



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E**  
**AMBIENTAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Caracterização das fases da compostagem de *Gliricidia Sepium* e  
quantificação de matéria orgânica utilizando espectrometria**

**Caroline Souza Da Fonseca**

**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**CARACTERIZAÇÃO DAS FASES DA COMPOSTAGEM DE *GLIRICÍDIA SEPIUM* E QUANTIFICAÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA UTILIZANDO ESPECTROMETRIA**

**CAROLINE SOUZA DA FONSECA**

*Sob a Orientação do Professor*  
**DR. MURILO MACHADO DE BARROS**  
*e Coorientação do Pesquisador da EMBRAPA*  
**DR. EDNALDO DA SILVA ARAÚJO**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental - PPGEAAmb, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ.

Outubro 2024

**Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico**

**Ficha catalográfica elaborada**

**com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Fonseca, Caroline Souza da, 1994-  
F676c Caracterização das fases da compostagem de  
Gliricidia Sepium e quantificação de matéria orgânica  
utilizando espectrometria / Caroline Souza da  
Fonseca. - Seropédica, 2024.

88 f.

Orientador: Murilo Machado de Barros .  
Coorientador: Ednaldo da Silva Araújo .  
Dissertação(Mestrado) . -- Universidade Federal

Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em  
Engenharia Agrícola e Ambiental , 2024.

1. solos . 2. reflectância . 3. análise de  
componentes principais . 4. carbono . I. Barros ,  
Murilo Machado de , 1983-, orient. II. Araújo ,  
Ednaldo da Silva , 1974-, coorient. III Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental . IV.  
Título.

**“É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.”**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E**  
**AMBIENTAL**

**CAROLINE SOUZA DA FONSECA**

Dissertação submetida como requisito para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31/10/2024**

---

Dr. Murilo Machado, de Barros  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
(Orientador)

---

Dr. Anderson Gomide da Costa  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

---

Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Universidade Federal de Lavras



ATA N° ATA n°81 Defesa de dissertação CAROLINE S. FONSECA/2024 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)  
(Nº do Documento: 5092)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/11/2024 11:09 )

ANDERSON GOMIDE COSTA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)  
Matrícula: ####619#5

(Assinado digitalmente em 01/11/2024 13:10 )

MURILLO MACHADO DE BARROS  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)  
Matrícula: ####506#5

(Assinado digitalmente em 01/11/2024 13:53 )

CAROLINE SOUZA DA FONSECA  
DISCENTE  
Matrícula: 2022#####0

(Assinado digitalmente em 01/11/2024 10:48 )

GABRIEL ARAÚJO E SILVA FERRAZ  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: ####.###.446-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 5092, ano: 2024, tipo: ATA, data de emissão: 01/11/2024 e o código de verificação: 722e4cc88b

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, pois sem ele, eu nada seria, por ter me dado forças e nunca ter esquecido de mim.

A meu pai Wellington, minha mãe Izabel, irmã Camila e meu namorado Felipe, por serem meu porto seguro, não importasse a tempestade que passasse, sempre teria um lugar calmo e seguro para estar.

A minha família, por todo apoio e confiança.

Aos meus amigos que o mestrado na UFRRJ me apresentou. Com vocês a caminhada foi sofrida, mas bem mais leve.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Murilo, por todo o incentivo e ajuda que foram muito necessários.

Ao Dr. Ednaldo Araújo, por ter me dado uma oportunidade em ser sua coorientada da EMBRAPA Agrobiologia, e por toda paciência, preocupação e ensinamentos.

À Fazendinha Agrobiologia, por toda experiência e conhecimentos que me foram adquiridos durante essa vivência

À todos os professores, principalmente ao Prof. Dr. Anderson, que contribuíram para a minha formação, expresso também o meu reconhecimento e admiração.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por proporcionar essa formação. É a realização de mais um sonho.

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

## RESUMO

FONSECA, Caroline Souza da. **Caracterização das fases da compostagem de *Gliricidia Sepium* e quantificação de matéria orgânica utilizando espectrometria.** 2024. 82p Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O aumento das emissões de gases de efeito estufa impulsionou o interesse pela matéria orgânica (MO), que possui como principal constituinte o carbono. Métodos como a espectrometria tornaram-se essenciais por oferecerem análises rápidas e sustentáveis, sem gerar resíduos químicos. O objetivo deste trabalho foi caracterizar e consequentemente determinar o comportamento espectral em dois experimentos: Experimento 1 - Fases do processo de compostagem da *Gliricidia sepium* e o Experimento 2 - Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo, com objetivo de simular solos arenosos típicos do Brasil. O experimento da compostagem foi conduzido na SIPA-Fazendinha Agrobiológica e as análises espectrais realizadas no Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Foram realizadas análises químicas na compostagem para a verificação da legislação vigente, na qual apresentou bons parâmetros de qualidade. Nas análises espectrais dos experimentos, foram realizadas as análises de componentes principais (ACP) com os dados brutos e dados com os pré-tratamentos: suavização por média móvel simples (SMO), correção de espalhamento de luz (MSC) e derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD), nas regiões espectrais do visível (RGB) e do infravermelho (IV). A Análise de Componentes Principais (ACP) demonstrou ser eficaz na diferenciação dos espectros, explicando a maior parte da variância dos experimentos com a soma das duas primeiras componentes principais (acima de 95,69% da variância total). Entre os pré-tratamentos aplicados, o MSC (Multiplicative Scatter Correction) apresentou a melhor distribuição espacial dos dados e identificou um maior número de comprimentos de onda representativos em quase todas as análises, exceto no Experimento 2 na região espectral do visível. Esses resultados indicam que a espectrometria é uma ferramenta adequada tanto para a caracterização das fases da compostagem quanto para a avaliação da variação da matéria orgânica no solo. Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para o monitoramento da matéria orgânica e do carbono no solo.

**Palavras-chave:** Solos, carbono, reflectância, análise de componentes principais.

## ABSTRACT

FONSECA, Caroline Souza da. **Characterization of the composting phases of *Gliricidia Sepium* and quantification of organic matter using spectroscopy.** 2024. 82p. Dissertation (Master's in Agricultural and Environmental Engineering). Technology Institute, Department of Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

The increase in greenhouse gas emissions has heightened interest in organic matter (OM), whose main constituent is carbon. Methods such as spectroscopy have become essential for providing rapid and sustainable analyses without generating chemical waste. This study aimed to characterize and determine the spectral behavior in two experiments: Experiment 1 – Phases of the composting process of *Gliricidia sepium* and Experiment 2 – Evaluation of the variation in organic matter content in the soil, simulating sandy soils typical of Brazil. The composting experiment was conducted at SIPA – Fazendinha Agrobiológica, and spectral analyses were performed at the Geoprocessing Laboratory of the Federal Rural University of Rio de Janeiro (UFRRJ). Chemical analyses were carried out on the compost to verify compliance with current regulations, which demonstrated good quality parameters. In the spectral analyses, Principal Component Analysis (PCA) was applied to both raw data and preprocessed data using three methods: simple moving average smoothing (SMO), multiplicative scatter correction (MSC), and first-order polynomial Savitzky-Golay derivation (SGD), in the visible (RGB) and infrared (IR) spectral regions. PCA proved to be an effective tool for spectral differentiation, with the sum of the first two principal components explaining most of the variance in the experiments (above 95.69% of the total variance). Among the preprocessing techniques applied, MSC showed the best spatial data distribution and identified a greater number of representative wavelengths in almost all analyses, except for Experiment 2 in the visible spectral region. These results indicate that spectroscopy is a suitable tool for both the characterization of composting phases and the evaluation of organic matter variation in the soil. Thus, this study contributes to the development of more efficient strategies for monitoring organic matter and carbon content in the soil.

