretivos e fertilizantes em maiores profundidades, visando o melhor desenvolvimento radicular, e conseqüentemente, da cultura (LAGUË et al., 2003; TREIN et al., 2005). Acredita-se que a melhoria das condições químicas e físicas do solo em profundidade e realizadas de forma concentrada, pode favorecer a produção de fitomassa aérea e radicular, reduzir a emissão relativa de GEE e aumentar em longo prazo, os estoques de C do solo.

Logo, torna-se necessária a coleta de dados em experimentos de longa duração, visando a melhor gestão do uso da terra e expansão da cana-de-açúcar no Brasil, posto a crescente demanda por energia renovável. O objetivo deste estudo foi avaliar a emissão acumulada anual de C-CO₂, o estoque de C no solo, a qualidade da MOS formada, o aporte de C do sistema radicular e na superfície do solo, produzidos no final do ciclo da cana-planta, bem como o balanço de C no sistema solo-planta-atmosfera,

em função do emprego do preparo profundo do solo em faixas, com a aplicação localizada de diferentes doses de calcário.

O cultivo de cana-de-açúcar tem passado por muitas mudanças nos últimos anos, portanto, de posse dos resultados desta pesquisa, será possível avaliar a possibilidade de aplicação de calcário em profundidade e concentrado apenas nas faixas de preparo do solo, além de confirmar ou não a recomendação oficial de calagem para o Estado de São Paulo, dando subsídio para que produtores tomem as melhores decisões de manejo, a produtividade, eficiência no uso de insumos, além de incrementar a qualidade do ambiente de produção, fortalecendo o apelo pelo uso de energia limpa, propiciando maior sustentabilidade do sistema produtivo, construído sobre o etanol de cana-de-açúcar.

REVISÃO DE LITERATURA

Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de produção agrícola

O efeito estufa é considerado um fenômeno natural, responsável pelo aquecimento e manutenção da vida na Terra (FERNANDES, FERNANDES, 2008). No sistema agrícola, o CO₂, N₂O e CH₄ são os principais gases de efeito estufa emitidos, produzidos principalmente em atividades de desmatamento e queima de resíduos vegetais, preparo de solo e aplicação de fertilizantes. Quando estes gases são provenientes do solo, a sua produção é influenciada por práticas que causam alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos do mesmo (BICALHO et al., 2017).

Com a crescente demanda alimentar, acredita-se que o setor agrícola, a nível mundial, contribua com aproximadamente 22% das emissões totais de CO₂, 80% das emissões de N₂O e 55% das emissões de CH₄ (IPCC, 2014), embora 30% dessas emissões possam ser compensadas através do manejo agrícola adequado (BAYER, 2007), como a adoção de práticas conservacionistas.

Por serem altamente dependentes de fatores climáticos, como temperatura, pluviosidade e radiação solar, as culturas só se desenvolvem em uma faixa de temperatura considerada ideal, a qual é controlada pelos gases de efeito estufa (TAIZ et al., 2017), e uma mudança na concentração destes gases, como tem ocorrido nos últimos anos, levam à alterações no regime hídrico global, reduzindo as áreas aptas no país, podendo levar a perdas de até R\$14 bilhões em 2070, segundo estimativas (DECONTO, 2008). Nesse contexto, o Brasil lançou o Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono em áreas agrícolas, cujos objetivos são reduzir a taxa de desmatamento na Amazônia e no Cerrado; adotar a recuperação de pastagens degradadas; promover a integração lavoura-pecuária e ampliar o uso do sistema de plantio direto e da fixação biológica de nitrogênio; visando uma redução de até 173 milhões de tCO₂eq (CNA, 2012).

Com o avanço das pesquisas sobre o efeito estufa, os estudos visam reduzir as emissões de gases provenientes do solo, tornando o mesmo, um possível dreno de gases. A adoção dessas alternativas, além de poder aumentar o estoque de C no solo, e a produtividade da cana-de-açúcar, poderá conferir aos agricultores Reduções Certificadas de Emissão, negociáveis em bolsas de valores, para abater as metas de redução de emissão de C (CERRI et al., 2004).

Mitigação das emissões de CO₂ e sequestro de carbono

Considerado o principal reservatório temporário de C do ecossistema, o solo apresenta uma estimativa de 1500 Pg do elemento na camada de 0 a 100 cm de profundidade (CIAIS et al., 2013). Porém, com a expansão das áreas agrícolas e a mobilização do solo, que propiciam a degradação das condições naturais deste se incorretamente manejado, levam à intensa decomposição da matéria orgânica (MOS) e consequente perda de C na forma de CO₂ (LOSS et al., 2015).

As práticas de manejo são um dos fatores que mais influenciam as emissões de CO₂ dos solos agrícolas, aliado às condições climáticas e características do solo (MADARI et al., 2005), capazes de influenciar na intensidade dos processos microbianos e, respectivamente, os ganhos e perdas de MOS (IAMAGUTI et al., 2015).

Para aumentar o sequestro de C, devem ser adotadas práticas conservacionistas de manejo que visam o mínimo revolvimento do solo, a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície e a utilização de culturas eficientes na absorção de C. Neste contexto, o sistema de plantio direto (SPD), sem o revolvimento do solo e com elevado aporte de resíduos vegetais aliado à rotação de culturas, é uma prática que intensifica a estabilização do C, minimizando a taxa de decomposição da MOS (PRAGANA et al., 2012). Maia et al. (2010) avaliando os efeitos dos sistemas de manejo nos estoques de C do solo e os fatores de emissão de gases nos Estados de Mato Grosso e Rondônia, constatou que o SPD contribuiu significativamente para o aumento dos estoques de C no solo em comparação à áreas sob cultivo convencional.

Adotado em aproximadamente 30% da agricultura nacional, o sistema de plantio direto vêm se destacando como um manejo potencial para o sequestro de C, evitando a

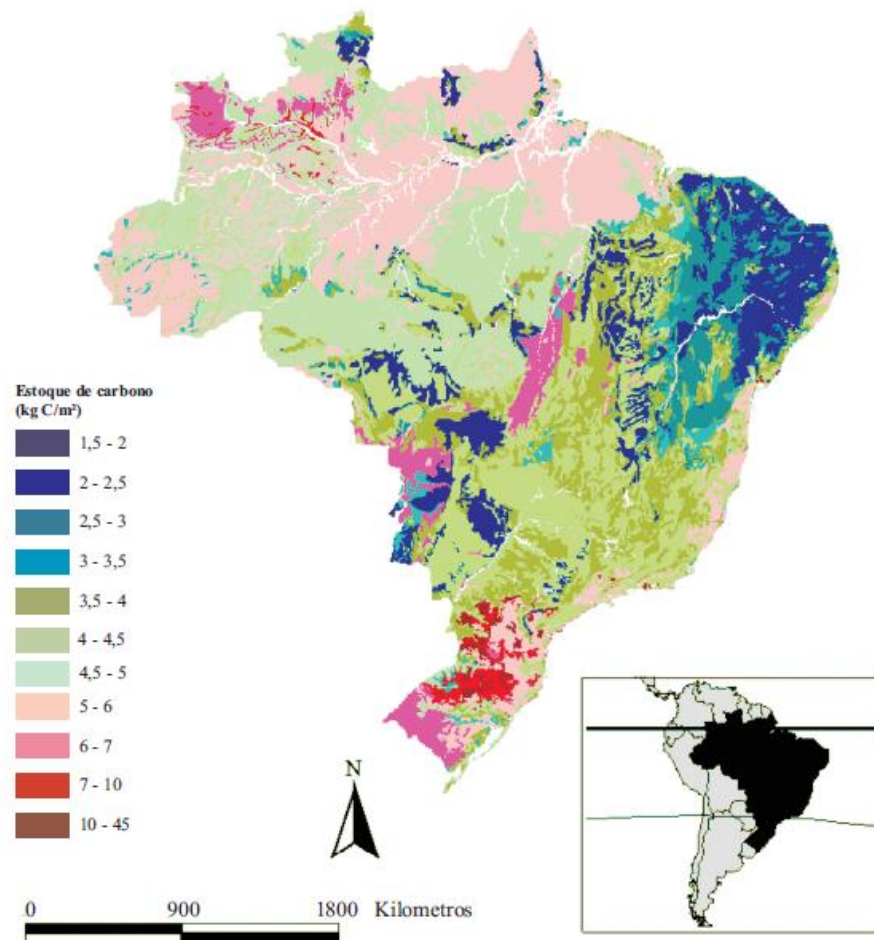
emissão de até nove milhões de toneladas de CO₂ por ano, no país (CERRI et al., 2007). Pesquisas no sul do Brasil, comparando o manejo convencional com o SPD, indicam uma variação no sequestro de C no solo de 0,12 a 1,6 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (AMADO et al., 2006).

Contudo, há divergências na literatura sobre a magnitude das emissões de CO₂ entre os diferentes sistemas de manejo, sugerindo que aliado a isto, as características do solo são fatores que influenciam potencialmente as emissões. Em solos com alto teor de argila, por exemplo, com predomínio de minerais de cargas variáveis, há maior superfície de contato entre minerais e compostos orgânicos, aumentando as interações organominerais, o que facilita a agregação e reduz as taxas de decomposição da MOS (STEVENSON, 1994). Além disso, solos argilosos são menos alterados pelos sistemas de manejo quando comparados aos solos arenosos, em virtude da maior estabilidade química das ligações organominerais.

Em média, estima-se que os solos brasileiros sejam capazes de sequestrar 0,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (CERRI et al., 2007), conforme mostrado na figura 1. Para tanto é necessário um balanço positivo de N e C no sistema. A prática de adubação nitrogenada, empregada em grande escala nos cultivos, quando comparada ao uso de leguminosas para a fixação biológica do N, tem se mostrado menos eficiente para o acúmulo de C no solo (MAIA; CANTARUTTI, 2004), devido à rápida disponibilidade de N no sistema, ocasionando um efeito estimulante na decomposição da MOS, chamado efeito priming, além de aumentar as emissões de N₂O.

No setor sucroalcooleiro, pesquisas sobre o balanço e sequestro de C têm revelado que 145 Mg ha⁻¹ de CO₂ são seqüestradas no cultivo da cana-de-açúcar e 111 Mg ha⁻¹ de CO₂ são emitidas na cogeração de eletricidade, havendo um saldo favorável de 34 Mg ha⁻¹ de CO₂ por ciclo de vida da cultura (CHOHF et al., 2004). Logo, a produção canavieira pode desempenhar um papel importante nas emissões de GEE do solo, uma vez que as práticas de manejo podem interferir nos fluxos de C e N no sistema solo-planta-atmosfera (BICALHO et al., 2017).

Figura 1 - Mapa do estoque de carbono de solos (0 a 30 cm) nos solos brasileiros sob vegetação nativa.



Fonte: Cerri et al. (2006, p.24).

Mitigação das emissões de N₂O

No Brasil, as emissões líquidas de N₂O, decorrentes de atividades antropogênicas, foram estimadas em 560 Gg, tendo o setor agrícola como principal responsável, representando 84% do total dessas emissões (MCTIC, 2016). Neste contexto, os solos são a principal fonte emissora de N₂O (TIAN et al., 2016) devido à utilização de fertilizantes nitrogenados, que por um lado possibilitam maior produção de biomassa e conseqüentemente, maior produtividade das culturas e, por outro, aumentam as emissões do referido gás. Os processos biológicos de nitrificação e desnitrificação que afetam a produção de N₂O no solo, resultam da disponibilidade de N (fonte, dose,

profundidade de aplicação), das interações entre fatores do solo (temperatura, textura, estrutura, pH, MOS e porosidade preenchida por água) e manejo adotado (rotação de culturas, intensidade de mobilização de solo) (SNYDER et al., 2009).

A nitrificação corresponde ao processo de oxidação aeróbia do amônio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) por bactérias autotróficas, dependentes do suprimento de N- NH_4^+ , sendo dividido em dois estágios: nitritação (NH_4^+ é oxidado à nitrito NO_2^- , por *Nitrosomonas sp.*, *Nitrosospira sp.* e *Nitrosococcus sp.*); e nitratação (NO_2^- é oxidado à NO_3^- , por *Nitrobacter sp.*, *Nitrosospira sp.* e *Nitrococcus sp.*) (BALL; PHILIPPOT, 2010). As taxas de nitrificação aumentam com a elevação do pH e, em solos bem drenados, há relativamente maior produção de óxido nítrico (NO) do que de N_2O .

Já a desnitrificação corresponde à redução do nitrato (NO_3^-) a dinitrogênio (N_2), em condições de anaerobiose, por bactérias heterotróficas facultativas, dependentes da disponibilidade de C orgânico e N- NO_3^- (BALL; PHILIPPOT, 2010). Este processo pode ser completo, resultando em N_2 , ou incompleto, onde uma fração de N pode ser emitida como NO e N_2O . O NO_3^- pode ainda se acumular no solo quando produzido além da demanda de microrganismos e plantas, potencializando as reações de desnitrificação. Contudo, a proporção de gases liberada durante a reação também depende do caminho que os gases percorrerão até a superfície do solo. Solos altamente saturados e com elevada tortuosidade, diminuem as chances de emissão de NO do solo, sendo o N_2O e N_2 as formas predominantemente emitidas, devido à dificuldade de difusão de O_2 e formação de ambientes anaeróbicos (BATEMAN; BAGGS, 2005).

Considerando o sistema de manejo adotado, pesquisas apontam que o SPD aumenta as emissões de N_2O quando comparado ao manejo convencional, devido à maior população de microrganismos desnitrificadores, densidade de solos não mobilizados e a manutenção de maior conteúdo de água nos solos, que aumentam a atividade microbiana, consumindo o O_2 disponível e criando microsítios anaeróbios. Já em manejo convencional, o revolvimento superficial aumenta a concentração de O_2 , reduzindo a emissão de N_2O , apesar da maior taxa de mineralização dos resíduos e MOS, promovida pelo preparo (LEMKE et al., 2004; GOMES, 2006; LIU et al., 2007) e maior emissão de CO_2 . No entanto, ainda há divergência no meio científico. Segundo Metay et al. (2007), as maiores emissões em SPD apenas ocorrem em áreas com

recente adoção do sistema (inferior a 10 anos), devido à alteração na umidade do solo. A melhoria nas propriedades físicas, com a formação de macroagregados, provenientes da implantação do SPD à longo prazo, viabilizam a difusividade de O_2 no perfil, minimizando as emissões de N_2O .

De forma geral, a maior emissão de N_2O está associada ao aumento de umidade no solo, que leva ao aumento na quantidade de espaço poroso preenchido por água e consequente diminuição no O_2 disponível (BRAGA et al., 2011). Em solos com textura argilosa, devido à maior percentagem de poros preenchidos por água provocada pelo pequeno tamanho dos poros e alto conteúdo de umidade, evidencia-se uma maior emissão de N_2O (SKIBA; BALL, 2002). Logo, quando a difusividade dos gases no solo é menor e a areação é limitada, o N_2O será o produto dominante (DAVIDSON et al., 2000).

Com relação à adubação nitrogenada, amplamente utilizada nos cultivos agrícolas, é importante considerar a fonte de N e a profundidade de aplicação (DOBBIE; SMITH, 2003). Quando aplicado na forma orgânica, o N apresenta liberação lenta e absorção gradativa pelas plantas, ao passo que a utilização de fertilizante mineral, além de aumentar as emissões, inibe a ação de microrganismos metanotróficos, responsáveis pela oxidação do CH_4 no solo. Em geral, fertilizantes amoniacais e amídicos resultam em emissões mais lentas do que os fertilizantes nítricos, que podem ser desnitrificados imediatamente (MORAIS, 2011). Jones et al. (2005) e Russow et al. (2008), em condições de solo com alta umidade, verificaram maiores emissões de N_2O a partir de fontes nítricas, que favoreceram o processo de desnitrificação. Além disso, a incorporação mais profunda do fertilizante e o parcelamento das doses aumentam a residência de NO_3^- no solo e reduz as suas perdas por lixiviação, garantindo a preservação dos recursos naturais.

O IPCC considera o fator de emissão de 1% para emissão de N_2O (IPCC, 2006), proveniente do N depositado no solo, sem considerar eventuais perdas no sistema, como a volatilização de amônia e a lixiviação de nitrato; variações de manejo; clima; tipo de solo e cultura. Logo, são necessários estudos de longo prazo para fornecer as informações necessárias para projetar os fatores de emissão para zonas climáticas específicas e tipos de solo, visando a melhoria dos inventários de GEE.

Apesar dos relatos sobre as emissões de N_2O provenientes do solo, este também pode drená-lo da atmosfera (ZSCHORNACK et al., 2016). Embora este fenômeno ainda seja pouco compreendido, fluxos negativos foram relatados em condições associadas à baixa disponibilidade de N e O_2 nos solos, ou seja, em condições favoráveis para reduzir N_2O a N_2 . O consumo de N_2O depende do solo, teor de água, temperatura, pH e disponibilidade de C e N orgânicos. Quanto mais tempo o N_2O permanecer no solo, seja porque foi produzido em camadas mais profundas ou devido à lenta difusão para a atmosfera, maiores quantidades de N_2O serão usadas como receptor de elétrons e maiores serão as emissões de N_2 .

Práticas como a calagem; o melhoramento genético para reduzir a dependência de fertilizantes (CARVALHO, ALVES, PEREIRA, 2010); liberação de inibidores de nitrificação biológica; e utilização de culturas com alto rendimento, melhorando a eficiência do uso de fertilizantes, são práticas que também auxiliam na mitigação de emissão do referido gás.

Mitigação das emissões de CH_4

Os solos desempenham um importante papel na variação da concentração de metano atmosférico (CH_4), sendo responsável por aproximadamente 16% do efeito estufa (OERTEL et al., 2016). No Brasil, as atividades de mudanças de uso da terra e os cultivos com arroz irrigado são os principais emissores de CH_4 na área agrícola, além da queima de biocombustíveis e de biomassa (CIAIS et al., 2013). O fluxo é variável, dependendo da natureza do sistema e das práticas de manejo adotadas. Segundo estimativas, em 2014 as emissões em território brasileiro chegaram a 12,6 Gg, as quais foram atribuídas principalmente ao setor agropecuário, responsável por 74% deste total (MCTIC, 2016). Contudo, os solos são baixos emissores de CH_4 . A sua produção é influenciada pelo clima (SCHÜTZ et al., 1990), fatores intrínsecos do solo (SETYANTO et al., 2002), manejo, irrigação e disponibilidade de carbono (COSTA, 2008). Em sua maioria, as emissões ocorrem em condições anaeróbicas, onde a fermentação é o principal processo bioquímico responsável pela degradação da MOS. Nestes locais, a emissão é condicionada pela textura do solo, sendo que os solos de

textura arenosa apresentam maior metanogênese do CH₄ do que os solos argilosos (BOECKX et al., 1997).

A quantidade de CH₄ emitido resulta do balanço dos processos de produção por bactérias metanogênicas (anaeróbias) e pela oxidação do CH₄ no solo, conduzida pelas bactérias metanotróficas (aeróbias obrigatórias), nas zonas oxigenadas (interface água, solo e rizosfera) (BAGGS et al., 2006). Logo, o fluxo é resultado líquido entre a produção oriunda da metanogênese e a oxidação por processos de metanotrofia (BALL et al., 1999; BAGGS et al., 2006). Contudo, estes processos podem ser influenciados pelas práticas de manejo do solo, alterando os fluxos de CH₄ (MOSIER et al., 2004).

No solo, a metanotrofia é regulada pela taxa de difusão do gás, a qual é dependente de condições físicas do solo e da demanda biológica (USSIRI et al., 2009). Em solos aerados, a absorção de CH₄ geralmente é dominante sobre a metanogênese, que ocorre somente em microsítios anaeróbicos. Solos não perturbados também são considerados agentes oxidantes de CH₄, porém, em áreas com a mobilização agrícola, o solo atua como fonte do gás (BALL et al., 1999), intensificado com a utilização de fertilizantes nitrogenados, os quais inibem a ação de microorganismos metanotróficos, responsáveis pela oxidação do CH₄ no solo (HÜTSCH, 2001; ACTON e BAGGS, 2011). Banger et al. (2012) em solo cultivado com arroz irrigado, observaram que a aplicação de fertilizante nitrogenado, resultou em maior emissão de CH₄ por kg de N aplicado, variando de $0,27 \pm 0,06$ kg C-CH₄ ha⁻¹ por safra.

Dentre as práticas que viabilizam a oxidação do CH₄, a rotação de culturas como fonte de N para cultivos subsequentes (USSIRI et al., 2009); a drenagem periódica do solo para a aeração das raízes (ZSCHORNACK et al., 2016); adoção de irrigação intermitente; compostagem de materiais orgânicos antes de sua incorporação; fertilizantes NPK à base de sulfato e correção com gesso natural, auxiliam na redução da emissão de CH₄.

Dinâmica de carbono em áreas de cultivo de cana-de-açúcar

Em áreas canavieiras, a intensa degradação dos solos agrícolas tem despertado preocupação com a qualidade do solo e a sustentabilidade da atividade. Neste

contexto, a adoção de práticas de manejo que visem aumentar a permanência de C no solo, entre outras ações globais, é essencial para garantir a alta produtividade e a sustentabilidade do sistema de produção.

O solo é considerado o segundo maior reservatório de C, com uma estimativa de 1500 Pg do elemento (IPCC, 2014), distribuídos em 12,8 bilhões de hectares e, o que mais tem sofrido com a ação antrópica, sobretudo devido às atividades agrícolas e de desmatamento, tornando o Brasil um grande emissor de CO₂.

A conversão de ecossistemas naturais para a agricultura, aliado a práticas inadequadas de manejo podem afetar a dinâmica do C no solo (BATLLE-BAYER et al., 2010), causando perdas de até 75% do elemento presente na matéria orgânica (MOS), além de aumentar as emissões de GEE.

A MOS, constituída, sobretudo, por C e considerada a principal fonte de energia e nutrientes para a atividade microbiana (EVANYLO; McGUINN, 2009), é uma das principais indicadores de qualidade do solo (DORAN; PARKIN, 1994; MIELNICZUK, 1999), capaz de detectar a intensidade dos processos de degradação, visto sua relação direta com os atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

Entre os atributos biológicos, a biomassa microbiana é definida como a parte viva da MOS (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008), responsável pelo processo inicial de transformação do carbono, capaz de detectar em um curto espaço de tempo, as alterações ocorridas no solo, decorrentes de seu uso e manejo, antecedendo às detecções de mudanças provocadas nas propriedades químicas e físicas (GLAESER et al., 2010). Por outro lado, os atributos físicos também exercem potencial influência na dinâmica do C do solo. A textura do solo, por exemplo, atua na estabilidade dos agregados, retenção e proteção da MOS e no tamanho dos poros, que consequentemente refletem na respiração de microrganismos e nas emissões de C-CO₂ para a atmosfera (CARBONELL-BOJOLLO et al., 2012). A porosidade do solo não só viabiliza o armazenamento e o transporte dos gases, como também a compactação do solo. A alteração nos percentuais de macro e microporos afetam o crescimento e a distribuição das raízes e as atividades microbianas, responsáveis pela respiração do solo (GOUTAL et al., 2012).

Neste contexto, práticas agrícolas que causam um excessivo revolvimento do solo, promovem a perda da MOS e, conseqüentemente, a emissão de gases para a atmosfera, em específico o CO₂. Em canaviais, por exemplo, as intensas operações de preparo criam condições favoráveis à mineralização e oxidação do C presente na MOS, por meio do aumento da aeração, desagregação e maior contato entre resíduo e solo (SCHWARTZ et al., 2010; BILANDZIJA et al., 2014).

Logo, a discussão pela adoção de sistemas conservacionistas, como o preparo reduzido, por exemplo, tem aumentado, posto o seu potencial em acumular carbono no solo, quando comparado ao preparo convencional (JORIS et al., 2016). A menor mobilização associada à manutenção de resíduos vegetais favorece a conservação e/ou incremento dos estoques de C, além de reduzir as perdas de solo por erosão (PROSDOCIMI et al., 2016), favorecendo a estabilização dos agregados e conseqüentemente, maior conteúdo de MOS.

A sucessão de culturas em áreas de reforma, ou a utilização de leguminosas, também são uma alternativa viável para aumentar o estoque de C em áreas canavieiras, uma vez que promovem melhores condições no balanço de N. Muitas vezes a quantidade de N no solo é insuficiente para atender a demanda da cultura, resultando numa competição indesejada entre microrganismos e vegetal. Contudo, embora a adubação nitrogenada possa propiciar um aumento no sequestro de C, o seu excesso favorece o crescimento microbiano, levando à rápida mineralização de C e N (YEOH et al., 2016), o que leva à controvérsia sobre a sustentabilidade bioenergética devido às potenciais emissões de GEE nos canaviais (CREUTZIG et al., 2015; SKOCAJ et al., 2013).

Segundo Cerri et al. (2011), a introdução da colheita sem queima da palha é uma prática positiva para o aumento dos estoques de C, que pode chegar a acumular 1,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0 a 30 cm, além de reduzir as emissões de N₂O e CH₄. Segundo Silva-Olaya et al. (2013), em áreas de Latossolo Vermelho cultivadas com cana-de-açúcar e colhidas sem queima, o preparo do solo durante a reforma do canavial promoveu, em apenas 44 dias, a mineralização de aproximadamente 80% do C acumulado anualmente ao longo do ciclo anterior. A colheita sem queima prévia, além de reduzir a emissão de C e garantir o seu maior estoque no solo, diminui os

custos de renovação do canavial, decorrente de sua maior longevidade; recicla e libera gradualmente nutrientes pela decomposição da palha, reduzindo suas perdas (CANELLAS et al., 2003).

Contudo, o acúmulo de C é um processo lento, posto que a maior parte adicionada é consumida por oxidação e é altamente influenciado pelas condições climáticas, características do solo e relação C:N, a qual é considerada baixa em áreas de canavial, devido a utilização da monocultura, havendo um desbalanço entre C e N no solo. Por outro lado, as perdas de C podem ocorrer de forma rápida, como CO₂ ou CH₄, dependente do manejo do solo que modifica o ambiente físico, a qualidade da MOS (PANOSSO et al., 2009; VAN WESEMAEL et al., 2010) e a diversidade de espécies de microrganismos (SAVARIO & HOY, 2011).

Com um metabolismo C₄, a cana-de-açúcar possui afinidade com o CO₂ atmosférico, alta eficiência fotossintética e de utilização da água, além de alta produção de biomassa (MAGRO et al., 2011). Tais características conferem grande potencial para sua utilização como cultura energética, tornando-a ideal para produção de etanol e outros biomateriais derivados da matéria-prima. Desta forma, o desenvolvimento de sistemas de produção em cana-de-açúcar que permitam reduzir a perda de C e aumentar o seu sequestro no solo, deverão aumentar a competitividade agrícola e ambiental da cultura.

Manejo do solo em área de produção de cana-de-açúcar

Preparo de solo

Nos últimos anos, a cultura da cana-de-açúcar vem ganhando impulso posto a necessidade mundial de utilização de energia limpa e renovável. Para tanto, o manejo adequado das áreas de produção é fator imprescindível para evitar a degradação do sistema solo-planta-atmosfera, garantindo a produtividade da cultura.

Além da finalidade para produção de açúcar para o consumo interno e exportação, a cultura é utilizada para a produção de etanol, que representa uma alternativa aos combustíveis derivados do petróleo. A sua produção na safra 2020/2021 está estimada

para 630,7 milhões de toneladas, produzidos em 8,4 milhões de hectares (CONAB, 2020), conferindo aos canaviais brasileiros uma produtividade média de colmos de 75 Mg.ha⁻¹. Observa-se, no entanto, que a produtividade está abaixo do potencial produtivo da cultura, que pode chegar a 200 Mg ha⁻¹ (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008) indicando que novas práticas devem ser adotadas a fim de aumentar a produtividade e a rentabilidade do setor.

Com a crescente adoção da mecanização no campo, estima-se que mais de trinta operações ocorrem em um mesmo talhão ao longo dos sucessivos cortes da cana-de-açúcar (SANTIAGO; ROSSETO, 2009), sendo inevitável a compactação do solo, o que o predispõe à erosão. Logo, torna-se necessária a reforma do canavial, em média, após cinco anos. Esta atividade é uma das mais onerosas do sistema de produção, sendo a escolha do tipo de preparo, fator primordial para altas produtividades, longevidade e o máximo retorno econômico da cultura.

O objetivo das operações de preparo é criar condições ideais para o desenvolvimento das raízes (VITTI et. al., 2016), visando a melhoria das condições físicas, químicas e biológicas, para garantir a brotação, o crescimento radicular e o estabelecimento da cana-de-açúcar. Na escolha do preparo, deve-se visar o mínimo revolvimento da superfície, evitando os processos de pulverização, que deixam o solo susceptível aos processos de erosão e à formação de impedimentos físicos abaixo das camadas movimentadas pelos equipamentos. A compactação, a desestruturação do solo e a redução nos teores de MOS são consideradas os principais indutores da degradação dos solos agrícolas (KLUTHCOUSKI et al., 2000).

Tradicionalmente no cultivo da cana-de-açúcar são utilizados para implantação e/ou para a reforma do canavial os preparos convencional, reduzido (cultivo mínimo), plantio direto e, recentemente, a adoção do preparo profundo canteirizado. O conceito de não mobilização do solo (*no tillage*) é de difícil aplicação na cana-de-açúcar, por esta caracterizar-se como uma monocultura, não havendo a prática de rotação. Logo, o conceito de preparo em faixa ou na linha de plantio tem sido adotado na cana-de-açúcar, podendo trazer como benefícios a maior reciclagem de nutrientes; redução da poluição dos cursos de água; manutenção de umidade no solo; menor incidência de

plantas daninhas; maior sustentabilidade; menor custo de produção para cana e para a cultura em sucessão; e, menor risco de erosão.

O preparo do solo apenas no “canteiro” adota o maquinário conhecido como “Penta”, apto a preparar, corrigir e adubar o terreno somente na área onde serão confeccionados os sulcos de plantio, sem a mobilização do solo no restante da área (ROSSETTO et al., 2011). Ele conjuga simultaneamente as funções de subsolagem, incorporação e aplicação de corretivo, enleiramento da palha e quebra de torrões. Segundo Marasca (2014), o preparo profundo contribui para o aumento do sistema radicular, proporcionando maior volume de solo explorado pelas raízes, e consequentemente maior potencial de absorção de água e nutrientes do solo, além do maior aproveitamento das precipitações.

Segundo Souza (2017), em estudo conduzido em Latossolo Vermelho e em Argissolo Amarelo com cana-de-açúcar, o preparo com escarificação apenas na linha de plantio contribuiu para a redução da emissão de CO₂ para a atmosfera, se comparado à escarificação realizada em área total. Contudo, ainda questiona-se sobre os impactos negativos que a prática poderia causar ao ecossistema de produção canavieiro, posto o intenso revolvimento do solo e fracionamento de seus agregados, expondo o carbono e nitrogênio à atividade dos microrganismos, estímulo à mineralização da MOS, aumento na lixiviação de nitrato, redução do estoque de carbono do solo e o aumento das emissões de GEE, afetando o balanço do carbono no sistema solo-planta-atmosfera.

Por outro lado, como a atual tendência no preparo é a adoção de práticas com canteirização permanente, preparo profundo e controle de tráfego (MARIA et al., 2016), acredita-se que o sistema poderá favorecer o aprofundamento radicular, devido as zonas definidas para o tráfego agrícola, fazendo com que a planta mantenha a absorção de água, a condutância estomática, a taxa de assimilação de CO₂ e, consequentemente, a taxa fotossintética (TAIZ e ZEIGER, 2004), por maiores períodos em épocas de baixa precipitação, além de ocorrer considerável redução na emissão de GEE em relação à mesma unidade de área preparada pelo preparo convencional.

