



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

NATACHE GONÇALVES DE MOURA FERRÃO

**AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS NA QUALIDADE E QUANTIDADE DO CARBONO  
EM DIFERENTES FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS DE  
MATA ATLÂNTICA E CANA-DE-AÇÚCAR**

Recife

2021

NATACHE GONÇALVES DE MOURA FERRÃO

**AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS NA QUALIDADE E QUANTIDADE DO CARBONO  
EM DIFERENTES FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS DE  
MATA ATLÂNTICA E CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

**Área de Concentração:** Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente.

**Orientador:** Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes.

**Coorientador:** Prof. Dr. Flávio Adriano Marques.

Recife

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

F373a Ferrão, Natache Gonçalves de Moura.  
Avaliação das mudanças na qualidade e quantidade do carbono em diferentes frações da matéria orgânica do solo em áreas de mata atlântica e cana-de-açúcar / Natache Gonçalves de Moura Ferrão. – 2021.  
86 f.: il., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes.  
Coorientador: Prof. Dr. Flávio Adriano Marques.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Recife, 2021.  
Inclui referências.

1. Energia nuclear. 2. Solos tropicais. 3. Ciclagem de nutrientes. 4. Frações microbianas do solo. 5. Refletância no infravermelho próximo. I. Menezes, Rômulo Simões Cezar (Orientador). II. Marques, Flávio Adriano (Coorientador). III. Título.

UFPE  
621.4837 CDD (22. ed.) BCTG/2022-60

NATACHE GONÇALVES DE MOURA FERRÃO

**AVALIAÇÃO DAS MUDANÇAS NA QUALIDADE E QUANTIDADE DO CARBONO  
EM DIFERENTES FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREAS DE  
MATA ATLÂNTICA E CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciências.  
Área de Concentração: Aplicações de Radioisótopos na Agricultura e Meio Ambiente.

Aprovada em: 31/05/2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Dário Costa Primo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Irapuan Oliveira Pinheiro (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

---

Prof. Dr. Aldo Torres Sales (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Tiago Diniz Althoff (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida, oportunidades e força para vencer os obstáculos e superar os desafios.

Ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energética e Nucleares (PROTEN) da Universidade Federal de Pernambuco, pela estrutura que possibilitou o desenvolvimento do trabalho.

A Coordenação Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro e logístico.

Ao meu orientador e coorientador, Prof. Dr. Rômulo Simões Cesar Menezes e Flávio Adriano Marques pela oportunidade de orientação.

Aos membros do Comitê de Acompanhamento do Doutorado, Prof. Dr. Irapuan Pinheiro, Indra Escobar e Dário Primo pela incrível contribuição, amizade, cobranças, sugestões, correções e, acima de tudo, por acreditar no meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Wilson Tadeu Lopes da Silva (Embrapa Instrumentação) pelo apoio no levantamento dos dados espectrais e pelas sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

À Profa. Dra. Érika Medeiros pelas enormes contribuições, paciência, correções no decorrer e desenvolvimento do trabalho de tese.

À equipe do laboratório de Energia da Biomassa (DEN/ UFPE), pelo auxílio nas análises, grande amizade em todas as horas.

À minha mãe e avós, ao meu irmão Emmanuel Ferrão pela paciência, apoio, amor e tolerância em todas às horas.

Aos meus filhos amados, pelo amor incondicional em grandes momentos da minha vida.

A minha mãe e madrinha, Josedete. Que com seu amor me apoiou infinitamente.

Aos meus, que sempre me protegeram e me guiaram pelo caminho do bem, em especial ao Sr. João da Serra. Meu amor e gratidão a todos.

Aos amigos amados e aos irmãos me dados Arthur Lemos, Ilka Lemos, Ilma Lemos, Célia, Edilza, Josué, Isa Nadine, Alice Sabrina, Uemeson Santos, Edilândia Dantas, Herenice Moreira, Paulo Melo, Aldo Sales, Adalberto Freire pela troca de conhecimentos, apoio incondicional e inúmeras horas de companheirismo que sem dúvida tornaram a caminhada mais agradável.

Aos membros da banca, pelas sugestões e participação.

À minhas tias avós, Maria Emilia e Eunira, pelo amor incondicional e por todo exemplo dado.

**Dedico**

## RESUMO

A mudança de uso da terra influencia diretamente nos atributos biológicos do solo e na dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), sendo fundamental para o funcionamento sustentável dos ecossistemas terrestres. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal estimar, através de técnicas e métodos analíticos avançados, alterações na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil. De forma mais específica, buscou-se: Verificar a quantidade e qualidade do carbono do solo em diferentes frações o carbono microbiológico do solo; Avaliar o comportamento em três anos distintos na atividade biológica e frações do carbono da MOS; Avaliar o poder de predição da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIRS) na quantificação do carbono da biomassa microbiana do solo. O estudo foi conduzido em três áreas distintas no estado de Pernambuco. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, totalizando 60 pontos amostrados. Foram realizadas análises físico-químicas, microbianas e espectroscópicas na região do infravermelho próximo nos solos coletados. De forma geral foi observado que, a conversão, a longo prazo, da vegetação florestal para cultivo de cana-de-açúcar induziu mudanças significativas na dinâmica da matéria orgânica do solo. Tais modificações refletiram perdas expressivas em áreas sob cana-de-açúcar de 27,5 % do COT, 47 % da fração leve livre do solo e 22 % da fração pesada do solo, em referência às áreas sob vegetação nativa. Com relação às variáveis microbiológicas foram observadas perdas no  $C_{mic}$  (64 %), na RBM (43 %), no CSA (44 %), nas atividades enzimáticas da  $\beta$ -glucosidase (24 %) e fosfatase (19 %), nas frações das proteínas ligadas à glomalina facilmente extraível (50 %), dificilmente extraível (75 %) e glomalina total (61 %). Embora o sistema de cana-de-açúcar possa proporcionar perdas substanciais, ano a ano tais mudanças comportam-se em equivalência às áreas sob vegetação nativa. Entretanto, esses comportamentos são visualizados em menores proporções. Com base nos valores do coeficiente de correlação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do deslocamento da correlação (Offset), características espectrais do NIR permitiram uma discriminação relativamente boa entre as amostras de solo. Os modelos preditivos foram eficazes para as variáveis relacionadas ao COT ( $R^2 = 0,78$ ), glomalina dificilmente extraível ( $R^2 = 0,87$ ) e glomalina total ( $R^2 = 0,81$ ).

**Palavras-chave:** solos tropicais; ciclagem de nutrientes; frações microbianas do solo; reflectância no infravermelho próximo.

## ABSTRACT

The change in land use directly influences the biological attributes of the soil and the dynamics of soil organic matter (MOS), being essential for the sustainable functioning of terrestrial ecosystems. Thus, the main objective of this work was to estimate, through advanced analytical techniques and methods, changes in biological activity and carbon fractions of MOS in an Atlantic Forest ecosystem and sugarcane cultivation in the Northeast region of Brazil. More specifically, we sought to: Verify the quantity and quality of soil carbon in different fractions of soil microbiological carbon; Evaluate the behavior in three different years in the biological activity and carbon fractions of the MOS; To evaluate the predictive power of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in the quantification of soil microbial biomass carbon. The study was conducted in three distinct areas in the state of Pernambuco. Soil samples were collected at a depth of 0-20 cm, totaling 60 sampled points. Physicochemical, microbial and spectroscopic analyzes were carried out in the near infrared region in the collected soils. In general, it was observed that the long-term conversion of forest vegetation to sugarcane cultivation induced significant changes in the dynamics of soil organic matter. Such modifications reflected significant losses in areas under sugarcane of 27.5% of the TOC, 47% of the free light soil fraction and 22% of the heavy soil fraction, in reference to areas under native vegetation. Regarding the microbiological variables, losses were observed in Cmic (64%), RBM (43%), CSA (44%), enzymatic activities of  $\beta$ -glucosidase (24%) and phosphatase (19%) in the fractions of proteins bound to easily extractable glomalin (50%), difficult to extract (75%) and total glomalin (61%). Although the sugarcane system can provide substantial losses, year after year such changes behave in equivalence to areas under native vegetation. However, these behaviors are visualized in smaller proportions. Based on the values of the correlation coefficient ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and displacement of the correlation (Offset), spectral characteristics of the NIR allowed a relatively good discrimination between the soil samples. The predictive models were effective for variables related to TOC ( $R^2 = 0.78$ ), hardly extractable glomalin ( $R^2 = 0.87$ ) and total glomalin ( $R^2 = 0.81$ ).

**Keywords:** tropical soils; nutrient cycling; microbial fractions of the soil; reflectance in the near-infrared.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização das áreas estudadas sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob agoecossistemas de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil.....	35
Figura 2 -	Localização geográfica dos pontos de estudo nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar com queima (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	41
Figura 3 -	Valores diários de precipitação pluviométrica ocorrida no mês de junho nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar com queima (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	42
Figura 4 -	Assinaturas espectrais médias de NIRS para todas as amostras de solo analisadas nas áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	53
Figura 5 -	Dendograma da análise hierárquica de agrupamentos (HCA) obtido dos espectros de todas as amostras de solo analisadas nas áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	54
Figura 6 -	Diagrama de projeção dos vetores dos atributos avaliados para as áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo	56

de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....

- Figura 7 - Dinâmica temporal do carbono orgânico do solo e suas frações avaliados nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil..... 58
- Figura 8 - Atributos microbianos de áreas sob Latossolo Amarelo nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil..... 61
- Figura 9 - Diagrama de projeção dos vetores dos atributos avaliados para as áreas sob Latossolo Amarelo nos anos de 2016, 2017 e 2018, sob vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil..... 64
- Figura 10 - Exemplo de espectros de absorvância em infravermelho próximo (NIRS) para 5 replicatas (A à E) e a média (M) de uma amostra coletada em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco..... 67
- Figura 11 - Valores preditos pela espectroscopia de infravermelho versus valores medidos pelos métodos de referência para o carbono orgânico do solo (COS), carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ), atividade enzimática do solo da  $\beta$ -glucosidase e fosfatase ácida, proteínas do solo relacionadas à glomalina facilmente (GFE) e dificilmente extraíveis (GDE) e glomalina total (GT)..... 71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização química e física do solo nas áreas avaliadas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	38
Tabela 2 -	Caracterização química e física do solo nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	43
Tabela 3 -	Atributos químicos e físicos de áreas sob Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e um Argissolo Franco Argilo Arenoso sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco.....	47
Tabela 4 -	Valores médios para as variáveis estudadas em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	50
Tabela 5 -	Estoques nas áreas sob Latossolo Amarelo avaliadas nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	66
Tabela 6 -	Matriz de correlação entre as variáveis avaliadas (n= 60) no estudo de modelos preditivos utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo em áreas sob ecossistema de Mata Atlântica e sistema de cultivo de cana-de-açúcar na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.....	69
Tabela 7 -	Valores médios dos métodos de referência utilizados no estudo de previsão utilizando espectroscopia de infravermelho próximo em áreas sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco.....	69

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Mata Atlântica .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Cana-de-açúcar.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Matéria orgânica do solo .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Atributos biológicos do solo.....</b>	<b>21</b>
2.5.1	Biomassa microbiana do solo.....	21
2.5.2	Respiração basal do solo .....	25
2.5.3	Atividade enzimática do solo .....	27
2.5.4	Proteínas do solo relacionadas à glomalina.....	30
2.5.5	Influência do manejo na dinâmica da MO e atividade biológica do solo .....	31
<b>2.6</b>	<b>Espectroscopia de infravermelho utilizada em estudo da matéria orgânica do solo .....</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>34</b>
3.1.1	Área de estudo .....	34
3.1.2	Amostragem do solo.....	36
3.1.3	Atributos físicos e químicos do solo .....	37
3.1.4	Espectroscopia de infravermelho .....	40
3.1.5	Análises estatísticas.....	40
<b>3.2</b>	<b>Estudo 2: Avaliação do comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>40</b>
3.2.1	Área de estudo .....	41
3.2.2	Amostragem do solo.....	42
3.2.3	Atributos físicos e químicos do solo .....	43
3.2.4	Análises estatísticas.....	45
<b>3.3</b>	<b>Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS).....</b>	<b>45</b>
3.3.1	Área de estudo .....	45

3.3.2	Amostragem do solo.....	46
3.3.3	Atributos físicos e químicos do solo .....	46
3.3.4	Métodos de referência para o estudo de previsão.....	47
3.3.5	Espectroscopia de infravermelho .....	48
3.3.6	Análises estatísticas .....	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo 2: Avaliação do comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3</b>	<b>Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS).....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>733</b>
<b>5.1</b>	<b>Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Estudo 2: Avaliação o comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar .....</b>	<b>73</b>
<b>5.3</b>	<b>Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS).....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>755</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Como componente chave, a matéria orgânica do solo (MOS) é descrita como uma mistura heterogênea de substâncias orgânicas com diferentes composições químicas e taxas de rotatividade, mediadas por fatores bióticos e abióticos (clima, temperatura, pH, umidade, tipo de vegetação, características do solo) (BLANCO-MOURE et al., 2016; LEHMANN; KLEBER, 2015). Além disso, a MOS fornece serviços ecossistêmicos que estão atrelados intrinsecamente à produção de alimentos, à regulação das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa, à prevenção de erosão do solo, à regulação da qualidade e quantidade da disponibilidade de água e à manutenção da biodiversidade animal, vegetal e microbiana (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006; PAUL, 2016).

Contudo, o equilíbrio ecológico e o fornecimento de serviços ecossistêmicos no solo são facilmente afetados pela conversão de áreas de vegetação nativa em campos de cultivo agrícola. Com a conversão há redução do reservatório de matéria orgânica do solo, com perdas substanciais que podem chegar à ordem de 50 % do seu estoque original (ANAYA; HUBER-SANNWALD, 2015). Tais perdas refletirão em reduções significativas da proteção física da MOS, expondo-a a fatores de degradação, levando à perda de C.

O Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, com extensas áreas cultivadas ao longo dos planaltos costeiros (CAVALCANTI et al., 2019, 2020; SIGNOR et al., 2014), sendo responsável por um quarto da produção global (CONAB, 2020). No sistema tradicional de produção de cana-de-açúcar, a queima de resíduos ainda tem sido uma prática comum para facilitar as operações manuais de colheita e transporte (BAYER et al., 2011). No entanto, tal manejo causa alterações significativas no ciclo biogeoquímico dos ecossistemas, nos agregados e na atividade biológica do solo (ANAYA; HUBER-SANNWALD, 2015; SOUZA et al., 2012).

Os atributos microbiológicos são frações de extrema sensibilidade às alterações provocadas pelos sistemas de manejo, em comparação as mudanças verificadas nas propriedades físicas e químicas. Desta forma, pode-se afirmar que a biodisponibilidade de MOS e, consequentemente de C sob o solo, são as principais fontes à biomassa microbiana e aumento da sua atividade (FINN et al., 2017; JUNIOR; PORTILHO; MERCANTE, 2015).

A biomassa, a biodiversidade e a atividade microbiana estão envolvidas diretamente na regulação dos serviços ecossistêmicos do solo, como, produtividade de plantas, ciclagem de nutrientes e emissões de gases causadores do efeito estufa. Nos últimos anos diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de demonstrar o decréscimo da atividade biológica

decorrente da conversão de áreas nativas em usos agrícolas (BLANCO-MOURE et al., 2016; FIGUEIREDO; RESCK; CARNEIRO, 2010; MACHADO et al., 2014; MARZAIOLI et al., 2010; MAZZETTO et al., 2016a).

No entanto, os métodos tradicionalmente utilizados nos estudos microbiológicos são baseados na utilização de substâncias químicas tóxicas e contaminantes, através de processos que demandam muito tempo e com alta variabilidade nos resultados. Portanto, trabalhos que visem utilizar métodos de quantificação de forma limpa, rápida e de baixo custo são fundamentais no entendimento da dinâmica da MOS nos ecossistemas, principalmente quanto aos fatores que afetam a qualidade, a fertilidade e a capacidade do solo de reter carbono após as perturbações antrópicas.

Por esta razão, a espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIR) é considerada uma alternativa para complementar (ou mesmo substituir) os métodos analíticos convencionais. Em particular para solos, esta técnica permite a avaliação de diferentes propriedades relacionadas à umidade e à matéria orgânica, incluindo o conteúdo de carbono e nitrogênio ou a capacidade de troca catiônica (MADARI et al., 2005; SANTOS; PEREIRA; KORNDÖRFER, 2010; SPENCE; ROBINSON, 2013; ZORNOZA et al., 2008). No entanto, poucos trabalhos atrelam NIR com a atividade biológica do solo. Modelos preditivos de NIR foram propostos para o carbono da biomassa microbiana e atividades enzimáticas no solo (CÉCILLON et al., 2008, 2009; DICK; SANTOS; FERRANTI, 2003; LUCE et al., 2014; LUDWIG et al., 2002; SORIANO-DISLA et al., 2014; ZORNOZA et al., 2008).

Sendo assim, avaliações que relacionem a qualidade e quantidade do carbono e das diferentes frações da MOS em distintos sistemas ecológicos contribuem substancialmente no fornecimento de informações quanto a dinâmica da MOS. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal estimar, através de técnicas e métodos analíticos avançados, alterações na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar na região Nordeste do Brasil. De forma mais específica, buscou-se: (1) Quantificar e qualificar o carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar; (2) Avaliar o comportamento em três anos distintos na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar; (3) Avaliar o poder de predição da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIRS) na quantificação do carbono da biomassa microbiana do solo sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico será abordada de maneira objetiva uma revisão bibliográfica sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas sob vegetação nativa de Mata Atlântica e áreas sob cultivo de cana de açúcar. Desta forma, buscou-se de forma sucinta contribuir para a integração dos trabalhos mais importantes relacionados ao tema, introduzindo conceitos que ajudarão a compreender a metodologia e os resultados obtidos.

### 2.1 Mata Atlântica

A Mata Atlântica é uma formação vegetacional de floresta Neotropical localizada ao longo da costa leste da América do Sul do leste do Paraguai e nordeste da Argentina ao nordeste do Brasil, e está entre as regiões com maior riqueza de espécies na Terra (BOCALINI et al., 2021). As condições climáticas são caracterizadas principalmente pela ausência de uma estação seca na região sul e um regime de precipitação mais sazonal na porção norte (LEME PABLOS et al., 2021). Dois tipos principais de vegetação constituem a Mata Atlântica: a floresta costeira (associada a um clima quente e úmido sem estação seca) e a floresta tropical sazonal ou Mata Atlântica semidecidual (associado a um clima sazonal com uma estação seca moderadamente severa, geralmente de abril a setembro) (GUEDES et al., 2020; MACEDO et al., 2021).

Atualmente a Mata Atlântica é considerada como um dos grandes focos de perda da biodiversidade no mundo, chamada de “*hotspot*”. Sua cobertura florestal natural atual representa 12 % da floresta remanescente, e encontra-se totalmente fragmentada, onde a maioria dos fragmentos possui menos de 50 ha (NAKAZATO et al., 2021; OLIVEIRA SANTOS et al., 2021). Como muitos ecossistemas globais, a Mata Atlântica vem experimentado perdas substanciais da área total, em grande parte devido à queimadas por incêndios florestais e mudanças no uso da terra (GUEDES et al., 2020).

Os ecossistemas florestais influenciam diretamente na manutenção do ciclo global do carbono, pelo acúmulo de biomassa, e o ciclo da água principalmente em ambientes continentais, com a formação de rios voadores pelo processo de evapotranspiração. Portanto, as relações ecológicas, bem como a ciclagem do carbono e da água, dependerão de como os ecossistemas respondem às mudanças climáticas (MACEDO et al., 2021).

Diniz et al., 2021 em trabalho ecológico sobre o efeito da fragmentação em áreas de Mata Atlântica relataram que, as mudanças no uso da terra afetam não apenas a quantidade de vegetação nativa, mas também a configuração espacial e a qualidade da floresta remanescente

por meio da fragmentação do habitat. Os autores também ressaltaram que, a quebra da continuidade do habitat pode resultar em fragmentos de habitat menores, mais isolados e mais expostos aos efeitos da interferência humana. Tais influências são responsáveis por uma diminuição na riqueza de espécies de 13% a 75%, degradação de ecossistemas, redução na retenção de nutrientes e na dinâmica trófica.

## 2.2 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é considerada uma das culturas mais importantes por seu valor energético, com uma área de cultivo global de mais de 20 milhões de hectares em mais de 70 países (SOUZA et al., 2012; VANOLLI et al., 2021). O Brasil é responsável por cerca de um quarto da produção global. O volume da produção nacional de cana-de-açúcar em 2020/21 totalizou 654,8 milhões de toneladas, 1,8% superior ao da safra 2019/20. Na Região Nordeste, especificamente, se confirmou safra com aumento na área em produção. Tais acréscimos representaram aumento na área colhida, fazendo com que a estimativa regional chegue a 849,7 mil hectares, 0,6% superior a 2019/20 (CONAB, 2021).

Atualmente, a lavoura da cana-de-açúcar passa por um período de intensa mudança nas práticas de manejo com a introdução da colheita mecanizada, sem a queima da pré-colheita. No entanto, a queima da palha da cana-de-açúcar, ainda realizada com frequência na maioria das regiões produtoras, tem impactos profundos, pois destrói a matéria orgânica do solo, deixando-o exposto à erosão, impactando microrganismos e causando poluição significativa (BIGOTT; HOY; FULTZ, 2019; BORDONAL et al., 2017; CAVALCANTI et al., 2019, 2020; SOUZA et al., 2012).

Moitinho et al., 2021 em estudos sobre efeito dos sistemas de cultivo de cana-de-açúcar manejados com queima relataram que, a queima dos canaviais antes da colheita manual tem sido historicamente uma prática de manejo comum no Brasil e no mundo, com o objetivo de reduzir a quantidade de palha e, conseqüentemente, facilitar as operações de corte e carregamento mecânico. No entanto, esta prática causa altas emissões de GEE (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>) e partículas nocivas na atmosfera.

Entretanto, a queima dos canaviais antes da colheita foi proibida até 2021 (lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, e conforme decreto nº 47.700 de 11 de março de 2003). Por questões ambientais, econômicas e agronômicas, a colheita manual da cana-de-açúcar tem sido gradativamente substituída pela colheita mecanizada, sem a necessidade de palha para queima,

assim, em média 15 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduos de palha serão deixados no campo (AGUIAR et al., 2021).

### 2.3 Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é um sistema complexo de substâncias em diversos estádios de decomposição, cuja dinâmica é mediada pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas e pela transformação contínua sob ação de fatores biológicos, químicos e físicos (FELLER; BEARE, 1997; MONI et al., 2012; SOLLINS; HOMANN; CALDWELL, 1996). A MOS representa 80 % do reservatório de carbono (C) terrestre, estimado em 1550 Pg (LEIFELD; KNABNER, 2005) sendo considerada uma importante fonte e dreno de C e nutrientes (FOLLETT, 2001).

A constituição da MOS é bastante complexa e heterogênea, sendo formada por frações em constantes transformações, com tempos de residência que variam de semanas (biomassa microbiana) até milhares de anos como, por exemplo, a fração humina (VON LÜTZOW et al., 2007). Dependendo do estudo, a MOS pode ser dividida em relação ao seu tempo de permanência no solo em três frações: ativa (biomassa microbiana e seus produtos), lenta derivado de material vegetal resistente (lignina) e da MO química e fisicamente protegida ou passiva (material muito resistente à decomposição, quimicamente recalcitrante e protegido fisicamente) (LEITE; MENDONÇA, 2003) ou em duas frações: lábeis e recalcitrantes (GREENFIELD et al., 2013; PLANTE et al., 2011; ROVIRA; VALLEJO, 2002).

Levando em consideração que a MOS é um *continuum* de fragmentos orgânicos em constantes processos de mineralização pelos microrganismos, o estudo de Lehmann & Kleber (2015) relataram que a degradação da MOS é constante e sempre em direção ao menor tamanho molecular dos compostos orgânicos e simultaneamente ao aumento de grupos polares e ionizáveis, e à solubilidade em água. Em contrapartida, os processos naturais de estabilização e proteção dos compostos orgânicos também aumentam, devido à maior reatividade das moléculas com superfícies minerais e a incorporação em agregados do solo.

Neste sentido, em processos de agregação da MOS há três mecanismos principais de estabilização (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000): a estabilização bioquímica, a estabilização por associação com partículas minerais e a proteção física. A estabilização bioquímica se dá pela complexa composição química dos compostos orgânicos (alto teor de compostos fenólicos, lignina) ou pelos processos de condensação e polimerização que ocorrem durante a decomposição dos resíduos vegetais (humificação), tornando-os mais resistentes à

decomposição (KUNDE et al., 2016; PILLON et al., 2011). A estabilização por associação com partículas minerais ocorre quando há ligação química ou físico-química entre os compostos orgânicos e os minerais do solo (FENG et al., 2014). A agregação física se dá pela formação de barreiras pelos agregados do solo, tornando inacessível a mineralização da MO pelos microrganismos e enzimas (C. CHENU, 2000)

Desta forma, por estar intimamente ligada às propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, a qualidade e quantidade da MO é mediada diretamente por mudanças ambientais, tipo de vegetação, clima e relevo, que refletem na ciclagem de nutrientes e estoques de C no solo (FENG et al., 2014; PAUL, 2016; VON LÜTZOW et al., 2007).