**Key words:** Soils, carbon, reflectance, principal component analysis.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Processo de compostagem. ....	18
<b>Figura 2.</b> Representação esquemática do espectro eletromagnético. ....	23
<b>Figura 3.</b> Biomassa recém-colhida de Gliricidia, com peso aproximado de 5 kg, do dia 0. ....	30
<b>Figura 4.</b> Montagem das leiras de compostagem. ....	31
<b>Figura 5.</b> Pilhas de compostagem com 45 dias, coleta realizada no dia 12 de janeiro de 2023, e na fase termofílica. ....	32
<b>Figura 6.</b> Processo de moagem das amostras de compostagem da Gliricidia para as análises químicas. ....	33
<b>Figura 7.</b> Blocos de tubo de digestores e balança de precisão. ....	34
<b>Figura 8.</b> Amostra de compostagem de Gliricidia de 200 mg. ....	34
<b>Figura 9.</b> Análise laboratorial dos espectros no dark room. ....	37
<b>Figura 10.</b> Amostras da compostagem para as leituras espectrais. ....	38
<b>Figura 11.</b> A: 100g de areia lavada e seca em estufa. B: 1% do Composto orgânico moído. Ambos utilizados nas análises de spectrorradiômetro. ....	39
<b>Figura 12.</b> Esquematização para a coleta das análises espectrais. ....	39
<b>Figura 13.</b> Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 0 e 15 da fase mesofílica do Experimento 1. ....	50
<b>Figura 14.</b> Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 30, 45 e 60 da fase termofílica do Experimento 1. ....	51
<b>Figura 15.</b> Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 75, 90, 105 e 120 da fase de maturação do Experimento 1. ....	52
<b>Figura 16.</b> Médias espectrais do Experimento 1- Fases do processo da compostagem. ....	53
<b>Figura 17.</b> Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD do Experimento 1 na região espectral do visível. ....	56
<b>Figura 18.</b> Análise comportamental do Experimento 1 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do visível. ....	58
<b>Figura 19.</b> Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD do Experimento 1 na região espectral do IV. ....	60

<b>Figura 20.</b> Análise comportamental do Experimento 1 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do infravermelho.....	62
<b>Figura 21.</b> Médias espetrais da areia.....	63
<b>Figura 22.</b> Resposta espectral representando solos com teores mais comuns de 1% a 2% de matéria orgânica (MO).....	64
<b>Figura 23.</b> Média espetrais representando solos com teores de menor disponibilidade acima de 3% de matéria orgânica (MO).....	65
<b>Figura 24.</b> Resposta espetrais da variação da quantidade de matéria orgânica no solo. ....	66
<b>Figura 25.</b> Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD no Experimento 2 na região espectral do visível. ....	69
<b>Figura 26.</b> Análise comportamental do Experimento 2 obtida pelo pré-tratamento SMO através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do visível... ..	71
<b>Figura 27.</b> Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD no Experimento 2 na região espectral do IV.....	73
<b>Figura 28.</b> Análise comportamental do Experimento 2 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do IV. ....	75

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1.</b> Dias das coletas de amostras da compostagem de 0 a 120 dias e as fases do processo da compostagem. ....	31
<b>Tabela 2.</b> Relação de valores de referência por parâmetro. Fonte: Adaptado de IN nº 25 SDA/MAPA, 2009. ....	35
<b>Tabela 3.</b> Análise de carbono e nitrogênio do composto orgânico. ....	42
<b>Tabela 4.</b> Análise de variância referente aos teores de carbono e nitrogênio das fases do processo de compostagem. ....	44
<b>Tabela 5.</b> Comparação das médias dos teores de carbono e nitrogênio das fases do processo de compostagem pelo Teste de Scott Knott. ....	45
<b>Tabela 6.</b> Relação C/N em relação aos dias das fases do processo de compostagem. ..	46
<b>Tabela 7.</b> Parâmetros exigidos pela legislação de C e N e parâmetros obtidos nestes experimentos.....	47
<b>Tabela 8.</b> Análise de dados Cálcio (Ca2+), Magnésio (Mg2+), Potássio (K+ ) e Fósforo (P). ....	47
<b>Tabela 9.</b> Parâmetros exigidos pela legislação de Ca e Mg e parâmetros obtidos nestes experimentos.....	49
<b>Tabela 10.</b> Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o Experimento 1- Fases da compostagem na região espectral do visível.....	55
<b>Tabela 11.</b> Faixas ideais de comprimentos de ondas para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do visível. ....	57
<b>Tabela 12.</b> Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do infravermelho. ....	58
<b>Tabela 13.</b> Faixas ideais de comprimentos de ondas para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do IV.....	61
<b>Tabela 14.</b> Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível. ....	67
<b>Tabela 15.</b> Faixas de comprimentos ideais componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível. ....	70
<b>Tabela 16.</b> Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o	

Experimento 2 – avaliação da variação do quantidadede matéria orgânica no solo na região espectral do IV..... 71

**Tabela 17.** Faixas de comprimentos ideais componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do IV..... 74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>16</b>
2.1 Objetivo Geral .....	16
2.2 Objetivos Específico.....	17
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
3.1 Compostagem e Gliricidia .....	17
3.2 Carbono (C) e Matéria Orgânica (MO) .....	19
3.3 Mercado de Carbono .....	20
3.4 Métodos para a Avaliação de Carbono.....	21
3.5 Espectrometria – Princípios Gerais .....	22
3.6 Espectrometria de Carbono .....	24
3.7 Espectrometria da MO.....	25
3.8 Pré-tratamento dos Dados da Análise Espectral.....	27
3.9 Análise de Componentes Principais (ACP).....	28
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
4.1. Caracterização das Fases de Processo da Compostagem .....	29
4.2 Análise Química do C, N e Macro nutrientes (Ca, Mg, P e K) .....	33
4.3 Análise Descritiva dos Parâmetros Químicos da Compostagem, ANOVA e Teste Scott Knott.....	35
4.4 Obtenção dos Índices Espectrais por meio do Espectrorradiômetro .....	36
4.5 Análises Espectrais de Reflectância. .....	39
4.6 Pré-tratamento das Análises Espectrais .....	40
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
5.1 Análises dos Atributos Químicos C e N da Compostagem .....	42
5.2 Análise Química dos Macro nutrientes (Ca, K, Mg e P) da Compostagem .....	47
5.3 Análise do Comportamento Espectral Do Experimento 1 – Fases do Processo de Compostagem .....	49
5.3.1 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 1 - Fases de processo da compostagem na região espectral do visível (380 - 780 nm) .....	54
5.3.2 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 1 - Fases de processo da compostagem na Região espectral do IV (780 – 2500 nm) .....	58
5.4 Análise do comportamento espectral do Experimento 2 – Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo .....	62
5.4.1 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 2 - Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível.....	67
5.4.2 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 2 - Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do IV (780 – 2500 nm).....	71

<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>75</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica (MO) é definida como uma soma de todas as substâncias orgânicas, composta por uma mescla de resíduos animais e vegetais, em diversos estádios de decomposição (NANZER et al, 2019). A MO é considerada um fator chave para a sustentabilidade, e utilizada para avaliar a qualidade do solo.