Calagem

A acidez excessiva é um dos fatores limitantes da produção agrícola mundial em solos intemperizados. A queda no rendimento no decorrer dos cultivos tem sido motivo de preocupação para os agricultores, posto que grande parte dos solos brasileiros são ácidos, capazes de reduzir o potencial produtivo das culturas.

Os solos podem ser naturalmente ácidos devido à constituição do material de origem, pobre em bases trocáveis do solo; podem tornar-se ácidos, pelos processos de intemperização que resultam em maiores teores de H^+ e Al^{+3} na solução do solo; ou como consequência da exploração agrícola, devido a exportação e lixiviação de nutrientes, pela intensificação do ciclo da MOS e, pela aplicação de fertilizantes acidificantes (RAIJ, 2010).

Dentre as práticas utilizadas para a correção da acidez, a calagem é uma das mais adotadas. Objetiva a correção do pH, o fornecimento de cálcio e magnésio, e a diminuição das concentrações tóxicas de alumínio e manganês. Atrelado a isto, favorece o aumento da disponibilidade de fósforo e molibdênio (CASTRO; CRUSCIOL, 2013; CAIRES et al., 2015); melhoria nas propriedades físicas e biológicas do solo; maior decomposição da MOS (YAO et al., 2009), e conseqüentemente, disponibilização de nutrientes, além do melhor aproveitamento dos adubos (CASTRO; CRUSCIOL, 2013; CAIRES et al., 2015).

Embora ainda pouco compreendida, a calagem pode influenciar o teor de carbono orgânico do solo (COS) (PARADELO et al., 2015), através do aumento da atividade biológica e conseqüente mineralização da MOS e perdas de CO_2 ; através do aumento da estabilidade das associações entre argila e MOS, que deve aumentar a proteção física e físico-química do COS; além de influenciar na maior produção de biomassa vegetal, através das melhores condições químicas do solo.

Castro et al. (2015), estudando o efeito da aplicação de corretivos de acidez em superfície após cinco anos de sua aplicação, em um Latossolo Vermelho, constataram o incremento de carbono orgânico até a profundidade de 0,10m. Sob condições subtropicais, num Latossolo Vermelho, Briedis et al. (2012) observaram que a aplicação de calcário no SPD aumentou os teores de C orgânico até a profundidade de 0,20 m, após 15 anos da primeira aplicação dos corretivos e 7 anos da reaplicação, atribuindo esses efeitos a melhoria na fertilidade do solo, como o aumento na saturação por bases

e o decréscimo na saturação por Al^{3+} trocável, além da maior deposição de C no solo pela biomassa vegetal.

A cana-de-açúcar, como Poaceae, apresenta certa tolerância à acidez do solo (PRADO et al., 2001), contudo, por ser uma cultura que permanece por longo período no campo e devido ao uso de elevadas doses de fertilizantes acidificantes, a calagem deve ser empregada na cultura para a disponibilização de nutrientes ao longo dos anos, garantindo a longevidade e produtividade do canavial.

No Brasil, os critérios de recomendação adotados para a cultura são o de saturação por bases (V%) e o da elevação dos teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} , sendo que no Estado de São Paulo a recomendação é dada segundo o método da elevação da saturação a 70% para cana-planta. Já para a cana-soca recomenda-se a aplicação de calcário em soqueiras caso $\text{V}\% < 50$ na camada superficial, utilizando-se doses máximas de 3 Mg ha^{-1} (BENEDINI, 1988).

A aplicação do calcário deve ser efetuada de forma uniforme em toda a área com conseqüente incorporação (SORATTO; CRUSCIOL, 2008), visando maior contato entre as partículas do calcário e do solo (FERRAZ et al., 2015). O Ca protege as raízes do estresse causado pelo baixo pH, garantindo a exploração de maior volume de solo e eficiência no uso de fertilizantes e da água armazenada no perfil. A sua restrição limita a tolerância da cultura aos períodos de déficit hídrico, reduzindo a taxa de assimilação de CO_2 e, conseqüentemente, a taxa fotossintética (TAIZ e ZEIGER, 2004), resultando na menor produtividade de colmos e açúcar.

As recomendações para a aplicação de calcário na cultura foram desenvolvidas em sistema de preparo convencional e colheita com cana-de-açúcar queimada. Contudo, a colheita da planta crua, sem queima, já é uma realidade nos estados brasileiros e, neste novo cenário, com novos tipos de preparo em faixas e colheita, há déficit de pesquisas com calcário, além dos resultados já estarem subestimados para o sistema atual de cultivo, segundo as recomendações oficiais para a calagem dadas por Spironello et al. (1996).

Com a adoção do novo sistema de preparo profundo canteirizado em cana-de-açúcar, onde é possível a aplicação do calcário a 0,80m de profundidade, acredita-se que pode haver uma maior exploração radicular em profundidade (GRIÈVE et al.,

2005), tornando as plantas mais aptas à períodos de déficit hídrico, garantindo a produtividade de colmos e açúcar em condições adversas.

CAPÍTULO 1 - ESTOQUE DE CARBONO E MICROBIOLOGIA DO SOLO COMO INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO

RESUMO: Entre os atributos do solo, a quantificação do estoque de C no mesmo, bem como a avaliação da qualidade da biomassa microbiana, responsável pelo processo inicial de transformação do C, são parâmetros capazes de detectar as alterações ocorridas no solo, decorrentes de seu uso e manejo. Em cultivo de cana-de-açúcar, posto a intensa mecanização das áreas, pode ocorrer elevada perda de C do solo, reduzindo a qualidade do ambiente de produção e, conseqüentemente, a produtividade da cultura. O emprego do preparo correto do solo aliado a doses adequadas de calcário pode atenuar esta problemática, reduzindo as perdas de C e aumentando a produção de biomassa vegetal. O objetivo deste trabalho foi avaliar em área de cana-planta, o efeito de diferentes preparos de solo e doses de calcário, quanto ao acúmulo de C no solo, qualidade da MOS formada, teor de C_{BMS} , bem como a produtividade de colmos e de açúcar da cultura. Foi realizado um experimento em solo de textura média, com delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas foram constituídas por três sistemas de preparo (convencional, profundo e profundo modificado) e as subparcelas, por quatro doses de calcário (0, 1, 2 e 3 vezes a dose recomendada). Os dados foram submetidos à análise de variância, teste LSD e regressão ($p \leq 0,05$). A utilização dos preparos profundo e profundo modificado resultou nos maiores estoques de C no solo. Para as frações da MOS, a utilização do preparo convencional com doses de calcário iguais ou maiores do que a recomendada resultaram nos maiores teores de COP, COAM e labilidade do C em superfície, enquanto o preparo profundo modificado garantiu os maiores teores de COAM em profundidade. Para o teor de C_{BMS} , a utilização do preparo profundo modificado aliado ao dobro da dose recomendada de calcário, garantiu os maiores valores; enquanto para a produtividade de colmos, a aplicação do triplo da dose, aliada ao preparo profundo, garantiu a produção de 147 Mg ha^{-1} de colmos. O preparo profundo do solo, sobretudo quando aliado à aplicação de doses de calcário acima da recomendada, reduz a labilidade do C na superfície do solo, porém aumenta os teores de COAM em profundidade, bem como os teores de C_{BMS} , com conseqüente aumento da produção de biomassa vegetal e produtividade de colmos.

1.1 INTRODUÇÃO

Paralelamente à expansão da fronteira agrícola brasileira, a degradação dos solos tem despertado a preocupação quanto a sua qualidade e sustentabilidade de produção. A mobilização do solo, devido à intensa prática de manejos convencionais, leva à decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) e conseqüentemente à perda de carbono na forma de CO₂ (LOSS et al., 2015).

A MOS, constituída, sobretudo, por carbono (C) e considerada a principal fonte de energia e nutrientes para a atividade microbiana (EVANYLO; McGUINN, 2009), é uma das principais indicadoras da qualidade do solo, considerada extremamente sensível para detectar a intensidade dos processos de degradação das diferentes práticas de manejo (CERRI et al., 2013), visto sua relação direta com os atributos químicos, físicos e biológicos do solo (MAIA; PARRON, 2015).

Entre os atributos biológicos, a biomassa microbiana é definida como a parte viva da MOS (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008), responsável pelo processo inicial de transformação do C, capaz de detectar em um curto espaço de tempo, as alterações ocorridas no solo, decorrentes de seu uso e manejo (GLAESER et al., 2010).

A regulação do ciclo do C depende do equilíbrio entre a captação e assimilação de CO₂ pela fotossíntese e a liberação de C gasoso pela respiração (CONANT, 2010) das raízes e dos microorganismos. Neste contexto, as práticas de manejo do solo são um dos fatores que mais influenciam a intensidade dos processos microbianos e, respectivamente, os ganhos e perdas de C (IAMAGUTI et al., 2015). As operações de preparo alteram as condições de umidade, aeração e temperatura do solo, além de modificar a sua estruturação, levando à perturbação mecânica dos agregados, que conseqüentemente afetam a atividade de mineralização dos microorganismos, responsável pelo estoque de C no solo (BEZDICEK et al. , 2003; FUENTES et al., 2006; KAINIEMI, 2014).

O preparo convencional, amplamente empregado em canaviais, tem implicado na maior vulnerabilidade à compactação e erosão do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2009), redução do teor da MOS, menor estabilidade dos agregados, menor capacidade de retenção de água e, perda da diversidade microbiana (ZHANG et al., 2010; VEZZANI;

MIELNICZUK, 2011; SARKER et al., 2018), o que favorece as perdas de C e, conseqüentemente, à baixa longevidade da cultura.

Aliado a isto, os solos tropicais são caracterizados pelo elevado nível de acidez, o que contribui para a baixa produção de biomassa vegetal e, conseqüentemente, baixo acúmulo de C orgânico. A calagem é uma das técnicas utilizadas mais eficientes para a correção de acidez, além de influenciar nos atributos físicos do solo, contribuindo para a maior estabilização dos agregados, que protegem o C orgânico da oxidação microbiana. Atrelado a isto, a disponibilidade de nutrientes, sobretudo de Ca^{2+} , é essencial à atividade dos microrganismos, o que favorece a população microbiana, refletindo na maior produção de biomassa vegetal e, conseqüentemente, adição de C orgânico no solo pelos restos culturais.

Perante este cenário, faz-se necessário a adoção de práticas de manejo conservacionistas, que visam o menor revolvimento do solo, com a aplicação adequada de calcário, favorecendo o acúmulo de C no mesmo, garantindo maior qualidade e sustentabilidade do sistema de produção. Logo, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da utilização do preparo profundo em faixas *versus* a utilização do preparo convencional, aliados à aplicação de diferentes doses de calcário em cana-planta, quanto ao estoque de C, a qualidade da MOS formada, além da sua influência no teor de C da biomassa microbiana, e conseqüentemente, na produtividade de colmos, em um solo Latossolo Vermelho de textura média.

Para isso, foram testadas as seguintes hipóteses: i) No sistema de preparo profundo em faixas, a dose de calcário mais elevada do que a recomendada, proporciona melhores condições para o crescimento radicular, com correção da acidez em profundidade, garantindo maior estoque de C no solo e maior produtividade do canavial, quando comparado à utilização do preparo convencional ii) A aplicação de calcário somente na área mobilizada, promove o maior aporte de MOS e maior atividade microbiana do solo, favorecendo o ambiente de produção, quando comparado à aplicação em área total, utilizando o preparo convencional.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Caracterização e localização da área experimental

O experimento foi instalado em março de 2017, em área de reforma de canavial, com colheita mecanizada, em Lençóis Paulista – SP, cuja localização geográfica é: 22°40'29.11"S e 48°46'36.42"O, com altitude média de 651 m (Figura 1). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura média (SANTOS et al., 2018).

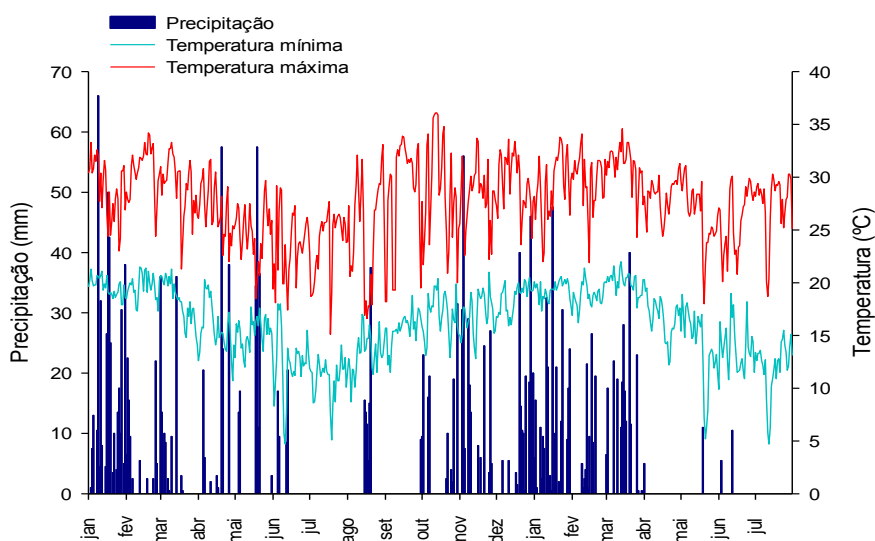
Figura 1 - Localização da área experimental no município de Lençóis Paulista - SP, Brasil.



Fonte: Google Maps.

O clima do local é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen. Apresenta precipitação média anual de 1258 mm, temperatura média anual de 20,5°C, com máxima de 38°C entre os meses de novembro e fevereiro e, mínima de 4°C, entre os meses de junho a agosto. Na figura 2 estão apresentados os valores médios para precipitação e temperatura, correspondente ao período de condução do experimento.

Figura 2 - Precipitação pluviométrica e temperaturas mínima e máxima entre janeiro de 2017 e julho de 2018 registradas em Lençóis Paulista - SP.



1.2.2 Instalação e condução do experimento

Anteriormente à reforma do canal, para a caracterização inicial e instalação dos tratamentos, foram retiradas três amostras aleatórias representativas da área experimental, em cada uma das camadas de 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m, totalizando 12 amostras, a fim de representar os atributos químicos, físicos e teor de matéria orgânica no solo, os quais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e física do Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2017

| Atributos químicos | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|-------------------|---|------------------|-----------------------|---------------|----|--|
| Camada (m) | pH (CaCl ₂) | COS (g dm ⁻³) | Ca | Mg | K | Al ³⁺ | H+Al | CTC | SB | |
| | | | ----- (mmol _c dm ⁻³) ----- | | | | | | | |
| 0,00-0,20 | 5,0 | 6,9 | 18 | 6 | 3,2 | 2 | 29 | 57 | 27 | |
| 0,20-0,40 | 4,8 | 7,5 | 16 | 4 | 2,4 | 3 | 32 | 54 | 23 | |
| 0,40-0,60 | 4,6 | 7,5 | 9 | 3 | 2,3 | 4 | 28 | 42 | 14 | |
| 0,60-0,80 | 4,4 | 4,6 | 6 | 2 | 1,5 | 8 | 30 | 40 | 10 | |
| 0,80-1,00 | 4,3 | 5,2 | 5 | 2 | 1,4 | 9 | 31 | 38 | 8 | |
| Camadas (m) | P | S | B | Cu | Fe | Mn | Zn | m | V | |
| | | ----- (mg dm ⁻³) ----- | | | | | | ---- (%) ---- | | |
| 0,00-0,20 | 7 | 10 | 0,30 | 0,7 | 27 | 2,8 | 0,8 | 8 | 47 | |
| 0,20-0,40 | 6 | 15 | 0,32 | 0,7 | 25 | 1,6 | 0,6 | 12 | 40 | |
| 0,40-0,60 | 3 | 21 | 0,30 | 0,6 | 15 | 0,7 | 0,4 | 22 | 34 | |
| 0,60-0,80 | 3 | 32 | 0,31 | 0,6 | 11 | 0,4 | 0,3 | 43 | 25 | |
| 0,80-1,00 | 3 | 53 | 0,31 | 0,5 | 10 | 0,4 | 0,3 | 52 | 21 | |
| Granulometria | | | | Atributos físicos | | | | | | |
| Camadas (m) | Areia | Argila | Silte | Pt | Macro | Micro | Ds | | | |
| | ----- (g kg ⁻¹) ----- | | | | ----- (m ³ m ⁻³) ----- | | (g cm ⁻³) | | | |
| 0,00-0,20 | 832 | 136 | 31 | 0,32 | 0,09 | 0,23 | 1,85 | | | |
| 0,20-0,40 | 812 | 147 | 41 | 0,32 | 0,08 | 0,24 | 1,84 | | | |
| 0,40-0,60 | 789 | 179 | 32 | 0,38 | 0,11 | 0,27 | 1,80 | | | |
| 0,60-0,80 | 783 | 179 | 38 | 0,39 | 0,17 | 0,22 | 1,65 | | | |
| 0,80-1,00 | 767 | 201 | 32 | - | - | - | - | | | |

Pt = porosidade total; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Ds = densidade do solo.

Posteriormente, baseado nos resultados da análise do solo, foram calculadas as doses de calcário, segundo as recomendações propostas por Spironello et al. (1996), conforme equação 1, considerando a profundidade de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m:

$$NC = CTC \times (V2 - V1)/10 \times PRNT \quad (1)$$

Onde: NC = Necessidade de calagem (t ha⁻¹); V2 = Saturação de bases a atingir - 70% para a cana-de-açúcar; V1 = Saturação de bases atual; CTC = capacidade de troca de cátions (mmol_c dm⁻³); PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado.

No preparo convencional foram aplicadas 2,6 Mg ha⁻¹ do calcário (dose

recomendada) e $1,95 \text{ Mg ha}^{-1}$ no preparo profundo, apenas na faixa do canteiro (3/4 da dose) e $0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$ (1/4 da dose) nos tubos condutores, situados atrás da haste subsoladora, com saídas a 0,40 m e 0,80 m de profundidade. A definição da menor dose em profundidade foi devido ao menor volume corrigido em filetes. Na Tabela 2, encontra-se a caracterização do calcário utilizado.

Tabela 2 - Caracterização do calcário utilizado em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2017

| Características do calcário | | | | |
|-----------------------------|---------|-----------------|-----------------------|-------------------------|
| CaO (%) | MgO (%) | Reatividade (%) | PN (%) ⁽¹⁾ | PRNT (%) ⁽²⁾ |
| 24 | 15 | 88 | 79 | 70 |

⁽¹⁾PN = Poder de Neutralização ou equivalente em CaCO_3 ; ⁽²⁾PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total

O plantio foi realizado de forma mecanizada, com 18 gemas viáveis m^{-1} , depositadas a uma profundidade de 30-40 cm, utilizando a variedade RB96-6928. Para a adubação foram utilizados 800 kg do formulado 04-20-15, o equivalente a 32 kg N ha^{-1} , $160 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $120 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$, aplicado no sulco de plantio. Foram aplicados sobre os toletes 330 mL ha^{-1} do inseticida Singular (Fipronil); $5,0 \text{ L ha}^{-1}$ do inseticida nematicida Pottente (Benfuracarbe) e 500 mL do fungicida Comet (Piraclostrobina), além de 100 mL ha^{-1} de microgeo, seguindo o padrão da Empresa Agrícola.

1.2.3 Tratamentos e delineamento experimental

Empregou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas por três sistemas de preparo do solo: 1 – Preparo Convencional (PC), 2 – Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa (PPFSER), 3 – PPFSEr modificado. As subparcelas constituídas por quatro doses de calcário (0, 1, 2 e 3 vezes a dose recomendada). Na figura 3 é possível observar o equipamento utilizado, denominado “Penta” e a forma como a aplicação de calcário foi feita pelo mesmo.

Figura 3 - Representação do equipamento “Penta”, com a presença de haste subsoladora e enxada rotativa, para realização do preparo profundo (A), com a respectiva aplicação de calcário apenas na faixa de plantio (B)



Fonte: Mafes Agromecânica (A); Eriene Alves, 2017 (B).

Os sistemas de preparo foram caracterizados pelas seguintes operações: 1.Preparo Convencional: constituiu-se de uma aração, a uma profundidade de 0,30 m com grade aradora de arrasto, de 28 discos recortados e espaçamento de 0,28m entre discos; seguido por aplicação de calcário em área total. Posteriormente empregou-se a subsolagem, com equipamento de quatro hastes, espaçadas em 1,5 m e profundidade de trabalho a 0,40 m, finalizando com uma aragem niveladora, a 0,30 m de profundidade; 2.Preparo Profundo: utilizou-se enxada rotativa equipada com 16 facas e, haste subsoladora, que trabalham a 0,40 m e 0,80 m de profundidade, respectivamente, em metade da área cultivada, e, aplicação de calcário em área total; 3.Preparo Profundo modificado: preparo com enxada rotativa e haste subsoladora em metade da área cultivada e aplicação de calcário apenas na faixa de preparo (metade da área da parcela). No PPFSER modificado, foram aplicados $\frac{3}{4}$ da dose recomendada de calcário na superfície do solo de forma manual e incorporado com enxada rotativa e haste subsoladora, e $\frac{1}{4}$ da dose foi aplicada nos filetes situados atrás da haste subsoladora, com saídas a 0,40 m e 0,80 m de profundidade. O centro das faixas de preparo foi demarcado com um sulco raso (0,10 - 0,15 m) previamente à aplicação do calcário, a fim de facilitar a distribuição do mesmo na superfície do solo de forma mecanizada.

As unidades experimentais (faixas) foram constituídas por cinco linhas duplas de 20m de comprimento cada, com espaçamento alternado de 1,40x0,50m entre linhas. As faixas de preparo apresentavam 0,80m de largura (canteiro), com os sulcos de plantio distanciados 0,50m entre si, localizados no centro da área revolvida.

1.2.4 Avaliações

1.2.4.1 Estoque de C no solo

O monitoramento do estoque de C no solo foi realizado antes da instalação do experimento e após a colheita da cana-de-açúcar. Coletaram-se amostras por meio do trado tipo sonda, nas camadas de 0,0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m de profundidade, no centro da linha de tráfego e na entrelinha de plantio.

Para cada profundidade, as amostras foram compostas por quatro subamostras, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente, foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira com malha de 2 mm e moídas em moinho de bola, para determinação dos teores de C-orgânico total (COT), por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®) (SWIFT,1996). Este baseia-se no princípio da combustão da amostra em elevadas temperaturas (900-950°C), associada a um influxo de gás oxigênio. Todo o carbono é convertido em CO₂ e o nitrogênio em óxidos (NO_x). O CO₂ é mensurado em um detector infravermelho, ao passo que os óxidos de nitrogênio sofrem um processo de remoção de oxigênio, formando gás N₂. O nitrogênio é então quantificado através de condutividade térmica (LECO CORPORATION, 2011).

O estoque de C no solo foi calculado conforme equação (VELDKAMP, 1994):

$$\text{Estoque} = d \times \mu \times e \quad (2)$$

Onde: Estoque = estoque de C no solo (Mg ha⁻¹); d = densidade aparente do solo na camada estudada (g cm⁻³); μ = teor de C no solo (%); e = espessura da camada estudada (cm).

Os estoques de C foram corrigidos utilizando-se o tratamento referência (preparo convencional), segundo metodologia descrita em Ellert e Bettany (1995). Para o fator densidade do solo, utilizado na equação 2, foram utilizados dados obtidos através de análises para atributos físicos do solo, provenientes de outro projeto já finalizado.

1.2.4.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Por ocasião da colheita da cana-de-açúcar, foram coletadas por meio de trado tipo sonda, amostras de solo nas camadas de 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, no centro da entrelinha de plantio da cultura (área não trafegável). Para cada amostra, em cada profundidade de coleta, foram retiradas quatro subamostras, colocadas em sacos plásticos hermeticamente vedados e imediatamente acondicionadas em caixas térmicas refrigeradas. Nestas amostras foi realizado o fracionamento físico da matéria orgânica pelo método granulométrico de acordo Cambardella e Elliot (1992), que consiste em separar o carbono orgânico do solo em duas frações: carbono orgânico particulado (COP), menos decomposto e mais recentemente depositado no solo, e carbono associado a minerais (COAM), mais recalcitrante e humificado.

Para tanto, foram pesados 20 g de solo seco ao ar, tamisados em malha de 2 mm, em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio 5 g L^{-1} . Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e enxaguadas com água destilada até remoção total da argila. A fração particulada retida na peneira (COP) associada à areia foi transferida para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seca em estufa de circulação de ar forçada a 50°C até atingir massa constante. A fração que atravessou a peneira correspondeu às frações de silte e argila (Figura 4).

Figura 4 - Detalhes do procedimento para fracionamento físico da matéria orgânica do solo. A: Agitação das amostras em agitador horizontal. B: Separação das frações, em peneira de malha de 0,053 mm. C: Secagem em estufa a 50°C, em potes de alumínio, da fração particulada retida. D: Fração retida após moagem, para leitura em analisador elementar automático



Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido à determinação de C em analisador elementar automático, da marca LECO, modelo TruSpec CHNS, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COP), de acordo com a equação 3:

$$\text{COP} = \frac{\text{CFP} \times \text{MFP}}{\text{Ps}} \quad (3)$$

Equação 3: COP = teor de carbono orgânico particulado do solo (g kg^{-1}); CFP = teor de

carbono da fração particulada (g kg^{-1}); MFP = massa da fração particulada (g); Ps = massa da amostra inicial do solo (20 g).

De posse dos resultados dos teores de carbono orgânico total (COT) e COP, foram calculados por diferença, os teores de carbono orgânico ligado a minerais (COAM), conforme equação 4:

$$\text{COAM} = \text{COT} - \text{COP} \quad (4)$$

Equação 4: COAM = teor de carbono orgânico associado a minerais no solo (g kg^{-1}); COT = teor de carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}); COP = teor de carbono orgânico particulado do solo (g kg^{-1}).

Com base nos resultados de COT e em cada fração, determinou-se o grau de labilidade (COT/COP) da MOS para cada tratamento (BAYER et al., 2009).

1.2.4.3 Determinação dos fatores microbiológicos

Para as análises microbiológicas, logo após a colheita da cana-de-açúcar, foram coletadas por meio de trado tipo sonda, amostras de solo nas camadas de 0,00-0,20 m, na entrelinha de plantio (área não trafegável), para a determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), quocientes microbiano (qMIC) e metabólico (qCO_2).

1.2.4.3.1 Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo

A análise da biomassa microbiana do solo (BMS) foi realizada em duplicata, utilizando a metodologia de Ferreira et al. (1999). As amostras de solo foram secas em estufa durante 24h com ventilação a 30°C ; em sequencia foram passadas em peneira de malha de 2,0 mm e pesadas em erlenmeyer de 250 mL (para cada parcela: duas amostras de 50 g). Posteriormente foram reumedecidas com 3 mL de água destilada

para atingir 25% da capacidade de campo de um solo arenoso (REICHARDT, 1988) e agitadas, visando uniformizar a distribuição da umidade. Para cada tratamento, uma amostra foi colocada em forno micro-ondas por 70 s, tempo obtido pela equação 5:

$$T = r \times \frac{mt}{P} \quad (5)$$

Onde: T = tempo real de exposição das amostras ao micro-ondas; r = 800J g⁻¹ de solo (quantidade de energia necessária para exposição); mt = massa total das amostras a serem irradiadas (g); P = potência real do aparelho (W).

A potência real do aparelho foi calculada pela equação 6:

$$P = \frac{C_p \times K \times \Delta t \times m}{T} \quad (6)$$

Onde: P = potência real do aparelho (W); C_p = 1 J ml⁻¹ °K⁻¹ (capacidade da água de receber calor); K = 4,184 [fator de correção de cal m⁻¹ °K⁻¹ para watts (J s⁻¹)]; Δt = variação de temperatura, em °C de 1 L de água em 2 min de exposição; m = 1000 g (massa da água em gramas); t = 120 s (tempo de exposição da água ao micro-ondas).

As amostras irradiadas e não irradiadas foram submetidas à extração com 50 mL de sulfato de potássio - K₂SO₄ (0,5 mol L⁻¹) por 30 min, em agitador rotatório circular e posteriormente foram decantadas e filtradas em papel filtro.

A determinação do carbono nos extratos irradiados e não irradiados foi feita com 10 mL do extrato, oriundo dos 50 mL após a filtração e adição de 2 mL de K₂Cr₂O₇ (0,066 mol L⁻¹), 10 mL de H₂SO₄ concentrado e, 5 mL de H₃PO₄ concentrado. Após o resfriamento foram adicionados 50 mL de água destilada. A titulação foi feita utilizando-se sulfato ferroso amoniacal (0,04 mol L⁻¹), com fenil-alanina como indicador. O carbono extraído do solo foi calculado pela equação 7:

$$C = \frac{(V_b - V_a) \times N \times 1000 \times V_{\text{extrator}}}{(\text{volume do extrato} \times \text{massa do solo seco})} \quad (7)$$

Onde: C = carbono extraído do solo (mg kg^{-1}); V_b = volume (mL) do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ gasto na titulação do branco; V_a = volume (mL) do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ gasto na titulação da amostra; N = normalidade exata do $(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$, N = 0,677; V_{extrator} = volume de K_2SO_4 utilizado na extração = 50 mL; V_{extrato} = volume de K_2SO_4 utilizado para análise = 10 mL; Massa do solo seco em gramas = 50g.

O C_{mic} foi calculado pela equação 8:

$$C_{mic} = \frac{CI - CNI}{K_{ec}} \quad (8)$$

Onde: CI = carbono extraído do solo irradiado; CNI = carbono extraído do solo não irradiado; K_{ec} = proporção total do carbono microbiano extraído após irradiação = 0,21 (FRIGHETTO, 2000).

Para o fator de correção K_{ec} , adotou-se o valor de 0,21. O mesmo, quando citado na literatura, é muito variável (0,21 a 0,45), não havendo um consenso a respeito do valor a ser utilizado (FRIGHETTO, 2000).

1.2.4.3.2 Quociente metabólico ($q\text{CO}_2$)

O quociente metabólico, expresso em $\text{mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CBMS h}^{-1}$, foi calculado pela razão entre o C-CO_2 liberado na análise de respiração microbiana e o teor de carbono na biomassa microbiana do solo (CBMS) (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

1.2.4.3.3 Quociente microbiano ($q\text{MIC}$)

O quociente microbiano, expresso em porcentagem, foi calculado pela relação entre o teor de carbono da biomassa microbiana (CBMS) e o teor de carbono orgânico total (COT) (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

1.2.4.4 Produtividade de colmos e açúcar total recuperável (ATR)

Aos 16 meses após o plantio foi avaliada a produtividade de colmos (Mg ha^{-1}) da cana planta – “ano e meio”, por meio da colheita mecânica e pesagem dos colmos em transbordo equipado com célula de carga. Para a avaliação do ATR foram coletados 20 colmos por parcela e submetidos ao desponte na altura da gema apical (ponto de quebra). Posteriormente, essas amostras foram identificadas e enviadas para laboratório, onde foram analisadas segundo metodologia descrita por Fernandes (2003).