Vancampenhout et al., 2009, ao avaliarem a composição química da MOS em diferentes ecossistemas naturais, relataram diferenças na composição da MOS em amostras de solos coletados sob tundra, floresta temperada e floresta tropical, considerando que a composição da MO é controlada pela natureza do material vegetal e fatores abióticos (clima, temperatura, umidade, característica dos solos). Os resultados indicaram que a MOS de climas frios (tundra) assemelha-se à composição da serrapilheira, evidenciada pela elevada quantidade de compostos relacionados ao material vegetal de origem e baixa atividade microbiana. Em condições temperadas, há aumento da degradação microbiana resultando em uma MOS mais alterada, porém, rica em compostos aromáticos. Em clima tropical, a MO é caracterizada por uma composição rica em compostos nitrogenados e baixos em ligninas, com pouco acúmulo de frações recalcitrantes (compostos alifáticos e aromáticos).

Portanto, as elevadas taxas de decomposição em regiões tropicais são contrabalanceadas por maiores taxas de produção dos resíduos vegetais que são depositados sobre o solo. Em condições naturais, os estoques de MO dos solos tropicais e subtropicais não diferem dos verificados em solos de regiões temperadas (CONCEIÇÃO et al., 2008; MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006). Desta forma, com o intuito de entender a dinâmica da MOS, várias técnicas foram aperfeiçoadas com o objetivo de separar suas diferentes frações, identificando sua localização na estrutura do solo e tempo de permanência.

O fracionamento físico atualmente é um dos métodos mais utilizados, por ser considerado menos destrutivo e mais relacionado à função e estrutura da MOS em relação aos métodos químicos. As extrações químicas são altamente seletivas e ligadas à solubilidade dos compostos orgânicos, o que leva a extração de compostos semelhantes de compartimentos ou reservatórios da MOS completamente diferentes (MONI et al., 2012; PLAZA et al., 2012; ROSCOE; MACHADO, 2002; SANTOS et al., 2013; SOUZA et al., 2006).

## 2.4 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento da MOS é baseado em técnicas de separação por métodos químicos ou físicos. Os métodos químicos geralmente utilizam ácidos e/ou bases fortes para fracionar a MOS, identificando as frações lábeis e recalcitrantes através do potencial de hidrólise do componente químico ao composto orgânico (COLLINS et al., 2000; ROVIRA; VALLEJO, 2000, 2002; SILVEIRA et al., 2008). Os métodos físicos por sua vez, têm como objetivo a separação dos compostos orgânicos em diferentes graus de associação com a matriz do solo (ROSCOE *et al.*, 2006) e geralmente são granulométricos ou densimétricos.

O método granulométrico consiste na separação da MOS associada a partículas minerais de diferentes tamanhos separadas por dispersão e peneiramento, dividindo-se em duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COp) e o carbono orgânico associado aos minerais (COM) (ONTL et al., 2015; VIEIRA et al., 2007). O método densimétrico por sua vez, baseia-se na separação dos compartimentos das frações orgânica e mineral do solo, mediante uso de soluções com densidades distintas (CONCEIÇÃO et al., 2007).

### *Fracionamento físico (densimétrico)*

O fracionamento densimétrico é um método que se baseia na separação de compartimentos das frações orgânicas e minerais do solo, mediante uso de soluções com densidades variando de 1,1 a 2,4 kg.dm<sup>-3</sup> (CONCEIÇÃO et al., 2007; DEMOLINARI et al., 2008; LIMA et al., 2008). O método tradicional admite a obtenção de três frações da MO, as quais se diferenciam em relação à dinâmica e estabilidade, à localização na estrutura do solo e ao grau de interação com a matriz mineral (PINHEIRO et al., 2004; RANGEL; SILVA; GUIMARÃES, 2007).

A fração leve livre (FLL) ou interagregados possui composição molecular comparável a de materiais vegetais e o principal mecanismo de proteção atuante é a recalcitrância intrínseca da biomolécula. A fração leve oclusa (FLO) ou intragregados compreende um diversificado conjunto de compostos orgânicos com grau de decomposição geralmente mais avançado em comparação à FLL, e os mecanismos de estabilização atuantes são a recalcitrância bioquímica e a proteção física por oclusão em agregados de solo. A fração pesada (FP) é composta basicamente pela MO associada aos minerais do solo, apresentando estágio mais avançado de decomposição. Nessa fração, há uma forte interação da MO com a matriz mineral, conferindo a esse compartimento maior contribuição para o armazenamento de C no solo (CONCEIÇÃO et al., 2014, 2015; SANTOS et al., 2013).

As soluções usualmente utilizadas em estudos de fracionamento densimétrico da MO são predominantemente inorgânicas, com destaque para as soluções de iodeto de sódio (NaI) e de politungstato de sódio (PTS), basicamente em razão da sua menor toxidez em comparação às soluções orgânicas inicialmente empregadas (tetrabrometano ( $C_2H_2Br_4$ ), bromofórmio ( $CHBr_3$ ) e tetraclorometano ( $CCl_4$ )) (LOPEZ-SANGIL; ROVIRA, 2013; VON LÜTZOW et al., 2007).

Conceição et al. (2015), ao avaliarem a eficiência na utilização de substâncias densas no fracionamento densimétrico da MOS, observaram que o uso de PTS ( $2,0 \text{ kg dm}^{-3}$ ) aumentou o rendimento do carbono orgânico (CO) das frações leve livres e frações leve oclusas em relação à solução de NaI ( $1,8 \text{ kg dm}^{-3}$ ). Os autores relataram que o uso da solução de NaI ( $1,8 \text{ kg dm}^{-3}$ ) subestima o rendimento de C das frações leve livres da MO, sendo esse efeito mais pronunciado na FLO que na FLL, possivelmente em razão da interação do íon iodeto com a MO presente na FLO.

Souza et al. (2006) utilizaram o fracionamento densimétrico da MOS com o objetivo de avaliar diferentes manejos e usos do solo. Os autores observaram que houve diferenças significativas em relação à FLL, que representou em média 7 e 3,5 % do COT em área nativa e agrícola, respectivamente, enquanto os valores da FP permaneceram praticamente constantes. Estes resultados demonstraram que as quantificações da FLL melhor representam as perdas de MOS, pois, estão intimamente ligadas à incorporação e suprimento de resíduos orgânicos ao solo, possuindo maior variabilidade espacial e sazonal que as demais frações, sendo muito sensível ao manejo.

Moure et al. (2016), ao avaliarem mudanças nas frações da MOS em diferentes usos em áreas do Semiárido Mediterrâneo observaram diminuição da FLL a medida que as perturbações do solo aumentaram. Freixo; Canellas; Machado, 2002, ao estudarem a natureza química das FLL e FLO da MOS por meio da espectroscopia, na região do infravermelho próximo e médio, observaram que a FLL apresentou bandas relacionadas a ligações aromáticas pouco pronunciadas, caracterizando menor condensação das moléculas, constituindo uma fração lábil rica em polissacarídeos e compostos nitrogenados. Os autores também observaram que as FLL e FLO constituem compartimentos distintos da MOS, sendo a FLO uma fração com maior transformação estrutural, em resultado à mineralização pelos microrganismos. Outra observação foi que o tipo de manejo não alterou a natureza química das frações e sim a quantidade, sendo refletido mais rapidamente na FLL.

## 2.5 Atributos biológicos do solo

Ao ser incorporado ao solo, o material vegetal é rapidamente exposto à ação dos microrganismos que constituem a fração viva da MO e são responsáveis por diversos processos biológicos e bioquímicos no solo. Os processos de mineralização da MO possuem relação direta com as propriedades do solo (textura, pH, temperatura, umidade) e tem como principais efeitos a degradação pela biomassa microbiana e a disponibilidade de nutrientes às plantas, através da ação de enzimas (BALDRIAN, 2013; MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006; PAUL, 2016; RUI et al., 2016; VON LÜTZOW et al., 2007).

### 2.5.1 Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana representa a menor porção viva do solo, porém, é considerada a parte mais ativa da MOS, composta por fungos, bactérias, protozoários e algas (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006; ROSCOE; MACHADO, 2002). A fração microbiana do solo compõe apenas 1 - 5 % do CO, no entanto, é a principal fonte de enzimas, sendo responsável pela quase totalidade da atividade biológica do solo, catalisando transformações bioquímicas (ARAÚJO et al., 2013), atuando em processos de formação do solo (intemperização de rochas) (ZAIA *et al.*, 2008), servindo como fonte e dreno de C, regulando a troca de nutrientes entre a atmosfera e o ecossistema solo-planta (ALVES et al., 2011; BUSO; KLIEMANN, 2003), atuando na biorremediação de poluentes e metais pesados (BOECHAT et al., 2012; LONGO; RIBEIRO; DE MELO, 2011) e representando uma reserva considerável de nutrientes (GUDE; KANDELER; GLEIXNER, 2012; VON LÜTZOW et al., 2007).

As transformações que o C passa no solo compreendem-se pela velocidade de degradação da MO, independente da forma em que se encontra, pela microbiota do solo, que é condicionada por fatores bióticos e abióticos, dentre eles: origem e natureza da MO (WANG; WANG, 2011), umidade e temperatura (WALLENSTEIN et al., 2012; ZHOU et al., 2013), textura do solo, clima, relevo e manejo do solo, sendo considerada como uma fração fortemente sensível as mudanças em curto prazo de tempo (PILLON et al., 2011).

Dentre todos os fatores que contribuem para o aumento ou diminuição da biomassa microbiana do solo, as diferentes condições climáticas promovem variações no seu conteúdo e dinâmica. Em média, os trópicos são 15 °C mais quentes que as regiões temperadas, além de não possuírem invernos rigorosos com temperaturas muito baixas. As temperaturas mais elevadas resultam num aumento das taxas dos processos bioquímicos (MOREIRA, FÁTIMA

MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006). Desta forma, nos trópicos úmidos, as temperaturas elevadas e as precipitações superiores a 2.000 mm.ano<sup>-1</sup> resultam em taxas de decomposição mais altas que em regiões temperadas (RUI et al., 2016; WANG; WANG, 2011).

Karhu et al., 2014, estudaram a variação da comunidade microbiana em solos de diferentes ecossistemas ao longo de um gradiente climático, do Ártico à Amazônia, relataram que a respiração microbiana do solo libera cerca de 60 Pg de C por ano para a atmosfera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Os autores observaram em experimentos de curto prazo que a respiração microbiana do solo aumenta exponencialmente com a temperatura. Desta forma, esta informação incorporada a modelos de simulação da dinâmica do carbono do solo sugere que os aumentos induzidos por aquecimento na liberação de CO<sub>2</sub> dos solos representam um importante influência na mudança climática.

Outro fator que influencia significativamente na diversidade microbiana do solo é a fitomassa. Liu et al., 2012; Mazzetto et al., 2016a relataram que a quantidade, a qualidade e a diversidade florística podem ser fatores importantes na determinação da diversidade microbiana. A MOS provem, em quase sua totalidade, de resíduos vegetais cuja composição média varia entre as diferentes espécies vegetais e, dentro da mesma espécie, devido à idade e à nutrição da planta (PILLON et al., 2011; SANTOS et al., 2012).

Canellas & Santos (2005) e Silva et al., 2013 descreveram que o tecido vegetal é composto principalmente por lignina, celulose e hemicelulose, que constituem até 85 % da biomassa seca de espécies arbóreas. Torres et al., 2014 em estudo sobre a degradação da lignina e da celulose e sua relação com a biomassa microbiana, utilizaram celulose e lignina marcadas (<sup>13</sup>C) em dois tipos de solos com diferentes propriedades. Em longo prazo, os autores observaram que a estabilidade da MO foi altamente dependente da natureza química do substrato e da quantidade de biomassa depositada no solo, sendo a lignina mais estável que a celulose em ambos os tipos de solos e possuindo teores elevados em frações mais estáveis da MO (humina).

Silva et al. (2013), ao compararem a composição lignocelulósica da MOS sob duas fitofisionomias diferentes, observaram que os teores de lignina variaram significativamente, sendo os maiores teores encontrados em áreas com vegetação predominantemente arbórea. Portanto, o conteúdo de MOS depende do balanço entre a incorporação de resíduos vegetais e sua taxa de decomposição. Desta forma, pode-se afirmar que, diferentes usos agrícolas resultam em diferentes comunidades microbianas e diferentes taxas metabólicas no solo.

Em trabalho de revisão sobre a disponibilidade da lignina no solo, Thevenot; Dignac; Rumpel, 2010 relataram que a degradação da lignina está diretamente relacionada à natureza

da vegetação, ao clima, ao uso da terra e as características intrínsecas do solo. Por exemplo, maiores teores de lignina foram encontrados em solos florestais em comparação com pastagens e solos aráveis, podendo estar relacionado a uma menor diversidade microbiana e um maior grau de exposição e degradação da MO com a mudança do uso da terra. Desta forma, é válido salientar que os níveis de degradação da MO pela microbiota do solo estão diretamente relacionados com as características fitofisionômicas e a diversidade da comunidade microbiana do ambiente.

Gude; Kandeler; Gleixner, 2012, em estudo sobre a dinâmica do carbono microbiano do solo relacionado à entrada de MO, observaram que em sistemas com maiores entradas de MO há maior atividade microbiana no solo, em particular, maior atividade fúngica, maiores taxas de atividade enzimática e um menor tempo de residência da MO no solo. Em contrapartida, sistemas com baixa entrada de MO alteraram a distribuição e a estrutura da comunidade microbiana e a atividade enzimática, levando os microrganismos a explorarem fontes alternativas de carbono.

Desta forma, a diminuição da incorporação da MO no solo causada pela mudança do uso da terra, por exemplo, altera todos os processos de mineralização da MO pelos microrganismos, promovendo menores taxas de sequestro de carbono (DE SOUZA et al., 2010; LOPES et al., 2011; SANTOS et al., 2012). Em uma revisão sobre a influência da agregação do solo sobre a biomassa microbiana e os processos biológicos, Gupta; Germida, 2015 relataram que, em sistemas com 69 anos de cultivo houve uma diminuição significativa da biomassa e respiração microbiana e atividades enzimáticas. Além disso, o cultivo destruiu agregados que resultaram na diminuição da proporção de macroagregados em relação à microagregados.

As raízes e hifas micorrízicas reúnem e estabilizam os microagregados e partículas de solo, através da formação de emaranhados e liberação de glicoproteínas com função ligante, formando macroagregados, que podem conter materiais lábeis ou recalcitrantes, que são inacessíveis à degradação microbiana (FIERER, 2017; NOBRE et al., 2015). Com o cultivo há a quebra dos filamentos micorrízicos e pelos radiculares, destruindo macroagregados e, por conseguinte aumentando a aeração, estimulando assim a rápida decomposição dos materiais de reserva do solo (TISDALL; OADES, 1982; BURNS; DAVIES, 1986; ELLIOTT, 1986; GUPTA; GERMIDA, 2015).

Logomarsino et al. (2012), em estudo sobre atividade microbiana em agregados e partículas minerais do solo, relataram que o grau de decomposição aumenta com a diminuição do agregado, revelando tempos de rotatividade de cerca de 15 - 50 anos para a MO armazenada

em macroagregados ( $> 250 \mu\text{m}$ ) e 100 - 300 anos para a MO armazenadas em microagregados ( $<250 \mu\text{m}$ ). Também observaram que a atividade microbiana e enzimática teve maiores taxas nas frações de silte e argila e foram diretamente influenciadas pelo maior teor de carbono orgânico nestas frações. Em contrapartida, na fração areia foi observado menor atividade microbiana, enzimática e menores teores de carbono orgânico.

Neste sentido, os valores do carbono da biomassa microbiana ( $C_{\text{mic}}$ ) indicam o potencial de reserva de C no solo que participa do processo de humificação da MO, permitindo assim aferir o acúmulo ou perda de C de um determinado manejo (ALVES et al., 2011; GAMBOA; GALICIA, 2011; RANGEL; SILVA; GUIMARÃES, 2007; SOUZA et al., 2006).

### ***Estimativa da biomassa microbiana no solo***

Para avaliar a interferência da atividade microbiana na dinâmica da MOS, diversos métodos tradicionais ainda são utilizados na quantificação do C microbiano do solo e expressos em geral, em  $\mu\text{g}$  de  $C_{\text{mic}} \text{g}^{-1}$  de solo seco ou  $\text{mg}$  de  $C_{\text{mic}} \text{kg}^{-1}$  de solo seco. Dentre os métodos mais utilizados estão: o método de clorofórmio-fumigação-incubação (CFI), descrito por Jenkinson & Powlson (1976); o método de clorofórmio-fumigação-extração (CFE), descrito por Vance *et al.* (1987) e o método de irradiação-extração (IE), descrito por Vance *et al.* (1987) (JORGE-MARDOMINGO et al., 2013; LI et al., 2004; QUANYING et al., 2014; ZHOU et al., 2013). Atualmente, técnicas isotópicas e espectroscópicas também permitem medir e quantificar a distribuição e as alterações nas comunidades de microrganismos, determinando o seu papel nos processos funcionais do solo em relação a MO (CÉCILLON et al., 2008; CROW et al., 2006; ZORNOZA et al., 2008).

No método CFI, a determinação do C microbiano baseia-se na medição de um pico de produção de  $\text{CO}_2$  liberado pelas amostras de solo fumigadas (com clorofórmio) e não-fumigadas após um período de incubação, em média de 10 dias. O pico de  $\text{CO}_2$  liberado nas amostras fumigadas é resultante da decomposição do material liberado pelos microrganismos mortos, enquanto que nas amostras não-fumigadas o fluxo de  $\text{CO}_2$  se dá pela respiração basal do solo (JENKINSON; POWLSON, 1976).

No método CFE, a fumigação do solo com clorofórmio promove a lise celular dos microrganismos com consequente liberação do citoplasma para o meio. Assim, o C, N e P podem ser extraídos por  $\text{K}_2\text{SO}_4$  e quantificados por uma solução de dicromato e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , estimando o C, o nitrogênio (N) e o fósforo (P) da biomassa microbiana do solo (VANCE *et al.*, 1987).

O método IE consiste na exposição da amostra de solo a irradiação com ondas eletromagnéticas (microondas) durante alguns minutos. Após a irradiação, as amostras irradiadas e não irradiadas são analisadas conforme os métodos de CFE. A morte de microrganismos com o uso do forno microondas é resultado da quantidade de irradiação eletromagnética administrada, havendo transferência de energia e temperatura, rompendo a parede celular e, assim, liberando o material citoplasmático para a solução do solo. (VANCE *et al.*, 1987).

A utilização de técnicas convencionais de quantificação do C microbiano do solo são essenciais para o entendimento da dinâmica da MOS. Porém, diversos autores salientam que os métodos tradicionais apresentam vantagens e desvantagens. A vantagem está na independência do estado fisiológico da população microbiana do solo a ser quantificada. Entre as desvantagens, destaca-se o fato que, os procedimentos analíticos para determinação do  $C_{mic}$  são complexos e trabalhosos, envolvendo a utilização de produtos tóxicos, como o dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) (FERREIRA; CAMARGO; VIDOR, 1999; MORAES *et al.*, 2009; ROSCOE; MACHADO, 2002).

A espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) é sugerida como uma alternativa viável aos métodos convencionais de avaliação, monitoramento e quantificação da biomassa microbiana do solo (CÉCILLON *et al.*, 2009). O NIR é um método analítico indireto baseado no desenvolvimento de modelos empíricos a partir dos quais a concentração de um constituinte do solo é prevista a partir de dados espectrais complexos (COÛTEAUX; BERG; ROVIRA, 2003; LUCE *et al.*, 2014). Os resultados obtidos pelo NIR são contrabalanceados com modelos estatísticos multivariados, onde são extraídos matematicamente padrões de absorção dos constituintes do solo e correlacionados com os parâmetros obtidos pelos métodos tradicionais (STENBERG *et al.*, 2010). O NIR é vantajoso por ser rápido, preciso, não destrutivo, ter baixo custo, requer uma preparação mínima da amostra e não requer o uso de produtos químicos (CHANG *et al.*, 2001).

### 2.5.2 Respiração basal do solo

A respiração basal do solo (RBS) é conceituada como a capacidade metabólica dos microrganismos em degradar compostos orgânicos em condições aeróbicas (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006). A medição da RMS é estimada com base na liberação do  $CO_2$  ou na captação de  $O_2$  e tem sido aplicada em pesquisas relacionadas à taxa

de mineralização da matéria orgânica do solo (CREAMER et al., 2014; CROW et al., 2006; KARHU et al., 2014; PAVAN FERNANDES; BETTIOL; CERRI, 2005; ZHOU et al., 2013).

Considerando a mesma constituição da comunidade microbiana, a taxa de respiração mais elevada pode ser desejável ou não, podendo indicar tanto um distúrbio, como um alto nível de produtividade do ecossistema, devendo ser analisada em cada contexto (ALVES et al., 2011; TÓTOLA; CHAER, 2002). Anderson & Domsch (1993) relataram que o quociente metabólico ( $qCO_2$ ), definido pela razão entre a RBS pelo  $C_{mic}$ , pode ser utilizado como atributo que reflete ambientes com menores ou maiores graus de distúrbio ou estresse. Portanto, valores mais elevados de  $qCO_2$ , normalmente, estão associados a ecossistemas jovens ou submetidos a alguma condição de estresse, enquanto menores valores, normalmente, são associados a ecossistemas maduros e estáveis.

Martins *et al.* (2010), ao avaliarem os fatores relacionados aos atributos biológicos do solo em áreas em processo de desertificação, relataram diferenças significativas nas taxas de respiração de ambientes conservados e degradados. As taxas de respiração tiveram diferenças médias de aproximadamente 50 % entre os ambientes, sendo as áreas degradadas com menores taxas. Esses resultados podem ser atribuídos à maior disponibilidade de nutrientes e água em ambientes conservados, onde as altas taxas são balanceadas por altas incorporações da biomassa vegetal ao solo.

Em estudo sobre a dinâmica dos atributos biológicos do solo na cultura da cana-de-açúcar sob manejo convencional, Evangelista et al., 2013 observaram na camada superficial do solo (0-20 cm) aumento nos valores para RBS e  $qCO_2$  em áreas sob cana com queima em relação à área com vegetação nativa. Estes resultados podem indicar que a prática de manejo com fogo interfere diretamente na respiração microbiana do solo, diminuindo a oferta de compostos mineralizáveis pelos microrganismos, promovendo competição e indicando estresse.

Em relação à precipitação e temperatura, Zhou et al., 2013 em trabalho sobre as variações da atividade microbiana do solo em região semiárida, observaram que o aumento da precipitação e da temperatura proporcionam, respectivamente, aumento significativo do carbono da biomassa microbiana e  $qCO_2$  e diminuição da atividade metabólica (RMS) nas camadas superficiais do solo. Maiores taxas de precipitação refletem positivamente no crescimento e diversidade da comunidade microbiana, mas refletem negativamente nas taxas metabólicas devido a maior disponibilidade de água e nutrientes de fácil assimilação no solo.

Em contrapartida, o aumento da temperatura reflete negativamente no metabolismo, na atividade e na diversidade microbiana do solo, pois estimula a evapotranspiração e

consequentemente a diminuição da umidade, desnaturação e inativação de proteínas e enzimas (EVANGELISTA et al., 2013; KARHU et al., 2014; MOYANO; KUTSCH; SCHULZE, 2007).

### 2.5.3 Atividade enzimática do solo

As enzimas são essenciais a todas as formas de vida, tendo sua síntese e atividade bastante regulada. As enzimas podem atuar dentro ou fora da célula, apresentam alta especificidade de reação, elevada eficiência catalítica, não são consumidas na reação e estão sujeitas a processos de indução, ativação, inibição e desnaturação química ou biodegradação no ambiente (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006).

O estudo da atividade enzimática no solo tem sido reportado em muitos trabalhos, como um indicador efetivo na decomposição da MO e da disponibilidade de nutrientes, decorrentes das diferentes práticas de manejo ou do ambiente (EVANGELISTA et al., 2012, 2013; MIRALLES et al., 2012; SPOHN; CARMINATI; KUZYAKOV, 2013). O crescimento microbiano e consequentemente a atividade enzimática são intimamente correlacionados as características químicas e físicas do solo, quantidade e qualidade da serrapilheira, fatores climáticos, temperatura, umidade (BLAGODATSKAYA; KUZYAKOV, 2013; DORNBUSH, 2007; OSANAI et al., 2015).

Araújo & Monteiro (2007), em revisão sobre indicadores biológicos de qualidade do solo, relataram que as enzimas estão presentes no solo tanto associadas às células microbianas (enzimas intracelulares), como não associadas (enzimas extracelulares). As enzimas intracelulares catalisam reações que ocorrem dentro das células, podendo ser liberadas pela lise celular e exercer atividades extracelulares. As enzimas extracelulares atuam no exterior da célula, degradando substratos estruturalmente grandes, que serão posteriormente transportados para dentro da membrana celular e metabolizados (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006; RAO et al., 2014).