A intensificação na mudança do uso e ocupação da terra leva a significativas transformações na vegetação, acarretam em importantes modificações nas características físicas e químicas dos solos. Consequentemente, essas mudanças induzem à interconversões de matéria e energia nos diversos compartimentos capazes de estocar o carbono e o nitrogênio presentes na MO (SOARES et al, 2022).

Desta forma, podemos dizer que a dinâmica do carbono está diretamente ligada ao uso e manejo do solo, o qual pode atuar como emissor de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, ou como dreno, pelo acúmulo de carbono na forma de matéria orgânica (PULROLNIK, 2009).

A presença da MO é extremamente importante no fluxo de gases de efeito estufa entre a superfície terrestre e a atmosfera. A MO é facilmente decomposta quando se realizam práticas de manejo não conservacionistas, causando agravamento da liberação de gases de efeito estufa (GEE), como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O (CERRI & CERRI, 2007).

Algumas alternativas vêm sendo criadas para que se tenha uma produção agropecuária com baixa emissão de GEE como: recuperação de pastagens degradadas; adoção de sistemas integrados (ILP e ILPF) e sistemas agroflorestais (SAFs); adoção do Sistema de plantio direto (SPD); difusão da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); expansão da área de florestas plantadas; e tratamento de dejetos animais (TELLES et al, 2021).

Outra alternativa que pode ser utilizada é a aplicação da compostagem, que é um processo biológico de transformação do material orgânico, biodegradável, em matéria orgânica humificada ou estabilizada. É uma técnica idealizada para se obter mais rapidamente e, em melhores condições, a desejada estabilização da matéria orgânica.

Na compostagem, pode-se utilizar a *Gliricidia Sepium*, que é uma leguminosa que aumenta o teor de nitrogênio e carbono, e desta maneira aumentando a taxa de retorno de nutrientes e teor de matéria orgânica no solo (de MATOS, 2021).

O carbono representa 58% da MO, por isso, a determinação do seu teor no solo pode ser utilizada para estimar a quantidade da fração orgânica no solo. Maiores teores de MO contribuem para melhoria da qualidade do solo, uma vez que, esta influência nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e o seu teor também é utilizado como indicador da qualidade dos sistemas de manejo do solo (NANZER et al, 2019).

Tecnologias baseadas em características espetrais podem ser amplamente utilizadas para a predição dos teores de carbono (TOZO, 2022). A espectrometria como substituta aos métodos analíticos convencionais pode produzir diagnósticos ambientais menos onerosos e mais rápidos. Já que Métodos convencionais para determinação atributos do solo, embora confiáveis, são trabalhosos para avaliar, quantificar e diagnosticar a concentração e necessidade nutricional de carbono.

RIBEIRO (2021), avaliou a utilização da espectrometria de reflectância como metodologia alternativa aos procedimentos laboratoriais de quantificação do carbono orgânico total (COT) e este associado às substâncias húmicas da matéria orgânica do solo (MOS) em solos semiáridos.

Nesse contexto, a identificação das faixas espetrais correspondentes às fases da compostagem e a quantificação da matéria orgânica por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) são aspectos fundamentais deste estudo. Além disso, a definição de faixas espetrais ideais para a distinção de espécies vegetais aprimora a precisão da caracterização espectral. Compreender o comportamento das respostas espetrais representa um avanço significativo na caracterização do solo, que pode permitir a identificação e diferenciação da matéria orgânica em diferentes tipos de solo.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo caracterizar as transformações espetrais e analisar a variabilidade dos espectros durante as fases da compostagem de *Gliricidia sepium* e a variação da matéria orgânica no solo. Além disso, buscou-se identificar os comprimentos de onda mais sensíveis a essas variações, permitindo a distinção entre as diferentes fases do processo de compostagem e os níveis de matéria orgânica no solo.

## 2.2 Objetivos Específico

Caracterizar as variações espectrais que ocorrem durante as fases do processo de compostagem da Gliricidia.

Caracterizar as mudanças espectrais que ocorrem em amostras de areia com diferentes quantidades de matéria orgânica, desta maneira, simulando solos arenosos com diferentes porcentagens de MO.

Aplicar e analisar pré-tratamentos espectrais para verificação da eficácia das análises de componentes principais (ACP).

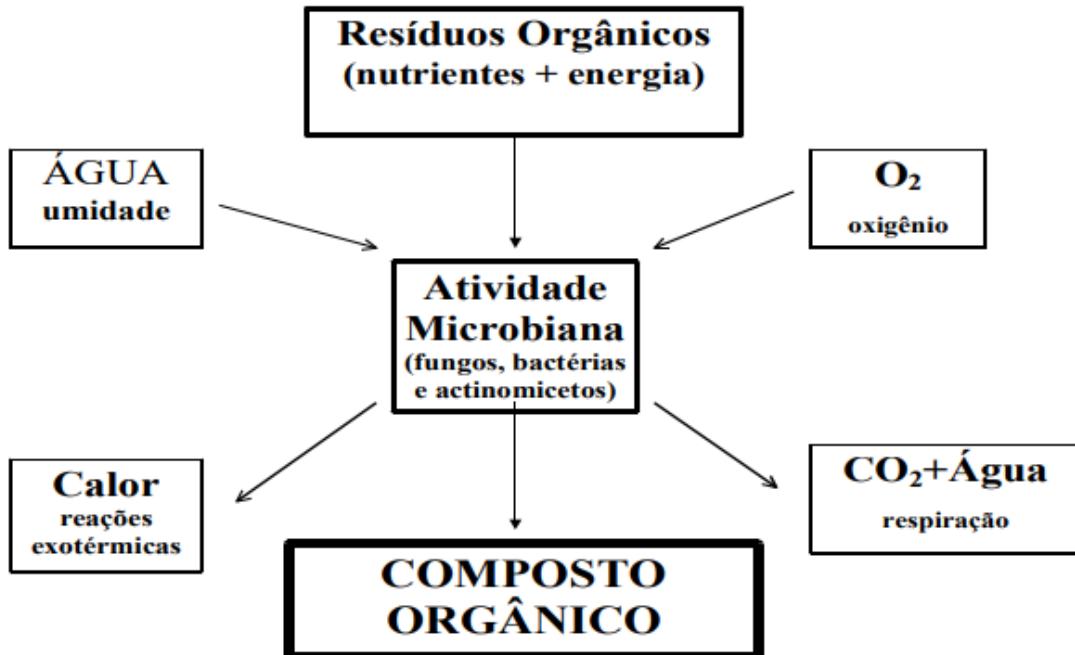
Determinar quais comprimentos de onda são determinantes para a separação das fases da compostagem.