1.2.5 Análise estatística

Os dados foram analisados quanto à sua distribuição pelo teste de Shapiro Wilk. Quando não foram considerados normais, foram transformados de forma a atenderem às pressuposições da análise de variância e, quando considerados normais, foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

Para as variáveis estoque de C, matéria orgânica do solo (MOS), C presente na biomassa microbiana (C_{BMS}), produtividade e ATR, os dados foram submetidos à análise de regressão ($p \leq 0,05$) e quando os mesmos não apresentaram interação significativa, foram submetidos ao teste de médias – LSD a 5% de significância. Foi realizada ainda uma análise de correlação de Pearson para as variáveis temperatura e umidade do solo, relacionadas aos teores de C_{BMS} .

1.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Estoque de carbono no solo

Avaliando a utilização de diferentes tipos de preparo de solo e doses de calcário, constatou-se que os tipos de preparo para a implantação da cultura da cana-de-açúcar afetaram o estoque de carbono (C) no solo, nas diferentes profundidades amostradas.

A utilização do preparo convencional limitou ($p \leq 0,05$), aproximadamente 11 Mg C ha^{-1} comparado aos demais preparos, profundo e profundo modificado, os quais não apresentaram diferença entre si (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise de variância e teste de médias para o estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) aportado no perfil de 0,00 – 1,00m de profundidade, na cultura da cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho de textura média

| | Probabilidade de F |
|------------------------------------|--------------------|
| Dose de calcário (D) | 0,2052 |
| Preparo de solo (P) ⁽¹⁾ | 0,0499* |
| D x P | 0,7341 |
| CV1 (%) (P) | 7,81 |
| CV2 (%) (D) | 8,95 |
| PC | 120b |
| PPFSER | 132a |
| PPFSER modificado | 131a |
| DMS | 9,93 |

*Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si. ⁽¹⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSER = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSER modificado = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo.

A utilização do preparo convencional resultou nos menores estoques de C no solo, com aproximadamente 121 Mg ha^{-1} , o que representa um decréscimo de 9% nos estoques de C. Tal fato pode estar associado ao maior revolvimento realizado em área total, na camada superficial do solo, levando à maior aeração, aumento da temperatura na camada revolvida, ruptura dos agregados e conseqüente exposição da matéria orgânica à ação de microrganismos. Além disso, embora os dados não apresentem diferença estatística ($p \leq 0,05$), a utilização do preparo profundo resultou na maior biomassa radicular analisada no perfil de 0,00 a 0,80m de profundidade (vide Capítulo 2), representando um aumento de 10% em relação à utilização do preparo convencional, ou seja, o equivalente a $0,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa de raízes. Neste caso, considerando que aproximadamente 43% da biomassa radicular é constituída por C (ALVAREZ et al., 2000), o preparo profundo estaria adicionando ao solo 130 kg ha^{-1} de C. De acordo com Carmeis Filho (2016), em regiões tropicais, onde as taxas de

decomposição da MOS são mais elevadas, as raízes assumem um importante papel incorporando C ao solo.

Uma vez que não foi constatado efeito da aplicação do calcário e como os dados provenientes da utilização do preparo profundo e profundo modificado não apresentaram diferença entre si, foi feita uma comparação para a produção de biomassa radicular considerando-se apenas os preparos convencional e profundo modificado, que apresentaram as menores e maiores médias de produção para raízes, respectivamente.

A mobilização do solo nos canteiros, realizada de forma localizada, aliada à ação da enxada rotativa que atua na quebra dos torrões, refletiu em baixa resistência do solo à penetração radicular (ALVES, 2020) quando se considera valores acima de 2,0 MPa como limitantes ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (TAYLOR et al., 1966), permitindo o maior crescimento de raízes, o que conseqüentemente contribuiu para o maior acúmulo de C no solo, embora de baixa magnitude. As raízes possuem elevado potencial para incrementar C ao solo, posto a recalcitrância dos seus compostos, como a lignina, por exemplo, que está associada à formação de substâncias húmicas (RASSE et al., 2005; BAYER et al., 2011). Resultados semelhantes na cultura da cana-de-açúcar foram encontrados por Lima (2016) em experimento conduzido em um Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, comparando a utilização dos preparos convencional e profundo na cultura, até 1,00 m de profundidade, onde o preparo profundo resultou em maior biomassa radicular.

Portanto, embora a utilização do preparo profundo seja uma técnica mais agressiva à estrutura do solo e conseqüentemente à proteção do C, a mesma é compensada por ser realizada em apenas uma faixa específica da área, ou seja, 50% da área cultivada, o que reduz o seu potencial de desestruturação do solo, resultando no maior acúmulo de C. Resultados semelhantes foram relatados por Teixeira et al (2018), testando os preparos profundo, convencional, cultivo mínimo e plantio direto em cana-de-açúcar, onde o preparo convencional apresentou o menor estoque de C, com aproximadamente 65 Mg ha^{-1} , na camada de 0 à 0,7 m. Segundo Souza et al. (2017), o preparo do solo apenas na linha da cultura perturba uma área proporcionalmente menor em comparação com o preparo em área total, o que leva ao maior acúmulo de MOS e

consequentemente, aumenta os estoques de carbono orgânico do solo (COS), corroborando com os resultados deste estudo.

Weiler et al. (2019) avaliando o balanço de carbono em áreas de cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo, constatou que a longo prazo, a redução das operações de preparo do solo, com o preparo apenas na linha de plantio por exemplo, poderia contribuir para o acúmulo de estoques de COS. Segundo o mesmo autor, a utilização do preparo convencional levou a perdas de até 5,4% dos estoques iniciais de C na camada de 0,00 a 0,20 m no primeiro ano de cultivo da cana-de-açúcar após a mobilização do solo.

Quanto ao efeito do calcário nos estoques de C no solo, vale ressaltar que ainda não há um consenso entre o efeito da aplicação de calcário nos estoques de C do solo, posto que muitos autores relatam uma redução nos estoques após a aplicação do calcário (CAIRES et al., 2006; KOWALENKO E IHNAT, 2013), enquanto outros observaram um aumento no mesmo (BRIEDIS et al., 2012a, MUÑOZ et al., 2013).

A calagem pode aumentar a atividade biológica do solo, favorecendo a mineralização da MOS e consequentemente resultar em maiores perdas de CO₂, reduzindo os estoques de COS. Por outro lado, a calagem melhora a estrutura do solo, aumenta a estabilidade das ligações organominerais e, consequentemente, a proteção físico-química do COS; ou ainda, a calagem melhora as condições do solo para o crescimento e a produtividade das culturas, bem como o retorno de C para o solo, aumentando o COS (INAGAKI, 2016). A influência da calagem no estoque de COS ainda é pouco compreendida (PARADELO et al., 2015), podendo ter efeito indireto sobre as propriedades do solo, à medida que favorecem a produção de fitomassa aérea e radicular das culturas, aumentam os teores de MOS e a atividade microbiana (GRIÈVE et al., 2005; CORRÊA et al., 2009).

Fazendo uma análise estratificada do perfil, levando-se em conta os preparos e dose de calcário utilizados, na camada superficial (0,00 a 0,20m) houve maior estoque de C (39 Mg ha⁻¹), o qual decresceu com a profundidade do solo, reduzindo-se à metade dos valores encontrados superficialmente (Tabela 4).

Tabela 4 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) aportado para cada profundidade (m) de coleta de um Latossolo Vermelho de textura média, na cultura da cana-de-açúcar

| | Probabilidade de F |
|--------------|--------------------|
| Profundidade | 0,0000* |
| CV(%) | 14,64 |
| DMS | 1,51 |
| 0,00 – 0,20 | 39,24a |
| 0,20 – 0,40 | 29,82b |
| 0,40 – 0,60 | 23,32c |
| 0,60 – 0,80 | 19,42d |
| 0,80 – 1,00 | 16,53e |

*Significativo ($p \leq 0,05$). **Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Tal fato pode estar atrelado à maior deposição de resíduos vegetais bem como a maior produção de biomassa radicular em superfície. Independente do preparo utilizado, o sistema radicular apresentou uma concentração média de 57% na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade (dados apresentados no Capítulo 2). Resultados semelhantes foram relatados por Freitas et al. (2018) avaliando os teores de carbono orgânico total no solo em diferentes sistemas de cultivo (mata nativa, cana-de-açúcar e área reflorestada), onde os maiores teores foram registrados em superfície (0,00 a 0,10 m) com conseqüente decréscimo à medida que aumentou-se a profundidade de amostragem.

Chaves e Farias (2008) em área de cultivo de cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros, constataram um estoque de C de $33,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada superficial (0,00 a 0,30m), enquanto nos demais horizontes (0,30 a 0,63m; 0,63 a 1,00m) os estoques reduziram a 26,3 e $21,2 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente, como também relatado neste estudo. Segundo os mesmos autores, embora haja um maior revolvimento na camada superficial do solo durante o preparo, proporcionando aumento da oxidação de compostos orgânicos, aquela é a zona em que a deposição dos compostos ocorre com maior intensidade, justificando os maiores estoques encontrados superficialmente.

Em estudo conduzido por Teixeira et al. (2018), os maiores valores para o estoque de carbono foram relatados em subsuperfície, diferindo dos resultados encontrados

neste trabalho. Tal fato, segundo o mesmo autor, está mais relacionado à densidade do solo e a profundidade da camada, do que propriamente aos teores de COS.

Analisando as diferentes camadas de solo, para os diferentes preparos, o preparo profundo garantiu maior estoque de C na camada de 0,00 a 0,20 m, com aproximadamente 41 Mg ha⁻¹ de C, enquanto nas camadas de 0,80 a 1,00 m foram registrados os menores estoques, próximos a 16 Mg ha⁻¹ de C para todos os preparos utilizados (Tabela 5), o que indica uma redução de aproximadamente 61% do conteúdo de C.

Nas camadas mais profundas, as diferenças nos estoques de C entre diferentes preparos são menos evidentes. Tal fato está atrelado à presença de um maior aporte de material orgânico nas camadas superficiais do solo, onde há maior concentração de raízes e onde são incorporados os resíduos vegetais da colheita, como já comentado e observado na tabela 5. Portanto, em razão da sua influência, os incrementos nos estoques de C proporcionados por diferentes manejos tornam-se mais evidentes quando em superfície (PINHEIRO et al., 2010).

Tabela 5 - Estoque de carbono (Mg ha⁻¹) aportado para cada profundidade de coleta de solo na cultura da cana-de-açúcar nos diferentes tipos de preparo, em um Latossolo Vermelho de textura média

| | | Probabilidade de F | |
|------------------|-------------------|-----------------------|----------------------------------|
| | | Profundidade | <0,001* |
| | | CV(%) | 13,89 |
| | | DMS | 2,48 |
| Profundidade (m) | PC ⁽¹⁾ | PPFSER ⁽¹⁾ | PPFSER modificado ⁽¹⁾ |
| 0,00 – 0,20 | 37,77b | 40,95a | 39,02ab |
| 0,20 – 0,40 | 27,88b | 31,64a | 29,94ab |
| 0,40 – 0,60 | 20,77b | 24,39a | 24,81a |
| 0,60 – 0,80 | 17,53b | 19,81ab | 20,91a |
| 0,80 – 1,00 | 16,91a | 16,03a | 16,64a |

*Significativo ($p \leq 0,05$). **Médias seguidas pela mesma letra na linha, não diferem entre si, pelo teste t ($p \leq 0,05$).⁽¹⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSER = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de calcário em área total; PPFSER modificado = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo.

Nas camadas de 0,40 a 1,00 m de profundidade observa-se o maior estoque de C proveniente da utilização dos preparos profundo e profundo modificado, que devido ao intenso revolvimento do solo até 0,80 m, provocado pelos mesmos, podem favorecer o deslocamento de compostos orgânicos solúveis oriundos de camadas superficiais, aumentando o acúmulo de C em camadas profundas. Embora apenas uma fração desses compostos carbonados fique no solo, são maiores as chances de que esse C fique relativamente mais protegido da decomposição microbiana em profundidade, em comparação às camadas próximas a superfície, favorecendo a utilização do preparo profundo.

Segundo Rakotovao et al. (2017), entre as principais atividades agrícolas, as operações de preparo do solo são altamente responsáveis pelas perdas de C do mesmo, sendo o seu acúmulo, uma estratégia promissora para reduzir o incremento atmosférico de CO₂ (DOSSOU-YOVO et al., 2016).

1.3.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Avaliando a matéria orgânica do solo (MOS), para todas as camadas de solo avaliadas houve interação ($p \leq 0,05$) entre os fatores preparo de solo e dose de calcário aplicada (Tabela 6). Verificou-se que os efeitos foram mais pronunciados nos preparos profundo e profundo modificado, com a aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário (7,8Mg ha⁻¹).

Tabela 6 - Probabilidades e coeficientes de variação (CV) dos teores de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COAM) e relação COP/COT, nas camadas de 0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e doses de calcário

| | COT | COP | COM | COP/COT |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| 0 a 0,20 m | | | | |
| Preparo do solo (P) | 0,349 | 0,187 | 0,355 | 0,204 |
| Dose de calcário (D) | 0,051 | <0,001* | 0,007* | <0,001* |
| P x D | 0,045* | <0,001* | 0,035* | <0,001* |
| CV1(%) | 9,08 | 6,67 | 9,66 | 8,13 |
| CV2(%) | 8,55 | 10,31 | 9,79 | 11,42 |
| 0,20 a 0,40 m | | | | |
| Preparo do solo (P) | <0,001* | 0,102 | <0,001* | 0,087 |
| Dose de calcário (D) | <0,001* | <0,001* | <0,001* | <0,001* |
| P x D | <0,001* | 0,001* | <0,001* | <0,001* |
| CV1(%) | 7,62 | 12,99 | 7,94 | 11,45 |
| CV2(%) | 6,45 | 11,39 | 7,08 | 14,01 |
| 0,40 a 0,60 m | | | | |
| Preparo do solo (P) | 0,022* | <0,001* | 0,021* | 0,002* |
| Dose de calcário (D) | 0,199 | 0,015* | 0,077 | 0,012* |
| P x D | 0,041* | 0,001* | 0,009* | <0,001* |
| CV1(%) | 10,45 | 12,40 | 11,07 | 17,07 |
| CV2(%) | 5,37 | 16,02 | 5,83 | 18,10 |
| 0,60 a 0,80 m | | | | |
| Preparo do solo (P) | <0,001* | 0,003* | <0,001* | 0,001* |
| Dose de calcário (D) | 0,243 | 0,044* | 0,135 | 0,015* |
| P x D | 0,047* | <0,001* | 0,008* | <0,001* |
| CV1(%) | 2,73 | 11,62 | 3,45 | 11,91 |
| CV2(%) | 6,12 | 15,54 | 6,43 | 15,81 |
| 0,80 a 1,00 m | | | | |
| Preparo do solo (P) | 0,001* | 0,147 | 0,002* | 0,146 |
| Dose de calcário (D) | <0,001* | 0,001* | <0,001* | 0,016* |
| P x D | 0,024* | <0,001* | 0,019* | <0,001* |
| CV1(%) | 4,81 | 19,70 | 5,87 | 22,37 |
| CV2(%) | 4,04 | 13,68 | 4,59 | 14,61 |

*Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Os teores de COT foram maiores nas camadas superficiais, como esperado, apresentando um decréscimo a partir dos 0,40m de profundidade (Tabela 7). Esse maior teor pode ser atribuído à incorporação do calcário em ambos os preparos, o que melhora as condições químicas em subsuperfície, proporcionando melhor desenvolvimento radicular e conseqüentemente, maior acúmulo de COT. Resultados semelhantes foram encontrados por Guimarães (2019), em um solo argiloso, em área de cana-de-açúcar, testando os preparos profundo e convencional, com a presença e ausência de calcário.

Os maiores teores de COT, de 6,0 g C kg⁻¹ e 6,9 g C kg⁻¹, para as camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m respectivamente, decorreram da utilização do preparo profundo com a aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário (7,8 Mg ha⁻¹), ao passo que nas camadas mais profundas os teores reduziram a valores abaixo da metade.

A redução dos teores em profundidade pode ser explicada pela textura do solo e mineralogia. Sendo um solo de textura média, com predominância de areia, as diferenças entre as taxas de decomposição da MOS são maiores quando submetida a diferentes tipos de preparo, devido a menor ligação dos compostos orgânicos com os constituintes coloidais minerais e, conseqüentemente, menor proteção física da MOS (BAYER et al., 2000). Por outro lado, Moro (2012) testando diferentes tipos de preparo na cultura, observou que quando utilizado os preparos convencional e escarificado, estes apresentaram uma média de COT 33% inferior, quando comparada ao emprego do plantio direto.

O preparo profundo modificado com a aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário resultou nos maiores teores em profundidade de COT (abaixo de 0,60m), com aproximadamente 3 g C kg⁻¹, o que pode ser decorrente da aplicação do calcário. A calagem altera o pH do solo, que a princípio pode aumentar a solubilidade de carbono orgânico (ANDERSSON; NILSSON, 2001) e conseqüentemente pode estabilizar o mesmo via pontes de Ca⁺² (SIX et al., 2004), alterando a suscetibilidade do C à decomposição microbiana e lixiviação. Segundo Briedis et al. (2012), a calagem pode promover maior retorno de C ao sistema via culturas, aumentando o teor de COT no solo. Isto se deve às melhorias químicas que o calcário fornece ao solo, sobretudo ao aumento da saturação por bases e decréscimo na saturação de Al³⁺, sendo estes dois

fenômenos, os principais responsáveis pelo acúmulo de COT.

Tabela 7 - Teores de carbono orgânico total (COT) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados

| Preparo de solo ⁽²⁾ | Dose de calcário ⁽³⁾ | | | | Equação | R ² * | P > F |
|--------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------------------------------|------------------|-------------------|
| | 0 | 2,6 | 5,2 | 7,8 | | | |
| 0,00 – 0,20m | | | | | | | |
| PC | 5,30 | 5,34 | 6,13 | 5,56 | - | - | ns ⁽¹⁾ |
| PPFSER | 5,52 | 5,46 | 5,19 | 6,08 | $0,035x^2 - 0,219x + 5,590$ | 0,782 | 0,0080 |
| PPFSER m. | 4,76 | 5,47 | 5,66 | 5,43 | $-0,035x^2 + 0,357x + 4,772$ | 0,990 | 0,0061 |
| 0,20 – 0,40m | | | | | | | |
| PC | 3,76 | 3,57 | 4,58 | 4,36 | $0,109x + 3,645$ | 0,574 | 0,0001 |
| PPFSER | 4,53 | 4,51 | 4,44 | 6,93 | $0,092x^2 - 0,448x + 4,661$ | 0,924 | <0,0001 |
| PPFSER m. | 3,97 | 4,09 | 4,67 | 4,55 | $0,088x + 3,977$ | 0,767 | 0,0062 |
| 0,40 – 0,60m | | | | | | | |
| PC | 3,02 | 3,20 | 3,29 | 3,04 | - | - | ns |
| PPFSER | 3,25 | 3,08 | 3,32 | 3,07 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 3,52 | 3,43 | 3,55 | 3,77 | - | - | ns |
| 0,60 – 0,80m | | | | | | | |
| PC | 2,60 | 2,68 | 2,70 | 2,74 | - | - | ns |
| PPFSER | 2,93 | 2,90 | 2,90 | 2,78 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 2,97 | 2,84 | 3,06 | 3,32 | $0,049x + 2,857$ | 0,649 | 0,0011 |
| 0,80 – 1,00m | | | | | | | |
| PC | 2,45 | 2,36 | 2,48 | 2,56 | - | - | ns |
| PPFSER | 2,49 | 2,18 | 2,68 | 2,48 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 2,70 | 2,52 | 2,80 | 2,87 | $0,009x^2 - 0,041x + 2,666$ | 0,676 | 0,0005 |

*Regressão significativa ($p \leq 0,05$). ⁽¹⁾ns = não significativo. ⁽²⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSER = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSER m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽³⁾Dose Recomendada de calcário ($2,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), 0 = sem aplicação de calcário, 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = duas vezes a dose recomendada de calcário; 7,8 = três vezes a dose recomendada de calcário.

Silva et al. (2014) avaliando o efeito da calagem na linha de cultivo da cana-de-açúcar, observaram que quando se compara a aplicação e a não aplicação do calcário, as perdas de C do sistema foram 48% superior quando realizada a calagem, reduzindo os teores de COT, diferindo dos resultados encontrados neste estudo. Situação

semelhante foi constatada por Marcelo et al. (2012), avaliando o efeito da calagem na respiração do solo. O mesmo autor verificou que quando o calcário foi aplicado na dose recomendada, a perda de C foi 24% maior quando comparada à do solo sem aplicação de calcário.

Segundo o IPCC (2006), a calagem é uma importante fonte de emissão de CO₂ do solo, resultante de reações de hidrólise do carbonato de cálcio, além da intensificação da atividade microbiana, pela melhoria das condições químicas do solo (FUENTES et al., 2006), que aumentam a degradação da MOS e conseqüentemente, a perda de C. Contudo, a prática de calagem neste estudo, não reduziu os teores de COT do solo quando comparado aos tratamentos em que o calcário não foi aplicado. A sua aplicação, sobretudo quando considerada o triplo da dose recomendada, refletiu nos maiores teores de COT.

O teor de COP apresentou variações nas camadas avaliadas, decorrente da utilização dos diferentes tipos de preparo e doses de calcário aplicadas (Tabela 8). Na camada superficial, o emprego do preparo convencional aliado à dose recomendada de calcário, garantiu o maior teor, com 0,93 g kg⁻¹ de COP, o qual reduziu-se a aproximadamente um terço e a um quinto, nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60m, respectivamente.

Nas camadas subsuperficiais (abaixo de 0,60 m), a utilização do preparo profundo aliado à aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário, garantiu os maiores teores, apresentando uma diferença média superior de 43% de COP quando comparado à utilização do preparo convencional e, 38% superior quando utilizado o preparo profundo modificado, ambos com 7,8 Mg ha⁻¹ de calcário.

O COP corresponde à fração da MOS formada recentemente (WENDLING et al., 2010), sensível às mudanças de uso da terra e práticas de manejo, sendo utilizado como indicador da qualidade do solo (LOSS et al., 2014). Apresenta seus maiores estoques em sistemas conservacionistas, e quando em profundidade, se dá pelo aporte de raízes ou através da incorporação dos resíduos pelos preparos de solo, onde há a inversão da leiva. Logo, ainda que ambos os sistemas de preparo tenham submetido o solo ao revolvimento, o preparo profundo é considerado mais agressivo do que o preparo convencional, pela presença da enxada rotativa, que causa grande

pulverização nas camadas superficiais, reduzindo, portanto, o estoque de COP na camada de 0,00-0,20 m. À medida que a estrutura do solo é fortalecida pela adoção de sistemas de manejo com menor revolvimento, os teores de COP são incrementados na forma de COP oclusa em agregados estáveis (CONCEIÇÃO et al., 2013).

Tabela 8 - Teores de carbono orgânico particulado (COP) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00 m, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados

| Preparo de solo ⁽²⁾ | Dose de calcário (Mg ha ⁻¹) ⁽³⁾ | | | | Equação | R ² * | P > F |
|--------------------------------|--|------|------|------|---------------------------------------|------------------|-------------------|
| | 0 | 2,6 | 5,2 | 7,8 | | | |
| 0,00 – 0,20m | | | | | | | |
| PC | 0,80 | 0,93 | 0,50 | 0,47 | - 0,054x + 0,890 | 0,662 | <0,0001 |
| PPFSER | 0,62 | 0,67 | 0,61 | 0,70 | - | - | ns ⁽¹⁾ |
| PPFSER m. | 0,60 | 0,78 | 0,62 | 0,57 | -0,008x ² + 0,056x + 0,628 | 0,594 | 0,0002 |
| 0,20 – 0,40m | | | | | | | |
| PC | 0,32 | 0,35 | 0,35 | 0,25 | -0,004x ² + 0,029x + 0,320 | 0,980 | 0,0056 |
| PPFSER | 0,30 | 0,42 | 0,39 | 0,33 | -0,006x ² + 0,055x + 0,306 | 0,907 | 0,0006 |
| PPFSER m. | 0,31 | 0,30 | 0,42 | 0,35 | 0,010x + 0,311 | 0,671 | 0,0008 |
| 0,40 – 0,60m | | | | | | | |
| PC | 0,20 | 0,17 | 0,17 | 0,14 | - | - | ns |
| PPFSER | 0,20 | 0,29 | 0,20 | 0,30 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 0,19 | 0,25 | 0,21 | 0,20 | - | - | ns |
| 0,60 – 0,80m | | | | | | | |
| PC | 0,19 | 0,23 | 0,17 | 0,17 | - | - | 0,0101 |
| PPFSER | 0,22 | 0,20 | 0,18 | 0,28 | 0,004x ² - 0,029x + 0,231 | 0,864 | 0,0002 |
| PPFSER m. | 0,21 | 0,17 | 0,17 | 0,13 | -0,009x + 0,213 | 0,945 | 0,0035 |
| 0,80 – 1,00m | | | | | | | |
| PC | 0,16 | 0,16 | 0,11 | 0,14 | - | - | ns |
| PPFSER | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,23 | 0,003x ² - 0,015x + 0,156 | 0,9360 | 0,0001 |
| PPFSER m. | 0,15 | 0,13 | 0,19 | 0,16 | - | - | ns |

*Regressão significativa (p≤0,05). ⁽¹⁾ns = não significativo. ⁽²⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽³⁾Dose Recomendada de calcário (2,6 Mg ha⁻¹), 0 = sem aplicação de calcário, 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = duas vezes a dose recomendada de calcário; 7,8 = três vezes a dose recomendada de calcário.

Para o carbono orgânico associado a minerais (COAM), também houve queda das camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40m, para as camadas mais profundas do solo (abaixo de 0,40 m) (Tabela 9). Para a camada de 0,00-0,20 m, a utilização do preparo convencional aliado à aplicação de duas vezes a dose recomendada de calcário resultou em 5,6 g kg⁻¹ de COAM; e para a camada de 0,20-0,40 m a utilização do preparo profundo com a aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário resultou em 6,5 g kg⁻¹ de COAM.

Nas camadas mais profundas, de 0,60 a 0,80 m e 0,80 a 1,00 m, o emprego do preparo profundo modificado e a aplicação de três vezes a dose recomendada de calcário, garantiram os maiores teores em profundidade, com 3,19 g kg⁻¹ e 2,70 g kg⁻¹ de COAM, respectivamente. Uma das hipóteses que sustentam estas observações é que a presença do calcário pode aumentar a solubilidade de carbono orgânico (ANDERSSON; NILSSON, 2001) e, conseqüentemente, estabilizar o mesmo via pontes de Ca⁺² (SIX et al., 2004), reduzindo a suscetibilidade do C à decomposição microbiana e lixiviação, aumentando os teores de COAM.

A maior parte do COT esteve ligada aos minerais, com valores de COAM variando entre 83 e 96% do COT. O COAM é a fração da MOS que apresenta maior estabilidade (BAYER et al., 2001), constituindo um mecanismo de proteção ao C por meio da sua interação com minerais, formando os complexos organominerais (DIECKOW et al., 2009).

O aumento dos teores de COP livre antecede a formação de COP oclusa em macro e microagregados e, posteriormente, há a formação de COAM (GOLCHIN et al., 1994), o qual garante a estabilização da MOS. Em geral, o COP encontra-se em menor proporção do que o COAM, com valores que variam de 3 a 20% do COT no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007), corroborando com os resultados encontrados neste estudo. Contudo, em condições de baixo revolvimento do solo e sob condições climáticas menos favoráveis à decomposição da MOS, a fração de COP pode aumentar no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007).

No presente trabalho, a proporção de COP em relação ao COT diminuiu em profundidade, independentemente do tratamento empregado. Essa redução pode ser decorrente da menor biomassa radicular observada em subsuperfície, uma vez que a

mesma é responsável pelo aumento nos teores de COP em profundidade. Resultados semelhantes foram relatados por Kunde et al. (2016), testando diferentes tipos de preparo do solo, com e sem a queima da palhada, para a implantação da cultura da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Tabela 9 - Teores de carbono orgânico associado a minerais (COAM) nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados

| Preparo de solo ⁽²⁾ | Dose de calcário (Mg ha ⁻¹) ⁽³⁾ | | | | Equação | R ² * | P > F |
|--------------------------------|--|------|------|------|--------------------------------------|------------------|-------------------|
| | 0 | 2,6 | 5,2 | 7,8 | | | |
| 0,00 – 0,20m | | | | | | | |
| PC | 4,50 | 4,41 | 5,63 | 5,09 | 0,114x + 4,462 | 0,641 | 0,0028 |
| PPFSER | 4,90 | 4,78 | 4,58 | 5,38 | - | - | ns ⁽¹⁾ |
| PPFSER m. | 4,16 | 4,69 | 5,04 | 4,85 | 0,093x + 4,322 | 0,682 | 0,0068 |
| 0,20 – 0,40m | | | | | | | |
| PC | 3,43 | 3,21 | 4,23 | 4,11 | 0,116x + 3,292 | 0,615 | 0,0001 |
| PPFSER | 4,23 | 4,08 | 4,05 | 6,59 | 0,099x ² - 0,504x + 4,355 | 0,934 | <0,0001 |
| PPFSER m. | 3,66 | 3,78 | 4,24 | 4,19 | 0,078x + 3,666 | 0,827 | 0,0223 |
| 0,40 – 0,60m | | | | | | | |
| PC | 2,79 | 3,03 | 3,12 | 2,90 | - | - | ns |
| PPFSER | 3,04 | 2,78 | 3,12 | 2,77 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 3,32 | 3,18 | 3,34 | 3,57 | - | - | ns |
| 0,60 – 0,80m | | | | | | | |
| PC | 2,41 | 2,44 | 2,52 | 2,57 | - | - | ns |
| PPFSER | 2,70 | 2,70 | 2,72 | 2,50 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 2,75 | 2,66 | 2,89 | 3,19 | 0,058x + 2,645 | 0,734 | 0,0002 |
| 0,80 – 1,00m | | | | | | | |
| PC | 2,29 | 2,20 | 2,36 | 2,41 | - | - | ns |
| PPFSER | 2,33 | 2,03 | 2,53 | 2,25 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 2,54 | 2,39 | 2,61 | 2,70 | 0,009x ² - 0,043x + 2,517 | 0,759 | 0,0067 |

*Regressão significativa (p<0,05). ⁽¹⁾ns = não significativo. ⁽²⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽³⁾Dose Recomendada de calcário (2,6 Mg ha⁻¹), 0 = sem aplicação de calcário, 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = duas vezes a dose recomendada de calcário; 7,8 = três vezes a dose recomendada de calcário.

Para a relação COP/COT, que representa um indicador de labilidade do C da MOS, os maiores valores foram encontrados nas camadas superficiais, sobretudo quando aplicada a dose recomendada de calcário (Tabela 10).

Nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, a utilização do preparo convencional aliado à aplicação de $2,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário resultou nos maiores valores para a labilidade do C, com 17,7 e 10,1, respectivamente, o que significa o maior aporte de C disponível no solo. O maior aporte de C promovido pelo preparo convencional, apesar da maior mineralização da MOS em área total, apresenta-se menos agressivo do que a enxada rotativa no equipamento de preparo profundo, resultando no aumento de COP e, conseqüentemente, maior labilidade do C no preparo convencional. Resultados semelhantes foram encontrados por Segnini et al. (2013), em experimento avaliando o índice de humificação da MOS quando da adoção do plantio direto e do preparo convencional para replantio de cana-de-açúcar. O mesmo autor observou que quanto maior a perturbação do solo, mais acelerada foi a decomposição das porções lábeis da MOS, resultando em um aumento relativo das estruturas recalcitrantes, como observado neste trabalho, quando utilizado o preparo profundo, que com a ação da enxada rotativa, refletiu em menor teor de COP.