Caldewell (2005), em trabalho de revisão sobre atividade enzimática como componente da biodiversidade do solo, relatou que existem correlações entre a atividade enzimática e o substrato, havendo especificidade enzima/substrato. Dentro de cada tipo de nutriente, existem formas químicas específicas baseadas em estrutura ou de ligação, desta forma, para cada composto há enzimas específicas e ativas.

### ***Fatores inibitórios da atividade enzimática***

Pillon *et al.* (2002) relataram que a interação organo-mineral resulta em alterações conformacionais na MO, que é protegida do ataque microbiano. Entretanto, essa imobilização não é restrita apenas a MO onde, enzimas extracelulares também podem ser adsorvidas pelos minerais, inibindo sua ação (SIX *et al.*, 2002ab; CALDEWELL, 2005). Burns *et al.*, 2013 relataram que muitas enzimas extracelulares do solo tornam-se estabilizadas por meio da associação com argila e ácidos húmicos, causando diminuição da atividade enzimática em comparação aos seus homólogos livres.

A diminuição da atividade enzimática pode ocorrer pela complexação da enzima, restringindo a acessibilidade ao substrato, pela oclusão de sítios ativos ou mudanças na conformação da enzima. Entretanto, enzimas imobilizadas representam um importante reservatório de atividade microbiana, podendo funcionar como resposta catalítica a mudanças na disponibilidade de substrato nos solos, servindo como o gerador de sinalização para a comunidade microbiana e como fonte de substrato durante os períodos em que a biomassa microbiana tem baixa atividade, seja por condições naturais ou por estresse (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; BURNS *et al.*, 2013; PAVAN FERNANDES; BETTIOL; CERRI, 2005).

A influência do pH na catálise enzimática está correlacionada com o estado de ionização dos resíduos. A concentração de íons de hidrogênio no sistema reacional pode afetar os grupos de ionização da enzima ou influenciar o estado de ionização do substrato. Assim, a constante de afinidade enzima-substrato torna-se afetada. Moléculas de enzimas possuem um número específico de grupos ionizáveis em sua distribuição total, e seu papel na degradação dos nutrientes é influenciado diretamente pela variação do pH no solo. Desta forma, cada enzima tem um pH ótimo de atuação, no qual a sua atividade é máxima (WANG; WANG, 2011).

### ***Quantificação da atividade enzimática no solo***

A atividade enzimática total do solo é determinada pelo método de diacetato de fluoresceína proposto por Ghini, Mendes & Bettiol (1998) e a atividade da enzima é estimada de acordo com o método proposto por Tabatabai (1994), utilizando a determinação colorimétrica do p-nitrofenol após incubação do solo com substrato específico de cada enzima, sendo p-nitrofenol- $\beta$ -D-glicopiranosídeo para a  $\beta$ -glucosidase, carboximetilcelulose para a celulase e xilano de Birchwood para xilanase.

Bandick & Dick (1999), em estudo sobre os efeitos da atividade enzimática em diferentes usos da terra, relataram que as enzimas que catalisam reações bioquímicas são parte

integrante do ciclo de nutrientes no solo, são principalmente de origem microbiana, mas também podem originar-se a partir de plantas e animais. Os autores avaliaram a atividade de onze diferentes tipos de enzimas do solo em relação ao manejo e qualidade do solo. Dentre as enzimas estudadas estavam a alfa ( $\alpha$ ) e  $\beta$ -glucosidase, celulase, uréase,  $\alpha$  e  $\beta$ -galactosidase. Houve aumento significativo ( $p < 0,05$ ) da atividade da celulase,  $\alpha$  e  $\beta$ -glucosidase em sistemas cultivados onde havia deposição de material orgânico, indicando a significância destas enzimas na ciclagem de nutrientes devido ao seu papel no ciclo do carbono.

Evangelista et al. (2012), em trabalho sobre atividade enzimática do solo sob sistemas de produção orgânica e convencional, tiveram como objetivo avaliar a atividade das enzimas ligadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glucosidase), à mineralização do fósforo (fosfatase ácida) e atividade enzimática total do solo. Observaram maiores níveis da atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase, em média 76 e 60 %, em solos sob cerrado nativo e sistema de produção orgânica, respectivamente. Estes resultados foram significativos quanto à relação da  $\beta$ -glucosidase na ciclagem do material orgânico provindo das adubações orgânicas, bem como da deposição lenta do material vegetal sobre o solo na área nativa.

Processo inverso foi realizado por Grasset; Amblès, 1998, no qual utilizaram enzima comercial na degradação da celulose presente na humina do solo. Os autores utilizaram método semelhante ao já utilizado na hidrólise de materiais lignocelulóticos, no qual são usados complexos enzimáticos em condições de temperatura (45 - 50 °C) e pH (4,8 - 5) constantes na degradação de biomassas para a produção de glicose. No processo de hidrólise da celulose no solo foram liberados lipídeos e ésteres, além dos produtos da própria degradação, comprovando que compostos lábeis estão presentes na fração humina, mas estão intrinsicamente ligados a materiais de difícil mineralização pelos microrganismos.

Outros trabalhos também utilizaram o método de hidrólise enzimática em estudos específicos de componentes da MOS. Lou & Warman (1992) avaliaram a hidrólise enzimática de ésteres da MOS; He et al. (2004) avaliaram a hidrólise enzimática do fósforo orgânico do solo. Em todos os trabalhos foram observados resultados positivos em relação à hidrólise enzimática do solo, porém o método é bastante eficaz para a avaliação de compostos específicos.

#### 2.5.4 Proteínas do solo relacionadas à glomalina

A glomalina é uma glicoproteína componente da parede celular das hifas de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), insolúvel em água, imunorreativa e acumula-se no solo após o processo de decomposição das hifas por microrganismos edáficos (MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006). A relação entre a estabilidade de agregados do solo e concentrações de glomalina é atribuída à recalcitrância e hidrobificidade da molécula, a qual possui propriedades adesivas que agem nas partículas de solo formando agregados (FOKOM et al., 2012; SILVA et al., 2012). Diversos trabalhos vêm ressaltando a concentração da glomalina e sua relação com a estabilidade de agregados e o estoque de C no solo (GISPERT et al., 2013; LÓPEZ-MERINO et al., 2015; SILVA et al., 2014; SOUSA et al., 2011).

A glomalina proporciona maior retenção de água, favorece a aeração e promove maior agregação das partículas do solo, o que evita a perda de nutrientes para as camadas mais profundas (LUNA et al., 2016) e está diretamente relacionada às características do solo, condições climáticas, práticas de manejo agrícola, e o tipo de vegetação (GISPERT et al., 2013; LOZANO et al., 2016). Os métodos utilizados tradicionalmente (Bradford ou ELISA) na extração da glomalina não são eficazes em extrair somente essa glicoproteína, o que levou à mudança do termo “glomalina” para “proteínas do solo relacionadas à glomalina” (PSRG) (WRIGHT; UPADHYAYA, 1996; WRIGHT; UPADHYAYA, 1998).

Estas glicoproteínas podem ser extraídas do solo a partir da utilização de extratores fortes, ciclos consecutivos em altas temperaturas (121 °C) durante 1 hora no mínimo, o que sugere que seja uma molécula extremamente estável, diferente das moléculas de proteínas, que desnaturam quando submetidas a altas temperaturas (WRIGHT; UPADHYAYA, 1996). As glicoproteínas ligadas à glomalina são geralmente divididas em duas frações: a glomalina facilmente extraível (GFE) que representa a fração recentemente depositada e que ainda não sofreu transformações bioquímicas no solo (WRIGHT; UPADHYAYA, 1996) e a glomalina total (GT) que se apresenta fortemente ligada às argilas (WRIGHT; UPADHYAYA, 1998).

Fokom et al. (2012), ao avaliarem o impacto do uso da terra nas PSRG em área de floresta úmida no sul de Camarões, observaram que os valores da GFE foram 35 % e da GT 40 % menores em áreas agrícolas que florestais. Os teores de PSRG diminuíram da floresta em relação aos sistemas agrícolas e estavam diretamente relacionados à diminuição de agregados do solo em áreas agrícolas demonstrando que, a conversão da floresta em áreas agrícolas afeta fortemente as condições biológicas e as propriedades físicas do solo.

Zhang et al., 2015, ao avaliarem o potencial de acumulação de carbono no solo através de respostas nos teores das PSRG ao aumento de CO<sub>2</sub> em uma floresta subtropical, observaram que com a incorporação de CO<sub>2</sub> houve aumento de 31 % nos teores de GT e diminuição de 5 % em relação a GFE. Os autores propuseram que o enriquecimento de CO<sub>2</sub> atmosférico contribui para o aumento da atividade microbiana do solo, por conseguinte aumento da mineralização de compostos lábeis. Desta forma, a GFE, por ser uma fração recentemente incorporada ao solo e não associada aos minerais é rapidamente mineralizada em relação à GT que é uma fração imunorreativa e resistente à decomposição microbiana. Portanto, solos que apresentem elevados teores de GT e uma menor relação GFE/GT podem conter PSRG consideravelmente mais velha, contribuindo significativamente para o estoque de C no solo.

#### 2.5.5 Influência do manejo na dinâmica da MO e atividade biológica do solo

Em estudo sobre a atividade de enzimas em solos sob uso agrícola e florestal Capeda et al. (2008) relatam que a qualidade de um solo é definida não só em termos da capacidade produtiva, mas também levando em consideração que o solo forma parte integrante do ecossistema. Portanto, o manejo inadequado pode causar perda progressiva da qualidade do solo e por conseguinte, alterações nos fatores químicos, físicos e biológicos. Contudo, algumas propriedades do solo respondem muito lentamente as mudanças no uso da terra em relação às propriedades biológicas que estão diretamente relacionadas à mineralização da MOS e liberação de nutrientes as plantas (BALOTA et al., 1998; DE SOUZA et al., 2010; MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, 2006).

Ao avaliarem a qualidade da MOS em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, (Signor et al., 2014) observaram que o cultivo da cana-de-açúcar sem queima da palha favoreceu o acúmulo de C ligado a complexos organominerais, e de C na biomassa microbiana no solo em comparação à colheita com queima. Souza et al., 2006, em trabalho sobre atributos biológicos em solo do cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos, relataram que a biomassa microbiana foi severamente afetada pelo manejo do solo, assim como o quociente metabólico, sendo as maiores reduções observadas em área de pastagem em relação ao plantio direto.

Desta forma, as propriedades biológicas e bioquímicas do solo tais como a atividade enzimática, o carbono da biomassa microbiana e a taxa de respiração são indicadores que podem ser utilizados no monitoramento de alterações ambientais devido ao uso agrícola (BALDRIAN, 2013; BALDRIAN et al., 2010; WALLENSTEIN et al., 2012).

## 2.6 Espectroscopia de infravermelho utilizada em estudo da matéria orgânica do solo

Devido à grande demanda de dados para monitoramento ambiental, que precisam ser obtidos de forma rápida e econômica, novas técnicas, como a espectroscopia por infravermelho, têm sido consideradas como alternativas para complementar ou substituir os métodos analíticos convencionais (COHEN; PRENGER; DEBUSK, 2005; LOPES et al., 2011).

A técnica de espectroscopia de infravermelho baseia-se na propriedade vibratória inerente aos átomos de uma molécula por meio da utilização de energia eletromagnética. Cada molécula responde de forma diferente à radiação, o que proporciona diferentes bandas de absorção no espectro infravermelho, fornecendo informações sobre a estrutura dos grupos funcionais presentes na matéria, bem como sobre a natureza de suas ligações químicas e sua reatividade (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002). Além de análises qualitativas, os espectros de infravermelho também permitem determinações semi quantitativas de grupos funcionais, principalmente os que contêm oxigênio (O) (DIAS et al., 2009).

Dentre as novas metodologias utilizando espectroscopia de infravermelho cita-se a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e no infravermelho médio (MIR). A espectroscopia NIR é um tipo de espectroscopia vibracional que corresponde aos comprimentos de onda de 700 a 2500 nm. O MIR atua na região do infravermelho médio, situada entre 2500 a 25000 nm (SORIANO-DISLA et al., 2014). Segundo Chatterjee et al., 2009, o NIR determina semi quantitativamente os compostos orgânicos, enquanto o MIR envolve a interpretação espectral das estruturas químicas, sendo mais adequado para fins qualitativos.

Os métodos espectroscópicos têm sido largamente utilizados em estudos da matéria orgânica do solo (MOS) (CÉCILLON et al., 2008, 2009; CHODAK et al., 2002; LUCE et al., 2014; ROMERO-FREIRE et al., 2016; ZORNOZA et al., 2008) e apresentam vantagens como elevada acurácia, rapidez na determinação, facilidade de uso e baixo custo (CHATTERJEE et al., 2009). A espectroscopia de infravermelho tem sido usada para a caracterização da MOS, principalmente com o avanço de técnicas não dispersivas, como a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), o que permite alta sensibilidade na análise e obtenção de espectros de alta resolução, com baixa relação sinal/ruído (MIRANDA; CANELLAS; TRINDADE NASCIMENTO, 2007).

Dias et al., 2009, ao avaliarem a qualidade dos ácidos húmicos (AH) em um Latossolo sob o uso de lodo de esgoto utilizando FTIR na faixa de 400-4000 nm, observaram índices de hidrofobicidade (índice atribuído ao nível de recalcitrância do material) da fração AH de solo de mata de 1,08 enquanto, solos sob a influência de lodo de esgoto apresentaram valor médio

de 0,52. Estes valores indicam maior recalcitrância da fração AH em solos de mata devido ao acúmulo de carbono e diminuição das taxas de mineralização o que não ocorre em solos com incremento do lodo, onde a MO vai sendo disponibilizada e mineralizada gradativamente.

Freixo; Canellas; Machado, 2002, avaliando as propriedades espectrais das frações leve-livre (FLL) e intragregado (FI) da MOS de um Latossolo, observaram que a FLL apresenta bandas de absorção C=C de aromáticos (1489 nm) pouco pronunciadas e bandas de caracterização de polissacarídeo (1300-1000 nm) bastante pronunciadas, caracterizando a labilidade desta fração em relação a FI. O aumento do sinal da banda referente a duplas ligações está relacionado à condensação da molécula, conseqüentemente, caracterizando um material mais recalcitrante.

Em estudos relacionados à biologia do solo é crescente o número de trabalhos relacionando técnicas espectroscópicas à biomassa microbiana, respiração basal e atividade enzimática do solo (CÉCILLON et al., 2008, 2009; COÛTEAUX; BERG; ROVIRA, 2003; ZORNOZA et al., 2008). Grande parte dos estudos envolvendo espectroscopia e microbiologia do solo utilizam análises com NIR e têm como objetivo investigar a utilidade das técnicas na quantificação dos atributos biológicos, diminuindo erros e custos analíticos e principalmente reduzindo a geração de resíduos químicos contaminantes.

Coûteaux; Berg; Rovira, 2003, avaliando a espectroscopia de NIR para determinação de matéria orgânica incluindo a biomassa microbiana em solos de áreas nativas, e Terhoeven-Urselmans et al., 2008, em estudo sobre a avaliação da NIR na determinação das propriedades biológicas do solo sob manejo orgânico, observaram uma eficiente capacidade preditiva, apresentando um coeficiente de determinação de  $R^2 > 0,90$  da NIR na determinação da biomassa microbiana do solo em comparação a métodos laboratoriais convencionais.

Rinnan; Rinnan, 2007, avaliando a aplicabilidade da NIR em quantificar a biomassa microbiana em solo predominantemente orgânico do Ártico, observaram que a NIR está altamente relacionada ao teor de MOS ( $R^2 > 0,90$ ) e carbono da biomassa microbiana ( $R^2 > 0,80$ ). Rinnan; Rinnan (2007) também observaram que os coeficientes de regressão das variáveis microbiológicas foram bastante semelhantes aos da MOS, confirmando que são variáveis altamente correlacionadas. Para a MOS houve pico distinto em cerca de 1900 nm, enquanto para as variáveis microbiológicas o comprimento de onda de 2050 nm contribuiu mais para a predição. Terhoeven-Urselmans et al., 2008 atribuíram os comprimentos de 1408, 1842 e 2414 nm para a predição do carbono microbiano.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Os solos utilizados neste estudo foram oriundos de áreas sob Mata Atlântica e sob cultivo de cana de açúcar. Esse projeto teve como objetivo principal relacionar a qualidade e quantidade do carbono e das diferentes frações da MOS em distintos sistemas ecológicos.

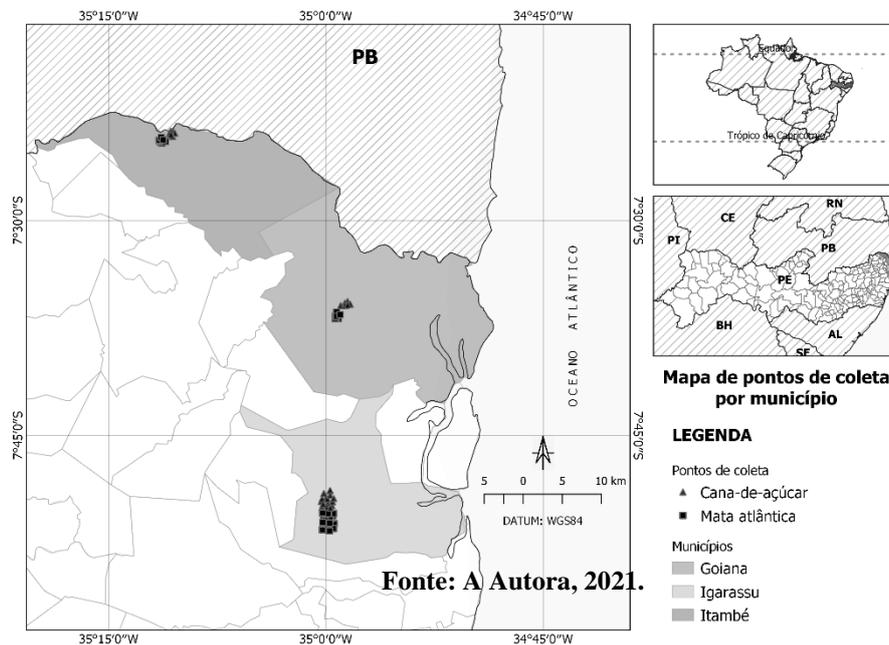
#### **3.1 Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar**

Esse estudo teve como objetivo principal quantificar e qualificar o carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar. Tal estudo foi realizado em três áreas distintas sob vegetação nativa e sob cultivo de cana de açúcar.

##### **3.1.1 Área de estudo**

O estudo foi conduzido em três áreas distintas de ecossistema florestal de Mata Atlântica e de agroecossistemas de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 1). Os solos das áreas foram classificados como Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico e Argissolo Franco Argilo Arenoso, respectivamente (EMBRAPA, 2013).

Figura 1 – Localização das áreas estudadas sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob agroecossistemas de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil



Fonte: A autora (2021).

### *Histórico das áreas*

A primeira área estudada foi a Usina São José situada no município de Igarassu/PE possui 25 mil hectares, dos quais 16 mil são plantados com cana-de-açúcar. O complexo usineiro contém mais de 100 fragmentos florestais. O fragmento florestal de Mata Atlântica denominado de “Fragmento Piedade”, o qual foi objeto de estudo desta pesquisa, possui 306 ha (PESSOA; ALVES, 2012) e é protegido pela Lei Estadual nº 9.989 de 1987 (SANTOS; ALVES, 2012). A vegetação predominante é de Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas (VELOSO et al., 1991) sobre solos predominantemente arenosos, relevo ondulado e clima segundo Köppen é do tipo As’, quente e úmido, com médias anuais de temperatura de 25 °C e pluviométrica de 1.687 mm ano<sup>-1</sup> (APAC – Agência Pernambucana de Águas e Climas, Estação Igarassu, PE).

As áreas sob cana-de-açúcar avaliadas são contíguas à área sob vegetação nativa e são denominadas como “Engenho Piedade”, as quais possuem 10,05 e 22,23 há, respectivamente. As áreas sob cultivo de cana-de-açúcar são cultivadas por mais de 50 anos e o corte da cana-de-açúcar é realizado manualmente e a despalha realizada com fogo. Para a renovação do canavial nessas áreas recebem diretamente no sulco de plantio, resíduos de torta de filtro sem mistura (puro), entre 30 a 40 Mg ha<sup>-1</sup> (Lucena, 2019). A cana soca ou soqueira recebe esse composto a cada corte na linha de cultivo (rebrotada da cana-planta). Os solos das áreas sob cana-

de-açúcar foram corrigidos com aproximadamente  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário dolomítico. Anteriormente ao plantio, na socaria, foram aplicados  $84 \text{ Kg ha}^{-1}$  de N e  $108 \text{ Kg ha}^{-1}$  de K, em seguida, após 30 dias foram aplicadas em cobertura  $126 \text{ kg ha}^{-1}$  de P. As áreas sob cana-de-açúcar nos anos de 2016 e 2017 encontravam-se em fase de ressoca. Em 2018 as áreas sob cana haviam sofrido transição para a implantação da irrigação por gotejamento.

A segunda área estudada foi a Estação experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) localizada no município de Itambé/PE, Zona da Mata Norte de Pernambuco (área de transição entre a Zona da Mata seca e Agreste de Pernambuco) possui 240 ha. O clima segundo Köppen é do tipo As', tropical chuvoso, quente e úmido, com verão seco, pluviosidade média anual de  $1.200 \text{ mm ano}^{-1}$  (chuvas concentradas entre maio e julho), temperatura média anual de  $25 \text{ °C}$ , umidade relativa do ar média de 80 % (Encarnação, 1980). Não foi possível obter o histórico dos fragmentos florestais de Mata Atlântica dessa área estudada.

As áreas sob cana-de-açúcar avaliadas são contíguas à área sob vegetação nativa e com um histórico de cultivo de mais de 50 anos (comunicação pessoal com o supervisor de campo). Na área é realizada calagem com calcário dolomítico, antes do plantio da cana-de-açúcar. É realizada aplicação de NPK conforme recomendação do IPA (informações cedidas pela equipe agrônoma).

A terceira área estudada foi a Usina de Santa Teresa, cujo nome oficial é Companhia Agroindustrial de Goiana, fundada em 1910 (atualmente desativada) está localizada na Mesorregião Mata e Microrregião Mata Setentrional no município de Goiana. O clima é classificado segundo Köppen do tipo Am', temperatura média anual de  $25 \text{ °C}$ , pluviosidade média anual de  $1.924 \text{ mm ano}^{-1}$ . Não foi possível obter o histórico dos fragmentos florestais de Mata Atlântica dessa área estudada.

As áreas sob cana-de-açúcar avaliadas são contíguas à área sob vegetação nativa e com um histórico de cultivo de mais de 50 anos (comunicação pessoal com o supervisor de campo). Entretanto, os históricos das áreas não foram cedidos pela equipe agrônoma da Usina Santa Teresa.

### 3.1.2 Amostragem do solo

Nas três áreas estudadas a amostragem do solo foi realizada no mês de junho de 2016, independente do tempo de colheita da cana. Para a área localizada na Usina de São José também foram realizadas amostragens de solo no mês de junho nos anos de 2017 e 2018. Em cada área foram coletadas seis amostras (compostas por três subamostras) de solo, de forma aleatória,

com pontos a cada dois metros, a uma profundidade de 0 a 20 cm. O total de amostras de solo coletadas foi de 60 (30 amostras de solo coletadas sob vegetação nativa e 30 amostras de solo coletadas sob cultivo de cana-de-açúcar).

Foram nomeadamente às amostras de solo como vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e áreas sob cultivo de cana-de-açúcar (CA). A área sob VN foi usada como referência para a condição inicial do solo antes de ser convertido em agricultura. As áreas sob CA foram localizadas contíguas à VN. Todas essas áreas apresentaram condições climáticas, tipos de solo, topografias e altitudes semelhantes.

Para análise microbiológica as amostras de solo foram acondicionadas em sacos de polietileno devidamente vedados, colocadas em caixas térmicas e transportadas para o laboratório, onde foram mantidas a 4 °C até o momento das análises (período máximo de armazenamento de 3 meses). Para a caracterização física e química, parte das amostras de solo foi seca ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm (TFSA).

### 3.1.3 Atributos físicos e químicos do solo

A caracterização química e física das amostras de solo (Tabela 1) foi realizada, de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997): pH do solo foi determinado em água (1:2,5), o P do solo por colorimetria (Mehlich<sup>-1</sup>), o Na<sup>+</sup> por fotometria de chama (EMBRAPA, 1999). Os percentuais de areia, silte, argila e densidade aparente das amostras de solo foram determinados.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo nas áreas avaliadas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.