Identificar os comprimentos de onda mais relevantes para distinguir diferentes teores de matéria orgânica em amostras de areia

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

### 3.1 Compostagem e Gliricidia

O composto orgânico tradicional (Figura 1) é obtido pelo processo de compostagem, uma técnica que visa acelerar e direcionar a decomposição de materiais orgânicos que ocorrem espontaneamente na natureza (SOARES et al., 2020). Os materiais orgânicos são dispostos em única pilha, molhados e revirados periodicamente. Os organismos vivos presentes nessa pilha fazem a decomposição dos materiais, transformando a mistura em um adubo natural num período aproximado de 90 dias ou mais (de JESUS et al., 2019).



**Figura 1.** Processo de compostagem.

Fonte: INÁCIO, 2015.

A eficiência do processo de compostagem está diretamente relacionada a fatores que proporcionam condições ótimas para que os micro-organismos aeróbios possam se multiplicar e atuar na transformação da matéria orgânica. Sendo dividida em 3 fases: Fase mesófila que a temperatura fica de 35 a 40°C durante os 15 primeiros dias, fase termófila com temperatura acima de 50°C por cerca de 60 dias e a fase de maturação, temperatura ambiente após 60 dias com estabilização da MO (INACIO, 2015).

A utilização de materiais de origem 100% vegetal tem sido uma alternativa viável para produção de compostos orgânicos utilizados em sistemas orgânicos de produção (SOARES et al., 2020). Surgindo como uma alternativa a utilização da *Gliricidia Sepium*, uma leguminosa que tem sido plantada em propriedades rurais, pela sua alta capacidade de produzir biomassa, em condições de baixa disponibilidade hídrica com alto teor de nitrogênio (N), em virtude de realizar o processo de fixação biológica de nitrogênio (FBN).

Neste sentido, o composto orgânico produzido a partir da *Gliricidia* proporciona melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos. Dentre as propriedades físicas, destaca-se a melhora da densidade e a porosidade do solo favorecendo a retenção da umidade no solo. Em relação às propriedades químicas, pode-se citar o aumento da disponibilidade de nutrientes, (macro e micronutrientes) de forma

lenta (de MATOS, 2021). Quanto as propriedades biológicas, o efeito está relacionado ao aumento da biodiversidade da população microbiana, favorecendo disponibilidade de nutrientes e contribuindo no processo de decomposição da matéria orgânica (MACHADO et al., 2012).

### **3.2 Carbono (C) e Matéria Orgânica (MO)**

O carbono é um elemento estratégico, sendo aquele pelo qual sua presença é fundamental e sua ausência pode acarretar um dano direto a aspectos econômicos, políticos e sociais (ZARBIN, & ORTH, 2020). A economia é fortemente dependente de recursos naturais renováveis, potencialmente vulneráveis às mudanças climáticas.

No fim do século XX, a dinâmica das mudanças climáticas passou a gerar preocupações por conta de uma mudança substancial no caráter do CO<sub>2</sub> presente na atmosfera gerados a partir da interferência antrópica. É importante salientar, que os um dos quatro principais compartimentos de carbono na Terra são os ecossistemas terrestres (biota mais solo) (BARBOSA et al, 2013). Sendo o maior reservatório de carbono no compartimento terrestre, o estocando em forma de matéria orgânica e armazena cerca de três vezes mais que o compartimento atmosférico (BAUMGARTNER et al, 2021). Quando o solo, se encontra em estado de degradação pode liberar gás carbônico e metano, gases responsáveis pelo efeito estufa, agravando ainda mais as mudanças do clima (PROJETO MAPBIOMAS, 2023).

Por isto, entre os principais setores econômicos contribuintes para as emissões de CO<sub>2</sub> nos anos mais recentes, ressaltam-se: a agricultura, responsável por 14% das emissões (DUVAL, 2021). O desmatamento, que acontece na Amazônia e também em outros biomas, é um dos principais emissores de carbono para atmosfera, e é impulsionado principalmente pela expansão da fronteira agrícola e da atividade pecuária (NOBRE, SAMPAIO & SALAZAR, 2007).

A quantidade de MO nos solos do Brasil é influenciada por vários fatores, como o clima tropical (que acelera a decomposição da matéria orgânica), o tipo de vegetação, o uso do solo (como agricultura ou pastagens) e práticas de manejo. Solos com 1 a 2 % de MO, são mais comuns, pois o clima tropical favorece a mineralização da matéria orgânica, e não sua acumulação no solo. Já solos com matéria orgânica acima de 4 a 5%, estariam se referindo a solos muito raros no Brasil. Como os solos brasileiros possuem

baixa quantidade de MO, se aumentou o uso de resíduos na adubação das lavouras.

Aumentando então a necessidade de analisar os possíveis impactos da agricultura (NOBRE, 2008). E o interesse nos efeitos do manejo do solo e nos estoques de carbono (EstC) oriundos da matéria orgânica. (LAL, 2018). E assim incentivando, o aumento do armazenamento de carbono (C) em solos agrícolas que contribui para minimizar as mudanças climáticas, bem como melhorar os sistemas de produção (KOVEN et al., 2017). Consequentemente os estudos de métodos precisos para determinar o C na matéria orgânica constitui-se em demanda recorrente. E também foi criado um mercado de créditos de carbono que constitui em um mecanismo que busca resolver problemas ambientais com uso de ferramentas econômica (SILVEIRA & OLIVEIRA, 2021).

### **3.3 Mercado de Carbono**

Atualmente se faz necessário uma política ambiental global voltada para redução das emissões dos GEEs, a fim de que os países realizassem ações para a proteção do meio ambiente contra a poluição, bem como prevenir que maiores danos viessem a acontecer (DUARTE et al, 2020). O problema que as mudanças climáticas causam para a população e a economia mundial está claro, bem como os desafios para se atuar, e assim mudem para uma economia mais sustentável (FACCIN, 2019).

O Protocolo de Kyoto é um dos acordos de maior importância, criando três mecanismos de flexibilização, sendo o Comércio de Emissões, a Implementação Conjunta e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MMA, 2019).

O Comércio de Emissões permite que os países vendam o excesso da capacidade de emissão à países acima de suas metas. A Implementação Conjunta permite que um país do Anexo I (são aqueles com uma responsabilidade maior – basicamente os países desenvolvidos) participe de projetos de redução de GEE em outros países que também estão no Anexo I, ou seja, é um esforço em conjunto entre dois ou mais países para atingir a meta da redução. E o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) permite que um país com compromisso de redução ou limitação de GEE, incluído no Anexo I, invista em projetos ou compre reduções de emissões dos países não pertencentes ao mesmo Anexo (UNFCCC, 2019)

É considerado assim marco inicial do Mercado de Carbono, no qual se configura como um mercado de compra e venda de licenças para emissões ou reduções de emissões, que são distribuídas por um órgão regulador ou geradas por projetos que fazem a redução

de emissões dos GEEs, mas que também pode se dividir em diferentes formas, tamanhos e regulamentações. Este mercado se demonstra de fundamental importância no que diz respeito às políticas de redução de emissões dos GEEs, pela forma que se desenvolve e por estar inserido em um novo contexto de mecanismos de proteção ambiental (DUARTE et al, 2020).

Ficando também definido no Protocolo de Kyoto que os países industrializados reduziriam em pelo menos 5,2% suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990. A União Europeia assumiu o compromisso de reduzir em 8%; os Estados Unidos assinaram em uma redução de 7%; e o Japão concordou em reduzir 6%. Alguns países como a Rússia e Ucrânia não assumiram compromisso de redução e outros como Islândia, Austrália e Noruega ainda teriam permissão para aumentar suas emissões (CENAMO, 2004).