Nas camadas mais profundas do solo, de 0,60-0,80 m e 0,80-1,00 m, a utilização do preparo profundo com a aplicação de $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, garantiu a maior labilidade do C, com valores médios de $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ e $9,7 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 10 - Grau de labilidade da MOS [(COP/COT)*100] nas camadas de 0,00 a 0,20; 0,20 a 0,40; 0,40 a 0,60; 0,60 a 0,80 e 0,80 a 1,00m de profundidade, em área de cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do tipo de preparo de solo e dose de calcário empregados

| Preparo de solo ⁽²⁾ | Dose de calcário (Mg ha ⁻¹) ⁽³⁾ | | | | Equação | R ² * | P > F |
|--------------------------------|--|-------|-------|-------|---------------------------------------|------------------|-------------------|
| | 0 | 2,6 | 5,2 | 7,8 | | | |
| 0,00 – 0,20m | | | | | | | |
| PC | 15,60 | 17,74 | 8,33 | 9,74 | -0,010x + 0,164 | 0,620 | <0,0001 |
| PPFSER | 11,90 | 12,11 | 12,69 | 11,86 | - | - | ns ⁽¹⁾ |
| PPFSER m. | 12,96 | 14,01 | 11,11 | 10,40 | -0,003x + 0,135 | 0,665 | 0,0015 |
| 0,20 – 0,40m | | | | | | | |
| PC | 8,70 | 10,07 | 7,06 | 6,38 | -0,004x + 0,096 | 0,656 | 0,0001 |
| PPFSER | 6,50 | 9,64 | 9,59 | 4,91 | -0,002x ² + 0,018x + 0,064 | 0,996 | <0,0001 |
| PPFSER m. | 8,93 | 7,26 | 9,10 | 8,91 | - | - | ns |
| 0,40 – 0,60m | | | | | | | |
| PC | 7,71 | 5,13 | 5,48 | 4,98 | -0,003x + 0,070 | 0,809 | 0,0125 |
| PPFSER | 6,77 | 9,81 | 6,46 | 9,53 | - | - | ns |
| PPFSER m. | 5,34 | 7,88 | 6,93 | 5,60 | - | - | ns |
| 0,60 – 0,80m | | | | | | | |
| PC | 7,06 | 9,53 | 6,21 | 5,73 | -0,001x ² + 0,005x + 0,075 | 0,751 | 0,0008 |
| PPFSER | 7,65 | 7,44 | 6,69 | 10,00 | 0,001x ² - 0,011x + 0,080 | 0,841 | <0,0001 |
| PPFSER m. | 7,91 | 6,03 | 5,31 | 4,40 | -0,003x + 0,071 | 0,965 | 0,0017 |
| 0,80 – 1,00m | | | | | | | |
| PC | 6,83 | 7,76 | 5,31 | 5,86 | - | - | ns |
| PPFSER | 6,45 | 7,86 | 5,16 | 9,72 | 0,001x ² - 0,005x + 0,064 | 0,663 | 0,0001 |
| PPFSER m. | 5,54 | 5,05 | 6,19 | 5,64 | - | - | ns |

*Regressão significativa (p≤0,05). ⁽¹⁾ns = não significativo. ⁽²⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSER = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de calcário em área total; PPFSER m. = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽³⁾Dose Recomendada de calcário (2,6 Mg ha⁻¹), 0 = sem aplicação de calcário, 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = duas vezes a dose recomendada de calcário; 7,8 = três vezes a dose recomendada de calcário.

Os maiores valores da relação COP/COT indicam maior proporção de COP, e de maior labilidade no COT. A maior labilidade do C nas camadas subsuperficiais promovida pelo preparo profundo modificado demonstra que o COP alterou significativamente a labilidade da MOS, havendo um maior aporte de C lábil e uma menor incorporação de C aos minerais subsuperficialmente.

1.3.3 Determinação dos teores de carbono da biomassa microbiana do solo

A análise de variância, bem como as médias e ajuste dos modelos da análise de regressão, para os teores de carbono da biomassa microbiana (C_{BMS}), quocientes microbiano ($qMIC$) e metabólico (qCO_2), avaliados na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade, estão apresentados na Tabela 11.

Para a variável C_{BMS} , quando utilizado o preparo profundo modificado aliado a duas vezes a dose recomendada de calcário, os dados se ajustaram ao modelo quadrático, representado pela equação $y = -2,952x^2 + 22,154x + 77,252$ ($R^2 = 0,54$), que apresenta um ponto de máximo quando aplicadas $5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, resultando em 137 mg kg^{-1} de C. O mesmo comportamento quadrático foi observado para a variável $qMIC$, quando utilizados o mesmo preparo de solo e dose de calcário, que se ajustaram à equação $y = -0,051x^2 + 0,360x + 1,549$ ($R^2 = 0,60$), resultando em um ponto de máximo equivalente a 2,4%. Já para qCO_2 , o emprego do preparo profundo sem a aplicação de calcário, resultou no maior valor, com $1,3 \text{ mg C-CO}_2 \cdot \text{g CBMS}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Os dados tiveram um comportamento quadrático, se ajustando à equação representada por $y = 0,057x^2 - 0,478x + 1,341$ ($R^2 = 0,99$).

Tabela 11 - Teores de carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), quocientes microbiano (qMIC) e metabólico (qCO₂), nas camadas de 0,00 a 0,20 m de profundidade

| Probabilidade de F | | | | | | |
|-----------------------------|--|-------------|--|--------|---|-------------------|
| | C _{BMS} (mg kg ⁻¹) | qMIC (%) | qCO ₂ (mg C-CO ₂ .g CBMS ⁻¹ .h ⁻¹) | | | |
| Dose | <0,0001* | 0,0133* | 0,0001* | | | |
| Preparo | 0,0008* | 0,0096* | 0,0064* | | | |
| D x P | <0,0001* | 0,0003* | <0,0001* | | | |
| CV1 (%) | 7,99 | 17,36 | 23,71 | | | |
| CV2 (%) | 11,31 | 18,79 | 25,95 | | | |
| Preparo solo ⁽²⁾ | Dose de calcário (Mg ha ⁻¹) ⁽³⁾ | | | | Equação | R ² ** |
| | 0 | 2,6 | 5,2 | 7,8 | | |
| C _{BMS} | | | | | | |
| PC | 100,72 | 114,98 | 80,40 | 114,60 | - | ns ⁽¹⁾ |
| PPFSER | 57,44 | 86,28 | 109,07 | 76,89 | -2,256x ² + 20,723x + 54,999 | 0,913 |
| PPFSERm. | 85,39 | 90,47 | 137,05 | 62,31 | -2,952x ² + 22,154x + 77,252 | 0,549 |
| qMIC | | | | | | |
| PC | 1,94 | 2,27 | 1,31 | 1,97 | - | ns |
| PPFSER | 1,09 | 1,63 | 2,00 | 1,32 | -0,045x ² + 0,394x + 1,050 | 0,915 |
| PPFSERm. | 1,68 | 1,72 | 2,42 | 1,06 | -0,051x ² + 0,360x + 1,549 | 0,602 |
| qCO ₂ | | | | | | |
| PC | 0,51 | 0,53 | 0,91 | 0,49 | -0,016x ² + 0,139x + 0,453 | 0,453 |
| PPFSER | 1,32 | 0,53 | 0,38 | 1,15 | 0,057x ² - 0,478x + 1,341 | 0,993 |
| PPFSERm. | 0,55 | 0,31 | 0,62 | 0,80 | 0,042x + 0,412 | 0,475 |

*Significativo pelo teste t de Student (p≤0,05). **Regressão significativa (p≤0,05). ⁽¹⁾ns = não significativo. ⁽²⁾PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSEr m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽³⁾ 0 = sem aplicação de calcário, 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = duas vezes a dose recomendada de calcário; 7,8 = três vezes a dose recomendada de calcário.

O C_{BMS} corresponde a uma fração biologicamente ativa da matéria orgânica do solo (MOS), sensível a fatores como mudanças sazonais de umidade e temperatura do solo, adição de carbono orgânico por restos culturais, exsudatos radiculares, dentre outros (ROSS, 1987; FRANZLUEBBERS et al., 1994).

O sistema de preparo profundo modificado, com a aplicação de duas vezes a dose recomendada de calcário, favoreceu o C_{BMS} em 41% e 20%, quando comparado aos preparos convencional e profundo, respectivamente, também utilizando o dobro da dose recomendada de calcário. A correção do pH e consequente disponibilização de nutrientes no solo, sobretudo de Ca²⁺, é essencial à atividade dos microrganismos.

Logo, a aplicação do calcário em profundidade pode ter favorecido a população microbiana, o que refletiu na maior produção de matéria seca aérea e radicular da cultura, contribuindo para a adição de C orgânico no solo pelos restos culturais, e, conseqüentemente, resultando em maior teor de C_{BMS} . Este resultado corrobora com diversos estudos que relatam o aumento da atividade microbiana quando realizada a calagem, e conseqüentemente resultam em maiores teores de C_{BMS} (SHAH et al, 1990; NEALE et al., 1997; ANDERSSON; NILSSON, 2001; BEZDICEK et al., 2003).

Por outro lado, considerando a intensa perturbação do solo causada pelos implementos utilizados no preparo profundo, segundo Lal et al. (1995) e Bernoux et al. (2005), poderia haver uma grande perda de C do solo, resultando em menores teores de C_{BMS} , o que, porém, não foi observado neste estudo.

Guimarães (2019), avaliando o C_{BMS} e $qMIC$ na cultura da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho Amarelo, submetido aos preparos convencional e profundo, com presença e ausência de calcário, relatou que os parâmetros avaliados apresentaram os maiores valores quando utilizado o preparo convencional sem a aplicação de calcário, atingindo $0,11 \text{ g kg}^{-1}$ e $5,2\%$ para C_{BMS} e $qMIC$, respectivamente. Segundo o mesmo autor, a aplicação de calcário pode ter elevado o pH do solo a uma faixa acima daquela considerada ótima para a atividade dos microrganismos, reduzindo a fixação de C.

Contudo, para o mesmo tipo de preparo (profundo modificado), quando utilizado o triplo da dose recomendada de calcário ($7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$), observou-se um decréscimo nos teores de C_{BMS} , bem como para $qMIC$, que chegaram a valores de 62 mg kg^{-1} de C e $1,06\%$, respectivamente. A “supercalagem” pode ter um efeito negativo sobre a produtividade das culturas e no aporte de C no solo, além de dispersar as partículas de argila, levando à desestruturação e compactação do solo, prejudicando a produção de matéria seca pelas plantas, e conseqüentemente, o aporte de MOS, tanto no curto quanto à longo prazo.

Paredes Junior et al. (2014) avaliando os sistemas de preparo convencional, cultivo mínimo e utilização da subsolagem em cana-de-açúcar, verificou que a prática do cultivo mínimo apresentou as melhores condições de manejo para o desenvolvimento dos microrganismos, bem como o maior teor de C_{BMS} , excluído o tratamento “floresta semidecídua”, composta por vegetação nativa e utilizada como área referencial da

condição original do solo. O mesmo autor relatou até $0,4 \text{ g kg}^{-1}$ de C presente na biomassa microbiana do solo, alegando que a presença de resíduos vegetais diminui a incidência de raios solares, favorecendo a manutenção de umidade e o microclima estável, gerando maior estabilidade do ecossistema.

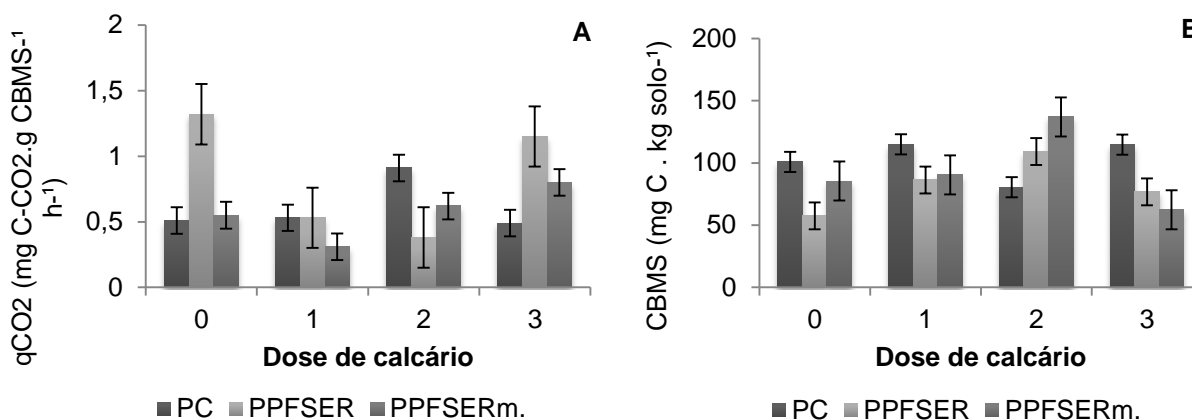
O q_{MIC} , obtido através da relação $C_{\text{BMS}}/\text{COT}$, indica a eficiência dos microrganismos em imobilizar C na sua biomassa, sendo valores em torno de 2 a 5% considerados ideais para um solo equilibrado (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008), e conseqüentemente, com teores de C disponível para os microrganismos. O valor encontrado quando utilizado o preparo profundo modificado aliado ao dobro da dose recomendada de calcário, está dentro do intervalo considerado ótimo (2,4%). Por outro lado, em condições de “supercalagem”, o decréscimo no q_{MIC} pode indicar uma faixa de pH acima daquela considerada ótima para a atividade dos microrganismos, deixando os mesmos sob condições de estresse. Silva et al. (2010), avaliando alterações na biomassa microbiana em diferentes manejos de solo, verificaram menores valores de q_{MIC} em sistemas convencionais, quando comparado ao plantio direto e cerrado nativo, o que pode ser atribuído ao estresse e baixa qualidade da MOS, segundo os autores.

Para o q_{CO_2} , a utilização do preparo profundo sem a aplicação do calcário resultou no maior valor do quociente, indicando um estresse metabólico nas populações microbianas deste local, com $1,32 \text{ mg C-CO}_2.\text{g CBMS}^{-1} \text{ h}^{-1}$. O q_{CO_2} expressa quanto de CO_2 é liberado em função do tempo, representando a taxa de respiração específica da biomassa microbiana (ALVES et al., 2011). Menores valores de q_{CO_2} têm sido observados em sistemas conservacionistas (BALOTA et al., 1998), posto que o intenso revolvimento do solo aumenta a mineralização da MOS e a liberação de CO_2 para a atmosfera (SIX et al., 2000). Segundo Martins et al. (2010), aumentos nos valores de q_{CO_2} estão relacionados à mineralização da biomassa microbiana, indicando que há maior consumo de carbono oxidável pelos microrganismos (PARTELLI et al., 2012) e, conseqüentemente, maior quantidade de C é liberado do solo.

Na representação gráfica da figura 5 é possível observar que quanto maior a perda de CO_2 do sistema (q_{CO_2}), menor é o acúmulo de C na biomassa microbiana, e vice-versa. Em condições de ambiente estressantes, a população microbiana usa o C de

suas próprias células para sua manutenção ou adaptação no solo (ISLAM; WEIL, 2000).

Figura 5 - Quociente metabólico (qCO_2) (A) e teor de CBMS (B) avaliados na camada de 0,00 a 0,20m de profundidade, em função de diferentes preparos de solo e doses de calcário, aplicados em um Latossolo Vermelho de textura média, com a cultura da cana-de-açúcar



PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPF SER = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPF SER m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. ⁽²⁾Dose Recomendada de calcário ($2,6\ Mg\ ha^{-1}$), 0 = sem aplicação de calcário, 1 = dose recomendada de calcário ($2,6\ Mg\ ha^{-1}$); 2 = duas vezes a dose recomendada de calcário ($5,2\ Mg\ ha^{-1}$); 3 = três vezes a dose recomendada de calcário ($7,8\ Mg\ ha^{-1}$).

Por fim, foi realizada uma análise de correlação de Pearson para as variáveis temperatura e umidade do solo, em relação aos teores de C_{BMS} . Os dados indicaram uma forte correlação positiva ($p \leq 0,05$) entre C_{BMS} e umidade do solo ($r=0,70$). Os dados obtidos corroboram com vários autores, que relataram maior teor de C_{BMS} em períodos de maior umidade do solo (BALOTA et al., 1998; GAMA-RODRIGUES et al., 2005; SOUZA et al., 2010; LOURENTE et al., 2011).

Paredes Junior et al. (2014) avaliando os atributos microbiológicos em cana-de-açúcar sob diferentes métodos de preparo de solo, observaram que nos períodos chuvosos, onde foi constatada maior umidade do solo, foram registrados altos valores para todos os parâmetros microbiológicos avaliados. Para os autores, os teores observados refletem as melhores condições ambientais para o desenvolvimento da população microbiana. Segundo Wardle (1990), variáveis macroclimáticas e atributos químicos, em conjunto, são quase sempre capazes de explicar a variação da atividade e dos teores de C_{BMS} .

1.3.4 Produtividade de colmos e açúcar total recuperável

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados da análise de variância para a produtividade em toneladas de colmos por hectare (TCH) e açúcar total recuperável (ATR), em função do preparo de solo e da dose de calcário utilizados. Para a variável TCH os dados foram influenciados pelo tipo de preparo e dose de calcário, ao passo que para ATR não houve diferença entre os tratamentos empregados ($p \leq 0,05$).

Tabela 12 - Produtividade em toneladas de colmos por hectare (TCH) e açúcar total recuperável (ATR), em área de produção de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista – SP, 2018

| | Probabilidade de F | |
|----------------------|--------------------|--------|
| | TCH | ATR |
| Preparo de solo (P) | 0,0147* | 0,2401 |
| Dose de calcário (D) | < 0,0001* | 0,3501 |
| P x D | < 0,0001* | 0,7419 |
| CV1 (%) | 3,99 | 1,77 |
| CV2 (%) | 3,88 | 2,14 |
| Média Geral | 127,00 | 155,00 |

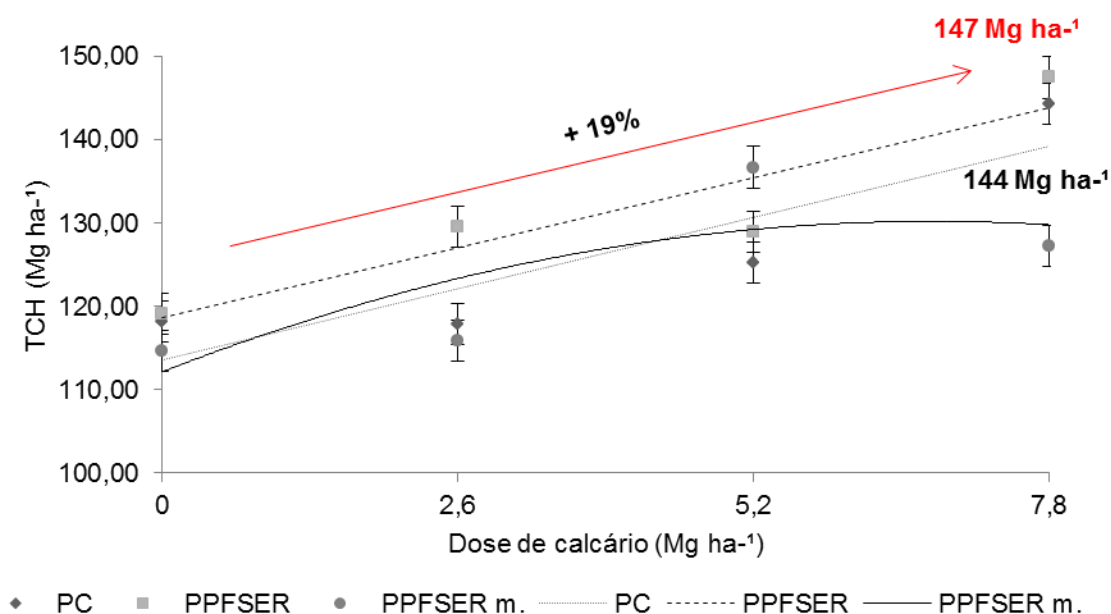
*Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).

Para os preparos convencional e profundo, os dados se ajustaram ao modelo linear de regressão, representado pelas equações y (preparo convencional) = $3,245x + 118,577$ ($R^2 = 0,85$) e y (preparo profundo) = $3,24x + 118,57$; $R^2 = 0,851$, respectivamente, que representa um incremento de $3,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de colmos para cada 2,6 toneladas de calcário aplicado, em ambos os preparos. A maior dose de calcário ($7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) aliada ao preparo profundo, garantiram a maior produtividade de colmos, alcançando 147 Mg ha^{-1} (Figura 6), representando um aumento de 19% em produtividade em relação ao tratamento em que não foi aplicado o calcário.

O mesmo comportamento foi observado para o preparo convencional e a aplicação de calcário, embora com valores inferiores de produtividade, atingindo 144 Mg ha^{-1} , o qual, contudo, não diferenciou estatisticamente do preparo profundo. Já para o preparo

profundo modificado, os dados se ajustaram à equação quadrática, com um ponto de máximo correspondente a 137 Mg ha^{-1} , quando aplicada o dobro da dose recomendada de calcário ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$), podendo-se inferir que o aumento da produtividade está relacionado às condições químicas do solo, que favorece melhorias ao ambiente de cultivo (AMARAL, 2002; GATIBONI et al., 2003). A aplicação de calcário tem se mostrado lucrativa na cultura, por aumentar a produtividade e, sobretudo, permitir a colheita durante vários anos (BASTOS et al., 2010), resultando em efeitos positivos na disponibilidade de macro e micronutrientes.

Figura 6 - Análise de regressão para a produtividade de colmos de cana-de-açúcar (TCH) em função da dose de calcário e preparo de solo utilizados



* $y(\text{PC}) = 3,29x + 113,57$; $R^2 = 0,794$; $y(\text{PPFSER}) = 3,24x + 118,57$; $R^2 = 0,851$; $y(\text{PPFSER modificado}) = -0,39x^2 + 5,33x + 112,12$; $R^2 = 0,619$. PC = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PPFSER = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário em área total; PPFSER m. = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo. Dose de calcário: 0 = sem aplicação de calcário; 2,6 = dose recomendada de calcário; 5,2 = dobro da dose recomendada de calcário; 7,8 = triplo da dose recomendada de calcário.

Rossato et al. (2017) avaliando os efeitos da aplicação de calcário na cultura, observou que quanto maior a aplicação da dose ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), maior a produtividade de colmos, corroborando com os resultados obtidos neste estudo. Rossetto et al. (2004) também avaliando os efeitos da calagem relatou acréscimos de até 13 Mg ha^{-1} de

colmos, quando o calcário foi aplicado em solos de baixa fertilidade e elevada acidez. Segundo a mesma autora, as respostas da cultura à calagem estão ligadas a solos muito ácidos e principalmente com alumínio trocável em níveis tóxicos.

Em pesquisa realizada por Prado et al. (2002) em cana planta, quanto maior a dose de calcário aplicada, àquela respondia de forma positiva com incremento em produtividade. Para os autores, as respostas positivas da cana-de-açúcar ao calcário estão diretamente relacionadas à disponibilidade dos nutrientes no solo, em decorrência da correção do mesmo.

Andrade et al. (2019), utilizando doses de até $6,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, verificou rendimento de colmos superior em até 16,5%, o que corresponde a $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ a mais de colmos, quando comparado ao tratamento sem aplicação de calcário. Em suma, esses resultados mostram que, apesar de a cana-de-açúcar ser considerada tolerante à acidez do solo (ROSSETTO et al., 2004), os níveis mais elevados de calcário proporcionaram maiores valores de produtividade, sobretudo em solos com elevada acidez e baixos teores de Ca e Mg.

Para a variável ATR os dados não apresentaram diferença estatística entre si, independente do tratamento utilizado, como apresentado na Tabela 12, com média geral de 155 Mg ha^{-1} de açúcar, a qual está acima dos valores indicados como bons ($>150 \text{ kg t}^{-1}$) por Ripoli e Ripoli (2004). O ATR é um dos principais fatores relacionados à qualidade da cultura. Ele representa todos os açúcares (sacarose, glicose e frutose) na forma de açúcares invertidos que serão recuperados na indústria, ressaltando-se que o atual pagamento de cana baseia-se neste parâmetro.

Silva et al. (2014), avaliando o efeito de diferentes doses de calcário, variando de 0 a 6 Mg ha^{-1} , em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, não constatou efeito para a variável ATR em cana-de-açúcar, corroborando com os resultados deste estudo. A ausência do efeito da calagem em parâmetros agroindustriais da cana-de-açúcar sugere que algumas características são controladas por fatores intrínsecos à própria variedade (material genético) e, portanto, menos dependente de fatores ambientais, como a acidez do solo (SILVA et al., 2014). Comportamento semelhante foi observado por Caldeira e Casadei (2010) quanto ao fornecimento de doses de até $2,58 \text{ Mg ha}^{-1}$ de

corretivo, atingindo média de 144,6 Mg ha⁻¹ de ATR, mostrando a baixa sensibilidade de determinadas variedades aos efeitos da calagem.

Por outro lado, ROSSATO et al. (2017) avaliando a produção de açúcar na cultura, decorrente da aplicação de calcário e gesso, observou um aumento quadrático na produção quando o calcário foi aplicado, sobretudo quando utilizada a dose recomendada por Spironello et al. (1996) ou quando utilizada o dobro dessa dose. Segundo os mesmos autores, estes resultados podem estar associados à disponibilidade de nutrientes no perfil do solo, decorrentes da aplicação de doses elevadas de calcário.

1.3 CONCLUSÃO

O preparo profundo do solo, sobretudo quando aliado à aplicação de doses de calcário acima da recomendada, reduz a labilidade do carbono na superfície do solo, porém, aumenta os teores de carbono orgânico associado a minerais em profundidade, bem como os teores de carbono da biomassa microbiana, com conseqüente aumento da produção de biomassa vegetal e produtividade de colmos.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. R. **Atributos físicos e produtividade de cana planta com calagem e preparo profundo canteirizado em um latossolo.** Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 85p., 2020.
- ALVES, T. S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, Londrina, v.33, p.341-347, 2011.
- AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 107p., 2002.
- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient of CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ANDRADE, P. P.; ANDRADE, L. A. B.; NOGUEIRA; F. D. Métodos de recomendação, doses de calcário e variedades no rendimento agrícola e qualidade de cana-de-açúcar (1º corte). **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, Varginha, v.1, n.1, 2019.
- BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo de sucessão de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 641-649, 1998.
- BASTOS, J. C. H. A. G.; CAZETTA J. J. O.; PRADO, R. M. Materiais corretivos e nitrogênio na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **Interciência**, Porto Alegre, v.35, n.1, p.55-58, 2010.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e nas mitigações de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.599-607, 2000.
- BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.1473-1478, 2001.
- BAYER, C. et al. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.40, p.1499–1511, 2009.
- BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v. 7, p. 55-118, 2011.

BERNOUX, M. et al. Gases do efeito estufa e estoques de carbono nos solos: inventário do Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1. p. 235-246, 2005.

BEZDICEK, D. F., BEAVER, T., GRANATSTEIN, D. Subsoil ridge tillage and lime effects on soil microbial activity, soil pH, erosion, and wheat and pea yield in the Pacific Northwest, USA. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.74, p.55–63, 2003.

BLANCO-CANQUI, H. et al. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 73:1871-1879, 2009.

BRIEDIS, C. et al. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an Oxisol under long-term no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.76, 151–160, 2012a.

BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.7, p.1007-1014, 2012.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.89, p.3-12, 2006.

CALDEIRA, D. S. A.; CASADEI, R. A. Efeito do calcário em soqueiras de três variedades de cana-de-açúcar no Mato Grosso. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v.4, n.3, p.05-09, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.3, p.777-783, 1992.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. de A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.3, n.1, p.20-25, 2008.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.129, p.40-47, 2013.

CORRÊA, J. C. et al. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 263-272, 2009.

DIECKOW, J. et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.60, p.240-249, 2009.

DOSSOU-YOVO, E. R. et al. Reducing soil CO₂ emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.156, p.44–53, 2016.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.75, p.529-538, 1995.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. 2.ed. Piracicaba: STAB, 2003. 240 p.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro ondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n. 4, p. 991-996, 1999.

FRANZLUEBBERS, A. J.; HONS, F. M.; ZUBERER, D. A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable c and n in wheat management systems. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 26, p. 1469-1475, 1994.

FREITAS, L. et al. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.28, n.1, p.228-239, 2018.

FRIGHETTO, R. T. S. Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação-extração. In: FRIGHETTO, R. T.S.; VALARINI, P.J., Coords. **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**: manual técnico. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 198p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 21).

FUENTES, J. P. et al. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.88, p.123–131, 2006.

GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 893-901, 2005.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, cap. 11, p. 159-170, 2008.

GATIBONI, L. C. et al. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.282-290, 2003.

GOLCHIN, A. et al. Study of free and occluded particulate organic-matter in soils by solid-state ¹³C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.285-309, 1994.

GRIÈVE, I. C.; DAVIDSON, D. A.; BRUNEAU, P. M. C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.125, p.39-48, 2005.

GUIMARÃES, T. M. **Preparo profundo e calagem em solos arenoso e argiloso na física e carbono do solo e na produtividade de cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado), Botucatu, 2019, 107 p.

INAGAKI, T. M. **Como a calagem pode aumentar o sequestro de carbono?** Disponível em: <<http://blog.agropro.com.br/calagem-pode-aumentar-sequestro-de-carbono/>>. 2016. Acesso: 20 de maio 2020.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, p. 69-78, 2000.

KOWALENKO, C. G.; IHNAT, M. Residual effects of combinations of limestone, zinc and manganese applications on soil and plant nutrients under mild and wet climatic conditions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.93, p.113–125, 2013.

KUNDE, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1520-1528, 2016.

LAL, R.; KIMBLE, J.; STEWART, B. A. Word soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A., eds. **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton, Advances in Soil Science, CCR Lewis Publishers, 1995. p. 1-7.

LECO CORPORATION. TruSpec CHN/CHNS Carbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur Determinators: Instruction Manual. 1. Ed. St JOSEPH, 2011. 532p.

LIMA, C. C. **Canterização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2016.

LOSS, A. et al. Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.43-54, 2014.

LOURENTE, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob sistemas de manejo e condições de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, p. 20-28, 2011.

MAIA, C. M. B. de F.; PARRON, L. M. Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais. **Embrapa Florestas-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2015.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; LA SCALA, N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. 2012. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.45-50, 2012.

MARTINS, C. M. et al. Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1883-1890, 2010.

MORO, V. J. **Emissão de gases de efeito estufa na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo e doses de nitrogênio**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Santa Maria, 64p., 2012.

MUÑOZ, C. et al. Physical protection of C and greenhouse gas emissions provided by soil macroaggregates from a Chilean cultivated volcanic soil. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B**, Copenhagen, v.62, p.739–748, 2013.

NEALE, S. P., SHAH, Z., ADAMS, W. A. Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidic organic soils following liming. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.29, p.1463–1474, 1997.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.202, p.98-107, 2015.

PAREDES JUNIOR, F. P. et al. Atributos microbiológicos em cultivos de cana-de-açúcar sob métodos de preparo do solo. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.57, n.2, p.101-107, 2014.