Atributos	Uso da terra					
	Área 1		Área 2		Área 3	
	VN	CA	VN	CA	VN	CA
pH	4,8	6	4,9	5,5	4,7	5,9
P (mg.dm <sup>-1</sup> )	1	4	3	3,3	2,8	5,6
Ca (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,2	1,4	3	3,7	1,1	2,4
Mg (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,4	0,6	0,9	0,7	0,8	1
Na (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,04	0,04	0,1	0,04	0,05	0,04
K (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,05	0,16	0,1	0,1	0,06	0,35
Al (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,9	0	1	0,3	0,8	0,1
CTC (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	6,6	6,1	16,5	12,6	9,2	7,2
Ds (Kg.cm <sup>-3</sup> )	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3	1,4
Areia grossa (%)	51	52,6	46,7	44,7	42,8	42,5
Areia fina (%)	21,6	23,3	19	20,7	25,4	26,8
Silte (%)	4,3	2,3	16	11,7	8,5	7,6
Argila (%)	23	21,6	18,3	23	23,3	23

Fonte: A Autora (2021).

\*P. fósforo; Ca. Cálcio; Mg. Magnésio; Na. Sódio; K. potássio; Al. Alumínio; CTC. Capacidade de troca catiônica; Ds. Densidade aparente do solo.

O carbono orgânico do solo (COT) foi determinado por oxidação via úmida com dicromato de potássio seguido de titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS; BREMNER, 1988), adaptado (MENDONÇA; MATOS, 2005). O carbono da biomassa microbiana (C<sub>mic</sub>) foi determinado pelo método de irradiação (MENDONÇA; MATOS, 2005). A biomassa microbiana do solo foi extraída adicionando-se 25 mL de sulfato de potássio 0,5 Mol L<sup>-1</sup> como extrator para 10 g de cada amostra de solo. O teor de carbono nos extratos foi determinado utilizando-se o método colorimétrico (BARTLETT; ROSS, 1988).

Os níveis de respiração basal microbiana do solo (RBM) foram determinados quantificando-se o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado no processo de respiração microbiana usando o método de adsorção alcalina com NaOH 0,5 Mol L<sup>-1</sup> e titulação do excesso de base com solução de HCl 0,25 Mol L<sup>-1</sup> e fenolftaleína como indicador, conforme descrito por Anderson e Domsch (1985).

O quociente microbiano (qMic) foi calculado pela relação C<sub>mic</sub>/COS, de acordo com Sparling (1992). O quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) foi calculado pela razão entre os teores do C<sub>mic</sub> e da RBM, de acordo com Anderson e Domsch (1993). Baseado no cálculo descrito por Sparling (1992) para o qMic, foi calculado para fim de entendimento do quanto do carbono orgânico é mineralizado pela microbiota, a taxa relativa de mineralização do solo (TRM), onde foi descrita pela razão RBM/COS.

O carbono solúvel em água (CSA) foi determinado pelo método de extração descrito por Bartlett; Ross (1988), adaptado (MENDONÇA; MATOS, 2005). A extração do CSA foi realizada adicionando 20 mL de água deionizada a 10 g de amostra de solo e mantida sob agitação por 30 minutos a temperatura ambiente. O teor de carbono nos extratos foi determinado utilizando-se o método colorimétrico (BARTLETT; ROSS, 1988), empregando permanganato de potássio como agente oxidante.

A atividade enzimática microbiana no solo associadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glucosidase) e do fósforo (fosfatase ácida), foram determinadas pelos métodos descritos por Tabatabai & Bremner (1982), Eivazi & Tabatabai (1988). Os métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do *p*-nitrophenol formado após o período de incubação do solo com o substrato específico durante uma hora a 37 °C. A atividade enzimática microbiana no solo foi expressa em  $\mu$ g *p*-nitrophenol liberado por grama de solo seco por hora. Para cada amostra de solo foram efetuadas três repetições analíticas em laboratório.

As proteínas do solo relacionadas à glomalina foram quantificadas pelo método descrito por Wright e Upadhyaya (1998). Para a quantificação do teor de glomalina facilmente extraível (GFE) 0,25 g de solo foram autoclavados por 30 minutos a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (20 mM; pH 7) e em seguida centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. Para a quantificação do teor de glomalina dificilmente extraível (GDE) os resíduos de solo remanescentes da primeira etapa de extração foram autoclavados por 1 hora a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (50 mM; pH 7) e centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. As quantificações dos sobrenadantes foram feitas segundo o método descrito por Bradford (1976), utilizando como padrão albumina bovina sérica. Os valores para a glomalina total (GT) foram obtidos através da soma dos teores de glomalina facilmente e dificilmente extraíveis.

O fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo foi realizado da separação da fração leve livre (FLL) e da fração pesada do solo (FP), de acordo com método descrito por Demolinari et al., (2008), com modificações. Para isso, foram adicionados 20 mL de água deionizada a 10 g de TFSA, em tubos de centrífuga de 50 mL durante 16 h em agitador vertical, não se fazendo uso de dispersante químico. A FLL foi recuperada pela passagem do sobrenadante em filtro quantitativo do tipo Whatmann. O carbono orgânico da fração pesada (FP), composta pelo resíduo de solo da etapa de extração da FLL, foi quantificado pelo método de oxidação via úmida descrito por Yeomans & Bremner (1998). O teor de carbono da FLL foi obtido através da diferença do COS e C-FP.

### 3.1.4 Espectroscopia de infravermelho

Para a obtenção dos espectros de solos, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm (TFSA) e analisadas na janela espectral de 10000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 16  $\text{cm}^{-1}$ , com acumulação de 32 varreduras. Para as leituras, cada amostra foi separada em cinco partes e analisadas separadamente (quintuplicata). As análises foram realizadas no espectrômetro de infravermelho próximo da marca Perkin-Elmer, modelo Spectrum 100.

### 3.1.5 Análises estatísticas

Com o objetivo de comparar as áreas sob vegetação nativa e sob cana-de-açúcar, as médias gerais das variáveis para os dois sistemas foram submetidas à análise de variância (ANOVA) seguida de teste de comparação de médias (teste t-student, 5 %). Como instrumento de identificação da disposição espacial dos sistemas de uso da terra e suas correlações com a dinâmica dos atributos avaliados (COT, Cmic, RBM, CSA,  $\beta$ -glucosidase, Fosfatase, GFE, GDE, GT, C-FLL e C-FP) empregou-se a Análise de Componentes Principais (ACP), para distinção dos ambientes em função do grau de degradação, utilizando o programa estatístico XLSTAT 2019. 1.2.

Para quantificação dos modelos microbiológicos utilizando espectroscopia, foi feita a soma dos espectros das cinco replicatas e obtenção dos espectros médios. Foram utilizados os espectros sem tratamento e com uso de primeira derivada e centrados na média. Foram realizadas duas avaliações multivariadas: (i) Análise Hierárquica de Clusters (HCA), para identificação de potenciais similaridades espectrais, utilizando o OriginPro 9.0.0 e (ii) Mínimos Quadrados Parciais (PLS) para obtenção de modelos de quantificação, através do software The Unscrambler X 10.1.

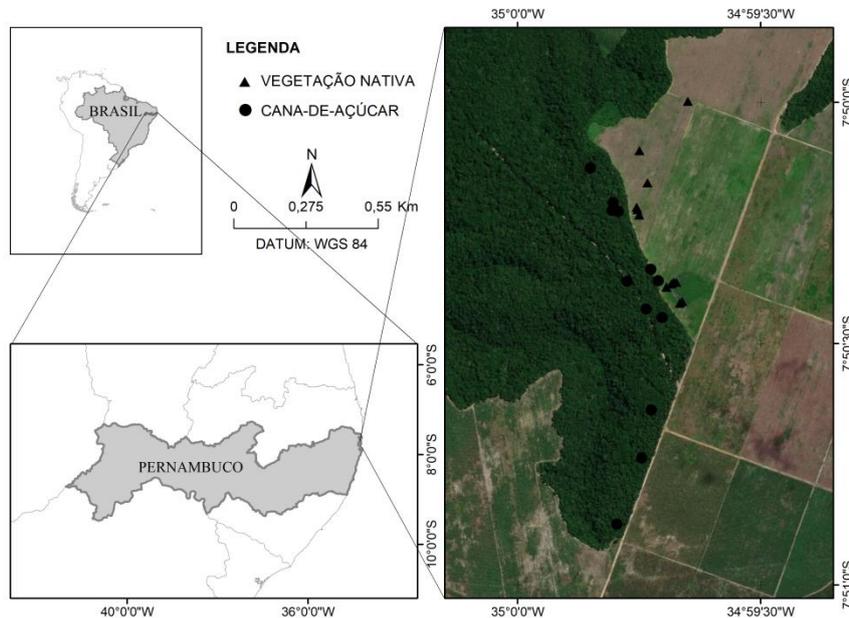
## **3.2 Estudo 2: Avaliação do comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar**

Esse estudo teve como objetivo principal a avaliação do comportamento em três anos distintos na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar. Foram avaliados parâmetros microbiológicos e variáveis relacionadas ao estoque de carbono no solo.

### 3.2.1 Área de estudo

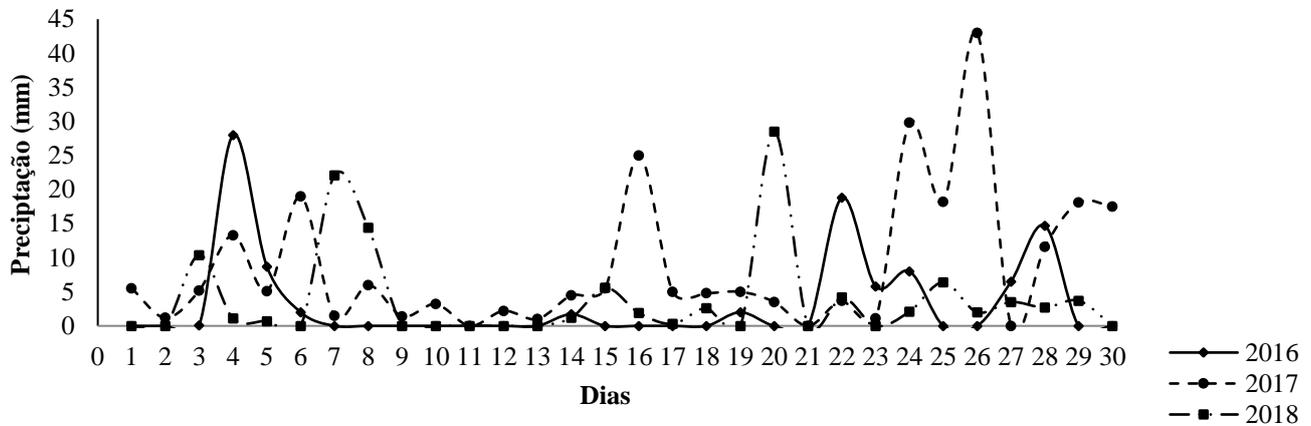
O estudo foi realizado na Usina São José ( $7^{\circ}50'25''\text{S}$ ,  $34^{\circ}59'40''\text{W}$ ), localizado no município de Igarassu, Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 2) ( $7^{\circ}50'25''\text{S}$ ,  $34^{\circ}59'40''\text{W}$ ). A vegetação predominante é de Floresta Estacional Semidecidual das Terras Baixas (Veloso et al., 1991) sobre solos predominantemente arenosos, relevo ondulado e clima segundo Köppen é do tipo  $\text{As}'$ , quente e úmido, com médias anuais de temperatura média anual de  $25^{\circ}\text{C}$  e pluviométrica de  $1.687\text{ mm ano}^{-1}$  (APAC – Agência Pernambucana de Águas e Climas, Estação Igarassu, PE). A precipitação média acumulada para os meses de coleta nos anos de 2016, 2017 e 2018 foram de 96,3, 263,9 e 113,4  $\text{mm mês}^{-1}$ , respectivamente (Figura 3). Os solos foram classificados como Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2013). O histórico da área estudada está descrito no tópico 3.1.1.

Figura 2 – Localização geográfica dos pontos de estudo nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil



Fonte: A Autora (2021).

Figura 3 – Valores diários de precipitação pluviométrica ocorrida no mês de junho nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A Autora (2021).

### 3.2.2 Amostragem do solo

A amostragem do solo foi realizada no mês de junho nos anos de 2016, 2017 e 2018, independente do tempo de colheita da cana. Em cada área foram coletadas seis amostras (compostas por três subamostras) de solo, de forma aleatória, com pontos a cada dois metros, a uma profundidade de 0 a 20 cm. O total de amostras de solo coletadas foi de 36 (18 amostras de solo coletadas sob vegetação nativa e 18 amostras de solo coletadas sob cultivo de cana-de-açúcar).

Amostras indeformadas de solo foram retiradas da mesma profundidade com o auxílio de um cilindro de metal com volume interno de  $78,3 \text{ cm}^3$ , denominado de “*anel de Kopecky*”, para se determinar a densidade do solo e efetuar os cálculos dos estoques de carbono orgânico total (COT), carbono presente na fração leve livre (C-FLL), carbono presente na fração pesada (C-FP), carbono solúvel em água (CSA) e carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ).

Foram nomeadamente às amostras de solo como vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e áreas sob cultivo de cana-de-açúcar (CA). A área sob VN foi usada como referência para a condição inicial do solo antes de ser convertido em agricultura. As áreas sob CA foram localizadas contíguas à VN. Todas essas áreas apresentaram condições climáticas, tipos de solo, topografias e altitudes semelhantes.

Para análise microbiológica as amostras de solo foram acondicionadas em sacos de polietileno devidamente vedados, colocadas em caixas térmicas e transportadas para o laboratório, onde foram mantidas a  $4^\circ\text{C}$  até o momento das análises (período máximo de armazenamento de 3 meses). Para a caracterização física e química, parte das amostras de solo

foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm (TFSA).

### 3.2.3 Atributos físicos e químicos do solo

As caracterizações químicas e físicas das amostras de solo foram realizadas de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997) (Tabela 2). O pH foi determinado em água (1:2,5), o P por colorimetria Mehlich<sup>1</sup> o Na<sup>+</sup> por fotometria de chama (EMBRAPA, 1999). A textura do solo foi determinada de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997).

Tabela 2 – Caracterização química e física do solo nas áreas avaliadas nos diferentes períodos de coleta (2016, 2017, 2018), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil

Áreas	pH	P (mg.dm <sup>-3</sup> )	Ca	Mg	Na	K	Al	H	S	CTC	V (%)	m
<i>Caracterização química</i>												
<b>2016</b>												
VN	5,14	1	0,23	0,47	0,04	0,05	0,22	4,88	0,80	6,60	12,17	53,3
CA	5,97	4	1,40	0,63	0,04	0,16	0	4,20	1,93	6,18	29,67	0
<b>2017</b>												
VN	4,72	4	0,56	0,65	0,03	0,05	0,93	7,83	1,38	10,13	13,83	41
CA	5,40	9,5	1,45	0,74	0,03	0,12	0,38	6,92	2,32	9,63	24	17
<b>2018</b>												
VN	5,28	2,8	0,45	0,52	0,03	0,05	0,93	6,35	1,09	8,37	13	47,2
CA	5,55	6,7	1,43	0,69	0,04	0,14	0,19	5,56	2,13	7,91	26,83	8,50
<i>Caracterização física</i>												
	Ds	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila							
	(Kg.cm <sup>-3</sup> )					(g Kg <sup>-1</sup> )						
VN	1,31	51	22	4	23							
CA	1,37	53	23	2	22							

Fonte: A Autora (2021).

\*P. fósforo; Ca. cálcio; Mg. magnésio; Na. sódio; K. potássio; Al. alumínio; CTC. capacidade de troca catiônica; Ds. densidade do solo.

O carbono orgânico do solo (COT) foi determinado por oxidação úmida com dicromato de potássio seguido de titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS; BREMNER, 1988) adaptado por Mendonça & Matos, (2005). O carbono da biomassa microbiana (C<sub>mic</sub>) foi determinado pelo método de irradiação e extraído adicionando-se 25 mL de sulfato de potássio 0,5 Mol L<sup>-1</sup> para 10 g de cada amostra de solo (MENDONÇA; MATOS, 2005). O teor de carbono nos extratos foi determinado utilizando-se o método colorimétrico (BARTLETT; ROSS, 1988).

Os níveis de respiração basal microbiana do solo (RBM) foram determinados quantificando-se o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) liberado usando o método de adsorção alcalina com NaOH 0,5 Mol L<sup>-1</sup> e titulação do excesso de base com solução de HCl 0,25 Mol L<sup>-1</sup> e

fenolftaleína como indicador, conforme descrito por Anderson & Domsch (1985). O quociente microbiano (qMic) foi calculado pela relação  $C_{mic}/COT$ , de acordo com Sparling (1992). O quociente metabólico (qCO<sub>2</sub>) foi calculado pela razão entre os teores do  $C_{mic}$  e da RBM, de acordo com Anderson & Domsch (1993).

O carbono solúvel em água (CSA) foi determinado pelo método de extração (Bartlett; Ross, 1988) com adaptações de Mendonça & Matos, (2005). O carbono solúvel do solo foi extraído adicionando 20 mL de água deionizada a 10 g de amostra de solo, sob agitação por 30 minutos a temperatura ambiente. O teor de carbono nos extratos foi determinado utilizando-se o método colorimétrico (Bartlett; Ross, 1988), empregando permanganato de potássio como agente oxidante.

As atividades enzimáticas microbianas no solo associadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glucosidase) e do fósforo (fosfatase ácida) foram determinadas pelos métodos descritos por Tabatabai & Bremner (1982) e Eivazi & Tabatabai (1988). Os métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do *p*-nitrophenol formado após uma hora de incubação do solo com o substrato específico, a 37 °C. A atividade enzimática foi expressa em  $\mu$ g *p*-nitrophenol liberado por grama de solo seco por hora. Para cada amostra de solo foram efetuadas três repetições analíticas em laboratório.

As proteínas do solo relacionadas à glomalina foram quantificadas pelo método descrito por Wright & Upadhyaya (1998). Para a quantificação do teor de glomalina facilmente extraível (GFE) 0,25 g de solo foram autoclavados por 30 minutos a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (20 mM; pH 7) e em seguida centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. Para a quantificação do teor de glomalina dificilmente extraível (GDE) os resíduos de solo remanescentes da primeira etapa de extração foram autoclavados por 1 hora a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (50 mM; pH 7) e centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. As quantificações dos sobrenadantes foram feitas segundo o método descrito por Bradford (1976), utilizando como padrão albumina bovina sérica. Os valores para a glomalina total (GT) foram obtidos através da soma dos teores de glomalina facilmente e dificilmente extraíveis.

O fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo foi realizado da separação da fração leve livre (FLL) e da fração pesada do solo (FP), de acordo com método descrito por Demolinari et al. (2008), com modificações. Para isso, foram adicionados 20 mL de água deionizada a 10 g de TFSA, em tubos de centrífuga de 50 mL durante 16 h em agitador vertical, não se fazendo uso de dispersante químico. A FLL foi recuperada pela passagem do sobrenadante em filtro quantitativo do tipo Whatmann. O carbono orgânico da fração pesada (FP), composta pelo resíduo de solo da etapa de extração da FLL, foi quantificado pelo método

de oxidação via úmida descrito por Yeomans & Bremner (1998), adaptado por Mendonça & Matos, 2005. O teor de carbono da FLL foi obtido através da diferença do COT e C-FP.

Os estoques de COT,  $C_{mic}$ , CSA, C-FLL e C-FP ( $Mg\ ha^{-1}$ ) nas áreas sob VN e CA foram calculados multiplicando-se a concentração do elemento na amostra ( $g\ Kg^{-1}$ ), pela espessura da camada amostrada (cm) e pela densidade da camada avaliada ( $Kg\ dm^{-3}$ ).

#### 3.2.4 Análises estatísticas

Os resultados das variáveis obtidas entre os anos estudados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) seguida de teste para comparação de médias (Tukey, 5 %). Com o objetivo de comparar as áreas sob vegetação nativa e sob cana-de-açúcar, as médias gerais das variáveis para os dois sistemas foram submetidas à análise de variância (ANOVA) seguida de teste para comparação de médias (teste t-student, 5 %). Como instrumento de identificação da disposição espacial dos sistemas de uso da terra e suas correlações com a dinâmica dos atributos avaliados (COT,  $C_{mic}$ , RBM, CSA,  $\beta$ -glucosidase, Fosfatase, GFE, GDE, GT, C-FLL e C-FP) foram geradas duas componentes principais (Fator 1 e Fator 2). A partir da relação entre esses componentes foi formado um diagrama de projeção de vetores, para os atributos do solo que mais influenciaram na distinção dos dois sistemas de uso da terra. Desta forma, empregou-se a Análise de Componentes Principais (ACP), para distinção dos ambientes em função do grau de degradação, utilizando o programa estatístico XLSTAT 2019. 1.2.

### 3.3 Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS)

Esse estudo teve como objetivo principal a avaliação do poder de predição da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIRS) na quantificação do carbono da biomassa microbiana do solo sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar.

#### 3.3.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em três áreas distintas de ecossistema florestal de Mata Atlântica e de agroecossistemas de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 1). Os solos das áreas foram classificados como Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho

Amarelo Distrófico e Argissolo Franco Argilo Arenoso, respectivamente (EMBRAPA, 2013). O histórico das áreas estudadas está descrito no tópico 3.1.1.

### 3.3.2 Amostragem do solo

Nas três áreas estudadas a amostragem do solo foi realizada no mês de junho de 2016, independente do tempo de colheita da cana. Para a área localizada na Usina de São José também foram realizadas amostragens de solo no mês de junho nos anos de 2017 e 2018. Em cada área foram coletadas seis amostras (compostas por três subamostras) de solo, de forma aleatória, com pontos a cada dois metros, a uma profundidade de 0 a 20 cm. O total de amostras de solo coletadas foi de 60 (30 amostras de solo coletadas sob vegetação nativa e 30 amostras de solo coletadas sob cultivo de cana-de-açúcar).

Foram nomeadamente às amostras de solo como vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e áreas sob cultivo de cana-de-açúcar (CA). A área sob VN foi usada como referência para a condição inicial do solo antes de ser convertido em agricultura. As áreas sob CA foram localizadas contíguas à VN. Todas essas áreas apresentaram condições climáticas, tipos de solo, topografias e altitudes semelhantes.

Para análise microbiológica as amostras de solo foram acondicionadas em sacos de polietileno devidamente vedados, colocadas em caixas térmicas e transportadas para o laboratório, onde foram mantidas a 4 °C até o momento das análises (período máximo de armazenamento de 3 meses). Para a caracterização física e química, parte das amostras de solo foi seca ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm (TFSA).

### 3.3.3 Atributos físicos e químicos do solo

A caracterização química e física das amostras de solo (Tabela 3) foi realizada, de acordo com a metodologia proposta pela Embrapa (1997): pH do solo foi determinado em água (1:2,5), o P do solo por colorimetria (Mehlich<sup>-1</sup>), o Na<sup>+</sup> por fotometria de chama (EMBRAPA, 1999). A textura e a densidade aparente do solo foram determinadas de acordo com a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997).

Tabela 3 – Atributos químicos e físicos de áreas sob Argissolo Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e um Argissolo Franco Argilo Arenoso sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco

Atributos	Ambiente					
	Área 1		Área 2		Área 3	
	Mata	Cana	Mata	Cana	Mata	Cana
pH	4,8	6	4,9	5,5	4,7	5,9
P (mg.dm <sup>-1</sup> )	1	4	3	3,3	2,8	5,6
Ca (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,2	1,4	3	3,7	1,1	2,4
Mg (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,4	0,6	0,9	0,7	0,8	1
Na (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,04	0,04	0,1	0,04	0,05	0,04
K (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,05	0,16	0,1	0,1	0,06	0,35
Al (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	0,9	0	1	0,3	0,8	0,1
CTC (cmolc.dm <sup>-1</sup> )	6,6	6,1	16,5	12,6	9,2	7,2
Ds (g.cm <sup>-1</sup> )	1,2	1,3	1,3	1,4	1,3	1,4
Areia grossa (%)	51	52,6	46,7	44,7	42,8	42,5
Areia fina (%)	21,6	23,3	19	20,7	25,4	26,8
Silte (%)	4,3	2,3	16	11,7	8,5	7,6
Argila (%)	23	21,6	18,3	23	23,3	23

Fonte: A Autora (2021).

\*P. fósforo; Ca. Cálcio; Mg. Magnésio; Na. Sódio; K. potássio; Al. Alumínio; CTC. Capacidade de troca catiônica; Ds. Densidade do solo.

### 3.3.4 Métodos de referência para o estudo de previsão

O carbono orgânico do solo (COT) foi determinado por oxidação úmida com dicromato de potássio seguido de titulação do dicromato remanescente com sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS; BREMNER, 1988) adaptado por Mendonça & Matos, (2005). O carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ) foi determinado pelo método de irradiação e extraído adicionando-se 25 mL de sulfato de potássio 0,5 Mol L<sup>-1</sup> para 10 g de cada amostra de solo (Mendonça; Matos, 2005). O teor de carbono nos extratos foi determinado utilizando-se o método colorimétrico (BARTLETT; ROSS, 1988).