Com o mercado de carbono, passou a ser viabilizado projetos que possuem certificados de carbono, tendo assim a possibilidade da compra desta redução (Créditos de Carbono) por países desenvolvidos com meta de redução estabelecida pelo Protocolo.

### **3.4 Métodos para a Avaliação de Carbono**

O maior compartimento de C dos ecossistemas terrestres é a matéria orgânica acumulada nos solos, e a principal via de entrada do C para o solo é a deposição dos resíduos vegetais, formados inicialmente pela fotossíntese. Estima-se que a quantidade de C estocada no solo até um metro de profundidade em todo o globo esteja em torno de 1,6 bilhões de toneladas (JESUS et al, 2019).

Entretanto, as atividades antropogênicas como as mudanças de uso de terra, podem afetar esse processo natural alterando o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo para atmosfera (emissão) ou da atmosfera para o solo (sequestro) (SANTOS, 2019). Em função das mudanças climáticas, do aquecimento global e do maior uso de resíduos na adubação das lavouras, o estudo de métodos precisos para determinar o C em resíduos orgânicos constitui-se em demanda recorrente de vários setores.

A análise do teor de C envolve a conversão em CO<sub>2</sub> de todas as substâncias orgânicas presentes no resíduo, por meio de combustão seca ou úmida, por digestão, oxidação e dosagem do agente oxidante remanescente, por titulometria, volumetria, entre outros procedimentos analíticos (GATTO et al., 2009). Ao se avaliar o teor de C, as variações nos resultados podem ocorrer tanto em razão dos métodos empregados, quanto

em relação à composição química dos materiais. Além disso, para compostos, há diferenças nos fatores de conversão dos teores de C em MO (CARMO & SILVA; 2012; JIMÉNEZ & GARCÍA, 1992). Sendo estes os métodos:

O método da mufla consiste na determinação gravimétrica do CO<sub>2</sub> evoluído e, por conseguinte, na perda de massa de resíduo submetido à alta temperatura por certo intervalo de tempo; na determinação da MO, considera-se, assim, a diferença de peso inicial (amostras secas a 105 °C) e de peso computado após a incineração da amostra a 550-600 °C (CARMO & SILVA; 2012; SUGUIO, 1973).

Os métodos baseados na oxidação do dicromato têm sido mais usados em pesquisas e análises em laboratórios de rotina. Entre eles, destacam-se os propostos por Walkley & Black (1934) e por Yeomans & Bremner (1988). Em ambos, a MO é oxidada com uma mistura de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,167 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado, sendo o excesso de dicromato titulado com sulfato ferroso amoniacial. Assume-se que o dicromato reduzido durante a reação com o solo equivale ao CO na amostra. Entretanto, no método proposto por Walkley & Black, faz-se necessária a aplicação de um fator de correção do método, uma vez que não ocorre completa oxidação do CO da amostra.

O principal ponto de divergência entre esses métodos seria a fonte externa de aquecimento proposta por Yeomans & Bremner (1988). Segundo esses autores, o aquecimento da mistura a 170 °C, por 30 min, seria suficiente para a completa oxidação do CO, sendo desnecessário empregar um fator de correção (GATTO et al, 2019).

Outro método baseia-se na combustão completa da amostra, por via a seca, à temperatura de 900 a 1200 °C, na presença em excesso de oxigênio, produzindo os gases CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, os quais são então homogeneizados e carreados por um gás inerte (hélio ou argônio) por uma coluna de separação, para finalmente serem analisados por um detector de condutividade térmica (REZENDE, 2011; ALMEIDA, SILVA, & WADT, 2016).

DE SOUZA BATALHA (2023), teve como objetivo avaliar a composição química do composto orgânico produzido com resíduos de pirarucu e de glircídia, o carbono orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black, e não apresentou diferença estatística durante os 90 dias experimentais.

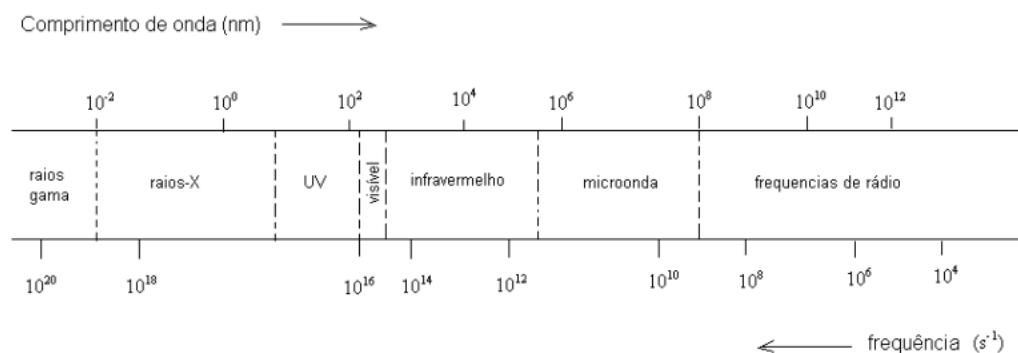
### 3.5 Espectrometria – Princípios Gerais

O princípio da espectrometria de reflectância difusa (ERD) é fundamentado na Lei de Beer-Lambert, que conceitua que quando uma energia eletromagnética incide

sobre um alvo, parte dos vários comprimentos de onda incididos sobre ele são absorvidos por essa amostra, parte atravessa sua superfície e parte é refletida de forma difusa, ou seja, espalhada em muitos ângulos (STONER & BAUMGARDNER, 1986). Essa energia é registrada por um sensor e decomposta em diferentes comprimentos de onda, de forma contínua ao longo do espectro eletromagnético, onde ficam definidas suas feições, que são conhecidas como curva espectral ou assinatura espectral (MORAES NOVO, 2010). Podendo ser obtidos pela reflectância ou o logaritmo do inverso da reflectância (absorbância).

As respostas espetrais podem ser nas bandas ultravioleta visível (UV-VIS) que são referentes as faixas do espectro eletromagnético que para o olho humano é possível de observar. Também se conhece essas faixas como sensores passivos, isto é, aqueles que utilizam apenas a luz do sol como fonte de captação da radiação eletromagnética.

E nas bandas do infravermelho (IV) que são realizadas através da interação da radiação com a matéria, e ocorre com o acoplamento do campo elétrico oscilante da vibração molecular e o da radiação incidente. A faixa de radiação do infravermelho, no espectro eletromagnético, ocorre na faixa entre o visível e micro-ondas (Figura 2), sendo que a faixa de maior interesse se encontra na região de 4000 a 750 nm) (FORATO et al, 2010).



**Figura 2.** Representação esquemática do espectro eletromagnético.  
Fonte: FORATO et al, 2010.

Os métodos de espectrometria modernos constituem hoje os principais recursos para a identificação e elucidação estrutural. São, também, de alta relevância na determinação da pureza e quantificação, bem como no controle e acompanhamento de

reações e processos de separação (LOPES & FASCIO, 2004). As principais razões relatadas por MENESES, de ALMEIDA & de MELLO BAPTISTA, (2019) para se utilizar a espectrometria como meio de obtenção de dados são:

- Sensível as mínimas quantidades de elementos ou moléculas presentes na matéria;
- Exige quantidade mínimas de material para identificá-lo;
- Pode ser realizado mesmo quando as matérias ou alvos estão distantes;
- Método não destrutivo;
- Pode produzir informações espaciais e temporais detalhadas.