PARTELLI, F. L. et al. Chemical and microbiological soil characteristics under conventional and organic coffee production systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 43, n. 2, p. 847-864, 2012.

PINHEIRO, E. F. M. et al. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.333, n.1-2, p.71-80, 2010.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.1, p.129-135, 2002.

RAKOTOVAO, N. H. et al. Carbon foot print of small holder farms in Central Madagascar: the integration of agroecological practices. **Journal of Cleaner Production**, v.140, n.3, p.1165–1175, 2017.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 269, p. 341–356, 2005.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 211-216, 1988.

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

ROSS, D. J. Soil microbial biomass estimated by the fumigation-incubation procedure: Seasonal fluctuations and influence of soil moisture content. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.19, p.397-404, 1987.

ROSSATO, O. B. et al. Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lime and gypsum in Southeastern Brazil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.33, n.2, p.276-287, 2017.

ROSSETTO, R. et al. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v.63, p.105-119, 2004.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2018.

SEGNINI, A. et al. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.70, n.5, p.321-326, 2013.

SHAH, Z.; ADAMS, W. A.; HAVEN, C. D. V. Composition and activity of the microbial population in an acidic upland soil and effects of liming. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 22, p. 257–263, 1990.

SILVA, I. R. da; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, R. R. D. et al. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SILVA, S. V. et al. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **Revista Agro@mbiente Online**, Boa Vista, v.8, n.3, p.298-305, 2014.

SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.681-689, jan. 2000.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.79, p.7–31, 2004.

SOUZA, E. D. et al. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 79-88, 2010.

SOUZA, L. C. et al. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbon dioxide emissions in an oxisol and ultisol? **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1113–1121, 2017.

SPIRONELLO, A. et al. **Cana-de-açúcar**. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1996. cap.22, p.237- 239. (Boletim Técnico n. 100).

TASSO JUNIOR, L. C. et al. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.276-283, 2007.

TAYLOR, H. M; ROBERSON, G. M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Madison, v. 102, p. 18-22, 1966.

TEIXEIRA, J. G. et al. Estoque de carbono em área de cana-de-açúcar utilizando diferentes plantas de cobertura e sistemas de preparo do solo. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, Campinas, SP, n.26, 2018.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

WARDLE, D. A.; PARKINSON, N. D. Interactions between microbial variables and the soil microbial biomass, **Biology and Fertility of Soils**, Florença, v.9, p.272-280, 1990.

WEILER, D. A. et al. Carbon Balance in Sugarcane Areas Under Different Tillage Systems. **BioEnergy Research**, Berlim, Springer Science and Business Media LLC, p. 1-13, 2019.

WENDLING, B. et al. Organic-matter pools of soil under pines and annual cultures. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v. 41, n.14, p.1707-1722, 2010.

CAPÍTULO 2 – EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E BALANÇO DE CARBONO NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

RESUMO: Mudanças no sistema de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), envolvendo aumento dos processos mecanizados, elevam a compactação do solo, reduzindo o crescimento das raízes, a produtividade e a longevidade dos canaviais, sendo necessária a adoção de práticas que atenuem esses efeitos. O preparo profundo canteirizado do solo, acompanhado da dose adequada de calcário, pode resultar em melhor uso de água e nutrientes, e conseqüentemente, no melhor desenvolvimento radicular e aumento da produção de biomassa vegetal. No entanto, essa técnica pode alterar as entradas e saídas de C do solo, afetando o estoque e balanço de C no sistema solo-planta-atmosfera. O objetivo deste trabalho foi avaliar em área de cultivo de cana-planta, o efeito de preparos de solo e a aplicação ou não de calcário, em relação às emissões de GEE, bem como o acúmulo de C na biomassa aérea e radicular da cultura, estimando o balanço de C no sistema de produção da cana-de-açúcar. Para tanto, foi realizado um experimento em primeira safra (cana-planta), em solo de textura média, utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, em função do manejo convencional do solo versus preparo profundo canteirizado, com ou sem a aplicação de calcário. Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e comparados pelo teste LSD ($p \leq 0,05$). O sistema de preparo profundo canteirizado, com a aplicação de calcário, promove a maior emissão de CO_2 do solo, e em contrapartida, leva ao maior aporte de C via biomassa aérea e radicular, garantindo a maior produtividade do canavial e, conseqüentemente, menor emissão relativa de GEE, ou seja, menor quantidade de gases emitido por unidade de massa de colmos produzida.

2.1 INTRODUÇÃO

Acredita-se que a temperatura média global, até o final do século XXI, deverá aumentar entre 1,2 e 4,8°C (IPCC, 2014), afetando diretamente os eventos climáticos, bem como o regime de chuvas e os períodos de seca (INGLESI-LOTZ; DOGAN, 2018), e conseqüentemente, o potencial produtivo das culturas. Esses eventos estão relacionados ao aumento da concentração atmosférica dos gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) (SMITH et al., 2014), emitidos em grande parte pelo setor agrícola.

No Brasil, considerado o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, a grande maioria das áreas cultivadas estão sob o sistema de manejo convencional, onde, paralelamente tem ocorrido a intensificação da mecanização agrícola. A combinação desses fatores tem promovido modificações físicas no solo e, incidindo na intensificação dos processos de degradação da estrutura do solo, erosão e compactação (OLIVEIRA NETO et al., 2011; ESTEBAN et al., 2019), além de acelerar a oxidação do carbono (C) orgânico, liberando em um curto período de tempo, altas quantidades de CO₂ para atmosfera (SILVA-OLAYA et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2013; FIGUEIREDO et al., 2015).

O crescente interesse pelo potencial que o solo apresenta em sequestrar C e, conseqüentemente, contribuir para mitigar o efeito estufa, as práticas de preparo e manejo empregadas na cultura vem sendo gradativamente substituídas pelo sistema de preparo concentrado em faixas, visando a redução da emissão de GEE e aumento do estoque de C no solo (FELLER; BERNOUX, 2008). A quantidade de C perdida está correlacionada com a intensidade da ruptura e o volume de solo perturbado pelos implementos agrícolas (LA SCALA et al 2006), logo, dependendo do tipo de solo e sistema de manejo adotado, os solos tornam-se importantes fontes ou sumidouros de C atmosférico (LAL et al 1995, BERNOUX et al 2005), reduzindo ou potencializando a sustentabilidade de produção.

Neste contexto, visando reduzir as emissões de CO₂ advindas do solo, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da adoção dos sistemas de preparo do solo com a aplicação ou não de calcário, quanto à emissão de gases de efeito estufa e balanço de C no sistema solo-planta-atmosfera. Acredita-se que a prática promova o maior aporte

de C via biomassa aérea e radicular, reduzindo a emissão relativa de GEE, ou seja, a quantidade de GEE emitidos por unidade de massa de colmos produzida.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização e localização da área experimental

O experimento foi instalado em março de 2017, em área de reforma de canavial, com colheita mecanizada, pertencente à Usina Barra Grande, grupo Zilor, em Lençóis Paulista – SP, cuja localização geográfica é: 22°40'29.11"S e 48°46'36.42"O, com altitude média de 651 m (vide Figura 1, capítulo 1). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura média (SANTOS et al., 2018).

O clima do local é do tipo Cwa, segundo a classificação de Koppen. Apresenta precipitação média anual de 1258 mm, temperatura média anual de 20,5°C, com máxima de 38°C entre os meses de novembro e fevereiro e, mínima de 4°C, entre os meses de junho a agosto (vide Figura 2, capítulo 1).

2.2.2 Instalação e condução do experimento

Anteriormente à reforma do canavial, para a caracterização inicial e instalação dos tratamentos, foram retiradas três amostras aleatórias representativas da área experimental, em cada uma das camadas de 0,0-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, totalizando 12 amostras, a fim de representar os atributos químicos, físicos e teor de carbono orgânico do solo (vide Tabela 1, capítulo 1).

Posteriormente, baseado nos resultados da análise do solo, foram calculadas as doses de calcário, segundo as recomendações propostas por Spironello et al. (1996), conforme equação 1, considerando a profundidade de 0,0-0,20 e 0,20-0,40 m:

$$NC = CTC \times (V2 - V1) / 10 \times PRNT \quad (1)$$

onde: NC = Necessidade de calagem (t ha⁻¹); V2 = Saturação de bases a atingir - 70%

para a cana-de-açúcar; $V1$ = Saturação de bases atual; CTC = capacidade de troca de cátions (mmolc dm^{-3}); PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado.

No preparo convencional foram aplicadas $5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ do calcário (dobro da dose recomendada) e, no preparo profundo, $3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ apenas na faixa do canteiro ($3/4$ da dose) e, $1,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ ($1/4$ da dose) nos tubos condutores, situados atrás da haste subsoladora, com saídas a $0,40 \text{ m}$ e $0,80 \text{ m}$ de profundidade. A definição da menor dose em profundidade foi devido ao menor volume corrigido em filetes. Na Tabela 2, exposta no capítulo 1, encontra-se a caracterização do calcário utilizado.

O plantio foi realizado de forma mecanizada, com 18 gemas viáveis m^{-1} , depositadas a uma profundidade de $30\text{-}40 \text{ cm}$, utilizando a variedade RB96-6928. Para a adubação foram utilizados 800 kg do formulado 04-20-15, o equivalente a 32 kg N ha^{-1} , 160 kg P ha^{-1} e 120 kg K ha^{-1} , aplicado o sulco de plantio. Foram aplicados sobre os toletes 330 mL ha^{-1} do inseticida Singular (Fipronil); $5,0 \text{ L ha}^{-1}$ do inseticida nematicida Pottente (Benfuracarbe) e 500 mL do fungicida Comet (Piraclostrobina), além de 100 mL ha^{-1} de microgeo, seguindo o padrão da Empresa Agrícola.

2.2.3 Tratamentos e delineamento experimental

Empregou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos, o preparo de solo e dose de calcário, sendo: Preparo Convencional (PC) sem aplicação de calcário e PC com a aplicação do dobro da dose recomendada ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$), Preparo Profundo Modificado em faixa (PPFSER modificado) sem aplicação de calcário e, PPFSER modificado com a aplicação do dobro da dose recomendada de calcário ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$). Na figura 3, exposta no capítulo 1, é possível observar o equipamento “Penta” utilizado para a realização do preparo profundo em faixas.

Os sistemas de preparo foram caracterizados pelas seguintes operações: 1.Preparo Convencional: constituiu-se de uma aragem, a uma profundidade de $0,30 \text{ m}$ com grade aradora de arrasto, de 28 discos recortados e espaçamento de $0,28\text{m}$ entre discos;

seguido por aplicação de calcário em área total. Posteriormente empregou-se a subsolagem, com equipamento de quatro hastes, espaçadas em 1,5 m e profundidade de trabalho a 0,40 m, finalizando com uma aragem niveladora, a 0,30 m de profundidade; 2.Preparo Profundo modificado: utilizou-se enxada rotativa equipada com 16 facas e, haste subsoladora, que trabalham a 0,40 m e 0,80 m de profundidade, respectivamente, em metade da área cultivada, e, aplicação de calcário apenas na faixa de preparo (metade da área da parcela). No PPFSER modificado, foram aplicados $\frac{3}{4}$ da dose recomendada de calcário na superfície do solo de forma manual e incorporado com enxada rotativa e haste subsoladora, e $\frac{1}{4}$ da dose foi aplicada nos filetes situados atrás da haste subsoladora, com saídas a 0,40 m e 0,80 m de profundidade. O centro das faixas de preparo foi demarcado com um sulco raso (0,10 - 0,15 m) previamente à aplicação do calcário, a fim de facilitar a distribuição do mesmo na superfície do solo de forma mecanizada.

As unidades experimentais (faixas) foram constituídas por cinco linhas duplas de 20m de comprimento cada, com espaçamento alternado de 1,40x0,50m entre linhas. As faixas de preparo apresentavam 0,80m de largura (canteiro), com os sulcos de plantio distanciados 0,50m entre si, localizados no centro da área revolvida.

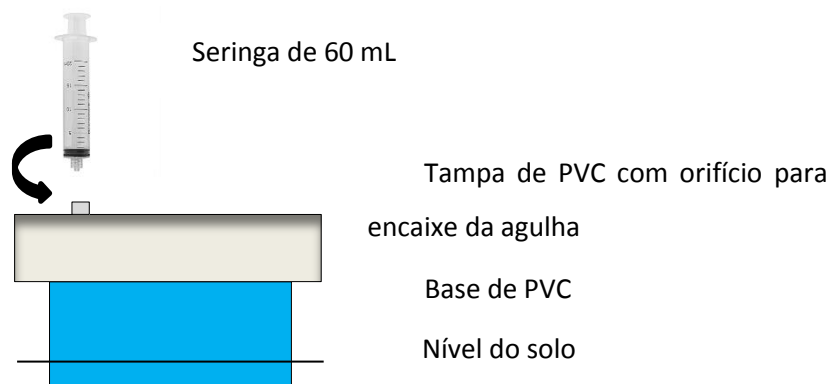
2.2.4 Avaliações

2.2.5.1 Coleta de gases de efeito estufa (CO₂, N₂O, CH₄)

A coleta de amostras de gases de efeito estufa (GEE) foi realizada de acordo com a metodologia de Varner et al. (2002). As câmaras utilizadas para a coleta dos GEE foram constituídas por uma base cilíndrica de policloreto de vinila (PVC), com as seguintes dimensões: 20 cm de altura x 30 cm de diâmetro, e uma tampa de 10 cm de altura, sendo a área da base da câmara de 0,0707 m². Na tampa, por onde foi realizada a coleta dos gases, foi confeccionada uma pequena válvula, visando manter a temperatura e a pressão interna da câmara iguais à do ambiente externo, conforme demonstrado na Figura 1. A profundidade de penetração da base no solo foi de aproximadamente cinco centímetros, e sua fixação na superfície se deu através de

movimentos rotacionais. As câmaras ficaram fixas durante todo o experimento, de modo a permitir a amostragem de gases no mesmo local.

Figura 1 - Representação das câmaras estáticas para coleta das amostras de gases de efeito estufa.



Fonte: Ana Stella F. Gonçalves (2018)

As coletas iniciaram-se após o preparo do solo, em março de 2017, quando as câmaras foram distribuídas nas parcelas, posicionadas no centro da entrelinha de plantio (0,50 m) e outra, no centro da linha de tráfego (1,40 m) (Figura 2), e foram finalizadas em junho de 2018, quando realizou-se o primeiro corte da cana-de-açúcar.

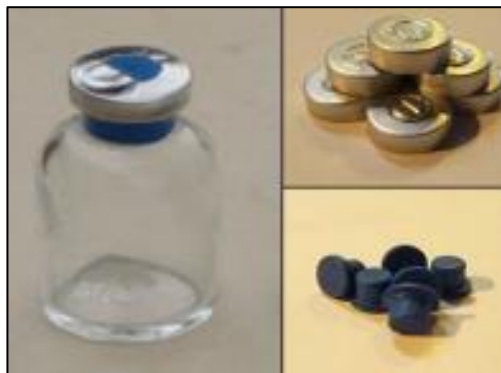
No primeiro ano (2017), após o plantio, as amostragens foram realizadas com maior frequência, inicialmente, em virtude da adubação (em média, a cada três dias, durante um mês aproximadamente). Como não foi realizada a adubação nitrogenada em cobertura na cana-planta, as sequências de amostragens procederam de forma geral, quinzenalmente, quando coincidiram com os meses mais chuvosos (outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro) e a cada 30 dias para os meses mais secos (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro), totalizando 27 eventos de amostragem no decorrer da condução do experimento.

Figura 2 - Posicionamento das câmaras em cada parcela para avaliação das emissões de gases de efeito estufa, Lençóis Paulista - SP, 2017



As amostras dos gases acumulados no interior da câmara foram coletadas com uma seringa de nylon de 60 mL. Com o auxílio de uma agulha (0,7 x 30 mm) acoplada à seringa, os gases coletados foram injetados em frascos de vidro de 30 mL, vedados com lacres de borracha (Figura 3). Estes foram submetidos manualmente ao vácuo, previamente às coletas. Em cada câmara foram coletadas três amostras num período de 40 minutos, sendo a primeira amostra coletada no primeiro minuto após o fechamento da câmara e as restantes aos 20 e 40 minutos, respectivamente.

Figura 3 - Frascos de vidro de 30 mL, vedados com lacres de borracha, utilizados para o armazenamento dos gases CO₂, N₂O e CH₄.



Fonte: Sousa Neto (2012).

Durante o período de coleta foram determinados o volume aproximado de cada câmara de coleta, a partir da altura média de cada câmara, obtida pela medição de três pontos da base no solo até a tampa; as temperaturas do solo e do ar, com o auxílio de um termômetro digital, e a pressão atmosférica, utilizando-se um barômetro. As coletas foram realizadas sempre no mesmo período, entre às 07 e 10 horas (Figura 4).

Figura 4 - Detalhes das câmaras estáticas instaladas em campo para a coleta de gases. A: Seringa acoplada à válvula, para realização da coleta. B: Pressurização de gases da câmara para a seringa. C: Transferência de gases da seringa para o frasco. Lençóis Paulista – SP, 2017



2.2.5.1.1 Quantificação das amostras de gases de efeito estufa

A determinação das concentrações dos GEE foi realizada em cromatógrafo gasoso Shimadzu® GC 2014, modelo Greenhouse, com fonte selada de 63Ni, equipado com uma coluna empacotada, um detector de captura de elétrons (ECD) para análise de N₂O e um detector de ionização de chama (FID) para determinação de CO₂ e CH₄. Foram empregadas as seguintes condições cromatográficas: detector FID a 250°C e detector ECD a 325°C, Metanador a 350°C e coluna empacotada a 70°C, com gás de arraste N₂, com sistema “back-flush” e injeção manual.

O fluxo de cada GEE foi determinado de acordo com a equação 2, proposta por Jantalia et al. (2008), ajustando-se regressões lineares:

$$\text{Fluxo} = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{v}{a} \times \frac{m}{V_m} \quad (2)$$

onde: Fluxo = expresso em $\mu\text{g GEE m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; ΔC e Δt = coeficiente angular da equação da reta ajustada; v e a = volume (m^3) e área (m^2) da câmara; m e V_m = massa (g mol^{-1}) e volume (L mol^{-1}) molar.

Para as variáveis volume e área da câmara, empregou-se os valores de $0,01968\text{m}^3$ e $0,07068\text{m}^2$; e para a massa molar dos gases, $44,01$; $16,042$ e $44,0128 \text{ g mol}^{-1}$ para CO_2 , CH_4 e N_2O , respectivamente. Para o cálculo do volume molar, foi utilizada a equação do gás ideal, conforme descrita abaixo (Equação 3):

$$P \times V = \eta \times R \times T \quad (3)$$

onde: P e V = pressão atmosférica (atm) e volume (m^{-3}); η = mols do gás; R = constante dos gases ideais ($0,082 \text{ atm L mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T = temperatura do ar a 5 cm (K).

A emissão diária de CO_2 , CH_4 e N_2O por coleta foi obtida pela média dos fluxos de cada tratamento. Foram plotadas curvas padrão, com as seguintes concentrações: 270, 648, 2063 e 7164 ppm de CO_2 ; 0,69, 2,06, 3,05 e 6965 ppm de CH_4 e 305, 693, 1092 e 1885 ppb de N_2O , realizadas em triplicata para melhor ajuste da curva. A emissão total (acumulada) dos GEE no ciclo da cultura foi determinada por integração de curvas para cada tratamento, e as emissões acumuladas convertidas em kg ha^{-1} de C equivalente.

2.2.5.1.2 Medidas auxiliares - temperatura e umidade do solo

Realizou-se o monitoramento da umidade e temperatura do solo, simultaneamente às coletas de GEE. Os equipamentos utilizados, Procheck Soil Moisture e sensor 5TM

(Decagon Devices), foram posicionados próximos às câmaras, numa profundidade média de cinco centímetros, em cada parcela. Aliado às avaliações, foi calculada a porosidade ocupada por água do solo, na camada de 0,00 a 0,05 m. Os dados médios encontram-se nas figuras 5 e 6.

Figura 5 - Dados médios para temperatura e umidade do solo por ocasião das 27 épocas de coletas de gases de efeito estufa, Lençóis Paulista - SP, 2018

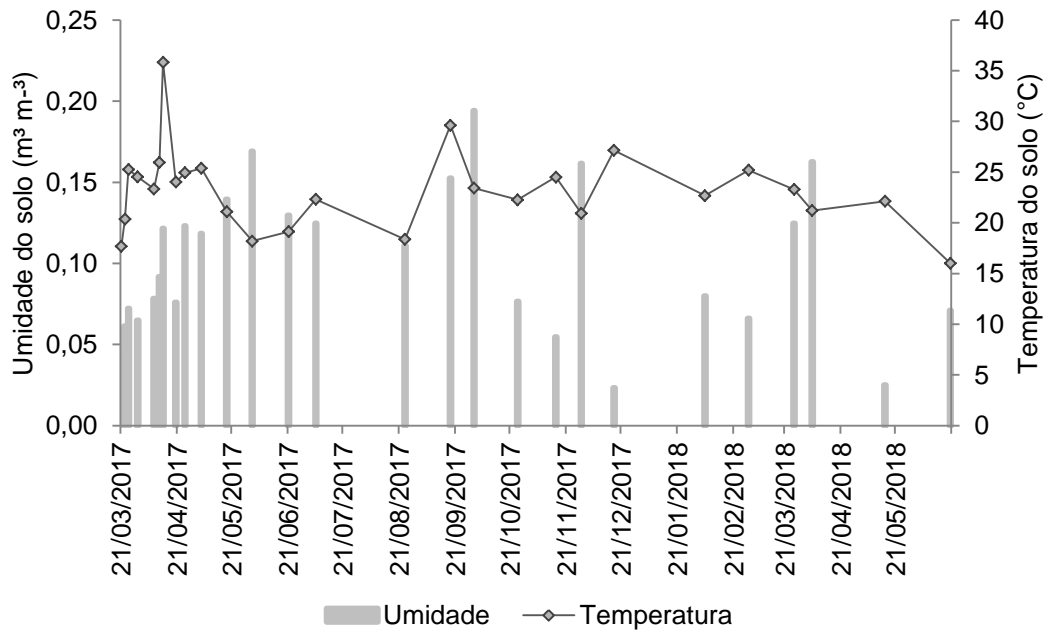
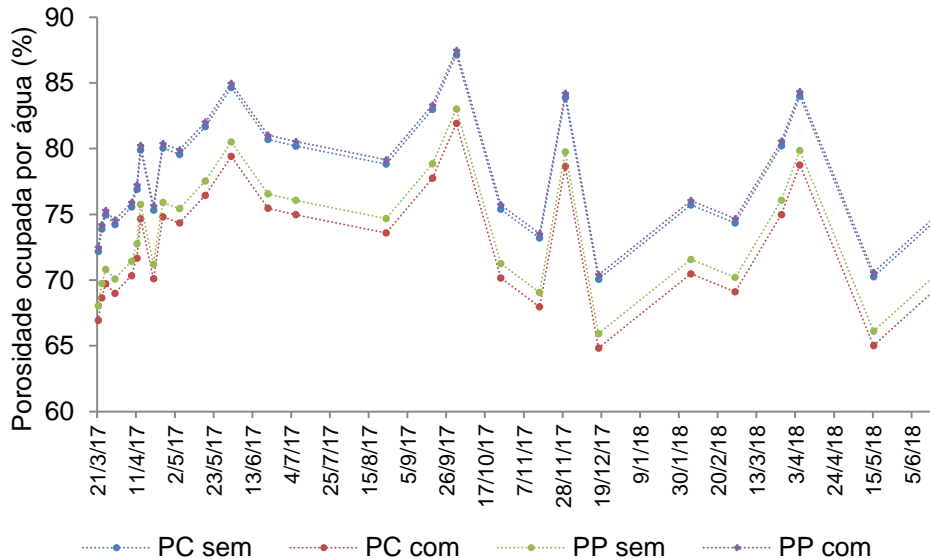


Figura 6 - Porosidade ocupada por água (POA) na camada de 0,00- 0,05 m, ao longo do cultivo da cana planta, nos preparos de solo: convencional (PC), sem e com aplicação de calcário, e, em preparo profundo (PP), sem e com aplicação de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média



2.2.5.2 Aporte de C pelos restos culturais da cana-de-açúcar em pós-colheita

Logo após a colheita da cana-de-açúcar, foram coletadas amostras de restos vegetais (palha + colmo) deixados na superfície do solo, por meio de gabaritos de madeira com dimensões de 0,40m x 0,40m. Posteriormente, o material foi acondicionado em sacos de papel e encaminhado para o laboratório, onde foi seco em estufa de aeração forçada a 60°C e pesado, para determinação da massa de resíduos em kg ha⁻¹. Após a pesagem, parte do material foi passada em moinho elétrico tipo “Willey” com malha de 1 mm e analisado quanto ao teor de C, por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®) (Figura 7). O resultado foi convertido em aporte de C via restos vegetais em kg ha⁻¹ e determinou-se o teor de C na palha e nos colmos deixados no campo. Conhecendo-se a produtividade de colmos por área, determinou-se a exportação de C via colheita.

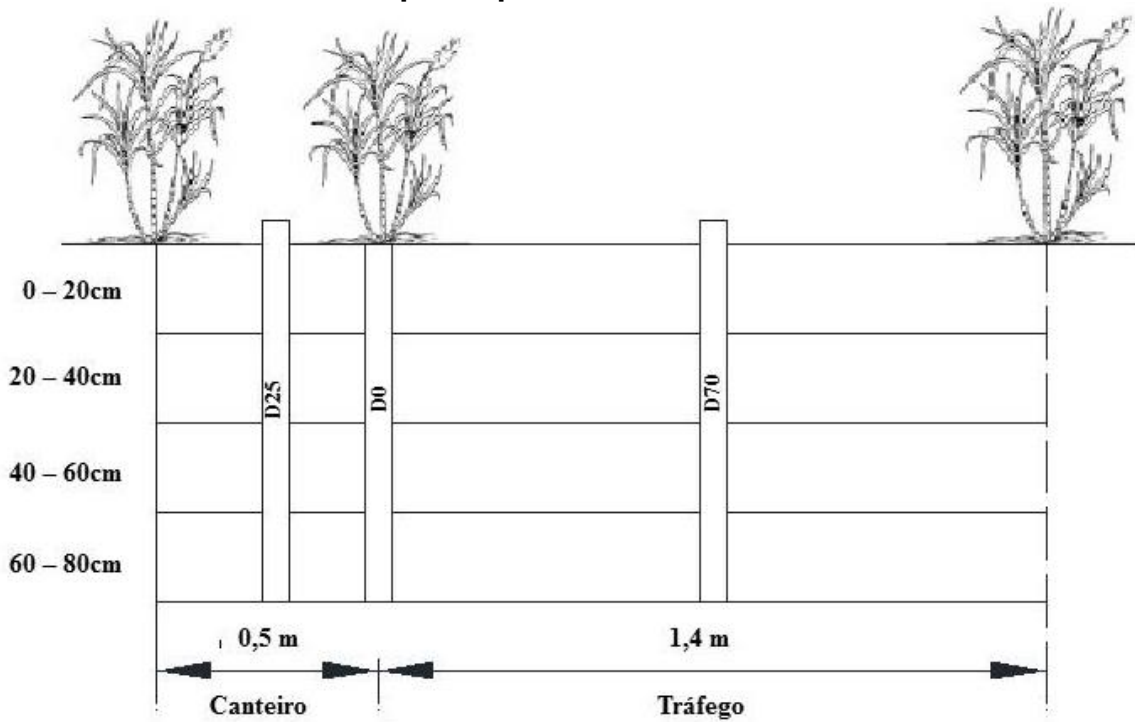
Figura 7 - Detalhes do procedimento para determinação do carbono residual em pós-colheita. A: Área em pós-colheita onde foram coletadas as amostras. B: Amostra após moagem em moinho elétrico tipo “Willey” com malha de 1 mm. C: Analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS)



2.2.5.4 Sistema radicular da cana-de-açúcar

No momento do máximo desenvolvimento vegetativo (maturação dos colmos), foram coletadas amostras de raízes da cana-de-açúcar pelo método do trado (FUJIWARA et al., 1994), às distâncias 0,00 (D0); 0,25 (D25) e 0,70 m (D70) das plantas de referência, e nas camadas de 0,00-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m, em quatro pontos por subparcela (Figura 8). As distâncias foram estabelecidas de maneira que D0 correspondia à coleta sob a planta de referência, D25 correspondia à coleta no meio da entrelinha de plantio (entre duas plantas) e D70 à coleta no meio da linha de tráfego. Foi utilizado um trado coletor, com cilindro de aço, com 150 mm de altura e diâmetro interno de 35 e 50 mm, para coleta de camadas superficiais e subsuperficiais, respectivamente.

Figura 8 - Demonstração da coleta de raízes na área não trafegável (canteiro) e na área de tráfego do maquinário agrícola, nas três distâncias (D0, D25 e D70) e em quatro profundidades



Fonte: Erilene Alves (2020)

Após a coleta, o solo contendo as raízes foi acondicionado em sacos plásticos identificados e congelados a -20°C . Para a lavagem das raízes, as amostras foram despejadas em peneira com malha de 01 mm e submetidas a jatos de água, restando-se as raízes e impurezas, que foram separadas por meio de pinças. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos, submersas em solução aquosa contendo 30% de álcool etílico para aumentar o tempo de conservação e, armazenadas à 2°C (Figura 9).

Posteriormente, as raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a 60°C por 48 h, para determinação da massa de matéria seca e do teor de C. Com os resultados de massa de raízes e do teor de C das mesmas, determinou-se a quantidade (Mg ha^{-1}) de C aportado pelas raízes no solo.

Figura 9 - Procedimento para determinação do C aportado pelo sistema radicular.
A: Coleta das amostras de raízes pelo método do trado. B: Separação das amostras após passagem em peneira. C: Amostra após secagem para determinação da matéria-seca e teor de C. D: Preparo de amostras para leitura em analisador elementar automático



A biomassa de raízes por hectare foi obtida pela adaptação da fórmula de Otto (2012), a partir do produto entre a massa seca e o comprimento de sulcos por hectare, considerando o espaçamento de 1,9 m para a área de avaliação de cada parcela. A biomassa de raízes (BR em $t\ ha^{-1}$) foi obtida pela Equação 4:

$$BR\ (kg\ ha^{-1}) = [DR_{D0} \times (0,25/1,9) + DR_{D25} \times (0,25/1,9) + DR_{D70} \times (1,4/1,9)] \times 10 \times Prof. \times 1000 \quad (4)$$

onde: DR = densidade de raízes ($g\ dm^{-3}$), nas distâncias D0, D25 e D70; Prof = profundidade de amostragem (m) igual a 0,2 m para cada camada do solo. A biomassa total foi obtida pela soma das mesmas em cada camada do solo.

2.2.5.5 Balanço de C-CO₂

O balanço de C nos diferentes sistemas de preparo do solo e calagem foi calculado pela diferença entre entradas e saídas de C no sistema solo-planta. Considerou-se como entrada a quantidade de C acumulada nas plantas, sendo necessário para esse último analisar os teores de C presente em colmos, raízes e palha, multiplicando pela quantidade destas partes em cada tratamento. Foram consideradas saídas de C as emissões acumuladas de C-CO₂eq durante o ciclo da cultura, provenientes das diferentes operações de preparo do solo e aplicação de calcário.