As atividades enzimáticas microbianas no solo associadas ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glucosidase) e do fósforo (fosfatase ácida) foram determinadas pelos métodos descritos por Tabatabai & Bremner (1982) e Eivazi & Tabatabai (1988). Os métodos baseiam-se na determinação colorimétrica do *p*-nitrophenol formado após uma hora de incubação do solo com o substrato específico, a 37 °C. A atividade enzimática foi expressa em  $\mu$ g *p*-nitrophenol liberado por grama de solo seco por hora. Para cada amostra de solo foram efetuadas três repetições analíticas em laboratório.

As proteínas do solo relacionadas à glomalina foram quantificadas pelo método descrito por Wright & Upadhyaya (1998). Para a quantificação do teor de glomalina facilmente extraível (GFE) 0,25 g de solo foram autoclavados por 30 minutos a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (20 mM; pH 7) e em seguida centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. Para a

quantificação do teor de glomalina dificilmente extraível (GDE) os resíduos de solo remanescentes da primeira etapa de extração foram autoclavados por 1 hora a 121 °C com 2 mL de citrato de sódio (50 mM; pH 7) e centrifugados a 10.000 rpm, durante 5 minutos. As quantificações dos sobrenadantes foram feitas segundo o método descrito por Bradford (1976), utilizando como padrão albumina bovina sérica. Os valores para a glomalina total (GT) foram obtidos através da soma dos teores de glomalina facilmente e dificilmente extraíveis.

### 3.3.5 Espectroscopia de infravermelho

Para a obtenção dos espectros de solos, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm (TFSA) e analisadas na janela espectral de 10000 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com resolução de 16  $\text{cm}^{-1}$ , com acumulação de 32 varreduras. Para as análises, cada amostra foi separada em cinco partes e analisadas separadamente (quintuplicata). As análises foram realizadas no espectrômetro de infravermelho próximo da marca Perkin-Elmer, modelo Spectrum 100, pertencente à Embrapa Instrumentação.

### 3.3.6 Análises estatísticas

Os dados de quantificação das variáveis analisadas foram submetidos à análise de correlação utilizando o software XLSTAT 2019. 1.2. A análise estatística para o estudo de previsão fez-se a soma dos espectros das cinco replicatas e obtenção dos espectros médios, que foram utilizados nas análises. Foram utilizados os espectros sem tratamento e com uso de primeira derivada e centrados na média. Para a obtenção dos modelos de regressão, utilizou-se sempre a primeira derivada dos espectros e os resultados centrados na média. Como o número de amostras é pequeno, trabalhou-se com método de validação cruzada, utilizando 59 segmentos. O número de fatores dependeu da variável analisada e ficou entre 4 e 5. O algoritmo utilizado foi o NIPALS do software The Unscrambler X 10.1. Todos os pontos do espectro foram considerados na elaboração das regressões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da tese serão apresentados em estudos distribuídos da seguinte forma: (1) Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar; (2) Avaliação do comportamento, em três anos distintos, da atividade biológica e das frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar; (3) Avaliação do poder de predição da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (NIRS) na quantificação do carbono da biomassa microbiana do solo sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar.

### 4.1 Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar

As concentrações do COT, das variáveis relacionadas à microbiologia do solo e das frações do CO no solo foram significativamente maiores em áreas sob VN que nas áreas sob CA (Tabela 4). Foi observado uma variação percentual de redução de 27,5 % na concentração do COT em áreas sob CA em relação às áreas sob vegetação nativa. Para as variáveis atreladas às frações de carbono no solo foi observado redução de 47 % do carbono presente na fração leve livre (C-FLL) e de 22 % do carbono presente na fração pesada (C-FP), nas áreas sob CA em relação à VN. Isso sugere que o simples fato das áreas sob vegetação nativa tenderem a sofrer menores perturbações, assim como, maiores incorporações de material orgânico sob o solo faz com que sejam observadas maiores concentrações tanto do COT como das suas diferentes frações, com relação às áreas sob CA. Essas maiores concentrações de carbono refletirão diretamente na biodisponibilidade de nutrientes para a manutenção da atividade biológica no solo.

Souza et al., 2012 também observaram maiores concentrações de COT em áreas sob VN. Os autores relataram que as concentrações de COT nas áreas sob VN foram 2,5 vezes maiores que em áreas sob CA. Perdas nas concentrações de C também foram observadas por Galdos; Cerri; Cerri, 2009, onde relataram diminuição na concentração de COT em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar em relação a áreas florestadas, na camada superficial do solo. Considerando os valores médios nas lavouras de cana-de-açúcar, os autores relataram que a concentração de C foi 36 % menor que em área de mata nativa.

Quando observado as proporções de cada fração do carbono (C-FLL e C-FP) com relação ao COT, as áreas sob VN apresentaram resultados significativamente diferentes às áreas

sob CA. Nas áreas sob cultivo de cana-de-açúcar a maior proporção do COT (83 %) foi do C-FP (fração recalcitrante), enquanto que para as áreas sob vegetação nativa essa proporção foi de 77 %. Com relação ao C de fácil e intermediária mineralização (C-FLL) foi verificado que 22 % do COT estava presente na FLL para a área sob VN e 16 % para as áreas sob CA. Tais resultados podem indicar que o manejo aplicado na área sob cultivo de cana resulta em uma menor disponibilidade de C mineralizável e de fácil decomposição no solo. O que deriva na liberação lenta de nutrientes e consequentemente em menores taxas de decomposição dos resíduos orgânicos presentes no solo (LOSS et al., 2009).

Tabela 4 – Valores médios para as variáveis estudadas em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.

Variáveis	Usos da terra		
	VN	CA	<i>p</i>
COT (g.Kg <sup>-1</sup> solo)	32,7 a	23,7 b	<i>p</i> <,0001
C-FLL (g.Kg <sup>-1</sup> )	7,2 a	3,8 b	<i>p</i> <,0001
C-FP (g.Kg <sup>-1</sup> )	25,4 a	19,9 b	<i>p</i> <,0001
Cmic (µg.g <sup>-1</sup> solo)	454,0 a	293,5 b	<i>p</i> <,0001
RBM (µg.g <sup>-1</sup> solo)	225,5 a	96,4 b	<i>p</i> <,0001
CSA (µg.g <sup>-1</sup> solo)	264,3 a	117,3 b	<i>p</i> <,0001
β-glucosidase (µg g <sup>-1</sup> dwt h <sup>-1</sup> )	81,8 a	61,7 b	<i>p</i> =,0013
Fosfatase (µg g <sup>-1</sup> dwt h <sup>-1</sup> )	168,2 a	136,2 b	<i>p</i> <,0001
GFE (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,08 a	0,04 b	<i>p</i> <,0001
GDE (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,04 a	0,03 b	<i>p</i> =,0001
GT (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,13 a	0,08 b	<i>p</i> <,0001
qMIC	1,44 a	1,23 a	<i>p</i> =,2269
qCO <sub>2</sub>	0,64 a	0,73 a	<i>p</i> =,6894

Fonte: A Autora (2021).

*Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem estatisticamente entre si.* Valores de (*p*). COT. carbono orgânico total; Cmic. carbono da biomassa microbiana; RBM. respiração basal microbiana; CSA. carbono solúvel em água; GFE. glomalina facilmente extraível; GDE. glomalina dificilmente extraível; GT. glomalina total; C-FLL. carbono da fração leve livre; C-FP. carbono da fração pesada; qMIC. quociente microbiano; qCO<sub>2</sub>. quociente metabólico; TRM. taxa relativa de mineralização.

Em relação às variáveis microbiológicas do solo, foi observada diferença significativa para o C<sub>mic</sub> entre os dois usos da terra, VN e CA. As áreas sob CA apresentaram perda de 64 %, dos teores do C<sub>mic</sub>, em referência às áreas sob VN. As maiores concentrações encontradas, em área sob VN, para o carbono microbiano refletem possivelmente uma melhor condição ambiental para o desenvolvimento da população microbiana. Assim, pode-se deduzir que sistemas cultivados geralmente exibem níveis mais baixos de C<sub>mic</sub> que os solos sob vegetação nativa. Enquanto que, sob a vegetação nativa, os resíduos vegetais abundantes fornecem um substrato heterogêneo para que os microrganismos do solo acumulem biomassa rapidamente através da decomposição (GAO et al., 2020; SOUZA et al., 2012). Fierer, 2017 relataram de forma similar ao resultado observado no presente trabalho o papel crucial na ciclagem de

nutrientes, na manutenção da fertilidade e no sequestro de carbono do solo pela biomassa microbiana presente no solo. Os autores ainda ressaltam variações e condições distintas no solo a depender do uso e manejo. Ou seja, com a modificação do sistema, através de mudanças no uso e/ou ecossistema, as condições ambientais podem variar consideravelmente entre os distintos habitats microbianos encontrados no solo.

Com relação à atividade microbiana e fração de material prontamente disponível no solo, foi observada uma perda de 43 % da RBM e de 44 % do CSA, entre os dois sistemas de uso da terra, VN e CA. Tais efeitos observados refletem diretamente na variação de deposição do material orgânico sob solo entre os sistemas de uso da terra. Onde, pode-se observar que em áreas sob CA a atividade microbiana e o fornecimento de material orgânico solúvel são limitados pela disponibilidade de substratos disponíveis no ambiente. Resultados semelhantes foram observados por Novak et al., 2017 onde observaram perda de 79,5 % na RBM em solos sob CA, em relação a solos sob VN. Singh et al., 2020 observaram perdas de 15 % na RBM entre áreas sob VN e áreas agricultáveis. Diante do exposto pode-se deduzir que as maiores concentrações observadas para a RBM e CSA sob vegetação nativa podem ser atribuídas à quantidade e qualidade relativamente alta de resíduos vegetais incorporados ao solo, o que proporciona maiores atividade microbiana devido à disponibilidade de fontes de carbono acima e abaixo do solo (ARAÚJO et al., 2013). Com isso, reservatórios sensíveis são gerados, CSA, onde são compostos principalmente pela matéria orgânica dissolvida e prontamente assimilável.

Com relação às atividades enzimáticas no solo foram observadas perdas de 24 % da atividade da  $\beta$ -glucosidase e de 19 % da atividade da fosfatase em solos sob CA, em comparação as áreas sob VN. De forma geral, as enzimas extracelulares atuam como catalisadores na decomposição de resíduos orgânicos no solo, portanto, agem de forma direta na liberação de nutrientes específicos a serem assimilados pela própria biomassa microbiana ou pelos vegetais. Tais resultados observados refletem possivelmente o efeito adverso da baixa concentração de substrato orgânico sob no solo em áreas sob cultivo de cana. Resultados similares foram observados por Singh et al., 2020, onde observaram declínio de 13 % na atividade da  $\beta$ -glucosidase em áreas agricultáveis, em relação a áreas nativas. Evangelista et al., 2012 também observaram padrão similar ao presente estudo, relatando que houve perdas significativas nas concentrações da atividade da  $\beta$ -glucosidase e fosfatase em áreas sob cultivo de CA em relação às áreas remanescentes de Cerrado.

As concentrações das frações de proteínas relacionadas à glomalina no solo observadas apresentaram padrão significativamente diferente entre os sistemas de uso da terra. Foi observada perda de 50 % na GFE e de 75 % na GDE. Tais diferenças representaram uma perda

de 61 % nas concentrações de GT. Singh; Rai; Singh, 2016 observaram que fatores envolvidos no acúmulo de COT no solo estimulam simultaneamente o enriquecimento de proteínas relacionadas à glomalina. Os autores observaram um aumento de até 17 % das proteínas relacionadas à glomalina em áreas preservadas, sugerindo o importante papel desta rede proteica no acúmulo e estabilização do carbono orgânico no solo. Silva et al., 2016 relataram um aumento de 128 a 201 % na fração GFE em áreas florestadas em comparação a áreas agricultáveis. Sendo assim, pode-se deduzir que a fração relacionada à glomalina no solo é sensível aos diferentes usos da terra, assim como, sensível a quantidade e qualidade do material orgânico depositado ao solo. Portanto, características como, sistema de uso do solo, práticas de manejo, presença e tipo de vegetação sob o solo podem influenciar na proporção de proteínas relacionadas à glomalina quantificadas (LÓPEZ-MERINO et al., 2015; LOZANO et al., 2016; SINGH; RAI; SINGH, 2016).

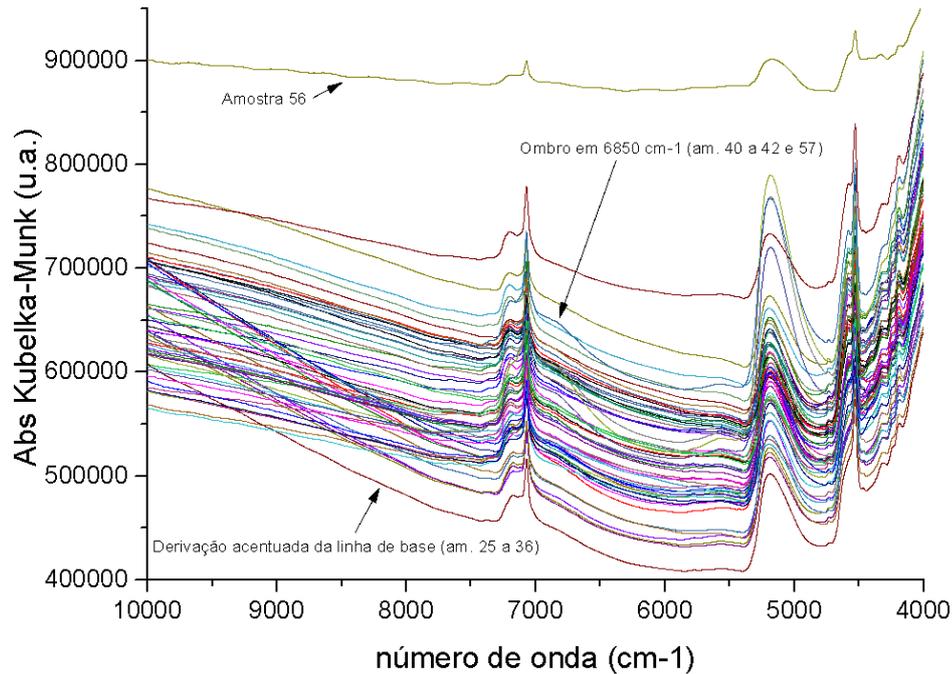
#### *Análise descritiva dos dados espectrais do solo*

Ao serem analisadas as amostras de solo, de forma independente, foi possível observar que algumas amostras avaliadas pelos espectros médios de NIRS apresentaram características espectrais distintas (Figura 4). A primeira é a amostra intitulada pelo n° 56 (relacionada ao uso CA, inserida nas amostras da Área 1) onde apresentou comportamento muito distinto aos demais, com linha de base que praticamente saturava o sinal e proporcionou baixa sensibilidade nos comportamentos espectrais que se pretendia observar. Todas as replicatas da amostra de solo foram muito similares e após repetição, não foi observada diferença nos sinais.

Outros comportamentos distintos foram observados no conjunto de amostras intituladas pelos n° 25 a 36. Tal conjunto é compreendido pelas amostras de solo de uma única área, Área 2, e estão inseridas tanto em áreas de CA como VN. As amostras de solo possuíam uma derivação de linha de base, principalmente entre as regiões entre 10000 e 6000  $\text{cm}^{-1}$ , provavelmente por alguma constituição mineral característica da região.

Também foi bastante nítido o ombro espectral observado na região de 6850  $\text{cm}^{-1}$ , nas amostras de solo nomeadas pelos n° 40 a 42 (amostras coletadas sob VN, inseridas na Área 3) e 57 (amostras coletadas sob CA, inseridas na Área 1). Tal sinal espectral observado é proveniente principalmente das vibrações de estiramento das ligações O-H, N-H e C-H. As bandas em torno de 7.000  $\text{cm}^{-1}$  em geral são resultantes dos estiramentos de hidroxilas, o que pode indicar a presença de fenóis, álcoois e hidróxidos de alumínio; estes últimos compõem argilominerais, como caulinita e montmorilonita. Estiramentos da ligação N-H, que compõe ureia e proteínas, também foram observados nessa região (FERRARESI et al., 2012a, 2012b).

Figura 4 – Assinaturas espectrais médias de NIRS para todas as amostras de solo analisadas nas áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A Autora (2021).

Os padrões espectrais observados demonstram provavelmente singularidades individuais das amostras de solo, como também particularidades ambientais e/ou manejo de uma área. Dalmolin et al., 2005 relataram que o comportamento espectral do solo é diretamente dependente de suas características físicas, químicas e biológicas. Portanto, o padrão espectroscópico obtido nas amostras de solo pode estar correlacionado as características similares perante a natureza química e/ou funcionalidades análogas entre as amostras de solo.

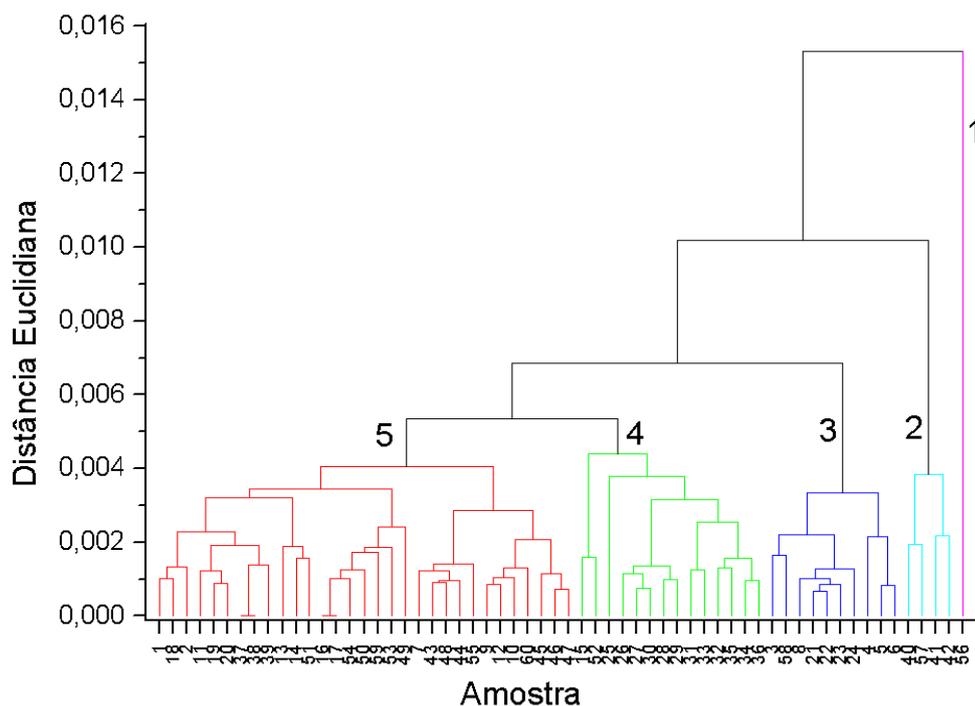
Na análise hierárquica de agrupamentos (HCA) pôde-se observar qualitativamente, as similaridades e diferenças entre as amostras de solo segundo suas características, no caso, espectrais (Figura 5). Para a análise de HCA, todos os pontos espectrais foram considerados como uma variável. Para todas as análises, foi utilizada a 1ª derivada dos espectros. Na HCA foi observada a formação de cinco grupos distintos, onde todos os grupos formados corresponderam ao padrão espectral observado.

O primeiro agrupamento foi composto apenas pela amostra denominada pelo nº 56, o mais separado de todos os demais. Já esperado em função do resultado espectral apresentado na figura 4. O segundo agrupamento foi constituído pelas amostras intituladas do nº 40, 41, 42 e 57. As amostras de solo denominadas pelo nº 40 a 42 estão inseridas em áreas sob VN coletadas na Área 3 e a amostra nomeada pelo nº 57 está inserida sob CA localizada na Área 1.

O terceiro agrupamento foi composto pelas amostras intituladas pela numeração 3, 4, 5, 6, 8, 21, 22, 23, 24 e 58. Todas as amostras do terceiro grupo foram coletadas em áreas sob CA na Área 1.

O quarto agrupamento foi formado pelas amostras denominadas pelas numerações 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36, além das amostras intituladas pelos n° 15 e 52, que apesar de fazerem parte deste agrupamento, são as que possuem maior distância euclidiana das outras. Todas as amostras de solo representadas no quarto grupo foram coletadas na Área 2 e estão tanto sob cultivo de CA como sob VN. Entretanto, as amostras 15 e 52 são amostras coletadas sob VN, na Área 1. O quinto agrupamento foi composto pelas demais amostras de solo.

Figura 5 – Dendograma da análise hierárquica de agrupamentos (HCA) obtido dos espectros de todas as amostras de solo analisadas nas áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A Autora (2021).

Ao serem analisados os agrupamentos formados na análise por HCA foi observado que as amostras inseridas em áreas de Usina de cana-de-açúcar, independentemente se foram coletadas sob campos nativos ou sob cultivo de cana-de-açúcar, apresentaram semelhanças espectrais e qualitativas, grupo 2 e 3. Tal resultado demonstra as possíveis modificações

ambientais ao longo do tempo nessas localidades, o que pode explicar a posteriori as paridades espectrais.

Já no grupo 4 pôde-se avaliar a semelhança quanto a qualidade das amostras de solo, independentemente do uso da terra, coletadas na Instituição Experimental Agronômica (IPA, intitulada como Área 2) e algumas amostras de solo coletadas sob VN da Área 1 (Usina de cana-de-açúcar). Desta forma, considerando como fator determinante a formação de grupos através das paridades espectrais pode-se deduzir que independente se o solo está sob CA ou VN a área experimental comporta-se qualitativamente próxima ao campo nativo estudado na Área 1, protegido por Lei desde 1987.

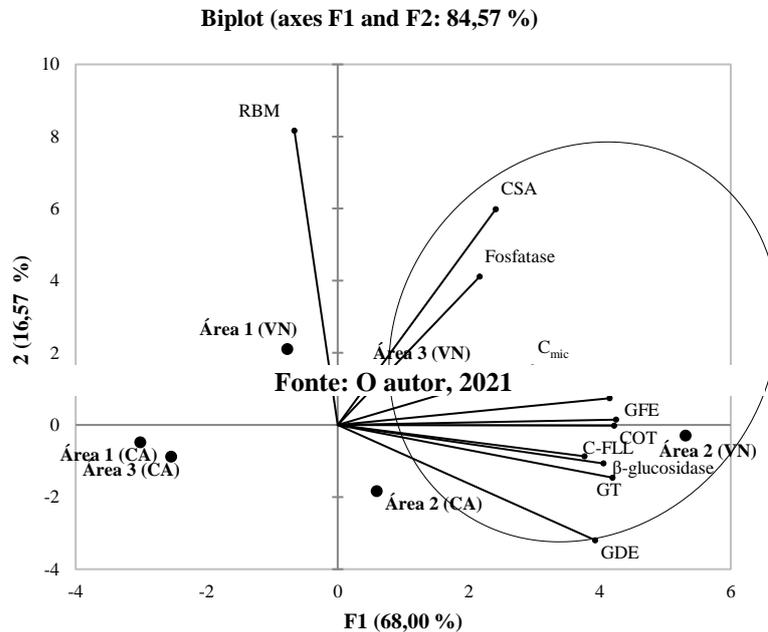
#### *Análise dos componentes principais*

A análise de componentes principais forneceu uma melhor imagem do grupamento das variáveis, tanto em relação às três diferentes áreas estudadas como também aos dois usos da terra (VN e CA). Foram geradas duas componentes principais (Fator 1 e Fator 2), com relação as variáveis estudadas (COT,  $C_{mic}$ , RBM, CSA,  $\beta$ -glucosidase, Fosfatase, GFE, GDE, GT, C-FLL e C-FP) (Figura 6).

Foi observado que as duas componentes principais explicaram 84,57 % da variação total dos atributos avaliados com relação às áreas e aos usos da terra, VN e CA. O Fator 1, gerado para a maior parte das variáveis (COT,  $C_{mic}$ ,  $\beta$ -glucosidase, Fosfatase, GFE, GDE, GT, C-FLL e C-FP) explicou 68 % da variação total dos dados e demonstrou altos coeficientes de correlação entre as variáveis e o fator ( $r \geq 0,507$  a  $\geq 0,995$ ). O Fator 2, gerado para a menor parte das variáveis (RBM e CSA) explicou 16,57 % da variação total dos dados e demonstrou coeficientes de correlação significativos entre as variáveis e o fator ( $r \geq 0,942$  e  $\geq 0,691$ , respectivamente).

Também foram observados coeficientes de correlação entre as áreas de estudo (Área 1, 2 e 3) e os fatores da análise de componentes principais. Os campos sob CA pertencentes à Área 1, os campos sob VN pertencentes a Área 2 e os campos sob CA pertencentes a Área 3 demonstraram altos coeficientes de correlação entre as variáveis e o Fator 1 ( $r \geq 0,798$  a  $\geq 0,972$ ). O Fator 2, gerado para a menor parte das áreas, campos sob VN pertencentes a Área 1 e campos sob CA pertencentes a Área 2, demonstrou coeficientes de correlação significativos entre as variáveis e o fator ( $r \geq 0,635$  e  $\geq 0,639$ , respectivamente).