Outras vantagens também para o uso dos referidos métodos físicos de análise destaca-se a redução no tempo de análise, ampliação da capacidade de identificar ou caracterizar estruturas complexas (LOPES & FASCIO, 2004). A utilização dos métodos convencionais e espectrais aumentam os dados que podem ser reunidos para satisfazer a crescente procura de informação quantitativa para apoiar a nova ciência e ajudar a satisfazer as necessidades mundiais ((VISCARRA ROSSEL et al., 2022).

ROMANO (2011), avaliou o grau de humificação da matéria orgânica de uma cronomsequência de solos através de espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS). E concluiu que a idade do solo não influencia diretamente no grau de humificação da MO, mas sim a formação histórica e o manejo.

### **3.6 Espectrometria de Carbono**

Com o aumento das emissões de gás carbônico para a atmosfera e com a implementação, em 2008, do Protocolo de Quioto pesquisas para avaliar o papel dos ecossistemas terrestres no ciclo global do carbono tem sido realizada. A construção de inventários nacionais de carbono vem motivando a implementação de projetos que promovam o acúmulo de carbono (C).

A necessidade de monitoramento dos estoques tem aumentado, exigindo a busca por metodologias de quantificação mais simples, de rápida reproduzibilidade e sem geração de resíduos sólidos. (SATO et al, 2013). Tornando então a espectrometria de carbono crucial para a crescente demanda (DAI et al, 2024). Métodos convencionais de predição caminham no sentido contrário às tendências da química moderna: a chamada química verde, que se preocupa com o desenvolvimento de tecnologias, métodos e processos incapazes de causar poluição (PRADO, 2003).

A maioria dos estudos realizados recentemente confirmaram que a espectroscopia é eficaz na previsão de C (WANG et al., 2024). Determinando diferentes frações da MO devido as diferenças de refletância associadas as formas químicas e proporções nos compostos contidos em cada fração. Adicionalmente, a partir das ligações organominerais, podem ser indiretamente determinados outros elementos químicos, como hidrogênio, fósforo e potássio (MARCHAO et al., 2019).

Geralmente, a espectroscopia de laboratório tende a produzir melhores previsões do que a espectroscopia no campo, principalmente devido à influência limitada da estrutura física e da umidade na difusão da luz (ROUDIER et al., 2017; MINASNY et al., 2011). Para espectros no campo, o aumento da umidade do solo diminui a refletância geral, como características de absorção proeminentes observadas em 1400 e 1900 nm (ROUDIER et al., 2017). E também podem ter como influencia, o tamanho da partícula quanto a rugosidade da superfície, que afetam a precisão da espectrometria.

Para usar os métodos com confiança, precisamos validar os resultados com conjuntos de dados independentes e amostrados de forma adequada (VISCARRA ROSSEL et al., 2022). Desta forma, a análise estatística, se tornou uma alternativa para estimar concentrações de constituintes de carbono a partir de espectros de refletância. Como acontece com qualquer modelagem, é necessária uma implementação criteriosa.

SILVA et al. (2020), utilizou da espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) em conjunto com a análise de componentes principais (ACP) para estudar características de um Latossolo Amarelo submetido a diferentes usos da terra (floresta primária; floresta secundária; fruticultura; horticultura; pastagem degradada; pastagem melhorada e agricultura anual) na Amazônia Oriental brasileira, e obteve como resultado que os espectros NIR apresentaram informações relevantes para o agrupamento das amostras de solos de acordo com seu tipo de uso e atributos físico-químicos (quantidade de carbono, nitrogênio, potássio e densidade) e a ACP apresentou 97 % da variância total explicada em PC1 e PC2.

### **3.7 Espectrometria da MO**

Dada à comprovação da MO em aumentar a capacidade produtiva dos solos, em particular em solos tropicais, pesquisas visando o melhor entendimento de sua dinâmica no solo tem sido incentivada, principalmente pois 58% da matéria orgânica, é composta por carbono. Suas propriedades de absorção notáveis, correlacionam-se fortemente com

a refletância espectral, permitindo que o conteúdo da MO seja efetivamente obtido usando o espectro de refletância como método alternativo (HUANG et al, 2024).

A spectrometria UV-VIS é bastante útil na caracterização da matéria orgânica justamente devido a sua composição, cujas propriedades de absorção e emissão de energia possibilitam a identificação de diferentes compostos orgânicos (KNAPIK et al., 2014). Sendo afetados por uma combinação de componentes como sais e materiais argilosos, contendo sinais complexos de absorções sobrepostas de múltiplas substâncias (HUANG et al, 2024).

Atualmente, há um crescente interesse no melhor entendimento das frações estáveis da MO, denominadas substâncias húmicas (SHs), constituídas por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina (PRIMO et al, 2011). As frações humificadas em amostras de solo conseguem ser rapidamente diferenciadas pela spectrometria, porque o comprimento de ondas dos espectros de emissão e excitação encontra-se em faixas maiores que os ácidos fúlvicos e húmicos. As análises podem ser feitas diretamente na amostra, sem necessidade do processo de extração e purificação.

Na região do IV é possível acessar a funcionalidade das SH, especialmente de grupos oxigenados, proteínas, polissacarídeos e proporção de grupos aromáticos/alifáticos e hidrofílicos/hidrofóbicos. É possível também identificar uma "assinatura química" das SH a partir da análise da região entre 1.400 e 900 cm<sup>-1</sup> conhecida como impressão digital (DOBBSS et al, 2009). No entanto, ainda não há um consenso entre a relação da concentração e as características de composição da matéria orgânica e os parâmetros tradicionalmente utilizados no monitoramento e na modelagem (KNAPIK et al., 2014).

Estudos recentes têm destacado o potencial dos métodos espectroscópicos para avaliar a maturidade do composto (MARTÍN et al., 2023). Relatando que as características de fluorescência da MO no composto refletem a decomposição gradual de substâncias semelhantes a proteínas durante a compostagem, bem como a formação de substâncias fúlvicas e húmicas (RUEDA et al, 2024).

CARNEIRO et al, (2019) demonstraram o potencial da spectrometria na caracterização da matéria orgânica de solos, confrontando a variável reflectância espectral com a quantificação da matéria orgânica de amostras de solo coletadas no Centro de Agroecologia Rio Seco – UEFS, e ao confrontar os resultados analíticos com a interpretação da leitura espectral, constatou-se uma concordância entre os valores de

reflectância representados nas curvas espetrais e os resultados analíticos do teor de MO.

### **3.8 Pré-tratamento dos Dados da Análise Espectral**

A aquisição de dados espetrais não fornece apenas informações relevantes sobre a presença, ausência e concentração de compostos químicos. Dependendo da técnica de aquisição de espetros, equipamentos, condições experimentais, acessórios utilizados, uma grande quantidade de informação relativa aos fenômenos físicos, erros aleatórios e sistemáticos também estarão presentes no conjunto de dados adquiridos. Dessa forma, para que essas informações não encubram a informação que está verdadeiramente relacionada com a propriedade que se deseja estudar, uma série de ferramentas matemáticas, chamadas de pré-tratamento espetrais, são utilizadas (FERREIRA, 2015).