2.2.5.6 Determinação da Emissão Relativa de Ceq (ERC)

As emissões acumuladas de CH₄ e N₂O foram convertidas em equivalente de carbono (C-eq) e somadas com a emissão acumulada de CO₂. Para tanto, levou-se em consideração que o potencial relativo de aquecimento global do CH₄ e do N₂O é de 34 e 298 vezes maior que a do CO₂, respectivamente, sendo o CO₂ considerado como referência (IPCC, 2013). Os cálculos para a conversão das emissões de C-CH₄ e de N-N₂O em C-equivalente (C-eq) estão expressos nas equações 5 e 6, respectivamente (PAVEI, 2005).

- 1 kg C-CH₄ = 12,36 kg de C-CO₂

- 1 kg de N-N₂O = 127,71 kg de C-CO₂

$$\text{C-eq (C-CH}_4\text{)} = \text{C-CH}_4 \times (16/12) \times 28 \times (12/44) \quad (5)$$

$$\text{C-eq (N-N}_2\text{O)} = \text{N-N}_2\text{O} \times (44/28) \times 265 \times (12/44) \quad (6)$$

De posse dos resultados de C-eq e das produtividades de colmos, procedeu-se o cálculo da ERC, por meio da equação 7, em kg C-eq / Mg de colmos produzidos.

$$\text{ERC} = \text{produtividade de colmos} / \text{C-equivalente} \quad (7)$$

2.2.5 Análise estatística

Os dados foram analisados quanto à sua distribuição pelo teste de Shapiro Wilk. Quando não foram considerados normais, foram transformados de forma a atenderem às pressuposições da análise de variância e, quando considerados normais, foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

Para as variáveis emissão de gases de efeito estufa (GEE), aporte de carbono pelo colmo, raízes e restos culturais da cana-de-açúcar, bem como para a emissão relativa e balanço de carbono, os dados foram submetidos ao teste de médias – LSD, a 5% de significância.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Emissão de gases de efeito estufa (CO₂, N₂O, CH₄)

As emissões dos gases CO₂, CH₄ e N₂O, em função de cada tratamento, estão apresentadas nas figuras 12, 13 e 15, onde foi feito um comparativo de fluxo diário em área de preparo convencional x preparo profundo modificado, sem e com a aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹), na entrelinha de plantio da cultura (canteiro) e na linha de tráfego do maquinário agrícola, em um período de 430 dias após o plantio.

Para as emissões de CO₂ (Figura 12) os fluxos foram maiores nos primeiros 40 dias e entre 190 e 250 dias após o plantio, atingindo picos de 14 g m⁻² dia⁻¹. Tal fato pode ser explicado inicialmente pelas maiores médias de armazenamento de água (Figura 10) e temperatura moderada do solo (média de 23°C) observadas nestes períodos (Figura 11), o que proporciona condições ideais para as atividades microbianas. Resultados semelhantes foram relatados por Chalco Vera e Acreche (2018), Panosso et al. (2009) e Vargas et al. (2014), onde as emissões de CO₂ foram relativamente altas nos períodos em que foram constatadas as maiores taxas de umidade do solo. Além disso, a maior perturbação na linha de plantio, após as operações de preparo levam à oxigenação do solo e quebra dos agregados, expondo a matéria orgânica (MOS) à ação de microrganismos, favorecendo a difusão do CO₂.

Figura 10 - Conteúdo de água no solo na camada de 0,00- 0,20 m, ao longo do cultivo de cana planta, nos preparos de solo: convencional, sem aplicação (A) e com aplicação (B) de calcário, e, em preparo profundo com utilização do penta, sem aplicação (C) e com aplicação (D) de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média, Lençóis Paulista - SP, 2018. AA= armazenamento de água; CC = capacidade de campo; PMP= ponto de murcha permanente

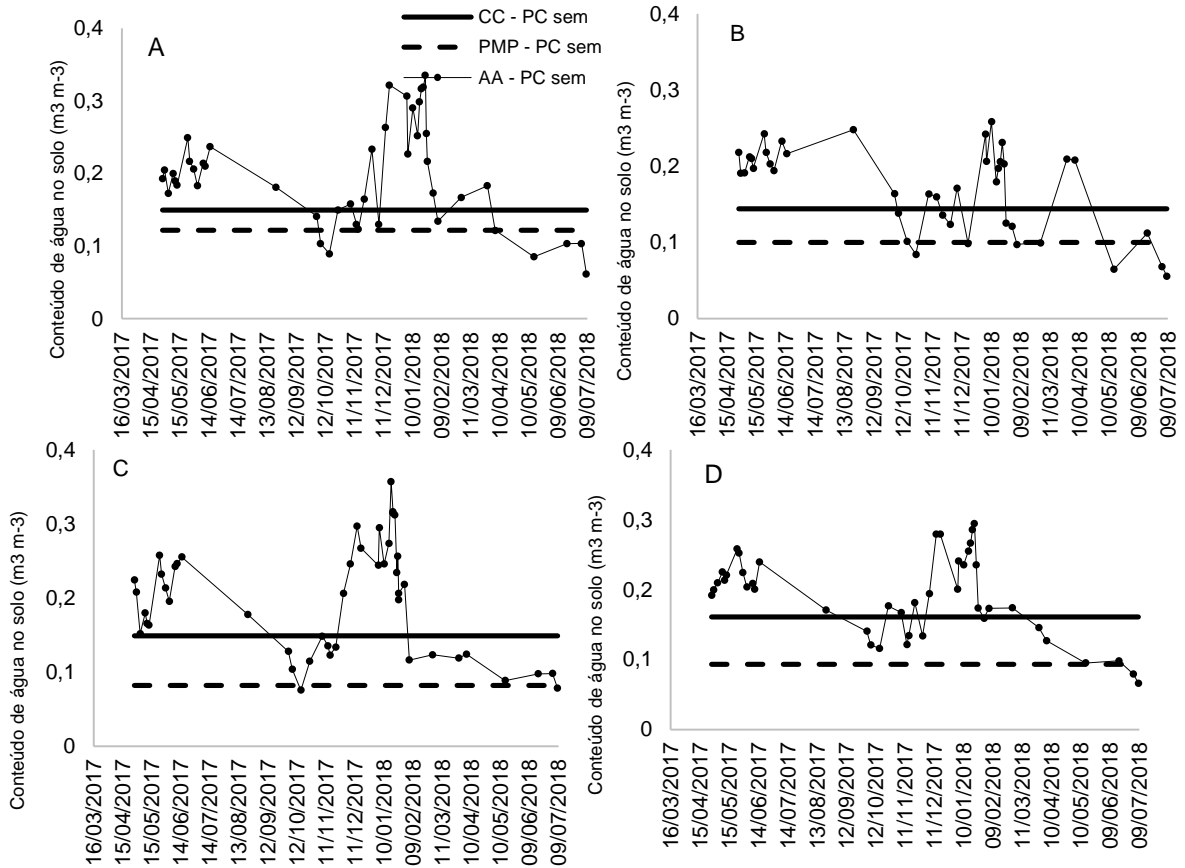
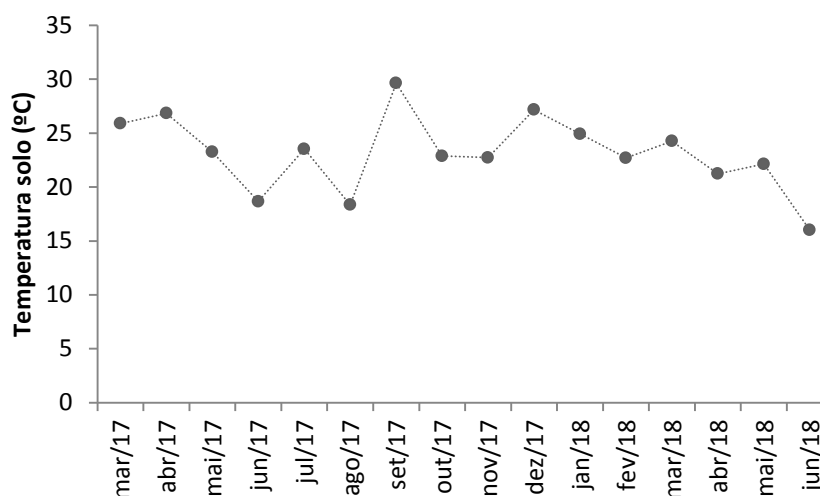


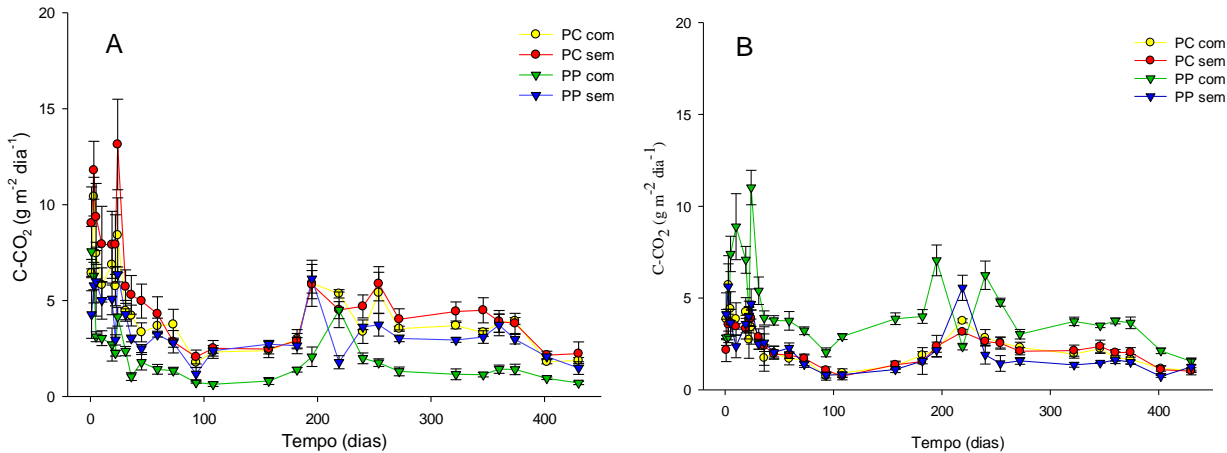
Figura 11 - Dados médios coletados de março de 2017 a julho de 2018, para a temperatura de um Latossolo Vermelho de textura média



Resultados semelhantes foram relatados por Farhate et al (2018), onde as maiores emissões de CO₂ decorreram nos primeiros 50 dias após o preparo do solo, analisando diferentes tipos de preparo e cobertura vegetal na cultura da cana-de-açúcar. Segundo o mesmo autor, as operações de preparo e as alterações no conteúdo de água do solo, impulsionadas por eventos de chuva, influenciam as emissões de CO₂ em curto prazo, havendo uma estabilização da mesma após certo período. O preparo leva à maior oxidação do carbono orgânico (CO), liberando quantidades significativas de CO₂ em curto período de tempo (SILVA-OLAYA et al., 2013; FIGUEIREDO et al., 2015), ao passo que a precipitação, quando em quantidades adequadas, altera o conteúdo de água do solo, podendo causar o deslocamento de CO₂ nos poros e estimular a atividade microbiana (SMART; PEÑUELAS, 2005; FIGUEIREDO et al., 2015). Segundo Teixeira (2007), quanto maior a profundidade de trabalho dos implementos, maiores as emissões de C-CO₂ do solo.

Nos demais períodos as emissões foram relativamente baixas e uniformes, entre 2 e 5 g m⁻² dia⁻¹, coincidindo com os períodos de baixa precipitação e conseqüentemente, onde foram registrados baixos conteúdos de água no solo, na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade, de aproximadamente 0,1 m³ m⁻³. Tal fato pode ter reduzido a atividade dos microrganismos (CARBONE et al., 2011), bem como a respiração radicular, sugerindo que a umidade é fator determinante para o aumento da atividade microbiana (BRITO et al., 2015) e conseqüente emissão de CO₂.

Figura 12 - Fluxo de CO₂ (g m⁻² dia⁻¹) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹)



Quando comparada as emissões na entrelinha de plantio da cana-de-açúcar e área de tráfego agrícola, as emissões de CO₂ foram significativamente maiores nas entrelinhas da cultura. Este resultado pode estar associado ao metabolismo radicular das plantas, concentradas principalmente ao longo dos sulcos de plantio (CURY et al., 2014; BARBOSA et al., 2018), o que as tornam mais próximas das câmaras onde foram realizadas as coletas, instaladas nas entrelinhas da cultura. Segundo Janssens et al., (1998) e Zhi-Min et al. (2013), a respiração radicular é responsável por até 60% da emissão de CO₂ do solo em terras agrícolas. Além disso, fatores como uma maior mobilização do solo nas fileiras de plantio, levando à oxigenação e quebra dos agregados próximos à entrelinha de coleta, como já mencionado, além do efeito da aplicação de calcário no sulco, podem ter contribuído para a maior emissão de CO₂.

Ao elevar o pH do solo com a prática da calagem, tem-se um aumento na atividade microbiana do solo, promovendo a curto prazo, a rápida decomposição da matéria orgânica (MIJANGOS et al., 2010; ARANTES et al., 2011). Além disso, segundo o fator de emissão adotado pelo IPCC (2006), a própria reação do calcário no solo emite 0,13 t C-CO₂ por tonelada de calcário aplicado, que representa o conteúdo equivalente de carbonato do material (13% para CaMg(CO₃)₂), supondo-se que todo o carbono do calcário aplicado seja emitido na forma de CO₂ no ano da aplicação.

Neste contexto, das 5,2 Mg ha⁻¹ de calcário aplicados ao solo, aproximadamente 0,7 Mg ha⁻¹ das 13,8 Mg ha⁻¹ de C-CO₂ emitidos (Tabela 2), seriam provenientes da reação do calcário, o que representa 5% da emissão total de C-CO₂ no primeiro ciclo da cultura. Figueiredo et al (2010) quantificaram as fontes de emissão de GEE relacionadas à produção de cana-de-açúcar e constataram que a calagem é responsável por 49,8 kg de Ceq ha⁻¹ ano⁻¹. Valores semelhantes foram relatados por Galdos et al (2010), com uma perda estimada de C devido a calagem da ordem de 74,7 kg Ceq ha⁻¹ ano⁻¹.

Outras causas responsáveis pelas emissões de CO₂ estão relacionadas aos atributos do solo, como densidade e porosidade, que são influenciados pelas condições ambientais e manejo da área agrícola (BICALHO et al., 2017). A maior microporosidade observada no perfil do solo (Tabela 1), quando utilizado o preparo profundo (ALVES, 2020), garante o armazenamento de água, o que pode ter influenciado as emissões de C-CO₂, posto a essencialidade da água para a atividade microbiana.

Tabela 1 - Características físicas do perfil do solo (0,00 a 1,00m de profundidade), em área de preparo convencional (PC) e preparo profundo (PP), sem e com a aplicação de calcário, de um Latossolo Vermelho de textura média

| | Densidade (g cm ⁻³) | Pt (%) | Macro (%) | Micro (%) | Umidade (m ³ m ⁻³) |
|--------|------------------------------------|-----------|--------------|--------------|--|
| PC sem | 1,67a | 0,34a | 0,14a | 0,20b | 0,17b |
| PC com | 1,64a | 0,35a | 0,15a | 0,20b | 0,17b |
| PP sem | 1,67a | 0,36a | 0,15a | 0,21ab | 0,18ab |
| PP com | 1,67a | 0,35a | 0,13b | 0,22a | 0,19a |
| Pr>Fc | 0,5170 | 0,2642 | 0,0045 | 0,0233 | 0,0233 |

*Médias seguidas da mesma letra minúsculas na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student (p<0,05). PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo. Pt = porosidade total; Macro = macroporos; Micro = microporos.

De forma geral, em relação ao fluxo acumulado de CO₂ após 430 dias de amostragem, levando-se em conta toda a área manejada (canteiro e tráfego), a maior emissão (13,8 Mg ha⁻¹ ciclo⁻¹) foi observada com a aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹), utilizando o preparo profundo em faixas, enquanto os demais tratamentos não

apresentaram diferença estatística entre si (Tabela 2). A emissão de C-CO₂ devido às práticas de preparo do solo está fortemente correlacionada com a intensidade da ruptura e o volume de solo perturbado pelos implementos utilizados (LA SCALA et al. 2006; TEIXEIRA, 2007). Logo, a interrupção dos agregados do solo pela utilização do preparo profundo, expõe a matéria orgânica antes protegida à decomposição (LA SCALA et al., 2008), como já comentado, aumentando as perdas de C. Além disso, o aumento do pH do solo decorrente da aplicação de calcário em profundidade, garante melhores condições físicas, químicas e biológicas para a ação dos microrganismos, aliado à sua ação floculante, que auxilia na retenção e infiltração de água, a qual é essencial para a atividade microbiana.

Tabela 2 - Emissão de C-CO₂, C-CH₄ e N-N₂O (kg ha⁻¹) por ciclo de cana planta (430 dias), em áreas de preparo convencional (PC) e preparo profundo modificado (PP), sem e com aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média

| Tratamentos ⁽¹⁾ | Emissão 430 dias (kg ha ⁻¹ ciclo ⁻¹) | | |
|----------------------------|---|-------------------|--------------------|
| | C-CO ₂ | C-CH ₄ | N-N ₂ O |
| PC sem | 10808 b | -0,6 a | 1,76 ab |
| PC com | 10210 b | -0,7 a | 2,06 a |
| PP sem | 9070 b | -0,5 a | 1,11 b |
| PP com | 13879 a | -1,1 b | 1,26 b |
| ANOVA | | | |
| Teste F | 0,0046 | 0,0267 | 0,0419 |
| DMS | 1866 | 0,3 | 0,5 |
| CV(%) | 12,51 | -33,40 | 26,71 |

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$).⁽¹⁾PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo.

Vale ressaltar que a maioria dos estudos avaliam a emissão de C-CO₂ somente após a aplicação dos corretivos (MARCELO et al., 2012) ou seja, no período que ainda está ocorrendo a correção do solo, e quando, conseqüentemente há uma maior emissão do referido gás. Portanto são necessários estudos de longa duração, uma vez

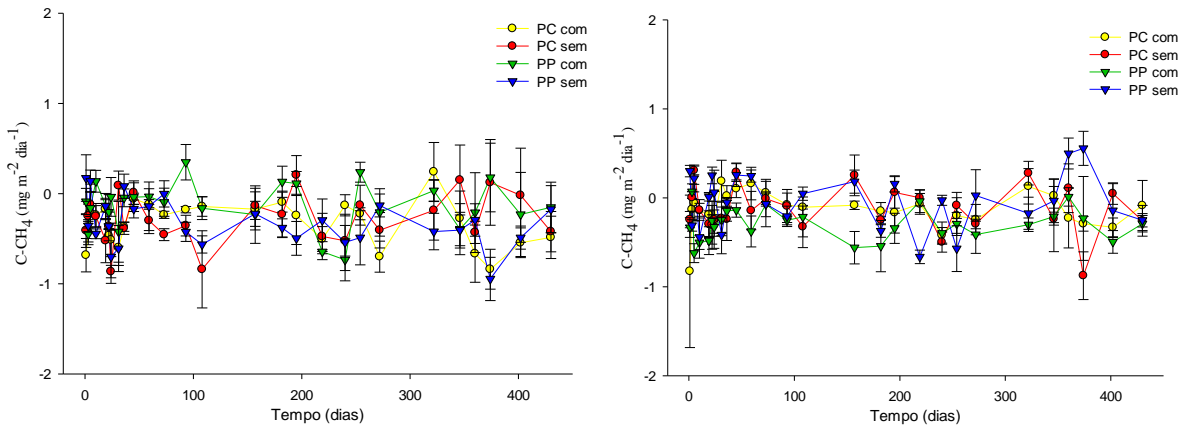
que a emissão acumulada de CO₂ tende a se igualar com o tempo, como demonstrado neste estudo.

Em relação à dinâmica dos fluxos de CH₄ é possível observar que os valores positivos e negativos, denotam a ocorrência tanto da metanogênese como da metanotrofia no solo, havendo uma tendência para a oxidação do gás, embora de baixa magnitude (Figura 13), e sem apresentar uma correlação com as condições de temperatura e umidade do solo, estocando até 1,1 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ de C-CH₄, quando empregado o preparo profundo em faixa, com a aplicação de calcário (Tabela 2). Segundo Vargas et al. (2014), a umidade do solo, a presença de resíduos vegetais ou o adubo nitrogenado, não alteraram os processos de emissão e absorção de CH₄, pois os dois mecanismos (metanotrofia e metanogênese) ocorrem simultaneamente.

Chalco Vera e Acreche (2018), avaliando o efeito da queima de palha na pós-colheita da cultura aliado à adubação sintética de N na dinâmica dos fluxos de CH₄ no sistema cana-solo, observaram não haver um padrão claro na dinâmica do fluxo do referido gás para os tratamentos empregados, corroborando com os resultados encontrados neste estudo; sendo os fluxos cumulativos de CH₄ desprezíveis em termos de massa de C. Os mesmos autores relatam que as emissões mais consistentes coincidiram com o período de altas temperaturas (do solo e do ar) e precipitação, sendo que durante o inverno, as emissões eram próximas a zero e constantes em todos os tratamentos de cana-de-açúcar, com valores cumulativos anuais entre -1,8 a 1,1 kg de C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹.

Segundo van Wesemael et al. (2010), a perda do estoque de C do solo como CH₄ pode ser intensificada por manejos que modifiquem o ambiente físico, a qualidade da matéria orgânica formada e, especialmente, a diversidade de espécies de microrganismos (como a prática do monocultivo) (SAVARIO; HOY, 2011).

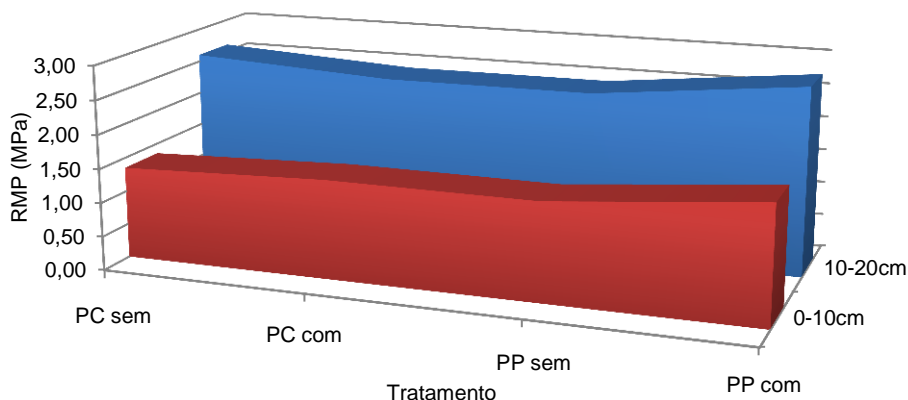
Figura 13 - Fluxo de CH₄ (mg m⁻² dia⁻¹) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹)



Weiner et al. (1996), também relatou a oxidação do C-CH₄ em todos os manejos empregados na cultura da cana-de-açúcar, variando a adubação nitrogenada, quantidade de água no solo e a presença de palha. Oliveira (2014) observou que há uma tendência à ocorrência de eventos de metanotrofia nas áreas canavieiras, que variam de 0,01 a 3,17 kg C-CH₄ ha⁻¹, contribuindo para a oxidação do CH₄ atmosférico.

O emprego do preparo profundo proporcionou em sua maioria, maior resistência mecânica à penetração (RMP) de raízes do solo, quando comparado ao emprego do preparo convencional (ALVES, 2020), como observado na Figura 14, o que leva à maior compactação e reduzida difusão de O₂, aumentando a oxidação do CH₄ (HUTSCK, 2001), refletindo nos resultados encontrados neste trabalho. Segundo Tesouro et al. (2016), isso demonstra que as emissões de CH₄ poderiam ser usadas como um marcador que indica o grau de perturbação antropogênica dos sistemas agrícolas, particularmente na cana-de-açúcar, onde uma maior compactação do solo foi relatada. Para Chalco Vera e Acreche (2018), o padrão que assumem os fluxos de CH₄ está pouco relacionado às variáveis climáticas, mas mais associados às propriedades físicas do solo.

Figura 14 - Resistência mecânica à penetração (MPa) depois da colheita da cana-de-açúcar, nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20m, em um Latossolo Vermelho de textura média, em função do preparo do solo e presença de calcário



PC sem = Preparo Convencional sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional com aplicação de 5,2 Mg ha⁻¹ de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa com aplicação de 5,2 Mg ha⁻¹ de calcário na faixa de preparo.

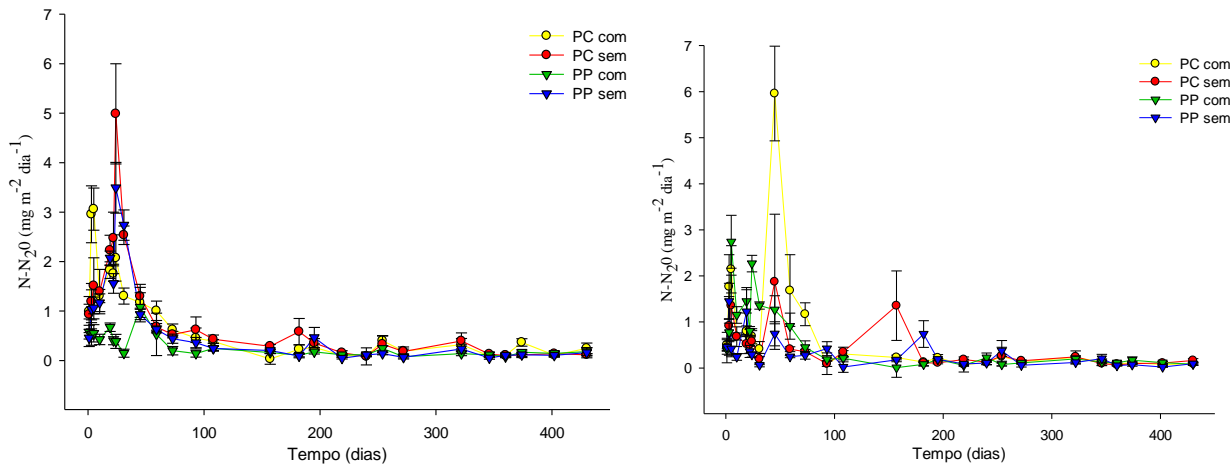
Nos solos, o metano se forma em condições anaeróbicas, pela quebra microbiana de compostos orgânicos, com baixo potencial de redução (SMITH et al., 2003). A disponibilidade de matéria orgânica, oxigênio, umidade, entre outros, afetam a formação do gás (metanogênese) ou a sua oxidação (metanotrofia), sendo o balanço destes processos determinante para classificar o ambiente em questão como emissor ou sumidouro de metano.

Segundo Lemer e Roger (2001) há ainda uma correlação positiva entre o conteúdo de carbono orgânico no solo e o potencial metanogênico. Logo, esperava-se que a disponibilidade de carbono orgânico favorecesse a formação de CH₄ através da redução de carbono, e não a sua oxidação, como verificado neste estudo. Segundo Oliveira (2014), quanto maior o teor de carbono orgânico, maior o consumo de CH₄ pelo solo, não apresentando alteração com a variação dos valores de pH.

Embora muitas vezes discriminado nos cálculos de GEE e estoque de C no solo (SIQUEIRA NETO et al., 2009), o consumo mundial de CH₄ pelos solos agrícolas é de aproximadamente 6% (LEMER; ROGER, 2001), sendo um dos únicos drenos biológicos para os GEE em equivalente de carbono (OSBORNE et al., 2010).

Para o fluxo de N_2O (Figura 15), os picos foram registrados nos primeiros 50 dias após o plantio, com posterior declínio, sendo o preparo convencional com a aplicação de calcário, responsável pela maior emissão acumulada ($2,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$), não apresentando, contudo, diferença quando não foi aplicado o calcário (Tabela 4). Martins et al. (2015), Aini et al. (2015), dentre outros pesquisadores, também relataram um rápido declínio das emissões de $N-N_2O$ após adubação nitrogenada, o que pode ser consequência da alta demanda de N pela planta, diminuindo assim as possibilidades de perdas do N mineral. Segundo Besen (2015), geralmente os picos são verificados cinco dias após a aplicação de N, devido ao tempo necessário para que ocorra a nitrificação do NH_4^+ para NO_3^- e a desnitrificação deste para N_2O . Segundo Chalco Vera et al. (2017), a entrada de N reduz a relação C/N do solo, aumentando as emissões de N_2O .

Figura 15 - Fluxo de N_2O ($\text{mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) na entrelinha de preparo do solo (canteiro) (A) e na linha de tráfego do maquinário agrícola (B), utilizando o Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo Modificado (PP), com e sem aplicação de calcário ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$)

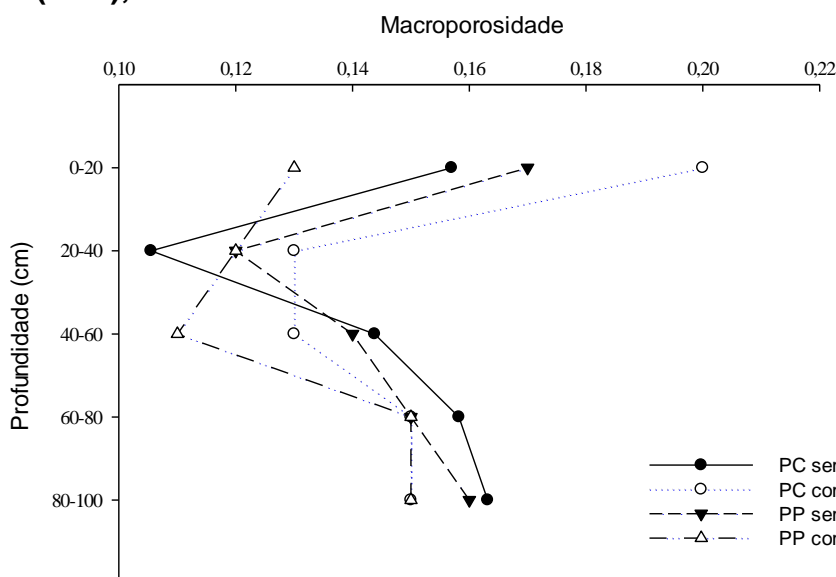


Tal fato pode ainda decorrer da maior macroporosidade observada após as operações de preparo convencional e aplicação de calcário (Figura 16) atrelada ao armazenamento de água após a instalação do experimento, o que levou a um aumento no espaço poroso ocupado por água (PPA) e consequente diminuição no O_2 disponível. Isto favorece o processo de mineralização e desnitrificação de N, aumentando a emissão de N_2O (BRAGA et al., 2011). Geralmente, com o aumento da PPA há maior

consumo do O_2 do solo por atividades microbianas, oxidação de carbono orgânico lábil e formação de sítios de anaerobiose (KHALIL; BAGGS, 2005).

Vale ressaltar que a temperatura média do solo ($23^\circ C$) foi essencial para estimular a respiração do mesmo e aumentar os sítios de anaerobiose, favorecendo os processos de desnitrificação (SIGNOR; CERRI, 2013). À medida que a temperatura do solo aumenta, ocorre a mineralização do carbono do solo e aumentam-se os fluxos de N_2O (WANG et al., 2014).