Figura 6 – Diagrama de projeção dos vetores dos atributos avaliados para as áreas sob Argissolo Amarelo (Área 1), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Área 2) e Argissolo Franco Argilo Arenoso (Área 3), em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A autora (2021).

A partir da análise de componentes principais ficou evidenciado que a alta correlação das variáveis ao Fator 1 está relacionado possivelmente a maiores níveis de atividade biológica o que pode ser provido de sistemas com maiores fontes prontamente disponíveis de nutrientes, além do maior aporte de material orgânico proveniente das áreas nativas bem como, da deposição e lenta decomposição da serrapilheira sobre o solo. Outro ponto a ser ressaltado é a relação entre os elementos avaliados quantitativamente e suas relações com as áreas de estudo, o que reforça as observações no estudo de HCA. Pôde-se observar que as variáveis quantitativas estudadas refletiram em uma íntima relação com as áreas sob VN e CA da unidade experimental IPA e campo sob VN em área de Usina de cana. Assim, pode-se ressaltar que mesmo estando sob cultivo de cana-de-açúcar essas unidades apresentam características similares com áreas remanescentes de Mata Atlântica, diferenciando-se tanto nas análises espectroscópicas quanto nas análises de HCA e PCA.

Similarmente aos resultados encontrados Singh; Rai; Singh, 2016 observaram relação entre variáveis como, COT e teores de proteínas ligadas à glomalina a áreas pouco perturbadas ambientalmente e com contínuo incremento de matéria orgânica sob o solo. Assunção et al., 2019 identificaram uma íntima relação entre áreas sob vegetação nativa com as formas de

carbono lábio, assim como as frações densimétricas do solo. Graham; Haynes, 2006 observaram através da análise de PCA uma separação dos perfis de resposta catabólica a diferença no conteúdo de C nas diferentes áreas. Onde, áreas nativas que apresentam maiores conteúdos de C no solo estão intimamente ligadas a uma maior atividade microbiana.

Sendo assim, através dos padrões encontrados, no presente estudo, pelas análises de PCA e HCA fica evidente que áreas que proporcionam acúmulo de matéria orgânica aumentam consequentemente a diversidade catabólica no solo em relação a áreas que causaram o esgotamento da matéria orgânica. Tal esgotamento da matéria orgânica é resultado característico da perda preferencial de frações prontamente decomponíveis, como também de frações mais recalcitrantes.

#### **4.2 Estudo 2: Avaliação do comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar**

##### *Dinâmica comportamental entre os dois diferentes usos da terra nas frações do COT no solo*

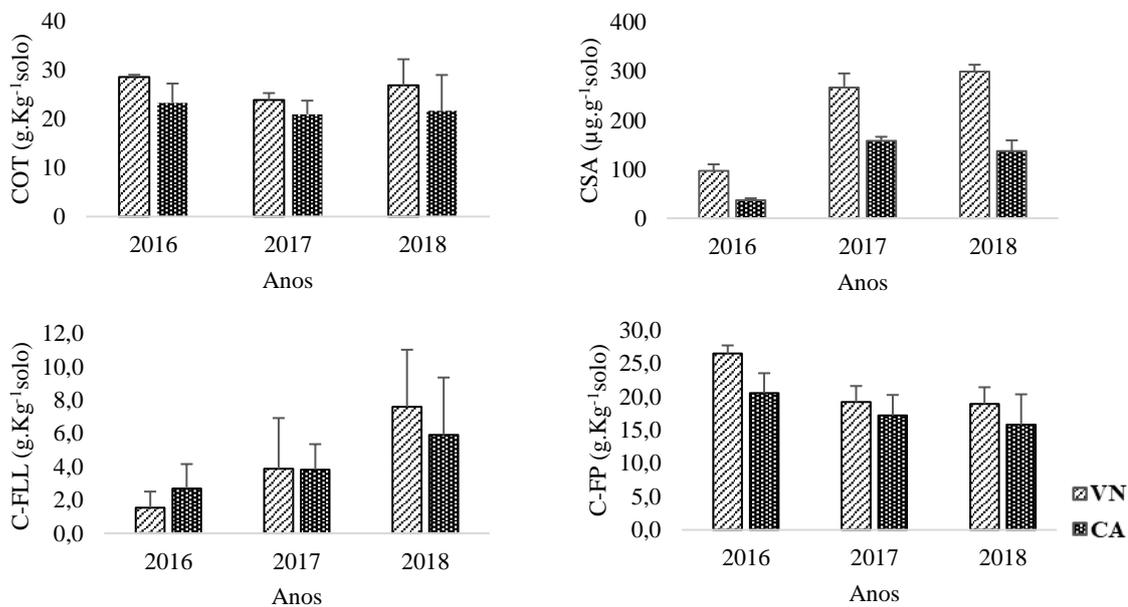
Foram observadas diferenças significativas entre os sistemas sob VN e CA com relação ao COT e as frações de carbono presentes no solo (Figura 7). Foi observada perda de 17 % do teor de COT e 19 % do carbono presente na fração pesada (C-FP), entre as áreas sob os diferentes sistemas de uso da terra, VN e CA. Também foram observadas, em relação aos três anos de coleta, flutuações no conteúdo das variáveis ligadas ao CO no solo (Figura 7). Essa dinâmica refletiu em uma diferença de 17, 11 e 20 % nos teores de COT entre os sistemas sob VN e CA, para os anos de 2016, 2017 e 2018, respectivamente. Para o carbono presente na fração pesada foram observadas diferenças entre os sistemas de 24, 14 e 18 %, nos anos de 2016, 2017 e 2018. Os maiores conteúdos de COT e C-FP no solo para a área sob vegetação nativa retratam diretamente a adição de material orgânico provido da contínua produção de resíduos vegetais e animais, assim como exsudados radiculares depositados sob o solo.

Desta forma, pode-se deduzir que com a conversão de área sob vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar, a longo prazo, há redução substancial no conteúdo de COT e de carbono presente em frações mais recalcitrantes, como o C-FP. Os resultados denotam que as frações orgânicas ligadas ao carbono são importantes impulsionadores na dinâmica da MOS. Assim, o entendimento da mudança nas propriedades orgânicas do solo em áreas sob sistemas distintos como, áreas nativas de floresta e campos agricultáveis podem fornecer uma nova visão

para a compreensão dos processos de biogeoquímicos em relação a variações sazonais e de manejo (ARAÚJO et al., 2013; PAUL, 2016; SINGH et al., 2020).

Resultados semelhantes foram observados por Souza et al., 2012, que relataram teores de COT sob VN superiores ao de cana queima em 148 %. Enquanto que, para o C presente na fração recalcitrante (C-FP), os autores relataram um decréscimo significativo de aproximadamente 83 % para as áreas de cana queima com relação à área sob VN. Galdos; Cerri; Cerri, 2009 observaram um decréscimo de 36 % no teor de COT para áreas sob cana-de-açúcar manejadas com queima em relação à área sob vegetação nativa.

Figura 7 – Dinâmica temporal do carbono orgânico do solo e suas frações avaliados nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



\*COT. carbono orgânico do solo; CSA. carbono solúvel em água; C-FLL. carbono da fração leve livre; C-FP. carbono da fração pesada.

Fonte: A Autora (2021).

Em relação ao CSA observou-se uma perda de 50 % do teor entre as áreas de VN e CA. Quando observado ano a ano, essa variação foi de 40, 60 e 50 % para os anos de 2016, 2017 e 2018, nas áreas de CA com relação à VN. Sendo assim, a fração do carbono solúvel em água refletiu como sendo um dos indicadores mais sensíveis a mudanças nos compartimentos de C lábil do solo. Portanto, frações ligadas ao CO que são extremamente lábeis, como o CSA, são indicadores diretos da quantidade de substrato de C disponível no solo, assim como do manejo aplicado à cultura (UCHIDA; NISHIMURA; AKIYAMA, 2012; WANG et al., 2020). Também foi observada tendência comportamental semelhante entre o CSA e RBM

(aumento do conteúdo em 2017), essa tendência foi notada para as duas áreas de estudo, VN e CA. Tal resultado permite que sejam ressaltadas relações entre a degradação da MOS pela microbiota e a disponibilidade de substrato assimilável no solo. Portanto, maiores taxas de C emitido através da respiração microbiana correlacionam-se diretamente em maiores disponibilidades de substratos prontamente disponíveis ao solo. Uchida; Nishimura; Akiyama, 2012 relataram tendência semelhante, onde observaram correlação positiva entre as variáveis CSA e RBM.

*Dinâmica comportamental dos variáveis microbianas do solo em áreas sob Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar*

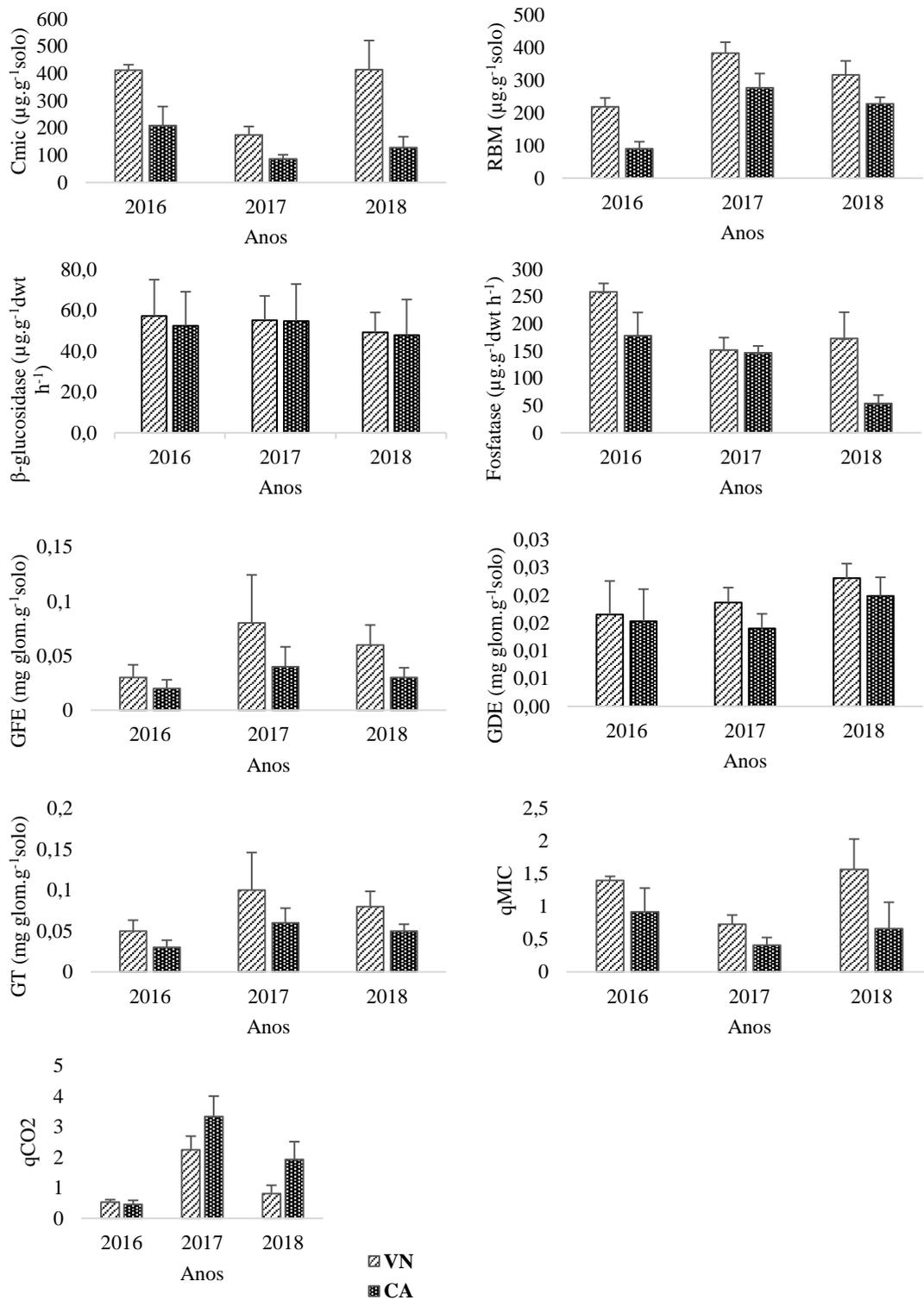
Foram observadas diferenças significativas entre os sistemas VN e CA com relação às variáveis microbiológicas estudadas (Figura 8). Essas diferenças refletiram uma variação de 57 % do  $C_{mic}$ , 35 % da RBM e atividade enzimática da fosfatase, 45 % da GFE, 15 % da GDE, 37 % da GT e 47 % do  $q_{mic}$  na área sob VN com relação a área sob cultivo de cana-de-açúcar. Em relação ao conteúdo de  $C_{mic}$ , foi observada perda significativa de 50 e 70 % nos solos cultivados sob cana-de-açúcar em referência aos solos sob VN, para os anos de 2016/2017 e 2018, respectivamente. Com relação à RBM a área cultivada com CA apresentou uma perda de 58 % em relação à VN, para o ano de 2016. Enquanto que, para os anos de 2017 e 2018 as perdas focaram em torno de 28 %. A atividade enzimática da fosfatase apresentou um percentual de diferença entre os sistemas de uso da terra em 31, 3 e 69 %, para os anos de 2016, 2017 e 2018.

Também foram observadas diferenças no conteúdo das proteínas ligadas à glomalina do solo. Essas diferenças foram de 33 % para o ano de 2016 e de 50 % para os anos de 2017/18 entre os sistemas de uso da terra, com relação à GFE. A GDE apresentou um percentual de diferença entre os sistemas sob VN e CA de 50 %, apenas para o ano de 2018. Em relação ao conteúdo de glomalina total a área sob VN apresentou maiores valores, representando um percentual de variação à área sob cultivo de cana de 40 % nos anos de 2016/17 e de 37 % para o ano de 2018. Também foram observadas diferenças no quociente microbiano. No ano de 2016 foi observada uma variação de 36 %, entre VN e CA. Para os anos de 2017 e 2018 as variações entre as áreas de cultivo refletiram um percentual de diferença de 44 e 58 %, respectivamente.

As perdas percentuais relatadas, através das quantificações das variáveis microbiológicas, no presente estudo estão intimamente correlacionadas a maior deposição e disposição de MO em áreas florestadas. Em áreas nativas há o maior acúmulo de COT nas camadas superficiais do solo quando comparado à área manejada. Portanto, o contínuo

incremento de substrato orgânico à decomposição contribui diretamente no impulsionamento e regulação da atividade microbiológica no solo. Similarmente aos resultados observados ASSUNÇÃO et al., 2019 ressaltaram que áreas sob vegetação nativa apresentaram maiores teores de C em camadas superficiais do solo em relação às áreas manejadas. Os autores também relataram que os maiores teores de C observados favoreceram na formação de material orgânico lábil e em maiores proporções de biomassa microbiana no solo. Singh; Rai; Singh, 2016 observaram correlação linear entre facões de COT, proteínas ligadas à glomalina e atividade microbiana no solo. Tais resultados indicaram que fatores envolvidos no acúmulo de carbono orgânico no solo estimulam simultaneamente o enriquecimento da fração microbiológica no solo. Fontúrbel et al., 2012 quantificaram maiores teores do  $C_{mic}$ , RBM e atividade enzimática no solo em áreas nativas em relação a solos manejados.

Figura 8 – Atributos microbianos de áreas sob Latossolo Amarelo nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A Autora (2021).

\*C<sub>mic</sub>. carbono da biomassa microbiana; RBM. respiração basal microbiana; GFE. proteínas relacionadas à glomalina facilmente extraível; GDE. proteínas relacionadas à glomalina dificilmente extraível; GT. proteínas relacionadas à glomalina total; qMIC. quociente microbiano; qCO<sub>2</sub>. quociente metabólico.

Com relação aos anos de coleta, as variáveis microbiológicas avaliadas apresentaram flutuações comportamentais similares entre os dois usos da terra. Através da disposição do gráfico (Figura 8) foi observada a formação de dois grupos comportamentais, os quais foram diferenciados através da observação de aumento e diminuição dos teores, em cada variável, ano a ano. O primeiro grupo foi composto pela RBM, GFE, GT e  $qCO_2$ , onde foi possível observar aumento dos conteúdos dessas variáveis no ano de 2017. O segundo grupo, composto pelo  $C_{mic}$ , atividade enzimática da fosfatase e  $qMic$ , apresentou dinâmica de diminuição dos teores no ano de 2017.

Os picos observados no ano de 2017 nas variáveis RBM, GFE e GT estão possivelmente relacionados à condição de grande umidade do solo, proporcionada pelo período chuvoso na época de coleta, o que favorece a manutenção da atividade microbiana e consequentemente à mineralização da MOS. Outro fator observado foi a relação de aumento das quantificações das variáveis (RBM, GFE e GT) à diminuição dos teores do COT e C-FP no ano de 2017. Tal resultado ressalva as fontes de nutrientes providas das diversas frações do CO do solo como mananciais diretos de alimento aos microrganismos.

Semelhantemente aos resultados encontrados Fokom et al., 2012 observaram diminuições substanciais nos teores da atividade microbiana e das frações relacionadas à glomalina no solo (GFE e GT) em áreas manejadas em referência a áreas florestadas. Foi observada uma correlação positiva entre o C no solo à GFE e GT, o que sugere a íntima relação da glomalina aos estoques de carbono no solo. Os autores também observaram correlação direta entre as frações de glomalina a atributos que estimulam a mineralização da MOS, como por exemplo a RBM.

Com relação ao padrão comportamental observado para o  $C_{mic}$  e atividade enzimática da fosfatase pode-se destacar a íntima relação entre a biodisponibilidade de material orgânico sob o solo e os princípios ecológicos que moldam a composição da comunidade microbiana. Ou seja, o fato do conteúdo da biomassa microbiana do solo normalmente ser refletido pelo conteúdo de MOS, leva a conclusão que a quantidade de biomassa microbiana provavelmente media os efeitos na produção de enzimas no solo. Sendo assim, pode-se afirmar que a variabilidade espacial no teor de carbono orgânico e suas distintas frações podem estar intimamente correlacionadas a diferentes respostas nos padrões comportamentais da microbiologia do solo.

Baldrian et al., 2010 observaram que a atividade da fosfatase ácida mostrou-se intimamente correlacionada aos conteúdos de biomassa microbiana no solo. Singh et al., 2020 relataram maiores teores de  $C_{mic}$  e atividade enzimática da fosfatase em áreas florestadas às

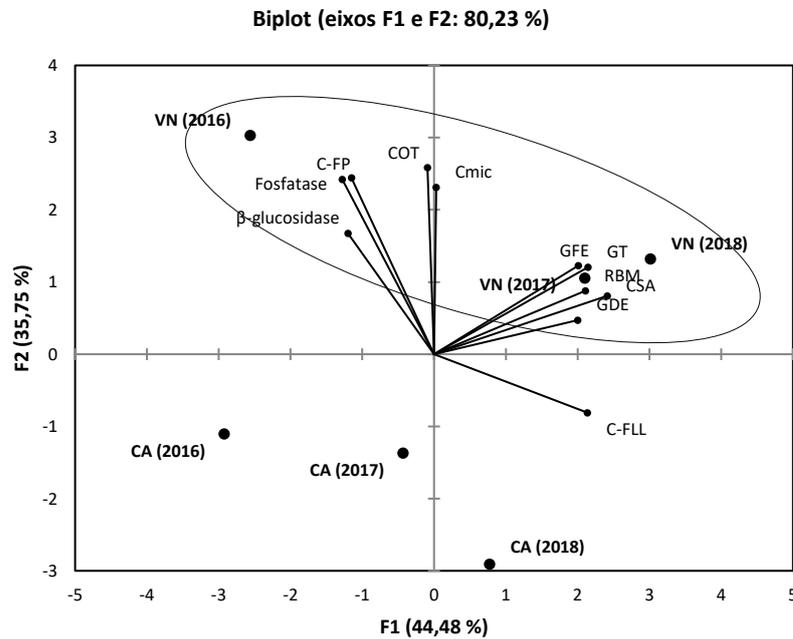
áreas sob manejo. Os autores também observaram relações entre o  $C_{mic}$  e as quantificações de COT no solo, o que refletiu diretamente na atividade enzimática no solo. Outra ressalva foi feita com relação às variações sazonais sobre as propriedades biológicas, onde foram observadas variações idênticas entre os usos da terra.

#### *Análise dos componentes principais*

A análise de componentes principais forneceu uma melhor imagem do grupamento das variáveis em relação aos dois usos da terra (VN e CA). Foram geradas duas componentes principais (Fator 1 e Fator 2), com relação as variáveis estudadas (COT,  $C_{mic}$ , RBM, CSA,  $\beta$ -glucosidase, Fosfatase, GFE, GDE, GT, C-FLL e C-FP) (Figura 9).

Foi observado que as duas componentes principais explicaram 80,23 % da variação total dos atributos avaliados com relação às áreas sob VN e CA. O Fator 1, gerado para a maior parte das variáveis (RBM, CSA, GFE, GDE, GT e C-FLL) explicou 44,48 % da variação total dos dados e demonstrou altos coeficientes de correlação entre as variáveis e o fator ( $r \geq 0,784$ ). O Fator 2, gerado para a menor parte das variáveis (COT,  $C_{mic}$ ,  $\beta$ -glucosidase, fosfatase e C-FP) explicou 35,75 % da variação total dos dados e demonstrou coeficientes de correlação significativos entre as variáveis e o fator ( $r \geq 0,588$ ). Foi observado que o vetor referente ao C-FLL mostrou-se projetado à área sob CA e correlacionado significativamente inverso à atividade enzimática da fosfatase ( $r = -0,359$ ).

Figura 9 – Diagrama de projeção dos vetores dos atributos avaliados para as áreas sob Latossolo Amarelo nos anos de 2016, 2017 e 2018, sob vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA), na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.



Fonte: A Autora (2021).

\*COT. carbono orgânico do solo; C<sub>mic</sub>. carbono da biomassa microbiana; RBM. respiração basal microbiana; CSA. carbono solúvel em água; GFE. glomalina facilmente extraível; GDE. glomalina dificilmente extraível; GT. glomalina total; C-FLL. carbono da fração leve livre; C-FP. carbono da fração pesada.

A partir da análise de componentes principais ficou evidenciado que as áreas sob VN e sob CA formaram dois grupos distintos. Tal projeção demonstra a relação entre áreas sob VN com formas de carbono lábil, assim como frações ligadas ao C mais recalcitrante no solo (C-FP). Sendo assim, o reflexo da dinâmica dos atributos estudados, através da PCA, demonstra a diferenciação dos sistemas de uso da terra por meio de atributos que estão intimamente relacionados a incorporação e mineralização da MOS. Similarmente aos resultados observados, Graham; Haynes, 2006 observaram uma relação entre variáveis como, C-FL, C<sub>mic</sub>, RBM e estabilidade agregada aos usos da terra que causavam acúmulo de matéria orgânica, aumentando assim, a diversidade catabólica em relação aos que causavam o esgotamento da MOS. Assunção et al., 2019 observaram que as variáveis relacionadas a todas as formas de carbono lábil, incluindo o C-FLL, contribuiriam 81,2 % da variação total dos dados para explicar a relação entre as áreas florestadas e manejadas.

Desta forma, pode-se deduzir que a prática de manejo pode influir na dispersão dos atributos avaliados e nas frações ligadas à mineralização da MOS. A quantidade de substrato de C prontamente disponível no solo, proteínas ligadas à glomalina e frações leves são componentes principais no entendimento da dinâmica da MOS. Esses componentes principais

são capazes de responder de forma direta a atividade biológica do solo em diferentes sistemas, pois exercem influência no desenvolvimento de serviços ecossistêmicos relacionados à ciclagem de nutrientes.

Helgason; Walley; Germida, 2010, observaram que o manejo nos sistemas agrícolas influencia diretamente na estrutura da comunidade microbiana interferindo no funcionamento metabólico das mesmas, mesmo quando os sistemas já são consolidados, como no caso da cana. Os autores também observaram mudanças na estrutura da comunidade microbiana entre os agregados do solo em cultivos convencionais, além da diminuição de proteínas ligadas à glomalina nos agregados do solo.

Com relação ao componente C-FLL mostrar-se projetado à área sob CA e correlacionado significativamente inverso à atividade enzimática da fosfatase, Lima et al., 2008 relataram que a FLL do solo é composta basicamente por resíduos vegetais parcialmente decompostos e que são fortemente influenciados pela quantidade e qualidade de resíduos depositados sob o solo. Assim, a correlação da C-FLL à atividade enzimática da fosfatase e a sua projeção direcionada a áreas sob CA pode estar intimamente atrelada ao manejo com queima, onde há presença de materiais particulados (carvão) e resíduos de palhada sob o solo.