Estes pré-tratamentos são aplicados aos dados espetrais com o intuito de suavizar, normalizar, realçar, reduzir discrepâncias, ruídos, interferências e não linearidades existentes. Sendo estes os mais comuns:

A Suavização por média móvel simples (SMO) que é uma das técnicas mais comuns utilizadas na espectrometria, utilizada para reduzir ruídos de fundo mantendo as características de interesse. Para a aplicação da suavização é necessário escolher o número de pontos a serem suavizados (CARVALHO, 2019).

A correção de espalhamento de luz (MSC) é usada para corrigir efeitos de espalhamento de luz em espectroscopia por refletância, causados por diferenças no tamanho e na forma das partículas. Estes efeitos são eliminados fazendo-se a regressão linear das variáveis espetrais nas variáveis do espectro médio (FERREIRA, 2015).

O algoritmo de Savitzky-Golay (SGD) (SAVITZKY; GOLAY, 1964) é geralmente utilizado para derivação espectral. Derivadas são técnicas comuns de pré-processamento espectral utilizadas para remover ruídos não importantes através do cálculo da derivada das refletâncias em relação aos comprimentos de onda. Esta técnica requer a seleção do número de pontos a serem derivados, além da ordem do polinômio e da derivada.

RIBEIRO (2021), utilizou dos pré-processamento da primeira derivada e suavização da reflectância por Savitzky-Golay para análise de espectroscopia de reflectância na avaliação do carbono orgânico em solos áridos, e ao utilizar a primeira derivada espectral com a PLSR e a PCR, os modelos de predição do carbono orgânico nas substâncias húmidas foram capazes de serem estimados com eficiência. AGUIAR

(2021), também utilizou de ferramenta exploratória dos dados espectrais de absorção de solos do Maciço de Baturité e do Sertão Central (Ceará, Brasil), para verificar a potencialidade da técnica na caracterização dos solos. Os dados espectrais foram obtidos pela espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e utilizou de correção do espalhamento de luz (MSC) e a 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> derivadas Savitzky-Golay, e foi obtido que o melhor pré-tratamento foi verificado usando apenas a correção de espalhamento de luz (MSC).

### **3.9 Análise de Componentes Principais (ACP)**

A análise de componentes principais (ACP) é um método de ordenação com grande tradição, sendo geralmente utilizada para a síntese de dados ambientais. Tendo como suas principais funções: Agrupar indivíduos com características semelhantes, estudar suas correlações e também identificando possíveis dados atípicos (outliers) que podem prejudicar a construção dos modelos de predição. Procedimento semelhante foi utilizado por VISCARRA ROSSEL & CHEN (2011).

Na análise de componentes principais, cada componente principal (PC) gerada é uma combinação linear das variáveis originais. O número de componentes principais a ser utilizado no modelo ACP é determinado pela porcentagem de variância explicada. Assim, seleciona-se um número de componentes de tal maneira que a maior porcentagem da variação presente no conjunto de dados originais seja capturada (SOUZA & POPPI, 2012).

A primeira componente principal (PC1) é traçada no sentido da maior variação no conjunto de dados; a segunda (PC2) é traçada ortogonalmente à primeira, com o intuito de descrever a maior porcentagem da variação não explicada pela PC1 e assim por diante; enquanto os escores representam as relações de similaridade entre as amostras.

SARTORIO (2023), teve como objetivo comparar e avaliar a potencialidade da técnica de Análise de Componentes Principais (ACP) para o aprimoramento da acurácia da classificação do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica Lajeado São José. A aplicação da ACP no Google Earth Engine (GEE) se mostrou muito eficiente, concentrando a maioria da informação nas duas primeiras componentes principais e alocando o ruído na última componente, que foi descartada.

Os gráficos de escores são as projeções dos objetos originais no espaço das componentes principais, ou seja, são as novas coordenadas dos objetos nas novas variáveis que são as PCs. É no gráfico dos scores que procuramos alguma relação entre os objetos, no caso do nosso conjunto de dados as relações entre os elementos (LYRA et al, 2010). Simplificando a representação da estrutura dos dados, procurando imagens planas que representem o melhor possível a disposição dos pontos-indivíduos no espaço e qual o melhor agrupamento (RODRIGUES, 2024).

Cada componente principal é constituído pela combinação linear das variáveis originais e os coeficientes da combinação são denominados loadings. Matematicamente, os loadings são os cosenos dos ângulos entre as variáveis originais e os componentes principais, representando, portanto, o quanto cada variável original contribui para uma determinada PC.

A avaliação dos loadings permite entender quais variáveis mais contribuem para os agrupamentos observados no gráfico dos escores. Através da análise conjunta do gráfico de escores e loadings, é possível verificar quais variáveis são responsáveis pelas diferenças observadas entre as amostras. GANASCINI DONATO (2021), menciona que através da seleção de comprimentos de onda pode fornecer uma referência de faixa a ser considerada no desenvolvimento de equipamentos de detecção de parâmetros.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização das Fases de Processo da Compostagem

O experimento da compostagem foi conduzido na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em parceria com a EMBRAPA Agrobiologia, em Seropédica-RJ. Após as coletas da compostagem, dois experimentos foram realizados no laboratório de geoprocessamento da UFRRJ sendo eles: o Experimento 1 (fase do processo de compostagem), referente às fases do processo de compostagem, e o Experimento 2 (Avaliação da variação da quantidade matéria orgânica no solo). A produção e coleta da compostagem de Gliricidia (Figura 3) foi realizada no SIPA – Sistema Integrado de Produção Agroecológica (Fazendinha Agroecológica Km 47), localizado no município de Seropédica.



**Figura 3.** Biomassa recém-colhida de *Gliricidia*, com peso aproximado de 5 kg, do dia 0.

A compostagem foi realizada no período compreendido entre novembro a março dos respectivos anos de 2022 e 2023. Foram montadas 4 leiras (Figura 4) no mesmo dia do corte da leguminosa e início da produção da compostagem, em pátio fechado com piso de concreto. A primeira amostra foi retirada no dia 0, estas foram colocadas em sacolas de papel kraft e levadas a estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 65°C por 72 horas, a fim de preservar as propriedades físicas da compostagem para as análises espectrais.



**Figura 4.** Montagem das leiras de compostagem.

Fonte: Gabriel Mello (2022).

O primeiro reviramento das pilhas foi realizado aos 15 dias após terem sido montadas, e os demais foram espaçados também com 15 dias, totalizando 9 reviramentos. Foi realizado da seguinte maneira: As 4 leiras de compostagem foram colocadas em caixas padronizadas, depois pesadas. Após esse processo, elas retornavam ao chão para ser reviradas, coletando as amostras para as análises, e molhadas até que o material se encontrasse com a umidade uniforme. Para a finalização, era realizado a montagem das pilhas para que após os 15 dias corridos, o mesmo processo fosse repetido. Assim até completar os 120 dias.