Figura 16 - Macroporos em área de cana-de-açúcar, submetida aos preparos convencional (PC) e profundo (PP), na presença (com) ou ausência (sem) de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média



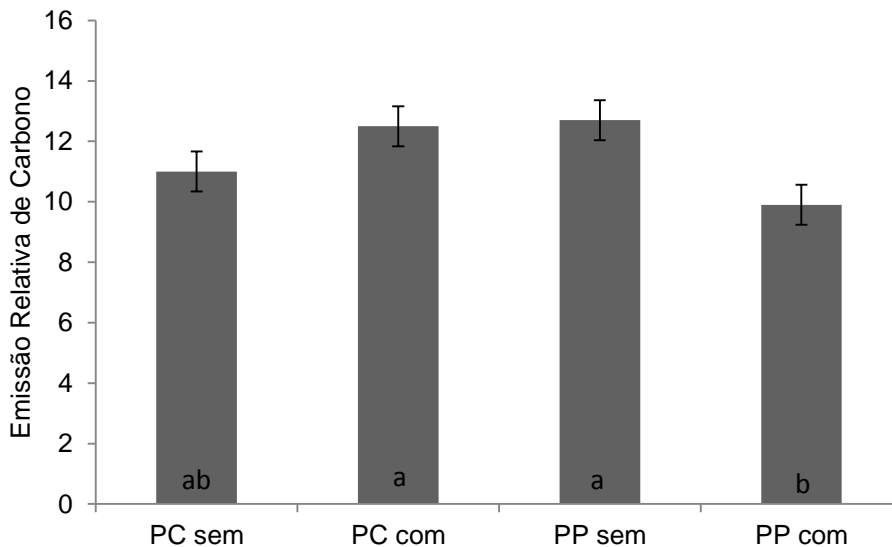
Resultados semelhantes foram observados por Santos et al. (2016) em agroecossistemas de longa duração na região do Cerrado, onde os maiores fluxos de N_2O ocorreram após a adição de fertilizantes nitrogenados, quando foi constatada maior PPA durante o período chuvoso, associadas ao aumento da temperatura do solo. Estudos têm demonstrado que a umidade (PPA), temperatura do solo e o teor de N mineral, são as principais variáveis que controlam as emissões de N_2O (BALL et al., 2014; BAYER et al., 2015; PETITJEAN et al., 2015).

A acidez do solo, considerada relativamente mais alta na implantação do experimento (vide Tabela 1, capítulo 1), é um dos fatores que também podem ter

influenciado as emissões logo após o plantio da cultura. Solos ácidos limitam as reações de desnitrificação em direção à produção de N_2 , resultando no acúmulo de N_2O (SANCHEZ-MARTIN et al., 2008). Contudo, os picos de emissão foram relativamente baixos, atingindo $6 \text{ mg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, o que pode ser justificado pela baixa aplicação de N na implantação do experimento e pela não realização da adubação nitrogenada em cobertura, na área experimental. A produção de N_2O é consequência das transformações do N oriunda de processos de nitrificação e desnitrificação no solo, sendo que a pronta disponibilidade do N, na forma mineral, por meio da adubação, favorece a emissão do referido gás (SMITH et al., 2003).

Fazendo uma análise para a emissão relativa de C, as emissões acumuladas de CH_4 e N_2O foram convertidas em equivalente carbono (C-eq) e somadas com a emissão acumulada de CO_2 (Figura 17).

Figura 17 - Emissão relativa de carbono (ERC) em área de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em um Latossolo Vermelho de textura média



*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). ⁽¹⁾PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo.

A utilização do preparo profundo modificado com a aplicação de calcário resultou na menor emissão relativa de C, com $9,9 \text{ kg C-eq / Mg}$ de colmos produzidos, quando

comparado aos demais tratamentos. Essa menor emissão ocorreu mesmo com as maiores emissões acumuladas de C-CO₂, o que se deve à maior produtividade de colmos neste tratamento, favorecendo a utilização do preparo profundo com a aplicação de calcário em profundidade.

Em suma, fatores como temperatura, umidade e pH do solo, combinados com o carbono orgânico disponível no mesmo, favorecem a atividade microbiana e produção de gases de efeito estufa. Logo, compreender os processos que regulam a emissão de gases para diferentes tipos de solo é uma questão fundamental na escolha das melhores estratégias de manejo para reduzir as emissões na produção de cana-de-açúcar, tornando o setor economicamente sustentável.

2.3.2 Aporte de carbono e biomassa do sistema radicular

A análise de variância para biomassa radicular, teor e acúmulo de C nas raízes da cana-de-açúcar está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Biomassa de raízes (kg ha⁻¹), teor (g kg⁻¹) e acúmulo de carbono (kg ha⁻¹), no perfil de 0,00 a 0,80 m de profundidade na cultura da cana-de-açúcar, cultivada em Latossolo Vermelho de textura média

| Tratamento ⁽²⁾ | Probabilidade de F | | |
|---------------------------|---|--|--|
| | Biomassa ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹) | Teor C ⁽¹⁾ (g Kg ⁻¹) | Ac. C ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹) |
| CV (%) | 0,000 | 0,005 | 0,000 |
| DMS | 6,03 | 2,66 | 5,63 |
| PC sem | 268,89 | 1,60 | 93,46 |
| PC com | 2388,7c | 350,2c | 886,8c |
| PP sem | 2926,0b | 370,5b | 1064,9b |
| PP com | 1985,7d | 394,6a | 775,1d |
| | 3857,5a | 391,7a | 1422,3a |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t de Student (p≤0,05). ⁽²⁾ PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo.

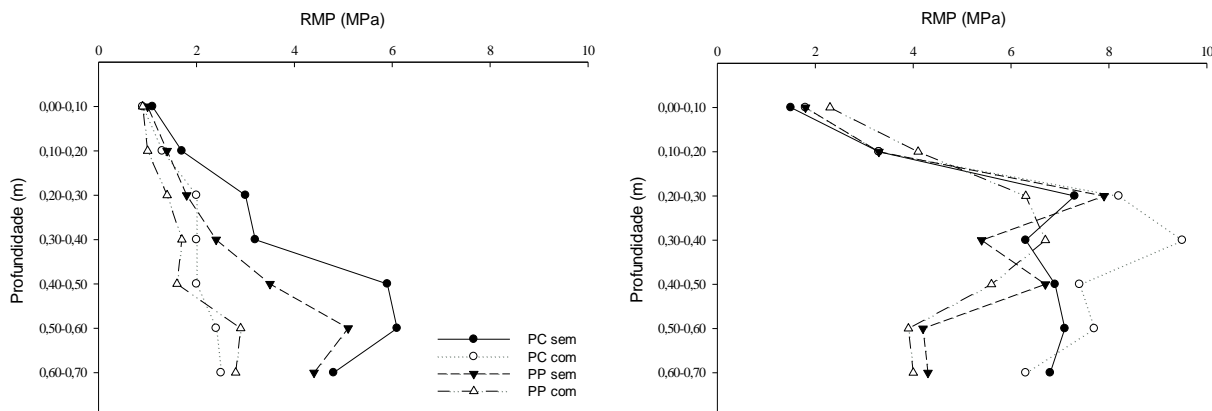
A utilização do preparo profundo modificado com a aplicação de calcário (5,2 Mg ha⁻¹) resultaram na maior biomassa de raízes analisada no perfil de 0,00 a 0,80 m de

profundidade, com $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$. A mobilização do solo nos canteiros, realizada de forma localizada, aliada à ação da enxada rotativa que atua na quebra dos torrões, refletiu em baixa resistência do solo à penetração de raízes (ALVES, 2020), como observado na figura 18, quando se considera valores acima de 2,0 MPa como limitantes ao desenvolvimento da cana-de-açúcar (TAYLOR et al., 1966), permitindo o maior crescimento radicular. Resultados semelhantes foram encontrados por Lima (2016) em experimento conduzido em um Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, comparando a utilização dos preparos convencional e profundo na cultura, até 1,00 m de profundidade, onde o preparo profundo resultou em maior biomassa radicular.

No canteiro, até 0,20 m, independente do tratamento empregado, a resistência do solo à penetração não ultrapassou o valor de 2,0 MPa (Figura 18), o que resultou na maior biomassa de raízes (Figura 19), sobretudo quando utilizado o preparo profundo, como já comentado. Para Otto et al. (2011), valores de resistência do solo acima de 2,0 MPa em solo de textura média, criam restrições severas ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, sendo tal parâmetro o indicador mais confiável de restrições ao crescimento das raízes.

Além disso, no canteiro, onde foi feita a calagem, independente do preparo, houve uma menor resistência à penetração. Estes resultados podem estar relacionados à disponibilidade de água no solo, uma vez que os tratamentos com calcário apresentaram maior frequência de disponibilidade hídrica às plantas (dados não apresentados). As condições de déficit hídrico podem reduzir o crescimento das raízes, e conseqüentemente a produção de biomassa radicular, além de ocorrer a mortalidade de raízes superficiais (LACLAU; LACLAU, 2009). A disponibilização de cálcio no solo melhora a circulação de água e ar no mesmo (SALTON et al., 2008), além de corrigir a acidez, neutralizando os efeitos tóxicos do alumínio e manganês (CALDEIRA et al., 2010).

Figura 18 - Resistência à penetração de raízes nas camadas de 0,00 a 0,70m de profundidade, em áreas de canteiro (A) e de tráfego do maquinário agrícola (B), com a cultura da cana-de-açúcar, em um Latossolo Vermelho de textura média



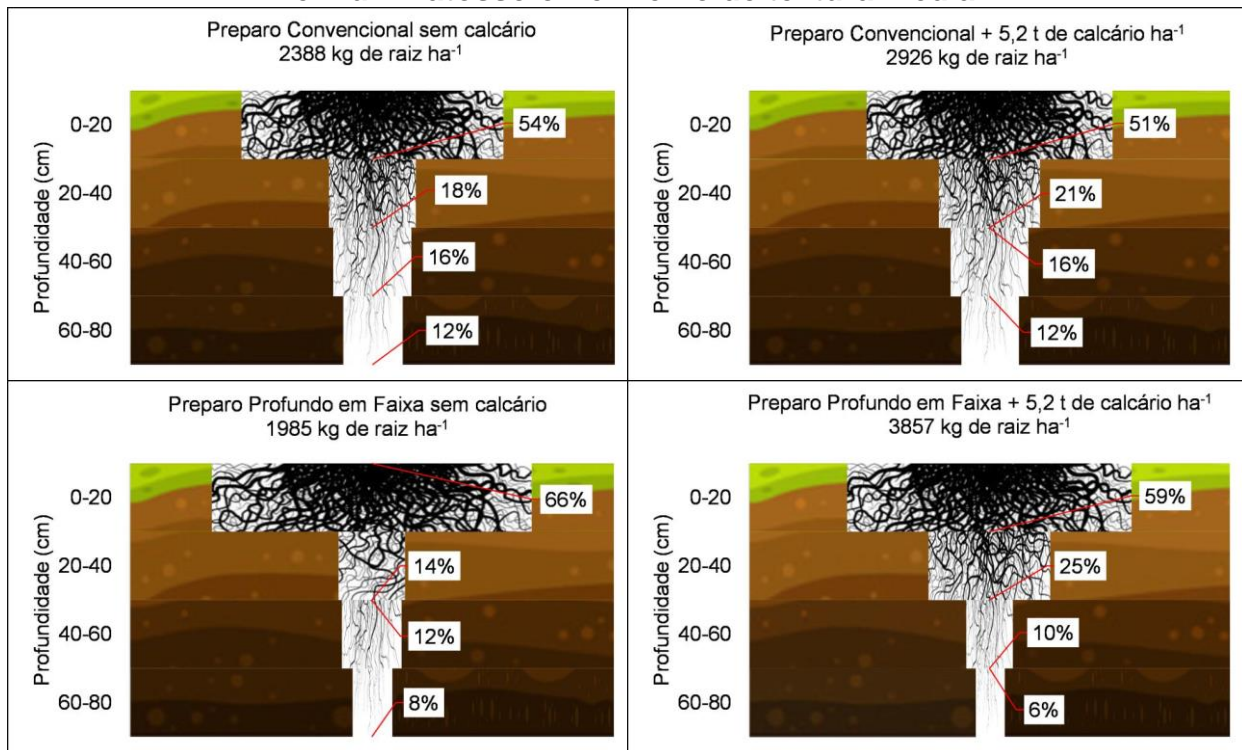
PC sem = preparo convencional sem a aplicação de calcário; PC com = preparo convencional com a aplicação de duas vezes a dose recomendada de calcário ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$); PP sem = preparo profundo modificado sem a aplicação de calcário; PP com = preparo profundo modificado com a aplicação de duas vezes a dose recomendada de calcário ($5,2 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Já para Barbosa (2015), em solos de textura arenosa, os limites críticos para restrições ao desenvolvimento radicular ocorrem quando a resistência do solo à penetração atinge valores de 1,5 MPa. O referido autor, em trabalho com a mesma variedade utilizada neste estudo, RB96-6928, avaliando a influência dos sistemas de preparo convencional e plantio direto sobre o desenvolvimento radicular, observou que verticalmente, a distribuição de biomassa das raízes para ambas as áreas foi de 62% até os 0,40 m de profundidade, diferindo dos resultados encontrados neste estudo, que apresentaram em média 77% de biomassa radicular nos primeiros 0,40 m.

Cury et al. (2014) em sistema convencional e de plantio direto em cana-de-açúcar, com e sem a aplicação de calcário, relatou que a cultura manteve em média, $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de raízes no solo até 1,00 m de profundidade. Segundo o mesmo autor, embora as raízes da cana-de-açúcar se concentrem na superfície e próximo da soqueira, o sistema radicular explora grande volume de solo, sendo observados de 15 a 30% das raízes nas camadas mais profundas, corroborando com os resultados deste estudo, que apresentaram em média 22% de raízes nas camadas de 0,40 a 0,80 m de profundidade. As raízes encontradas nos primeiros 0,45 m são conhecidas como raízes

de sustentação (FARIAS et al., 2008), e quanto maior o volume radicular por camada, maior é o rendimento da cultura (VAN DEN BERG et al., 2000).

Figura 19 - Porcentagem de distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar nas diferentes profundidades de coleta, de 0,00 a 0,80 metros de profundidade, em um Latossolo Vermelho de textura média



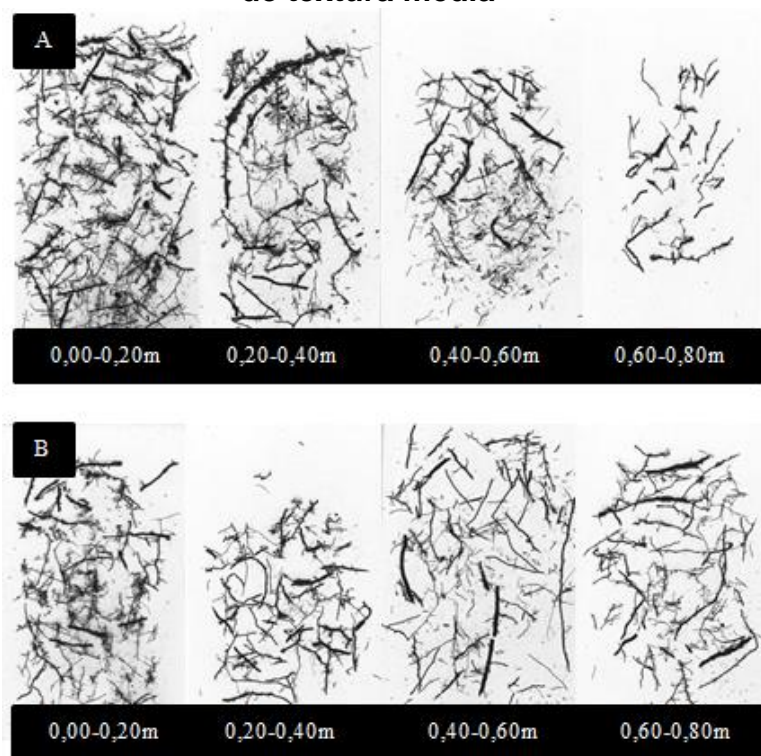
Fonte: Patrícia Dias (2020), Ana Stella Freire Gonçalves (2020)

De forma geral, a utilização do preparo profundo aliado à aplicação de calcário possibilitou um maior desenvolvimento e exploração das raízes, sobretudo nas camadas superficiais (0,00 a 0,40 m), provavelmente pela ação da enxada rotativa que atua no destorroamento e pulverização superficial do solo, permitindo maior descompactação do mesmo e conseqüentemente, a expansão radicular, como já descrito. Contudo, abaixo da camada de 0,40 m ainda foi observado o crescimento radicular (Figura 20). Neste caso, o emprego do preparo convencional resultou na maior distribuição de raízes, independente da aplicação ou não de calcário. Este resultado pode ser proveniente do revolvimento do solo realizado com implementos agrícolas até os 0,40 m de profundidade, em área total, quando empregado o sistema convencional,

visto que no preparo profundo não é realizado o revolvimento de solo em área trafegável.

Para tanto, deve-se considerar que existe uma pressão resultante do manejo da cultura, principalmente em relação ao tráfego na entrelinha, o que diminui a porosidade e conseqüentemente a aeração do solo, aumentando os índices de RMP e compactação.

Figura 20 - Distribuição média da biomassa radicular de cana-de-açúcar aportada no perfil de 0,00 a 0,80m de profundidade para os preparo profundo (A) e convencional (B), com e sem a utilização de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média



Fonte: imagens digitalizadas e analisadas com o programa WinRhizo versão 3,8-b (Regent Instrument Inc).

O mesmo comportamento foi observado para o acúmulo de carbono (kg ha^{-1}) aportado pelo sistema radicular, nas camadas de 0,00 a 0,80 m de profundidade. A utilização do preparo profundo modificado com a aplicação de calcário garantiu um estoque de $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono, ao passo que o mesmo preparo sem a aplicação de calcário resultou em 775 kg ha^{-1} de carbono aportado pelo sistema radicular (Tabela 3),

apresentando uma queda de aproximadamente 45% de C. A adição de Ca e Mg no solo, eleva os valores de pH do mesmo, o que intensifica a atividade rizosférica dos microrganismos e o acúmulo de carbono na biomassa microbiana, quando em condições favoráveis de umidade e temperatura (COSTA et al., 2004) favorecendo o maior aporte de raízes e conseqüentemente, maior produção vegetal, além de conferir maior tolerância às plantas ao estresse hídrico, garantindo rendimentos satisfatórios (CAIRES et al., 2001).

2.3.3 Aporte e exportação de carbono via colmo

Para o teor de C, a utilização do preparo convencional apresentou a maior média, com 151,3 g kg⁻¹ de C, sobretudo quando o calcário não foi aplicado; enquanto para a variável acúmulo de C, os dados não apresentaram diferença entre si. Contudo, independente do preparo de solo empregado, e quando o calcário foi aplicado, observou-se maior acúmulo de C nos colmos, com 19 Mg ha⁻¹ e 20 Mg ha⁻¹, quando utilizados os preparos convencional e profundo modificado, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 - Teor (g kg⁻¹) e acúmulo (Mg ha⁻¹) de carbono em colmos de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo e das doses de calcário aplicadas, em um Latossolo Vermelho de textura média

| Tratamento ⁽²⁾ | Probabilidade de F ⁽¹⁾ | |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| | Teor C (g kg ⁻¹) | Ac. C (Mg ha ⁻¹) |
| Tratamento ⁽²⁾ | 0,0779 | 0,2794 |
| CV(%) | 1,48 | 10,54 |
| DMS | 3,51 | 3,19 |
| PC sem | 151,31a | 18,29a |
| PC com | 148,49ab | 19,26a |
| PP sem | 148,50ab | 17,75a |
| PP com | 146,55b | 20,54a |

⁽¹⁾Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). ⁽²⁾ PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo.

Considerando os dados de produtividade de colmos, a utilização do preparo profundo aliado a aplicação de calcário, garantiu maior TCH, o equivalente a 136,7 Mg ha⁻¹, quando comparado ao preparo convencional, que apresentou 125,2 Mg ha⁻¹. Logo, considerando-se que nos colmos contem aproximadamente 25% de matéria seca e nestes, 45% de carbono (RESENDE et al., 2001), conclui-se que para a maior produtividade, seriam exportados aproximadamente 15 Mg ha⁻¹ de C, tornando este valor próximo ao observado para os dados de exportação de C via colmos, equivalente a 20 Mg ha⁻¹ de C.

O maior acúmulo de carbono nos colmos, associada à aplicação de calcário, indica o melhor desenvolvimento das plantas quando manejadas em solos corrigidos.

Ramos et al. (2016) avaliando os preparos de solo convencional, reduzido e plantio direto em cana-de-açúcar para o acúmulo de carbono nos colmos, em um Latossolo Vermelho Acriférico de textura argilosa, obteve os maiores resultados quando empregado o preparo convencional, com 3,8 Mg ha⁻¹ de C, embora os tratamentos não apresentassem diferença estatística, estando porém, os valores bem abaixo dos encontrados neste estudo, quando considerado os preparos convencional e profundo, com média de 18,8 Mg ha⁻¹ e 19,1 Mg ha⁻¹, respectivamente.

2.3.4 Aportes de matéria seca, carbono e nitrogênio pela palha

Para a variável aporte de matéria seca, os dados não foram influenciados pelo tipo de preparo e dose de calcário aplicados. Observou-se, contudo, maior aporte de palha quando utilizado o preparo profundo aliado ao calcário, atingindo 5,2 Mg ha⁻¹ de palha, o que representa um aumento de 6% de matéria seca quando comparado ao tratamento em que o calcário não foi aplicado (Tabela 5). A prática da calagem melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo, favorecendo melhorias ao ambiente de cultivo (AMARAL, 2002; GATIBONI et al., 2003), e conseqüentemente à produção de matéria seca.

Almeida (2011) notou que a aplicação de calcário promoveu incremento linear no acúmulo de matéria seca da cana-de-açúcar cultivada sob um Latossolo Vermelho distrófico, atingindo 17,8 Mg ha⁻¹ de palha, quando aplicados 3,6 Mg ha⁻¹ de carbonato

de cálcio, registrando um aumento de 29% comparado ao tratamento em que o mesmo não foi aplicado.

Segundo Leal et al. (2013), a quantidade de palha produzida pode variar entre 7,4 e 24,3 Mg ha⁻¹, e, embora tenha sido quantificado baixo aporte de palha neste estudo, acredita-se que o mesmo possa ser decorrente de características inerentes à própria cultivar (SANTOS et al., 2014), uma vez que a mesma apresentou boa produção de colmos (137 Mg ha⁻¹) quando utilizado o preparo profundo com a aplicação de duas vezes a dose recomendada de calcário, com produtividade média acima daquela relatada para a variedade (95 Mg ha⁻¹) (EMBRAPA, 2016). Além disso, foi registrado uma boa distribuição de chuvas ao longo do desenvolvimento da cultura no primeiro ano (1827 mm), garantindo o adequado suprimento de água e crescimento vegetal.

Tabela 5 - Aporte de matéria seca (Mg ha⁻¹), teor de C (g kg⁻¹) e de N (g kg⁻¹), acúmulo de C (kg ha⁻¹) e de N (kg ha⁻¹) e, relação C/N em palhada de cana-de-açúcar, cultivada em Latossolo Vermelho de textura média

| | Probabilidade de F ⁽¹⁾ | | | | | |
|---------------------------|-----------------------------------|---------|--------|----------|---------|----------|
| | Palha | Teor C | Teor N | Ac. C | Ac. N | C:N |
| Tratamento ⁽²⁾ | 0,8864 | 0,2821 | 0,0876 | 0,8955 | 0,1574 | 0,1350 |
| CV(%) | 14,77 | 0,73 | 9,39 | 15,23 | 16,39 | 10,20 |
| DMS | 1,18 | 5,41 | 0,68 | 566,21 | 5,98 | 16,84 |
| PC sem | 4,90a | 461,50a | 4,14b | 2266,53a | 20,00b | 112,70a |
| PC com | 4,92a | 464,25a | 4,47ab | 2283,55a | 22,07ab | 104,38ab |
| PP sem | 4,94a | 466,50a | 4,56ab | 2306,81a | 22,60ab | 103,00ab |
| PP com | 5,26a | 463,50a | 5,03a | 2439,47a | 26,63a | 92,80b |

⁽¹⁾Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). ⁽²⁾ PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo.

A produção e permanência da palha no solo, entre outros benefícios, influencia a ciclagem de nutrientes (CARVALHO et al., 2016). Contudo, a disponibilização desses nutrientes contidos na palha está associada a fatores ambientais e intrínsecos do material vegetal, que irão determinar a sua velocidade de decomposição. Neste contexto, para o teor de C (g kg⁻¹), todos os dados ficaram próximos aos valores considerados por Galdos et al. (2010) na cultura da cana-de-açúcar, que variam entre

38 e 45% de C. Para o teor de N, a utilização do preparo profundo modificado aliado ao calcário resultou na maior média, com $5,03 \text{ g kg}^{-1}$. Almeida (2011), avaliando os teores de N em palha de cana-de-açúcar, em função da aplicação de doses de carbonato de cálcio no solo, que variavam de 0 a $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, não constatou diferença para as doses aplicadas, relatando um valor médio de $7,2 \text{ g kg}^{-1}$ de N.

Para o acúmulo de C e de N, a utilização do preparo profundo aliado a aplicação de calcário proporcionou os maiores resultados, com $2,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C e $26,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N acumulados, coincidindo com o tratamento que proporcionou a maior produção de palha (Tabela 5). Estratégias que melhorem a fertilidade do solo, como a prática da calagem, podem resultar em maior produtividade e conseqüentemente, maior retorno de resíduos ao solo, contribuindo para o aumento do estoque de C e N, em comparação a uma área sem correção (PARADELO et al., 2015). Segundo Urquiaga et al. (1997) e Resende et al. (2006), em 10 Mg de palha podem estar contidos de 40 a 60 kg ha^{-1} de N e $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C, valores próximos aos encontrados neste estudo. O N é um dos nutrientes mais demandados pela cultura, e apenas uma fração do mesmo, de 3% a 30% proveniente da palhada, é mineralizado ao longo de um ano (ROBERTSON; THORBURN, 2007; FERREIRA et al., 2015).

Para a relação C:N, a utilização do preparo convencional sem a aplicação de calcário resultou na maior média, atingindo 112, ao passo que a utilização do preparo profundo com a aplicação de calcário refletiu nos menores valores, com média de 92 (Tabela 5). Contudo, os dados apresentaram altos valores para a relação C:N (FORTES; TRIVELIN; VITTI, 2012), com média de 108 para o preparo convencional e 97 para o preparo profundo. Oliveira et al. (1999) também relatou altos valores para a relação C:N, em torno de 97, alegando a influencia da sua composição química para os valores reportados.

Segundo Trivelin et al. (1995), a palha de cana-de-açúcar apresenta de 390 a 450 g kg^{-1} de C e 4,6 a $6,5 \text{ g kg}^{-1}$ de N, o que representa uma razão C:N em torno de 100, estando os resultados obtidos neste estudo próximos aos intervalos considerados. A alta relação C:N é um dos fatores responsáveis pela lenta taxa de decomposição da palha (ROBERTSON; THORBURN, 2007), resultando em maior imobilização do N do

solo (SMITH; DOUGLAS, 1971; SIQUEIRA; FRANCO, 1988), o que contribui para um menor fator de emissão de N₂O (SIQUEIRA NETO et al., 2015).

2.3.5 Balanço de carbono (C-CO₂)

Para o balanço de carbono (C), baseado nos resultados de C-CO₂ emitidos anualmente em cana-planta e nos aportes de C via resíduos vegetais (biomassa radicular + parte aérea (colmos e palha)), independente do tratamento aplicado, os dados não apresentaram diferença entre si, com um balanço médio positivo (estoque de C) de 13 Mg ha⁻¹ de C no solo (Tabela 6).

Tabela 6 - Balanço de C-CO₂ (Mg C ha⁻¹) em área de produção de cana-de-açúcar, em função do preparo de solo utilizado e da dose de calcário aplicada, em Latossolo Vermelho de textura média

| | Probabilidade de F |
|---------------------------|--------------------|
| Tratamento ⁽¹⁾ | 0,7832 |
| CV(%) | 18,68 |
| DMS | 3,88 |
| PC sem | 12,27 |
| PC com | 13,95 |
| PP sem | 13,14 |
| PP com | 12,62 |

⁽¹⁾PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo.

Mesmo não havendo diferença no balanço de C para os diferentes tratamentos, o estoque de C no perfil do solo (0,00 a 1,00 m de profundidade) após as operações de preparo e aplicação de calcário, no tratamento PP com calcário, foi superior aos demais, registrando 133 Mg ha⁻¹ de C (Tabela 7). A presença de C no solo, de acordo com Iwata et al. (2010), contribui para o aprimoramento das propriedades químicas, físicas, e biológicas do solo. É uma fonte de energia para a biomassa microbiana; atua no processo de armazenamento e fornecimento de nutrientes; na disponibilização de água; formação e estabilização dos agregados; favorece resistência ao solo e melhorias

significativas na densidade do mesmo. Logo, a adoção de manejos agrícolas que favoreçam a conservação e o incremento do C no solo contribuem positivamente para mitigar as emissões de CO₂ do solo (DE SOUZA BARROS, 2013).

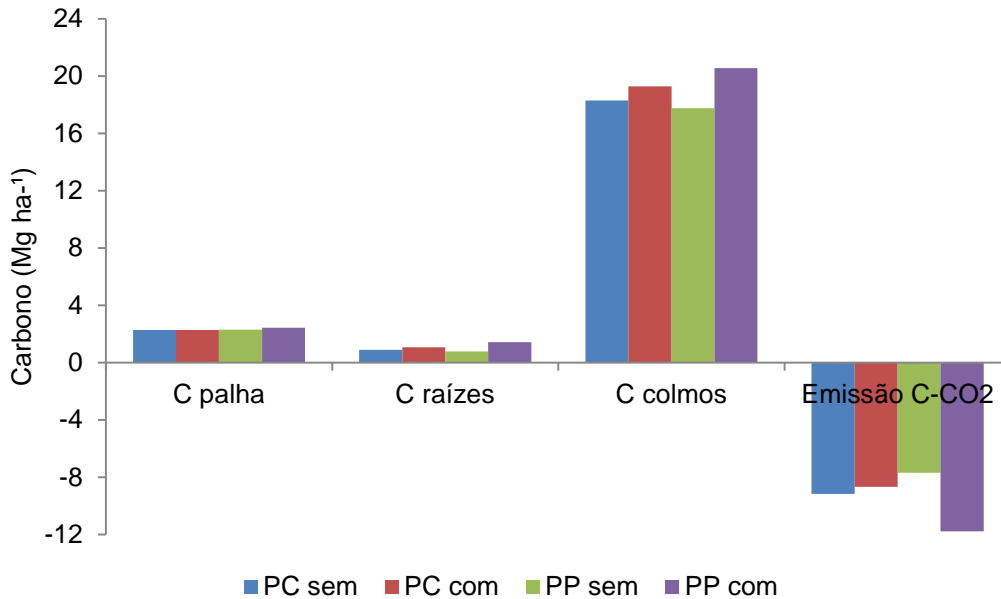
Tabela 7 - Estoque de C (Mg ha⁻¹) no perfil do solo (0,00 a 1,00 m de profundidade), em área de produção de cana-de-açúcar, após as operações de preparo de solo e aplicação de calcário, em Latossolo Vermelho de textura média

| | Probabilidade de F |
|---------------------------|--------------------|
| Tratamento ⁽¹⁾ | 0,0127* |
| CV(%) | 3,55 |
| DMS | 7,14 |
| PC sem | 120,86b |
| PC com | 121,72b |
| PP sem | 127,54ab |
| PP com | 133,05a |

⁽¹⁾Significativo pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si, pelo teste t de Student ($p \leq 0,05$). ⁽¹⁾PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário na faixa de preparo.