Através da observação da disposição dos vetores no quadro de projeção (Figura 9) pode-se deduzir que a correlação negativa observada entre a fosfatase e o C-FLL está ligada a uma relação inversa de aumento ou diminuição da atividade enzimática da fosfatase em relação os teores do C-FLL sob o solo. A ciclagem de fósforo no solo está intimamente ligada às propriedades bioquímicas da matéria orgânica e atrelada a disponibilidade de C lábil, afetando assim, na imobilização e/ou mineralização de fósforo no solo pela microbiota e, portanto, maiores ou menores atividades enzimáticas da fosfatase (MERINO et al., 2019).

O C-FLL foi um dos componentes que melhor explicaram a variação dos dados, para a análise multivariada, mostrando-se como um indicador sensível as mudanças na qualidade do solo entre os sistemas de CA e VN. Tal observação é importante, pois, essa fração representa um compartimento de rápida e intermediária ciclagem e que favorece a biota do solo. Assim, esse resultado demonstra que mesmo em condições comportamentais semelhantes o sistema CA manejado com queima não é eficiente em manter o funcionamento microbiano, como ocorre em solos de áreas sob floresta nativa.

#### *Estoques de carbono nas frações da MOS*

Os estoques de carbono nos sistemas de uso da terra foram diferentes entre si onde, os maiores estoques encontraram-se em áreas sob VN (Tabela 5). Foi observada diferença de 13

% do estoque de COT entre os sistemas de uso da terra, vegetação nativa de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar. Os resultados encontrados mostraram que os estoques de C das frações ligadas ao  $C_{mic}$  e CSA foram mais sensíveis ao manejo, refletindo em decréscimos de aproximadamente 50 % na área sob cultivo de cana em relação à VN. O C-FP apresentou uma diferença de 15,5 % entre os sistemas sob cana-de-açúcar e vegetação nativa. Os valores das frações de carbono orgânico, valores obtidos pela soma das frações de CO, presentes no solo totalizaram 70,7 e 60,8  $Mg\ ha^{-1}$ , para as áreas de VN e CA. Deste total, 97,8 e 98,8 % foram recuperados em laboratório, através da quantificação do COT, obtendo-se os estoques de 69,2  $Mg\ ha^{-1}$  para VN e 60,1  $Mg\ ha^{-1}$  para CA.

Tabela 5 – Estoques nas áreas sob Latossolo Amarelo avaliadas nos anos de 2016, 2017 e 2018, em diferentes sistemas, vegetação nativa de Mata Atlântica (VN) e cultivo de cana-de-açúcar (CA) na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.

Variáveis ( $Mg\ ha^{-1}$ )	Usos		P
	VN	CA	
Est. $C_{mic}$	0,9±0,3 a	0,4±0,2 b	< ,0001
Est. CSA	0,6±0,2 a	0,3±0,2 b	= ,0002
Est. C-FLL	11,3±9,5 a	11,2±7,1 a	= ,9606
Est. C-FP	57,9±10,7 a	48,9±10,9 b	= ,0170
Est. C (total)	70,7	60,8	
Est. C (medido)	69,2±9,4 a	60,1±13,3 b	= ,0224
(%) Recuperação/perda	97,8	98,8	

Fonte: A Autora (2021).

*Médias seguidas por letras iguais, na mesma linha, não diferem estatisticamente.* Valores de (p). Est.  $C_{mic}$ . estoque de carbono na biomassa microbiana; Est. CSA. estoque de carbono solúvel em água; Est. C-FLL. estoque de carbono na fração leve livre; Est. C-FP. estoque de carbono na fração pesada.

Os resultados observados no presente estudo demonstram que a conversão, a longo prazo, resulta em perdas significativas de frações prontamente disponíveis no solo (CSA), assim como em perda da comunidade biológica ( $C_{mic}$ ), alterando diretamente a ciclagem biogeoquímica do solo. Entretanto, perdas também são observadas em frações mais recalcitrantes do solo (C-FP), mas em menores proporções.

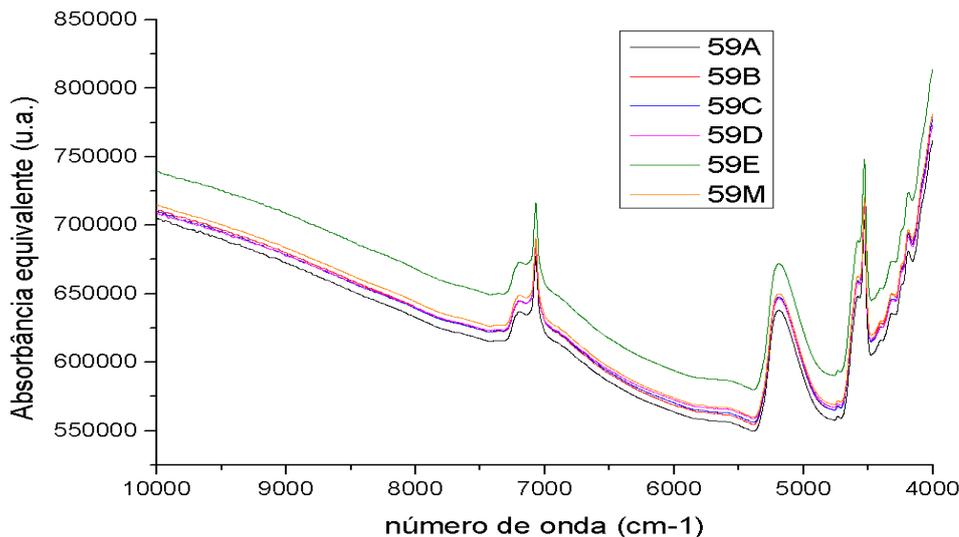
### 4.3 Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS)

#### *Análise exploratória dos espectros de infravermelho próximo (NIRS) nos solos*

A análise dos espectros via espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) mostrou perfis similares em termos de resposta entre as amostras. Pequenas diferenças foram encontradas na linha de base, relativas aos espalhamentos de sinais, em função da não uniformidade granulométrica das amostras de solo, o que gerou diferentes efeitos de

espalhamento de luz. Exemplo do espectro de NIRS obtido para uma amostra de solo está demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de espectro de absorbância no infravermelho próximo (NIRS), para 5 replicatas (A à E) e média (M), de uma amostra de solo (numerada como 59) coletada em área sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco.



Fonte: A Autora (2021).

Através da observação dos espectros de infravermelho próximo foram observadas três principais regiões, onde mostraram maiores valores de absorbância, situadas em torno de 7000  $\text{cm}^{-1}$ , 5200  $\text{cm}^{-1}$  e 4500  $\text{cm}^{-1}$ . Na primeira região dos espectros foram notados sinais que derivaram da absorção de energia relacionadas aos movimentos vibratórios das ligações O-H e N-H, presente em carboidratos e proteínas. A segunda região observou-se banda intensa em torno de 5200  $\text{cm}^{-1}$ , que é caracterizado por compostos que contêm ligações C-H, como lipídeos, celulose, lignina, amido, pectina e substâncias húmicas. A terceira região observada em torno de 4500  $\text{cm}^{-1}$  é caracterizada por espectros com combinações entre vibrações e estiramentos de C-H, N-H e O-H. Estas atribuições observadas foram feitas a partir de informações obtidas em Cécillon et al., 2008, 2009; Ferraresi et al., 2012a, 2012b ; Rinnan; Rinnan, 2007.

#### *Avaliação dos dados de referência*

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram as correlações entre os dados obtidos das variáveis utilizadas como referência no modelo de predição utilizando NIRS. Foram observadas correlações positivas e significativas entre a maior parte das variáveis utilizadas,

demonstrando que os atributos microbiológicos estão correlacionados entre si e com o carbono orgânico do solo. A atividade enzimática ligada ao ciclo do carbono ( $\beta$ -glucosidase) e as frações das proteínas ligadas à glomalina no solo demonstraram maiores coeficientes de correlação com o COT em relação ao carbono da biomassa microbiana e a atividade enzimática da fosfatase. As correlações observadas estão estritamente relacionadas à funcionalidade dos microrganismos na manutenção da decomposição da matéria orgânica e consequentemente, na disponibilidade de C em diferentes estágios de decomposição no solo. Portanto, pelo fato da atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase está diretamente atrelada a decomposição de MO rico em C e pelo fato das características da glomalina no solo serem estritamente ligadas ao C, a correlação entre essas variáveis já era esperado.

Gispert et al., 2013, observaram que as relações entre o COS, proteínas relacionadas à glomalina e atividade enzimática foram as propriedades mais apropriadas para expressar a dinâmica da MOS, uma vez que coexistem compostos orgânicos lábeis e estáveis. Fokom et al., 2012 observaram correlação positiva entre os teores de C e os teores das frações ligadas a glomalina no solo. Os autores evidenciaram as correlações encontradas, pois demonstram a grande importância da glomalina nos reservatórios de carbono no solo. Soares; Rousk, 2019 relataram que, a microbiota é intrinsicamente responsável pela decomposição da matéria orgânica e, portanto, regulam os estoques de carbono, onde utilizam o carbono assimilado para a produção de biomassa e para a disponibilidade de nutrientes no solo.

De forma genérica pode-se hipoteticamente induzir que as correlações entre as variáveis observadas podem influenciar em um baixo ou alto modelo de previsão. Entretanto, não só os dados de correlação entre as variáveis são suficientes, pois, às análises espectroscópicas são acrescidos fatores intrínsecos das amostras, como características químicas, físicas, ambientais e biológicas, que são de suma importância para a variabilidade das leituras espectroscópicas e do modelo de previsão.

Tabela 6 – Matriz de correlação entre as variáveis avaliadas (n= 60) no estudo de modelos preditivos utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo em áreas sob ecossistema de Mata Atlântica e sistema de cultivo de cana-de-açúcar na Zona da Mata do estado de Pernambuco, Brasil.

Variáveis	COT	C <sub>mic</sub>	β-gluco	Fosfatase	GFE	GDE	GT
COT	<b>1</b>	<b>0,525</b>	<b>0,686</b>	0,281	<b>0,621</b>	<b>0,803</b>	<b>0,753</b>
C <sub>mic</sub>	--	<b>1</b>	0,393	0,303	0,415	0,450	0,465
β-gluco	--	--	<b>1</b>	ns	<b>0,537</b>	<b>0,677</b>	<b>0,643</b>
Fosfatase	--	--	ns	<b>1</b>	ns	ns	ns
GFE	--	--	--	ns	<b>1</b>	<b>0,697</b>	<b>0,947</b>
GDE	--	--	--	ns	--	<b>1</b>	<b>0,890</b>
GT	--	--	--	ns	--	--	<b>1</b>

Fonte: A Autora (2021).

Os valores em negrito indicam correlação estatisticamente significativa entre as variáveis, a um nível de significância  $p \leq 0,05$ . COT. carbono orgânico total do solo; C<sub>mic</sub>. carbono da biomassa microbiana; β-gluco. atividade enzimática da β-glucosidase; GFE. glomalina facilmente extraível; GDE. glomalina dificilmente extraível; GT. glomalina total.

Foram observados altos desvios-padrão e coeficientes de variação nos dados utilizados para a calibração do modelo de previsão (Tabela 7). A variabilidade nos dados quantitativos observados pelos métodos de referência, devido às variações no uso do solo, cobertura vegetal e variabilidade ambiental das amostras de solo, pode contribuir para uma melhor ou não previsão dos modelos. Outro provável fator impulsionador de um bom ou baixo modelo de previsão é o número amostral (n= 60) utilizado.

Tabela 7 – Valores médios dos métodos de referência utilizados no estudo de previsão utilizando espectroscopia de infravermelho próximo em áreas sob ecossistema florestal de Mata Atlântica e sob cultivo de cana-de-açúcar da Zona da Mata do estado de Pernambuco.

Variáveis	M	S	Mín.	Máx.	CV	Método de referência
COS (g.Kg <sup>-1</sup> solo)	26,6	7,35	12,9	49,1	27,6	Yeomans & Bremner (1988)
C <sub>mic</sub> (μg.g <sup>-1</sup> solo)	319,1	171,8	64,5	702,3	53,8	Brookes et al. (1982) e Islam & Weil (1998)
β-glucosidase (μg g <sup>-1</sup> dwt h <sup>-1</sup> )	64,2	24,7	25,8	139,3	38,6	Tabatabai & Bremner (1982),
Fosfatase (μg g <sup>-1</sup> dwt h <sup>-1</sup> )	155,6	53,9	37,9	284,1	34,6	Eivazi & Tabatabai (1988)
GFE (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,1	0,03	0,01	0,2	60,5	
GDE (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,03	0,02	0,01	0,1	85,1	Wright e Upadhyaya (1998)
GT (mg glom.g <sup>-1</sup> solo)	0,1	0,05	0,03	0,3	63,4	

Fonte: A Autora (2021).

\*M. valores médios das variáveis; S. desvios-padrão médios das variáveis. Máx. valor máximo das variáveis; Mín. valor mínimo das variáveis; CV. coeficiente de variação das variáveis. \*COS. carbono orgânico total do solo; C<sub>mic</sub>. carbono da biomassa microbiana; RBM. respiração basal microbiana; CSA. carbono solúvel em água; GFE. glomalina facilmente extraível; GDE. glomalina dificilmente extraível; GT. glomalina total.

### Modelos de predição

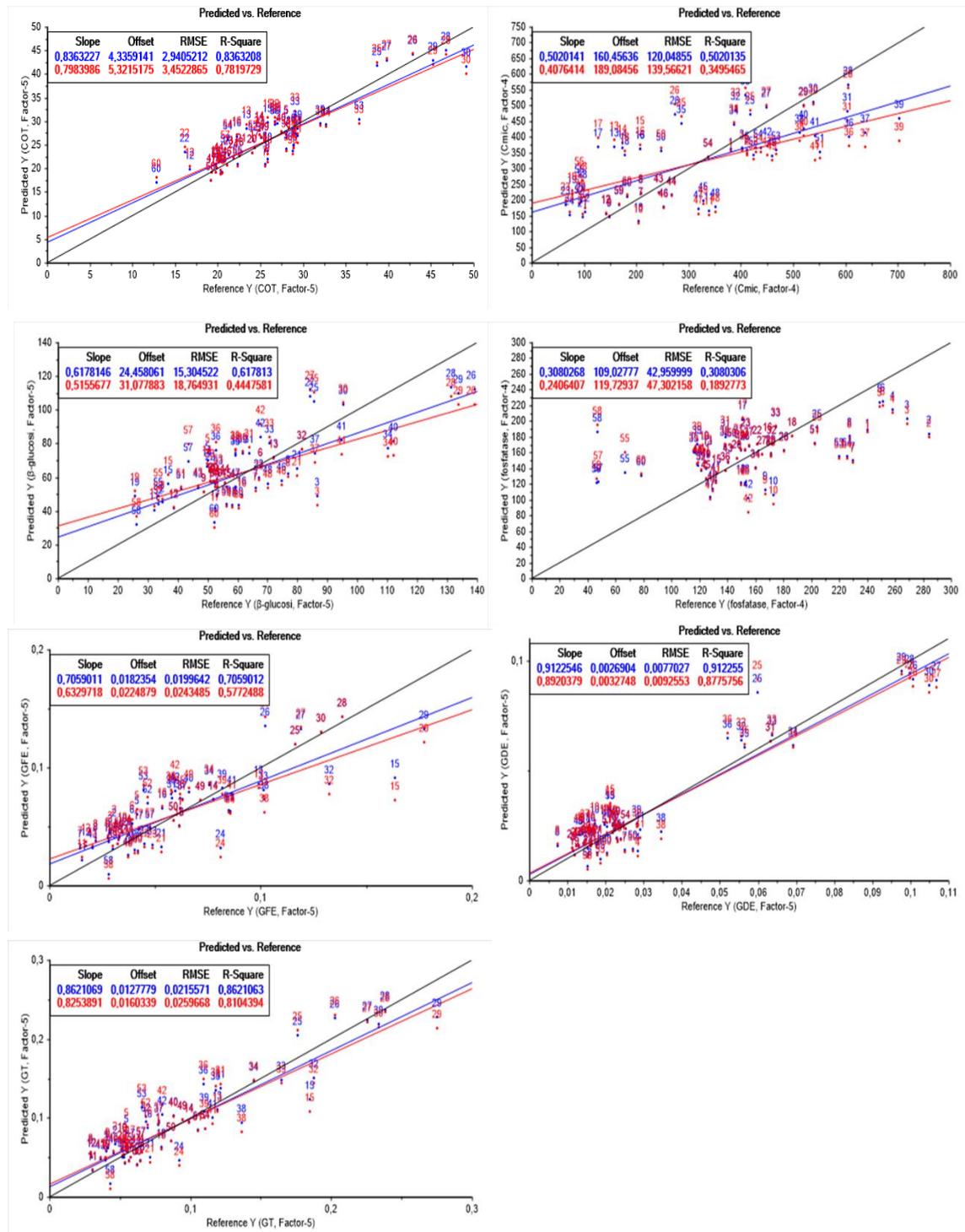
Os resultados de calibração aplicados aos dados espectroscópicos e aos dados de referência mostraram que o NIRS foi satisfatório para a maior parte das variáveis analisadas. A capacidade da espectroscopia de refletância NIR prever as sete propriedades do solo está resumida na Figura 11. A escolha dos melhores modelos preditos foi baseada na avaliação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e do deslocamento

da correlação para o ótimo (Offset). Os modelos tidos como satisfatórios apresentaram altos  $R^2$ , baixos RMSE e Offset.

Os melhores modelos de regressão obtidos para as variáveis estudadas foram para o COT ( $R^2 = 0,78$ , RMSE = 3,45 e Offset = 5,32) e para as frações das proteínas ligadas à glomalina, GFE ( $R^2 = 0,57$ , RMSE = 0,02 e Offset = 0,02), GDE ( $R^2 = 0,87$ , RMSE = 0,009 e Offset = 0,003) e GT ( $R^2 = 0,81$ , RMSE = 0,02 e Offset = 0,01). Todas essas variáveis mostraram excelentes coeficientes de correlação e valores extremamente baixos de RMSE e Offset para o número amostral relativamente pequeno. Entretanto, mesmo apresentando bons modelos preditivos, os modelos para as frações de glomalina no solo mostraram uma variância com cinco fatores em torno de 70 a 90 %, o que apresentou como sendo pouco abrangente. Os modelos também apresentaram vazios de ponto no range demonstrando que mesmo havendo um bom modelo de regressão há a necessidade de um número amostral maior, assim como amostras com maior variabilidade ambiental.

O modelo de predição para o carbono da biomassa microbiana do solo mostrou-se fraco, sendo observado um baixo coeficiente de correlação (0,34), alto valor de RMSE (139,56) e alto valor de Offset (189,08), o maior dentre as variáveis preditas. Para a variável relacionada à atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase o modelo mostrou uma correlação muito pobre após a validação cruzada, distante da ideal, por apresentar baixos valores de quantificação pelo método de referência e pelo pequeno número amostral. O modelo apresentou um coeficiente de correlação de 0,44 e 18,76 de RMSE. Com relação a variável relacionada à atividade enzimática da fosfatase ácida o modelo de previsão foi o que mostrou pior resultado de correlação. Foi detectado que os valores da quantificação dos métodos de referência foram muito baixos para que a técnica fosse capaz de correlacionar ( $R^2 = 0,18$  e RMSE = 47,30).

Figura 11 – Valores preditos pela espectroscopia de infravermelho versus valores medidos pelos métodos de referência para o carbono orgânico do solo (COS), carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ), atividade enzimática do solo da  $\beta$ -glucosidase e fosfatase ácida, proteínas do solo relacionadas à glomalina facilmente (GFE) e dificilmente extraíveis (GDE) e glomalina total (GT).



Fonte: A Autora (2021).

\*Linha e pontos azuis correspondem ao modelo de calibração original e linha e pontos vermelhos correspondem ao modelo após a validação cruzada.

Há de se considerar que a correlação entre os dados (Tabela 6) e os desvios-padrões médios (Tabela 7) observados para as variáveis de referência podem contribuir para modelos mais ou menos robustos. Levando em consideração que o melhor modelo predito foi referente à GDE ( $R^2 = 0,87$ ) observa-se concomitantemente que essa variável demonstrou maior correlação com o COT ( $R^2 = 0,803$ ) e menor desvio-padrão médio (0,02), dentre as variáveis analisadas. Da mesma forma, identificou-se para os modelos menos robustos, como o  $C_{mic}$  e a atividade enzimática da fosfatase. Tais variáveis foram as que mostraram menores correlações com o COT e maiores desvios-padrões médio.

Resultados semelhantes aos alcançados nesse estudo foram relatados em outros trabalhos (CÉCILLON et al., 2008, 2009; NAWAR; MOUAZEN, 2019; SORIANO-DISLA et al., 2014). No entanto, não foram encontrados na literatura artigos que descrevam modelos relacionados às proteínas do solo relacionadas à glomalina, apesar desse parâmetro refletir a capacidade de retenção de carbono, atributo importante para avaliação da qualidade do solo ou manejo agrícola. Zornoza et al., 2008 observaram resultados previstos como excelentes para o COT,  $C_{mic}$ , atividade enzimática da  $\beta$ -glucosidase e fosfatase, para um número amostral de 393. Os autores relataram para o COS um  $R^2 = 0,98$ /RMSE = 5,75, para o  $C_{mic}$  um  $R^2 = 0,91$ /RMSE = 3,26, para a  $\beta$ -glucosidase e fosfatase um  $R^2 = 0,93$ /RMSE = 3,66. Dick et al., 2013 verificaram que, a técnica de espectroscopia NIR foi bem sucedida tanto na previsão do COS ( $R^2 = 0,91$  e RMSE = 7,2) quanto para a atividade da  $\beta$ -glucosidase ( $R^2 = 0,82$  e RMSE = 35,6) utilizando um conjunto amostral de 181 e 139, respectivamente. Comino et al., 2018 observaram que, a capacidade preditiva para a atividade enzimática foi geralmente média, com bons resultados de calibração e validação para a  $\beta$ -glucosidase ( $R^2 = 0,60$  e 154,53 RMSE) e baixa para a fosfatase ácida ( $R^2 = 0,33$  e 69,31 RMSE). Mesmo utilizando um número amostral relativamente alto (157) os autores salientaram que o fato da previsão da  $\beta$ -glucosidase ter sido relativamente melhor em relação às outras atividades enzimáticas (fosfatase ácida) se dá, pois, há uma estreita relação entre esta enzima e a matéria orgânica do solo ( $R^2 = 0,49$ ), com isso há uma maior influência no perfil espectral do NIR.

Além de dados quantitativos, demais fatores podem ser ressaltados para um bom ou baixo modelo de predição. O primeiro a ser levado em consideração são características relacionadas intrinsecamente ao solo, como, variações no uso da terra, cobertura vegetal e condições climáticas específicas. Outro fator que interfere nos estudos de predição, observado através dos modelos previstos, é o número amostral. A quantidade de amostras utilizada para a construção de um modelo de predição interferirá diretamente na qualidade dos resultados.

## 5 CONCLUSÕES

Nesse tópico foram abordadas as principais conclusões sobre os estudos realizados.

### 5.1 Estudo 1: Quantificação e qualificação do carbono e frações microbiológicas do solo em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar

A conversão, a longo prazo, da vegetação florestal para cultivo de cana-de-açúcar induziu mudanças significativas na dinâmica da matéria orgânica do solo. Tais modificações refletiram perdas expressivas de frações essenciais à manutenção de serviços ecossistêmicos no solo. Foi observado, de forma geral, perdas em áreas sob cana-de-açúcar de 27,5 % do COT, 47 % da fração leve livre do solo e 22 % da fração pesada do solo, em referência às áreas sob vegetação nativa. Com relação às variáveis microbiológicas foram observadas perdas no  $C_{mic}$  (64 %), na RBM (43 %), no CSA (44 %), nas atividades enzimáticas da  $\beta$ -glucosidase (24 %) e fosfatase (19 %), nas frações das proteínas ligadas à glomalina facilmente extraível (50 %), dificilmente extraível (75 %) e glomalina total (61 %).

Embora possam ser quantificadas perdas significativas nas áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, padrões espectroscópicos relacionados à qualidade da MOS demonstraram características similares quanto a natureza química e/ou funcionalidades análogas entre as amostras de solo. Ou seja, embora os sistemas sob cultivo possam ser bastante divergentes em termos quantitativos há similaridades comportamentais e qualitativas aos campos nativos.

Desta forma, os resultados encontrados no presente estudo demonstram que os parâmetros avaliados refletem de forma satisfatória a dinâmica do carbono e das frações atreladas a MOS em diferentes usos da terra. Os efeitos foram validados pela PCA que sustentaram a íntima correlação dos atributos medidos a áreas que proporcionem maiores aportes de material orgânico sob o solo.