O tratamento PP com calcário, considerando as entradas e saídas de C do sistema, foi responsável pelas maiores médias obtidas, tanto positivas - para as entradas de C (palhada, biomassa de raízes e C dos colmos) e para o estoque de C no solo, quanto negativas - emissões de C-CO₂ (Figura 21).

Figura 21 - Compartimentos de carbono no sistema solo-planta-atmosfera, considerando os preparos convencional e profundo, sem e com aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho de textura média



PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa, com aplicação de calcário apenas na faixa de preparo.

O preparo profundo modificado com a aplicação de calcário resultou no maior acúmulo de C na palhada, raízes e colmos, com respectivamente 2,44 Mg ha⁻¹, 1,42 Mg ha⁻¹ e 20,55 Mg ha⁻¹. Assim como o tratamento refletiu no maior aporte de C no solo, o mesmo levou às maiores perdas de C-CO₂, com 11,7 Mg ha⁻¹. Contudo, fazendo-se um balanço de C do sistema, o mesmo preparo apresentou um saldo positivo de 12,6 Mg ha⁻¹ de C no solo. Acredita-se que tal resultado esteja vinculado à aplicação do calcário em profundidade.

A calagem é uma prática agrícola essencial para elevar o pH do solo, predispondo à condições favoráveis de cultivo, garantindo a maior produção de biomassa aérea e radicular, e conseqüentemente, maior produtividade. Por outro lado, concomitantemente à elevação do pH, há aumento da atividade microbiana do solo (EKENLER; TABATABAI, 2003), a qual acelera a decomposição da matéria orgânica (YAO et al., 2009) podendo levar a significantes perdas de C-CO₂ (CHAN; HEENAN, 1999). Contudo, em médio prazo este efeito pode ser reduzido devido à elevada produção de biomassa vegetal (RIDLEY et al., 1990; HATI et al., 2008; BRIEDIS et al., 2012b;

CASTRO et al., 2015), em consequência da melhoria da fertilidade do solo, como constatado neste estudo, resultando em um saldo positivo de C no solo.

Resultados semelhantes foram relatados por Mendonça (2020) avaliando o balanço de C em culturas de superfície, aliado a aplicação de calcário e gesso em sistema de semeadura direta de longa duração. Segundo a mesma autora, apesar da calagem influenciar na emissão de C-CO₂, a sua utilização aliada a doses de gesso, resulta em maiores entradas de C via resíduos vegetais, compensando as saídas de C, promovendo um balanço de C favorável para o sistema.

Segundo Yu (2004) e Nishi et al. (2005), para cada tonelada de C fixado na fitomassa, há uma mitigação equivalente a 3,67 Mg de CO₂ da atmosfera. Logo, considerando-se o C fixado na biomassa aérea e radicular da cultura (25,1 Mg ha⁻¹), o que corresponde a valores de 20,4 Mg ha⁻¹ de C acumulados nos colmos; 3,3 Mg ha⁻¹ de C acumulados na palha e 1,4 Mg ha⁻¹ de C aportado no sistema radicular, obtém-se uma mitigação equivalente a 92,1 Mg ha⁻¹ de C para os dados apresentados neste estudo.

Logo, o sequestro de carbono decorrente da utilização do sistema de preparo profundo com a aplicação de calcário somente na área mobilizada reduz a emissão relativa de GEE, ou seja, a quantidade de GEE emitidos por unidade de massa de colmos produzida, compensando a maior emissão de C-CO₂ quando utilizado o mesmo tratamento.

2.4 CONCLUSÃO

A utilização do sistema de preparo profundo com a aplicação de calcário concentrada na linha de plantio, aumenta a emissão anual de C-CO₂, aumenta a produção de raízes, de palha e colmos, e conseqüentemente garante maior acúmulo de carbono na biomassa vegetal de cana-planta, reduzindo a emissão relativa de carbono no sistema solo-planta-atmosfera.

REFERÊNCIAS

- AINI, F. K. et al. Nitrous oxide emissions along a gradient of tropical forest disturbance on mineral soils in Sumatra. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.214, p.107–117, 2015.
- ALMEIDA, T. B. F. de. **Efeito residual do calcário e da escória de siderurgia na primeira soqueira da cultura da cana-de-açúcar**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2011.
- AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície**. 2002. 107 f. (Tese). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- ARANTES, S. A. C. M. et al. Efeito da calagem na mineralização de 14c-glifosato em solos. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 234-241, 2011.
- BALL, B. C. et al. Seasonal nitrous oxide emissions from field soils under reduced tillage, compost application or organic farming. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.189, p.171–180, 2014.
- BARBOSA, L. C. **Atributos físicos do solo e desenvolvimento radicular à cana-planta em diferentes sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2015, 89p.
- BARBOSA, L. C. et al. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v.13, p.15-25, 2018.
- BAYER, C. et al. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage: cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**. v.146, p.213–222, 2015.
- BESEN, M. R. **Influencia de fontes de nitrogenio no fluxo de gases e na produtividade do milho e do trigo em Sistema de plantio direto**. Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos. Trabalho de conclusão de curso, 2015.
- BICALHO, E. S. et al. Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. **Soil Science Society of America Journal**, v.81, p.1168-1178, 2017.
- BRAGA, D. M. et al. Volatilização de amônia e emissão de óxido nitroso em função da adubação com uréia e vinhoto em cana-de-açúcar. Uberlândia/MG, 2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO – CBCS, 33., 2011, Uberlândia/MG, **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia/UFU, v. 1, p. 1-3, 2011.

BRIEDIS, C. et al. Soil organic matter pools and carbon protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, Amsterdam, v.170: p. 8088, 2012b.

BRITO, L. F. et al. Seasonal Fluctuation of Soil Carbon Dioxide Emission in Differently Managed Pastures, **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, 2015.

CAIRES, E.F. et al. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 1029-1040, 2001.

CALDEIRA, D. S. A.; CASADEI, R. A. Efeito do calcário em soqueiras de três variedades de cana-de-açúcar no Mato Grosso. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.4, n.3, p.05-09, 2010.

CARBONE, M. S. et al. Seasonal and episodic moisture controls on plant and microbial contributions to soil respiration. **Oecologia**, v.167, p.265–278, 2011.

CARMEIS FILHO, A. C. **Soil acidity management on an oxisol quality and wheat-common bean growth under a long term no-tillage system**. Tese (Doutorado em Agronomia: Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

CARVALHO, J. L. N. et al. Agronomic and environmental implications of sugarcane removal: a major review. **Global Change Biology Bioenergy**, Melbourne, v.9, p.1181-1195, 2016.

CASTRO, G. S. A. et al. A. Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 14, n.1, 2015.

CHALCO VERA, J. et al. To burn or not to burn: the question of straw burning and nitrogen fertilization effect on nitrous oxide emissions in sugarcane. **Science Total Environment**, v.587–588, p.399–406, 2017.

CHALCO VERA, J. C.; ACRECHE, M. M. Towards a baseline for reducing the carbon budget in sugarcane: three years of carbon dioxide and methane emissions quantification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 267, p. 156-164, 2018.

CHAN, K. Y. HEENAN, D. P. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1841–1844, 1999.

COSTA, F. S. et al. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.587-589, 2004.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.38, p.1929-1938, 2014.

DE SOUZA BARROS, J. D. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. **POLÊMICA**, v.12, n.2, p.341-351, 2013.

EKENLER, M.; TABATABAI, M. A. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. **Biology and Fertility of Soils**, Florença, v.39, p.51-61, 2003.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema de Produção da Cana-de-açúcar para o Rio Grande do Sul. In: Sistemas de Produção, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, n.23, 247 p., 2016.

ESTEBAN, D. A. et al. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.187, n.1, p.60-71, 2019.

FARIAS, C. H. A. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.356–362, 2008.

FARHATE, C. V. V. et al. Soil tillage and cover crop on soil CO₂ emissions from sugarcane fields. **Soil Use and Management**, 2018.

FELLER, C.; BERNOUX, M. Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration. **Waste Management**, v. 28, p.734-740, 2008.

FERREIRA, D. A. et al. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil, 2015.

FIGUEIREDO, E. B. et al. Greenhouse gas emission associated with sugar production in southern Brazil. **Carbon Balance Manag.** v.5, p.1–7, 2010.

FIGUEIREDO, E. B. et al. Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum spp.*) replanting in southern Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, Melbourne, v.7, p.316-327, 2015.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdã, v.42, p.189-198, 2012.

FUGIWARA, M. et al. A técnica de estudo de raízes pelo método do trado. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1994. 9p. (Boletim Técnico, 153)

GALDOS, M. V. et al. Simulation of sugarcane residue decomposition and above ground growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.326, p.243-259, 2010.

GATIBONI, L. C. et al. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.282-290, 2003.

HATI, K. M. et al. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. **Geoderma**, Amsterdam, v.148, p.173-179, 2008.

HUTSCK, B. W. Methane oxidation, nitrification, and counts of methanotrophic bacteria in soils from a long-term fertilization experiment ("Ewiger Roggenbau" at Halle). **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.164, p.21-28, 2001.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2001**: Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, Cambridge University Press. 881p.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. In: National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, v.4, 2006.

IWATA, B. de F. et al. Carbono total e carbono microbiano de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no cerrado piauiense. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18, 2010, Teresina. **Anais...** Teresina: EMBRAPA Meio-Norte, 2010. CDRom.

JANSSENS, I. A. et al. Elevated atmospheric CO₂ increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and soil CO₂ efflux in Scots pine seedlings. **Global Change Biology**, Oxford, v.4, p.871-878, 1998.

JANTALIA, C. P. et al. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and systems in the south of Brazil. **Nutrient Cycling Agroecosystems**, Ithaca, v.82, p.161-173, 2008.

KHALIL, M. I.; BAGGS, E. M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.37, p.1785-1794, 2005.

LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.114, p.351-360, 2009.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.91, n.1-2, p.244-248, 2006.

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

LEAL, M. R. L. V. et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, Amsterda, v.53, p.11-19, 2013.

LECO CORPORATION. TruSpec CHN/CHNS Carbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur Determinators: Instruction Manual. 1. Ed. St JOSEPH, 2011. 532p.

LEMER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils : a review. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v.37, p.25-50, 2001.

LIMA, C. C. **Canterização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular. 2016. 130 f.** Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e subtropical) - Instituto Agronômico, Campinas, 2016.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; LA SCALA, N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. 2012. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.45-50, 2012.

MARTINS, M. R. et al. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.151, p.75–81, 2015.

MENDONÇA, L. P. **Balanço de carbono no sistema solo-planta-atmosfera com aplicação superficial de calcário e gesso em sistema de semeadura direta.** Tese (Doutorado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 117p., 2020.

MIJANGOS, I. et al. Effects of liming on soil properties and plant performance of temperate mountainous grasslands. **Journal of Environmental Management**, Londres, v.91, p.2066-2074, 2010.

NISHI, M. H. et al. Influência dos créditos de carbono na viabilidade financeira de três projetos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.2, p.263-270, 2005.

OLIVEIRA, M. W. et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2359-2362, 1999.

OLIVEIRA NETO, A. M. et al. Manejo químico de adubos verdes para sucessão da cana-de-açúcar em sistema de cultivo mínimo. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina, v.10, n.2, p.86-94, 2011.

OLIVEIRA, M. E. D. de. **Estimativas de Emissões de N₂O e CH₄ na cultura da cana de açúcar no Estado de São Paulo**. Piracicaba- SP (Tese de Doutorado), 2014.

OSBORNE, B. et al. Key questions and uncertainties associated with the assessment of the cropland greenhouse gas balance. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.139, p. 293–301, 2010.

OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.2, p.201-210, 2011.

OTTO, R. **Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada**. Tese (Doutorado), Piracicaba, 2012.

PANOSSO, A. R. et al. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p.275–282, 2009.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: a review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 202, p. 98-107, 2015.

PAVEI, M. A. **Decomposição de resíduos culturais e emissão de gases do efeito estufa em sistemas de manejo do solo em Ponta Grossa (PR)**. 2005. 115f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

PETITJEAN, C. et al. Soil N₂O emissions in French Guiana after the conversion of tropical forest to agriculture with the chop-and-mulch method. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.208, p.64-74, 2015.

RAMOS, N. P. et al. Contribuições de sistemas de preparo para a produção e acúmulo de carbono na biomassa da cana-de-açúcar, sob plantio de novembro em Guaíra-SP. **Anais 10...** Congresso STAB, 2016.

RESENDE, A. S. de. et al. Efeito Estufa e o Seqüestro de Carbono em Sistemas de Cultivo Com Espécies Florestais e na Cultura de Cana-de-Açúcar. Embrapa, **Documentos**, n.133, 2001.

RESENDE, A. S. et al. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE Brazil. **Plant and Soil**, Dordresht, v.281, n.1-2, p.339-351, 2006.

RIDLEY, A. M. et al. The importance of the carbon cycle to acidification of a grazed annual pasture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v.30, p.529-537, 1990.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v.45, p.1–11, 2007.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.11-21, 2008.

SANCHEZ-MARTIN, L. et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.40, p.142–151, 2008.

SANTOS, F. A. et al. Optimization of hydrothermal pretreatment of cane sugar straw for cellulosic ethanol production. **Quimica Nova**, São Paulo, v.37, n.1, p.56-62, 2014.

SANTOS, I. L. et al. Soil N₂O emissions from long-term agroecosystems: Interactive effects of rainfall seasonality and crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.233, p.111–120, 2016.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2018.

SAVARIO, C. F.; HOY, J. W. Microbial communities in sugarcane field soils with and without a sugarcane cropping history. **Plant and Soil**, Crawley, v.341, p.63–73, 2011.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.43, p.322-338, 2013.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugar cane. **Environmental Research Letters**, v.8, p.1-8, 2013.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília: MEC; ABEAS; Lavras, 1988, 236p.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 4, p. 709-717, 2009.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Direct N₂O emission factors for synthetic N-fertilizer and organic residues applied on sugarcane for bioethanol production in Central-southern Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, Melbourne, v.8, p.269, 2015.

SMART, D. R.; PEÑUELAS, J. Short-term CO₂ emissions from planted soil subject to elevated CO₂ and simulated precipitation. **Applied Soil Ecology**, v.28, p.247-257, 2005.

SMITH, J. H.; DOUGLAS, C. L. Wheat straw decomposition in the field. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.35, p.269-272, 1971.

SMITH, K. A. et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.54, n.4, p.779-791, 2003.

SMITH, P. et al. Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, p. 811–922, 2014.

SPIRONELLO, A. et al. **Cana-de-açúcar**. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1996. cap.22, p.237- 239. (Boletim Técnico n. 100).

TAYLOR, H. M; ROBERSON, G. M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Madison, v. 102, p. 18-22, 1966.

TEIXEIRA, L. G. **Emissão de CO₂ de um Latossolo vermelho após preparo mecânico**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Jaboticabal) 98p., 2007.

TESOURO, O. et al. Cultivo de caña en Famaillá: Estudio de caso. Propiedades físicas del suelo: Evolución e impacto en el rendimiento del cultivo. **Inf. Técnicos INTA**, 2016.

TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIQUES, J. C. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.12, p.1375-1385, 1995.

URQUIAGA, S. et al. **Fixação biológica de nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar: Perspectivas**. In: Workshop sobre avaliação e manejo de recursos naturais em área de exploração da cana-de-açúcar, Aracaju. **Palestras...** Aracaju: Embrapa-CPATC, 1997. 126p. Editado por Walane Maria Pereira de Mello Ivo, Ana Alexandrina Gama da Silva, Dalva Maria da Mota, Marcelo Ferreira Fernandes. 1997.

VAN DEN BERG, M. Land use systems research on strongly weathered soils in south and south-east Brazil. Utrecht: The Royal Dutch Geographical Society, 2000, 432p. (Netherlands Geographical Studies, 271).

VAN WESEMAEL, B. et al. Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.107, p.14926–14930, 2010.

VARGAS, V. P. et al. Sugarcane crop residue increases N₂O and CO₂ emissions under high soil moisture conditions. **Sugar Tech**, v.16, p.174–179. 2014.

WANG, J. et al. Temperature sensitivity of soil carbon mineralization and nitrous oxide emission in different ecosystems along a mountain wetland-forest ecotone in the continuous permafrost of Northeast China. **Catena**, n.121, p.110-118, 2014.

WEIER, K. L. Trace gas emissions from a trash blanketed sugarcane field in tropical Australia. **Sugarcane**, p. 271, 1996.

YAO, X.; CHU, J.; WANG, G. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress. **Biological Trace Element Research**, Clifton, v.130, p.283-290, 2009.

YU, C. M. **Seqüestro florestal de carbono no Brasil: dimensões políticas, socioeconômicas e ecológicas**. São Paulo: Annablume IEB, 2004. 280p.

ZHI-MIN, Z. et al. Contribution of Root Respiration to Total Soil Respiration in a Cotton Field of Northwest China. **Pedosphere**, Nanjing, v.23, p.223-228, 2013.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego do sistema de preparo profundo em faixas, com aplicação de calcário acima da dose atualmente recomendada, somente na área mobilizada, além de aumentar a produtividade de colmos, promove o maior aporte de C via biomassa aérea e radicular, o que a longo prazo, pode incrementar o estoque de C no solo. Atrelado a isto, com o aumento de produtividade da cultura em primeira safra, há uma reduzida emissão relativa de GEE, o que remete a uma produção mais sustentável. Estas condições mostram a necessidade de uma nova recomendação de calcário para as condições de preparo do solo para o Estado de São Paulo.

Por outro lado, a utilização do preparo convencional, independente da aplicação de calcário, garante uma melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, o que pode ser favorável para o desenvolvimento da cultura, em condições de déficit hídrico.

REFERÊNCIAS

- ACTON, S.; BAGGS, E. Interactions between N application rate, CH₄ oxidation and N₂O production in soil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.103, p.15-26, 2011.
- ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. S. Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológica, institucionais e políticas. Brasília: **Embrapa Informações tecnológicas**, v.1: produção e produtividade agrícola. 1336 p., 2008.
- AMADO, T. J. C. et al. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.35, p.1599-1607, 2006.
- BAGGS, E. M.; CHEBII, J.; NDUFA, J. K. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.90, p.60-76, 2006.
- BALL, B. C. et al. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.29-39, 1999.
- BALL, E.; PHILIPPOT, L. Microbial terrestrial pathway to nitrous oxide. In: Smith, K. A. (ed) Nitrous oxide and climate change. Londres: Earthscan, p.4-35, 2010.
- BANGER, K.; TIAN, H.; LU, C. Do nitrogen fertilizers stimulate or inhibit methane emissions from rice fields? **Global Change Biology**, Oxford, v.18, p.3259-3267, 2012.
- BATEMAN, E. J.; BAGGS, E. M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. **Biology and Fertility of Soils**, Florença, v.41, p.379-388, 2005.
- BATTLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Change in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: a Review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam v.137, p.47-58, 2010.
- BAYER, C. **Desafios no manejo da matéria orgânica do solo e seqüestro de C na agricultura conservacionista**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, v.31, 2007.
- BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.7, p.55-118, 2011.
- BENEDINI, M. S. Novo conceito no uso de calcário em cana-de-açúcar, **COPERSUCAR**, Série Agronômica, n.16, 1 ed. 1988. 19p.

BICALHO, E. da S. et al. Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.81, p.1168-1178, 2017.

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

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 91-95, 1997.

BRAGA, D. M. et al. Volatilização de amônia e emissão de óxido nitroso em função da adubação com uréia e vinhoto em cana-de-açúcar. Uberlândia/MG, 2011. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO – CBCS, 33., 2011, Uberlândia/MG, **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia/UFU, v. 1, p. 1-3, 2011.

BRASIL (2016). Terceiro inventário de emissões anuais de gases de efeito estufa do Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Brasília: MCTI.

BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 7, p.1007–1014, 2012.

CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.

CANELLAS, L. P. et al. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CARBONELL-BOJOLLO, R. M. et al. Influence of soil and climate conditions on CO₂ emissions from agricultural soils. **Water Air and Soil Pollut**, New York, v.223, n.1, p.3425-3435, 2012.

CARVALHO, A. M. de; ALVES, B. J. B.; PEREIRA, L. L. Emissão de Óxido Nitroso do Solo com Aplicação de Fontes de Fertilizantes Nitrogenados em Sistema Plantio Direto no Cerrado. **Brasília, DF: Embrapa Cerrados**, 2010.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195-196, p. 234–242, 2013.

CASTRO, G. S. A. et al. Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 14, n. 1, 2015.

CERRI, C. E. P. et al. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, p.83-99, 2007.

CERRI, C. C. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v.62, n.1, p.23-28, 2011.

CERRI, C. C. et al. **Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem**. In: Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa, Ministério da Ciência e Tecnologia, 49p., 2006.

CHOHF, F. M.; DUPAS, F. A.; LORA, E. E. S. Balanço, análise de emissão e seqüestro de CO₂ na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro, 7p. 2004.

CHAPUIS-LARDY, L. et al. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, Oxford, v.13, p.1-17, 2007.

CIAIS; P. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: STOCKER, T. F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX; P.M. MIDGLEY (Eds.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

CNA - CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. Guia de financiamento para agricultura de baixo carbono / Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. – Brasília, DF: CNA, 2012. 44 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acomp. safra bras. cana, v.6 - Safra 2020/21, n.1 - Primeiro levantamento, Brasília, 2020.

COSTA, F. S. et al., Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria v.38, n.7, p.2049-2053, 2008.

CREUTZIG, F. et al. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. **GCB Bioenergy**, Melbourne, v.7, p.916–944, 2015.

DA SILVA BICALHO, E. et al. Soil Greenhouse Gases: Relations to Soil Attributes in a Sugarcane Production Area. **Soil Science Society of America Journal**, v.81(5), p.1168, 2017.

DAVIDSON, E. A. et al. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. **BioScience**, Washington, v. 50, p. 667-680, 2000.

DECONTO, J. G. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Brasília: Embaixada Britânica; Campinas: Embrapa/Unicamp, 84p., 2008.

DOBBIE, K. E.; SMITH, K. A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled porosity and other controlling variables. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p. 204-218, 2003.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. eds. Defining soil quality for a sustainable environment. **Soil Science Society of America**, Madison, p.3-22, n.35, 1994.

EVANYLO, G. E.; MCGUINN, R. Agricultural management practices and soil quality: measuring, assessing, and comparing laboratory and field test kit indicators of soil quality attributes. Virginia: Polytechnic Institute and State University, p.12, 2009.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Conservation agriculture**. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/ca/>> Acesso em: 22 abr. 2020.

FERNANDES, A. H. B. M.; FERNANDES, F. A. **A Embrapa e as mudanças climáticas**. Embrapa Pantanal, 2008.

FERRAZ, R. L. S. et al. Calagem em cana-de-açúcar: efeitos no solo, planta e reflexos na produção. **Interfacs - Saúde, Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.10, n.1, 2015.

FILHO, M. V. M.; SIQUEIRA, D. S.; JÚNIOR, J. M. Preparo dos solos tropicais: a importância de se conhecer a variabilidade dos atributos do solo. In: BELARDO, G. DE C.; TUFAILE, M. C.; SILVA, R. P. DA. (Eds.). Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar. SBEA, p.149-177, 2015.

FUENTES, J. P.; BEZDICEK, D. F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J. L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1, p. 123-131, 2006.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, cap. 11, p. 159-170, 2008.

GLAESER, D. F. et al. Biomassa microbiana do solo sob sistemas de manejo orgânico em cultivos de café. **Ensaio e Ciência: Ciência Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v.14, n.2, p.103-114, 2010.

GOMES, J. **Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 2006,

126p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GOUTAL, N. et al. Soil CO₂ concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. **European Journal of Soil Science**, London, v.63, p.261-271, 2012.

GRIÈVE, I. C.; DAVIDSON, D. A.; BRUNEAU, P. M. C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. **Geoderma**, Amsterdam, v.125, p.39-48, 2005.

GROFFMAN, P. M. et al. Challenges to incorporating spatially and temporally explicit phenomena (hotspots and hot moments) in denitrification models. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.93, p.49-77, 2009.

HÜTSCH, B. W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production. Invited paper. **European Journal of Agronomy**, v. 14, p. 237-260, 2001.

IAMAGUTI, J. L. et al. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19 n.5, 2015.

IPCC - INTERNATIONAL GOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for national greenhouse gas inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use. In: National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, v.4, 2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014.

JONES, C. C. et al. Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of carbon in soils. **Global Change Biology**, Oxford, v.11, p.114-166, 2005.

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.162, p.68-77, 2016.

KLUTHCOUSKI, J. et al. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57 n.1, 2000.

LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled-traffic farming (CTF) using wide-span implement carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANNUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, 2003, Montréal. **Proceedings**. Montréal: CSAE/SCGR, 2003. (CSAE. Paper, 03-233).

LEMKE, R.; SOLBERG, E.; IZAURRALDE, C.; NYBORH, M. **Seasonal nitrous oxide emissions from agricultural soils in the Parkland region of the Canadian Prairie**. 2004. Disponível em: <http://paridss.usask.ca/factbook/soilcrop/cesar1.html>. Acesso em: 19 nov. 2019.

LIU, X. J. et al. Dinitrogen and N₂O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, n. 39, p. 2362-2370, 2007.

LOSS, A. et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, n.4, p.1212-1224, 2015.

LUDWIG, J. et al. Soil-air exchange of nitricoxide: an overview of processes, environmental factors, and modeling studies. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.52, p.225–257, 2001.

MADARI, B. et al. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.80, p.185-200, 2005.

MAGRO, F. J. et al. **Biometria em cana-de-açúcar**. Escola superior de agricultura “Luis de Queiroz”. Piracicaba, p.2, 2011.

MAIA, C. E.; CANTARUTTI, R. B. Acumulação de nitrogênio e carbono no solo pela adubação orgânica e mineral contínua na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2004.

MAIA, S. F. M. et al. Changes in soil organic carbono storage under diferente agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 177-84, 2010.

MARASCA, I. **Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo**. 2014. 76 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas. Botucatu – SP.

MARIA, I. C. de et al. **Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronomico de Campinas, 2016.

MARTINS, N. G. S. **Os fosfatos na cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado, Piracicaba, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 87 p., 2004.

MERCANTE, F. M. et al. Biomassa microbiana, em um Argissolo Vermelho, em diferentes coberturas vegetais, em área cultivada com mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 34, p. 479-485, 2008.

MCTIC - Brazil Ministry of Science, Technology and Innovation, Secretariat of Policies and Programs of Research and Development, General Coordination on Climate Change. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Volume III. Ministry of Science, Technology and Innovation, Brasilia, DF, Brazil. p. 41–62, 2016.

METAY, J. A. et al. N₂O and CH₄ emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.141, p.78-88, 2007.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. **Ecosistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Genesis, p.1-8, 1999.

MOSIER, A., R. et al. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: Sources, sinks and mechanisms. **Environment, Development and Sustainability**, v.6, p.11–49, 2004.

OERTEL, C. et al. Greenhouse gas emissions from soils-A review. **Chemie der Erde**, v.76, p. 327–352, 2016.

PANOSSO, A. R. et al. Spatial and temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.105, p. 275–82, 2009.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 202, p. 98-107, 2015.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.9, p.1199-1204, 2001.

PRAGANA, R. B. et al. Atributos Biológicos e Dinâmica da Matéria Orgânica em Latossolos Amarelos na Região do Cerrado Piauiense Sob Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.851-858, 2012.

PROSDOCIMI, M.; CERDÀ, A.; TAROLLI, P. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. **Catena**, v.141, p.1-21, 2016.

RAIJ, B. V. Acidez e calagem In: VALE, D.W.; SOUSA, J. de I.; PRADO, R. de M.(coord.). **Manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas**. São Paulo: Jaboticabal. Cap. 3, p. 37-68. 2010.

ROSSETTO, R. et al. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.124, p.8-13, 2011.

RUSSOW, R.; SPOTT, O.; STANGE, C. F. Evaluation of nitrate and ammonium as sources of NO and N₂O emissions from black earth soils (Haplic Chernozem) based on ¹⁵N field experiments. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.40, p.380-391, 2008.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Preparo do solo. **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar**. Acessado: 21 de abr de 2020. Agencia Embrapa de Informação Tecnológica (Ageitec). Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_20_711200516716.html

SAVARIO, C. F.; HOY, J. W. Microbial communities in sugarcane field soils with and without a sugarcane cropping history. **Plant Soil**, v.341, p.63–73, 2011.

SCHÜTZ, H.; SEILER, W.; CONRAD, R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.11, p.77-95, 1990.

SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; EVETT, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v.110, n.1, p.221-229, 2010.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Novas estimativas do SEEG Brasil - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa – 2018, ed.7, 2019.

SETYANTO, P. et al..Soil controlling factors of methane gas production from flooded rice fields in Pati District, Central Java.Indonesia. **Journal of Agricultural Science**, Belgrade, v.3 p. 20-31, 2002.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v.8, p.1-8, 2013.

SKIBA, U.; BALL, B. The effect of soil texture and soil drainage on emissions of nitric oxide and nitrous oxide. **Soil Use and Management**, Oxford, n. 18, p. 56-60, 2002.

SKOCAJ, D. M.; EVERINGHAM, Y. L.; SCHROEDER, B. L. Nitrogen management guidelines for sugarcane production in Australia: can these be modified for wet tropical conditions using seasonal climate forecasting? **Springer Science Reviews**, v.1, p.51–71, 2013.

SNYDER, C. S. et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.133, p.247-266, 2009.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.675-688, 2008.

SOUZA, Z. M. et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.271-278, 2005.

SOUZA, L. C.; FERNANDES, C.; NOGUEIRA, D. C. S.; MOITINHO, M. R.; BICALHO, E. S.; LA SCALA, N. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbon dioxide emissions in an oxisol and ultisol? **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1113–1121, 2017.

SPIRONELLO, A. et al. **Cana-de-açúcar**. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1996. cap.22, p.237- 239. (Boletim Técnico n. 100).

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York, John Wiley, 496p., 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAIZ, L. et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. Artmed Editora. 6ed, 858p. 2017.

TANG, J. et al. Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-statesensors. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.118, p.207–220, 2003.

TAVARES, R. L. M. et al. Soil CO₂ emission in sugarcane management systems. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Section B — Soil and Plant Science, v.65, n.8, p.755–762, 2015.

TIAN, H. et al. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere. **Nature**, v. 531, p.225-232, 2016.

TREIN, C. R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L. F. C. Tráfego controlado: pneus e compactação. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, v.41, p.22-25, 2005.

USSIRI, D. A. N.; LAL,R.; JARECKI, M. K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, p.247–255, 2009.

VAN WESEMAEL, B. et al. Agricultural management explains historic changes in regional soil carbon stocks. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.107, p.14926–14930, 2010.

VITTI, A. C.; MARIA, I. C.; FONTES, J. L.; BORTOLETTI, J. O.; DRUGOWICH, M. I.; ROSSETTO, R. **Boletim de recomendações gerais para conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar**. 2016. 85p.

YAO, H. Y. et al. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v.41, p.1425-1432, 2009.

YEOH, Y. K. et al. The core root microbiome of sugarcane cultivated under varying nitrogen fertilizer application. **Environmental Microbiology**, v.18, n.5, p.1338–1351, 2016.

ZSCHORNACK, T. et al. Impacto de plantas de cobertura e da drenagem do solo nas emissões de CH₄ e N₂O sob cultivo de arroz irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1163-1171, 2016.