### 5.2 Estudo 2: Avaliação o comportamento, em três anos distintos, na atividade biológica e frações do carbono da MOS em ecossistema de Mata Atlântica e cultivo de cana-de-açúcar

Alterações consistentes foram observadas quando há a conversão de áreas sob vegetação nativa a campos de cultivo de cana-de-açúcar. Anos de cultivo sucessivo de cana-de-açúcar foram capazes de proporcionar perdas significativas nos estoques do carbono, assim como em

frações ligadas à microbiologia do solo. As áreas cobertas pela vegetação florestal armazenaram em média 69 Mg ha<sup>-1</sup>. Grande parte desse carbono está estocada na fração recalcitrante do solo (83 %) enquanto, a menor parte está estocada em frações solúveis (0,9 %). Entretanto, a conversão de áreas nativas a campos sob cana-de-açúcar, a longo prazo, causou perdas de até 50 % nos estoques das frações ligadas ao carbono microbiano e a frações solúveis. Enquanto que, para as frações do carbono recalcitrantes tais perdas foram de 15 %.

Embora o sistema de cana-de-açúcar possa proporcionar perdas substanciais, ano a ano tais mudanças comportam-se em equivalência às áreas sob vegetação nativa. Entretanto, esses comportamentos são visualizados em menores proporções. Portanto, pode-se notar que padrões de manejo e características ambientais podem moldar a dinâmica da MOS. As praticas de manejo podem sim influir na dispersão dos atributos do solo. Contudo, características inerentes a fatores ambientais fazem com que os ecossistemas situados sob mesmas condições comportem-se de formas semelhantes.

### **5.3 Estudo 3: Estimativa de previsão dos atributos microbianos do solo através da aplicação da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS)**

As características espectrais do NIR permitiram uma discriminação relativamente boa entre as amostras de solo. Mesmo com limitações na previsão quantitativa, especialmente na atividade enzimática relacionada à fosfatase ácida e carbono da biomassa microbiana, a técnica de espectroscopia mostrou-se eficaz a ser usada para estimar variáveis relacionadas ao carbono orgânico e as proteínas relacionadas à glomalina no solo, com um número amostral relativamente baixo.

O NIR demonstrou ser uma técnica sensível às propriedades microbiológicas do solo e útil para rápida avaliação não destrutiva da qualidade biológica do solo. Desta forma, recomenda-se a espectroscopia de infravermelho próximo para a análise exploratória e discriminatória de amostras de solo e para o desenvolvimento de modelos de previsão. Permitindo assim, inferir de forma não destrutiva os atributos biológicos do solo e demonstrando uma boa frequência analítica, sem o uso de reagentes químicos contaminantes e com resultados muito próximos aos obtidos pelos métodos de referência. No entanto, mais trabalhos são necessários para desenvolver modelos mais confiáveis e robustos, incluindo um maior conjunto amostral, com diferentes tipos de solo e sob diferentes manejos.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. et al. **Sugarcane straw as a potential second generation feedstock for biorefinery and white biotechnology applications** *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Ltd, , 1 jan. 2021.
- ALVES, T. DOS S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 33, n. 2, p. 341–347, 2011.
- ANAYA, C. A.; HUBER-SANNWALD, E. Long-term soil organic carbon and nitrogen dynamics after conversion of tropical forest to traditional sugarcane agriculture in East Mexico. *Soil and Tillage Research*, v. 147, p. 20–29, 2015.
- ARAÚJO, A. S. F. et al. Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 66, p. 175–181, 2013.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Biosci. J.*, v. 23, p. 66–75, 2007.
- ASSUNÇÃO, S. A. et al. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 658, p. 901–911, 2019.
- BALDRIAN, P. et al. Distribution of microbial biomass and activity of extracellular enzymes in a hardwood forest soil reflect soil moisture content. *Applied Soil Ecology*, v. 46, n. 2, p. 177–182, 2010.
- BALDRIAN, P. Distribution of Extracellular Enzymes in Soils: Spatial Heterogeneity and Determining Factors at Various Scales. *Soil Science Society of America Journal*, v. 78, n. 1, p. 11, 2013.
- BALOTA, E. L. et al. Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 4, p. 641–649, 1998.
- 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, n. 5, p. 55–118, 2011.
- BIGOTT, A. F.; HOY, J. W.; FULTZ, L. M. Soil properties, microbial communities, and sugarcane yield in paired fields with short- or long-term sugarcane cultivation histories. *Applied Soil Ecology*, v. 142, n. January, p. 166–176, 2019.
- BLAGODATSKAYA, E.; KUZYAKOV, Y. Active microorganisms in soil: Critical review of estimation criteria and approaches. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 67, p. 192–211, 2013.
- BLANCO-MOURE, N. et al. Soil organic matter fractions as affected by tillage and soil texture under semiarid Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research*, v. 155, p. 381–389, 2016.

- BOCALINI, F. et al. Comparative phylogeographic and demographic analyses reveal a congruent pattern of sister relationships between bird populations of the northern and south-central Atlantic Forest. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 154, p. 106973, 1 jan. 2021.
- BOECHAT, C. L. et al. Industrial and urban organic wastes increase soil microbial activity and biomass. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1629–1636, 2012.
- BORDONAL, R. DE O. et al. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 240, p. 54–65, 2017.
- BURNS, R. G. et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216–234, 2013.
- BUSO, W. H. D.; KLIEMANN, H. J. Relações de carbono orgânico e de nitrogênio total e potencialmente mineralizável com o nitrogênio absorvido pelo milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 33, n. 2, p. 97–105, 2003.
- C. CHENU, M. B. J. B. Academic entrepreneurial orientation. Empirical evidence from life sciences. **Soil & Tillage Research**, v. 53, p. 215–230, 2000.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 189, n. January, p. 140–147, 2019.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, n. March, p. 114353, 2020.
- CÉCILLON, L. et al. Variable selection in near infrared spectra for the biological characterization of soil and earthworm casts. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 7, p. 1975–1979, 2008.
- CÉCILLON, L. et al. Predicting soil quality indices with near infrared analysis in a wildfire chronosequence. **Science of the Total Environment**, v. 407, n. 3, p. 1200–1205, 2009.
- CHATTERJEE, A. et al. Evaluation of different soil carbon determination methods. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 3, p. 164–178, 2009.
- CHODAK, M. et al. Use of near infrared spectroscopy to determine biological and chemical characteristics of organic layers under spruce and beech stands. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 165, n. 1, p. 27–33, 2002.
- COHEN, M. J.; PRENGER, J. P.; DEBUSK, W. F. Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy for Rapid, Nondestructive Assessment of Wetland Soil Quality. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, n. 4, p. 1422–1434, 2005.
- COLLINS, H. P. et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 32, p. 157–168, 2000.
- COMINO, F. et al. Infrared spectroscopy as a tool for the assessment of soil biological quality in agricultural soils under contrasting management practices. **Ecological Indicators**, v. 87, n.

July 2017, p. 117–126, 2018.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-açúcar: safra 2019/2020. **Observatório Agrícola**, v. 6, n. 4, p. 58, 2020.

CONAB. - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Monitoramento agrícola - Safra 2015/2016. v. 3, n. 9, p. 57, 2021.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Eficiência do politungstato de sódio no fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 1, p. 1301–1310, 2007.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 1, p. 541–549, 2008.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1–7, 2014.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Eficiência de soluções densas no fracionamento físico da matéria orgânica do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 1, p. 490–497, 2015.

COÛTEAUX, M. M.; BERG, B.; ROVIRA, P. Near infrared reflectance spectroscopy for determination of organic matter fractions including microbial biomass in coniferous forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 12, p. 1587–1600, 2003.

CREAMER, R. E. et al. Measuring basal soil respiration across Europe: Do incubation temperature and incubation period matter? **Ecological Indicators**, v. 36, p. 409–418, 2014.

CROW, S. E. et al. Isotopic analysis of respired CO<sub>2</sub> during decomposition of separated soil organic matter pools. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 11, p. 3279–3291, 2006.

DALMOLIN, R. S. D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481–489, 2005.

DEMOLINARI, M. S. M. et al. Efeito da solução de separação densimétrica na quantidade e qualidade da matéria orgânica leve e na quantificação do carbono orgânico da fração pesada. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 871–879, 2008.

DIAS, B. DE O. et al. Infravermelho na caracterização de ácidos húmicos de latossolo sob efeito de uso contínuo de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 1, p. 885–894, 2009.

DICK, D. P.; SANTOS, J. H. Z.; FERRANTI, E. M. Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two southern brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 29–39, 2003.

DICK, W. A. et al. Prediction of  $\beta$ -glucosidase and  $\beta$ -glucosaminidase activities, soil organic C, and amino sugar N in a diverse population of soils using near infrared reflectance spectroscopy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 56, p. 99–104, 2013.

- DINIZ, M. F. et al. The underestimated role of small fragments for carnivore dispersal in the Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 1, p. 81–89, 1 jan. 2021.
- DORNBUSH, M. E. Grasses, litter, and their interaction affect microbial biomass and soil enzyme activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 9, p. 2241–2249, 2007.
- EVANGELISTA, C. R. et al. Atividade enzimática do solo sob sistema de produção orgânica e convencional na cultura da cana-de-açúcar em Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 4, p. 1251–1261, 2012.
- EVANGELISTA, C. R. et al. Atributos microbiológicos do solo na cultura da cana-de-açúcar sob manejo orgânico e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 4, p. 1549–1562, 2013.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1–4, p. 69–116, 1997.
- FENG, W. et al. Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 69, p. 398–405, 2014.
- FERRARESI, T. M. et al. Aplicação da espectroscopia no do solo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Arroz e Feijão**, v. 1, n. 38, p. 36, 2012a.
- FERRARESI, T. M. et al. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 36, n. 1, p. 1769–1777, 2012b.
- FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 991–996, 1999.
- FIERER, N. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. **Nature Reviews Microbiology**, v. 15, n. 10, p. 579–590, 2017.
- FIGUEIREDO, C. C. DE; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 907–916, 2010.
- FINN, D. et al. Microbial energy and matter transformation in agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 111, p. 176–192, 2017.
- FOKOM, R. et al. Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 69–75, 2012.
- FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration zin cropland soils. **Soil & Tillage Research**, v. 61, p. 77–92, 2001.
- FONTÚRBEL, M. T. et al. Effects of an experimental fire and post-fire stabilization treatments on soil microbial communities. **Geoderma**, v. 191, p. 51–60, 2012.

FREIXO, A. A.; CANELLAS, L. P.; MACHADO, P. L. O. A. PROPRIEDADES ESPECTRAIS DA MATÉRIA ORGÂNICA LEVE-LIVRE E LEVE INTRA-AGREGADO DE DOIS LATOSSOLOS SOB PLANTIO DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 26, n. 3, p. 445–453, 2002.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 153, n. 3–4, p. 347–352, 2009.

GAMBOA, A. M.; GALICIA, L. Differential influence of land use/cover change on topsoil carbon and microbial activity in low-latitude temperate forests. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 142, n. 3–4, p. 280–290, 2011.

GAO, F. et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen as affected by primary forest conversion. **Forest Ecology and Management**, v. 463, n. October 2019, p. 118013, 2020.

GISPERT, M. et al. The impact of land management and abandonment on soil enzymatic activity, glomalin content and aggregate stability. **Geoderma**, v. 202–203, p. 51–61, 1 jul. 2013.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microbial community in the row and inter-row of sugarcane under burning and trash retention. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 1, p. 21–31, 2006.

GRASSET, L.; AMBLÈS, A. Aliphatic lipids released from a soil humin after enzymatic degradation of cellulose. **Organic Geochemistry**, v. 29, n. 4, p. 893–897, 1998.

GREENFIELD, L. G. et al. Soil Biology & Biochemistry Acid hydrolysis to define a biologically-resistant pool is compromised by carbon loss and transformation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 64, p. 122–126, 2013.

GUDE, A.; KANDELER, E.; GLEIXNER, G. Input related microbial carbon dynamic of soil organic matter in particle size fractions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 47, p. 209–219, 2012.

GUEDES, B. J. et al. Vulnerability of small forest patches to fire in the Paraíba do Sul River Valley, southeast Brazil: Implications for restoration of the Atlantic Forest biome. **Forest Ecology and Management**, v. 465, p. 118095, 1 jun. 2020.

GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, J. J. Soil aggregation: Influence on microbial biomass and implications for biological processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 80, p. A3–A9, 2015.

HELGASON, B. L.; WALLEY, F. L.; GERMIDA, J. J. No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. **Applied Soil Ecology**, v. 46, n. 3, p. 390–397, 2010.

JORGE-MARDOMINGO, I. et al. Seasonal changes in microbial activity in a semiarid soil after application of a high dose of different organic amendments. **Geoderma**, v. 206, p. 40–48, 2013.

JUNIOR, F. P. P.; PORTILHO, I. I. R.; MERCANTE, F. M. Atributos microbiológicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 151–164, 2015.

- KARHU, K. et al. Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. **Nature**, v. 513, n. 7516, p. 81–84, 2014.
- 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**, v. 51, n. 9, p. 1520–1528, 2016.
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60–68, 2015.
- LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. DE S. Modelo Century de dinâmica da matéria orgânica do solo: equações e pressupostos. **Ciência Rural**, v. 33, n. 4, p. 679–686, 2003.
- LEME PABLOS, J. et al. North-south and climate-landscape-associated pattern of population structure for the Atlantic Forest White Morpho butterflies. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 161, p. 107157, 1 ago. 2021.
- LI, F. M. et al. Dynamics of soil microbial biomass C and soil fertility in cropland mulched with plastic film in a semiarid agro-ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 11, p. 1893–1902, 2004.
- LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1053–1063, 2008.
- LIU, Y. et al. The long-term effects of reforestation on soil microbial biomass carbon in subtropical severe red soil degradation areas. **Forest Ecology and Management**, v. 285, p. 77–84, 2012.
- LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. Í.; DE MELO, W. J. Recuperação de solos degradados na exploração mineral de cassiterita: Biomassa microbiana e atividade da desidrogenase. **Bragantia**, v. 70, n. 1, p. 132–138, 2011.
- LOPES, E. L. N. et al. Microbial biomass and soil chemical properties under different land use systems in northeastern Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1127–1139, 2011.
- LÓPEZ-MERINO, L. et al. Glomalin accumulated in seagrass sediments reveals past alterations in soil quality due to land-use change. **Global and Planetary Change**, v. 133, p. 87–95, 2015.
- LOPEZ-SANGIL, L.; ROVIRA, P. Sequential chemical extractions of the mineral-associated soil organic matter: An integrated approach for the fractionation of organo-mineral complexes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 62, p. 57–67, 2013.
- LOZANO, E. et al. Sensitivity of glomalin-related soil protein to wildfires: Immediate and medium-term changes. **Science of the Total Environment**, v. 572, p. 1238–1243, 2016.
- LUCE, M. ST. et al. Rapid determination of soil organic matter quality indicators using visible near infrared reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 232–234, p. 449–458, 2014.
- LUDWIG, B. et al. Near infrared spectroscopy of forest soils to determine chemical and

- biological properties related to soil sustainability. **Forest Ecology and Management**, v. 171, n. 1–2, p. 121–132, 2002.
- LUNA, L. et al. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region. **Catena**, v. 143, p. 256–264, 2016.
- MACEDO, T. M. et al. Diversity of growth responses to recent droughts reveals the capacity of Atlantic Forest trees to cope well with current climatic variability. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118656, 15 jan. 2021.
- MACHADO, L. V. et al. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289–299, 2014.
- MADARI, B. E. et al. Mid- and near-infrared spectroscopic determination of carbon in a diverse set of soils from the Brazilian national soil collection. **Spectroscopy Letters**, v. 38, n. 6, p. 721–740, 2005.
- MARZAIOLI, F. et al. Comparison of different soil organic matter fractionation methodologies: Evidences from ultrasensitive <sup>14</sup>C measurements. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 268, n. 7–8, p. 1062–1066, 2010.
- MAZZETTO, A. M. et al. Comparing how land use change impacts soil microbial catabolic respiration in Southwestern Amazon. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, n. 1, p. 63–72, 2016a.
- MAZZETTO, A. M. et al. Activity of soil microbial biomass altered by land use in the southwestern Amazon. **Bragantia**, v. 75, n. 1, p. 79–86, 2016b.
- MERINO, A. et al. Soil organic matter and phosphorus dynamics after low intensity prescribed burning in forests and shrubland. **Journal of Environmental Management**, v. 234, n. January, p. 214–225, 2019.
- MIRALLES, I. et al. Hydrolase enzyme activities in a successional gradient of biological soil crusts in arid and semi-arid zones. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 53, p. 124–132, 2012.
- MIRANDA, C. DO C.; CANELLAS, L. P.; TRINDADE NASCIMENTO, M. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 905–916, 2007.
- MOITINHO, M. R. et al. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO<sub>2</sub> emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **Catena**, v. 196, p. 104903, 1 jan. 2021.
- MONI, C. et al. Density fractions versus size separates: does physical fractionation isolate functional soil compartments? **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5181–5197, 2012.
- MORAES, A. J. DE et al. Comparação de metodologias para determinação de matéria orgânica em solos argilosos no oeste do Paraná. **Synergismus scyentifica**, v. 04, n. 1, 2009.
- MOREIRA, FÁTIMA MARIA DE SOUZA & SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica

do Solo. v. 2 ed., p. 729, 2006.

MOYANO, F. E.; KUTSCH, W. L.; SCHULZE, E. D. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 4, p. 843–853, 2007.

NAKAZATO, R. K. et al. Trace metals at the tree-litter-soil- interface in Brazilian Atlantic Forest plots surrounded by sources of air pollution. **Environmental Pollution**, v. 268, p. 115797, 1 jan. 2021.

NAWAR, S.; MOUAZEN, A. M. On-line vis-NIR spectroscopy prediction of soil organic carbon using machine learning. **Soil and Tillage Research**, v. 190, n. February, p. 120–127, 2019.

NOBRE, C. P. et al. Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 138–147, 2015.

NOVAK, E. et al. Atributos químicos e microbiológicos sob diferentes coberturas de solo. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 19–30, 2017.

OLIVEIRA SANTOS, R. DE et al. NMDI application for monitoring different vegetation covers in the Atlantic Forest biome, Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 33, p. 100329, 1 set. 2021.

ONTL, T. A. et al. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, v. 255–256, p. 1–11, 2015.

OSANAI, Y. et al. Warming and elevated CO<sub>2</sub> combine to increase microbial mineralisation of soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 85, p. 110–118, 2015.

PAUL, E. A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 98, p. 109–126, 2016.

PAVAN FERNANDES, S. A.; BETTIOL, W.; CERRI, C. C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. **Applied Soil Ecology**, v. 30, n. 1, p. 65–77, 2005.

PILLON, C. N. et al. Carbono e nitrogênio de um argissolo vermelho sob floresta, pastagem e mata nativa. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 447–453, 2011.

PINHEIRO, E. F. M. *et al.* Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, n. 3, p. 731–737, 2004.

PLANTE, A. F. et al. Soil Biology & Biochemistry Biological , chemical and thermal indices of soil organic matter stability in four grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 5, p. 1051–1058, 2011.

PLAZA, C. et al. A comprehensive method for fractionating soil organic matter not protected and protected from decomposition by physical and chemical mechanisms. **Clean - Soil, Air,**

**Water**, v. 40, n. 2, p. 134–139, 2012.

QUANYING, W. et al. Impacts of 9 years of a new conservational agricultural management on soil organic carbon fractions. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 1–6, 2014.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoque e frações da matéria orgânica de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1341–1353, 2007.

RAO, M. A. et al. Enzymes as useful tools for environmental purposes. **Chemosphere**, v. 107, p. 145–162, 2014.

RINNAN, R.; RINNAN, Å. Application of near infrared reflectance (NIR) and fluorescence spectroscopy to analysis of microbiological and chemical properties of arctic soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 7, p. 1664–1673, 2007.

ROMERO-FREIRE, A. et al. Is soil basal respiration a good indicator of soil pollution? **Geoderma**, v. 263, p. 132–139, 2016.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. DE A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. [s.l.: s.n.].

ROVIRA, P.; VALLEJO, V. R. Examination of Thermal and Acid Hydrolysis Procedures in Characterization of Soil Organic Matter. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 31, p. 81–100, 2000.

ROVIRA, P.; VALLEJO, V. R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil : an acid hydrolysis approach. **Geoderma**, v. 107, p. 109–141, 2002.

RUI, Y. et al. Microbial respiration, but not biomass, responded linearly to increasing light fraction organic matter input: Consequences for carbon sequestration. **Scientific Reports**, v. 6, n. September, p. 1–9, 2016.

SANTOS, D. C. DOS et al. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um argissolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, p. 838–844, 2013.

SANTOS, G. A.; PEREIRA, A. B.; KORNDÖRFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (nir) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, p. 100–108, 2010.

SANTOS, V. B. et al. Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. **Geoderma**, v. 170, p. 227–231, 2012.

SIGNOR, D. et al. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 38, p. 1402–1410, 2014.

SILVA, C. F. DA et al. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v. 38, n. 1, p. 423–431, 2014.

SILVA, C. F. DA et al. Fungos micorrízicos arbusculares: Composição, comprimento de micélio extrarradicular e glomalina em áreas de mata Atlântica, Rio De Janeiro. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 419–433, 2016.

SILVA, D. K. A. DA et al. Soil microbial biomass and activity under natural and regenerated forests and conventional sugarcane plantations in Brazil. **Geoderma**, v. 189–190, p. 257–261, 2012.

SILVA, V. E. et al. Composição lignocelulósica e isotópica da vegetação e da matéria orgânica do solo de uma turfeira tropical. I - composição florística, fitomassa e acúmulo de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 121–133, 2013.

SILVEIRA, M. L. et al. Characterization of soil organic carbon pools by acid hydrolysis. **Geoderma**, v. 144, p. 405–414, 2008.

SINGH, A. K. et al. Biological indicators affected by land use change, soil resource availability and seasonality in dry tropics. **Ecological Indicators**, v. 115, n. March, p. 106369, 2020.

SINGH, A. K.; RAI, A.; SINGH, N. Effect of long term land use systems on fractions of glomalin and soil organic carbon in the Indo-Gangetic plain. **Geoderma**, v. 277, p. 41–50, 2016.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2099–2103, 2000.

SOARES, M.; ROUSK, J. Microbial growth and carbon use efficiency in soil: Links to fungal-bacterial dominance, SOC-quality and stoichiometry. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 131, n. January, p. 195–205, 2019.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, p. 65–105, 1996.

SORIANO-DISLA, J. M. et al. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical, chemical, and biological properties. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 49, n. 2, p. 139–186, 2014.

SOUSA, C. DA S. et al. Influências da temperatura de armazenamento e de extratores na determinação de glomalina em solos Paraibanos. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 42, n. 4, p. 867–841, 2011.

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 Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 79–88, 2010.

SOUZA, E. D. et al. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 28, n. 3, p. 323–329, 2006.

SOUZA, R. A. et al. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 155, p.

1–6, 2012.

SPENCE, A.; ROBINSON, C. Spectro-Chemical Analysis of the Speciation of Cadmium on Montmorillonite in the Presence of Soil Microbial Biomass. **Procedia Environmental Sciences**, v. 18, p. 114–126, 2013.

SPOHN, M.; CARMINATI, A.; KUZYAKOV, Y. Soil zymography - A novel in situ method for mapping distribution of enzyme activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 275–280, 2013.

TERHOEVEN-URSELMANS, T. et al. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 5, p. 1178–1188, 2008.

THEVENOT, M.; DIGNAC, M. F.; RUMPEL, C. Fate of lignins in soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 8, p. 1200–1211, 2010.

TORRES, I. F. et al. The role of lignin and cellulose in the carbon-cycling of degraded soils under semiarid climate and their relation to microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 152–160, 2014.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. . Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo. **Tópicos em ciência do solo**, n. 2, p. 195–276, 2002.

UCHIDA, Y.; NISHIMURA, S.; AKIYAMA, H. The relationship of water-soluble carbon and hot-water-soluble carbon with soil respiration in agricultural fields. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 156, p. 116–122, 2012.

VANCAMPENHOUT, K. et al. Differences in chemical composition of soil organic matter in natural ecosystems from different climatic regions - A pyrolysis-GC/MS study. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 3, p. 568–579, 2009.

VANOLLI, B. S. et al. Epigeic fauna (with emphasis on ant community) response to land-use change for sugarcane expansion in Brazil. **Acta Oecologica**, v. 110, p. 103702, 1 maio 2021.

VIEIRA, F. C. B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1–2, p. 195–204, 2007.

VON LÜTZOW, M. et al. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 9, p. 2183–2207, 2007.

WALLENSTEIN, M. D. et al. A litter-slurry technique elucidates the key role of enzyme production and microbial dynamics in temperature sensitivity of organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 47, p. 18–26, 2012.

WANG, D. et al. Water extractable organic C and total N: The most sensitive indicator of soil labile C and N pools in response to the prescribed burning in a suburban natural forest of subtropical Australia. **Geoderma**, v. 377, n. November 2019, p. 114586, 2020.

WANG, Q.; WANG, S. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions. **Applied Soil Ecology**, v. 47, n. 3, p. 210–216, 2011.

ZHANG, Y. et al. Chemical composition of organic matter in a deep soil changed with a positive priming effect due to glucose addition as investigated by  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 85, p. 137–144, 2015.

ZHOU, X. et al. Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland. **Geoderma**, v. 206, p. 24–31, 2013.

ZORNOZA, R. et al. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 7, p. 1923–1930, 2008.