Na Tabela 1, está o demonstrativo dos dias que foram realizados as coletas até completar 120 dias de compostagem, e suas respectivas fases do processo da compostagem (Figura 5).

**Tabela 1.** Dias das coletas de amostras da compostagem de 0 a 120 dias e as fases do processo da compostagem.

<b>Dias</b>	<b>Datas das coletas da compostagem</b>	<b>Fases do processo da compostagem</b>
0	30 de Novembro 2022	Fase Mesofílica

15	14 de Dezembro de 2022	
30	28 de Dezembro de 2022	
45	12 de Janeiro de 2023	Fase Termofílica
60	27 de Janeiro de 2023	
75	10 de Fevereiro de 2023	
90	27 de Fevereiro de 2023	Fase de Maturação
105	14 de Março de 2023	
120	31 de Março de 2023	



**Figura 5.** Pilhas de compostagem com 45 dias, coleta realizada no dia 12 de janeiro de 2023, e na fase termofílica.

Para ser realizada as análises químicas, as amostras de compostagem após a secagem foram encaminhadas ao processo de moagem em moinhos tipo Willey, com

facas e câmara de aço inoxidável e com peneiras de 0,5 ou 1mm de diâmetro (20-40 mesh), como mostrado na Figura 6. Este processo foi realizado para assegurar a homogeneização dos tamanhos das partículas da amostra (DEMBOCURSKI, 2023).



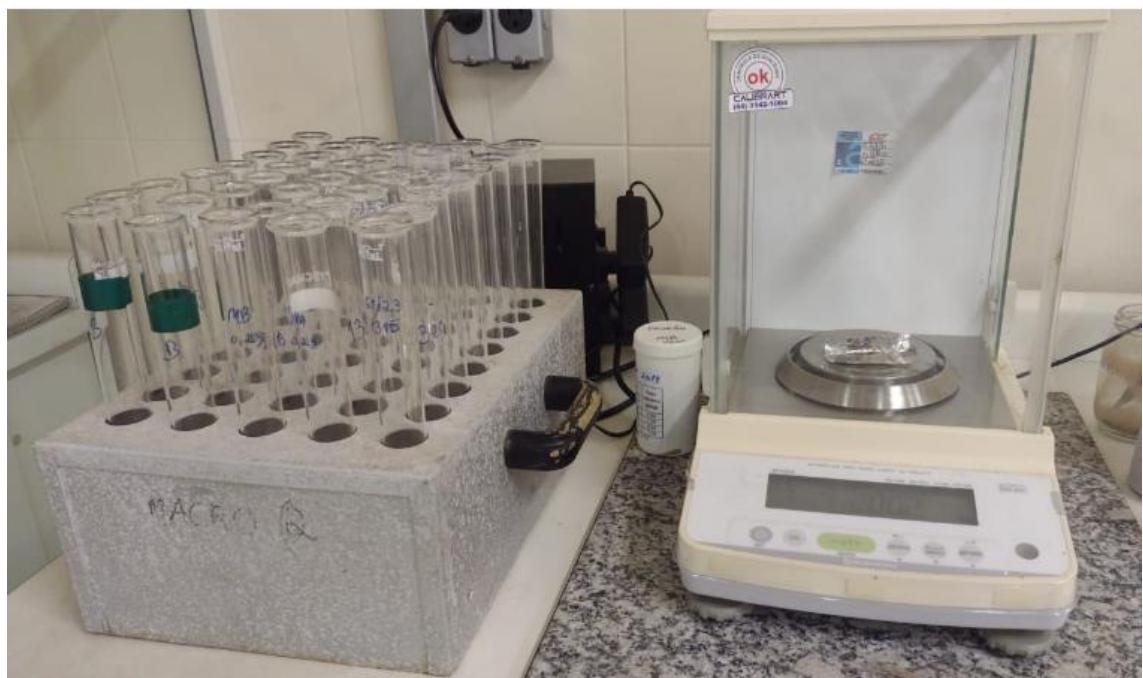
**Figura 6.** Processo de moagem das amostras de compostagem da Gliricidia para as análises químicas.

#### 4.2 Análise Química do C, N e Macro nutrientes (Ca, Mg, P e K)

A caracterização de Carbono e Nitrogênio foi realizada no laboratório de Ciclagem de Nutrientes na EMBRAPA-AGROBIOLOGIA. Foram pesadas amostras de aproximadamente 12 mg de cada leira por dia de compostagem, com precisão de 4 casas decimais, em capsulas de estanhos. Foi utilizado, o autoanalisador de carbono, a 900°C (modelo CHN-600), que utiliza com referência o processo de combustão a seco que permite a determinação porcentual de elementos químicos como o carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre de uma amostra. A cada 10 amostras o aparelho foi calibrado com amostras-padrão do laboratório.

A caracterização dos macros nutrientes foi realizado no laboratório de Química Agrícola na EMBRAPA-AGROBIOLOGIA (Figura 7). Foram 36 amostras, seguindo a adaptação do método tradicional descrito por Horwitz (1997) para digestão nitroperclórica. Foram pesados 200mg das amostras (Figura 8) em tubos de ensaio e

adicionaram-se 2 mL da mistura ácida nitro-perclórica (2:1), e então prosseguiram para o aquecimento gradativamente até a temperatura de 210 °C.



**Figura 7.** Blocos de tubo de digestores e balança de precisão.



**Figura 8.** Amostra de compostagem de Gliricidia de 200 mg.

Os parâmetros analisados foram comparados com a legislação vigente ao tema, identificando se o composto obtido atende aos padrões de qualidade para fertilizantes orgânicos. A Instrução Normativa nº 25 de 2009, do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), dispõe sobre tais padrões, sendo eles mínimos ou máximos (ÀVILA et al, 2020). A Tabela 2 apresenta os valores adotados como referência neste trabalho.

**Tabela 2.** Relação de valores de referência por parâmetro. Fonte: Adaptado de IN nº 25 SDA/MAPA, 2009.

Parâmetro	Valor
N total (mín.) - %	0,5
C orgânico (mín.) - %	10
Relação C/N (máx.)	14/1
Cálcio total (mín.) – g/kg	1,0
Magnésio total (mín.) – g/kg	1,0

Nitrogênio (N), Carbono (C), Mínimo (mín.) e Máximo (máx.).

#### **4.3 Análise Descritiva dos Parâmetros Químicos da Compostagem, ANOVA e Teste Scott Knott**

A estatística descritiva foi utilizada como a etapa inicial da análise de dados, tendo como objetivo resumir e compreender os dados (PEREIRA, 2019). Foi necessária para caracterizar a variabilidade do nitrogênio, carbono e macro nutrientes durante a compostagem para caracterização das normas vigentes. Todas as análises foram realizadas no software Past 4.03. Os parâmetros analisados foram: coeficiente de variação e teste Shapiro-wilk.

O coeficiente de variação (CV) foi analisado segundo a classificação proposta por WARRICK & NIELSEN (1980), considerando como valores baixos o  $CV < 12\%$ , médios para  $12\% < CV < 60\%$  e altos para  $CV > 60\%$ . A normalidade dos dados foi avaliada pelo Teste de Shapiro-Wilk, que tem como objetivo avaliar se uma distribuição é semelhante a uma distribuição normal. Portanto, um valor de  $p < 0.05$  indica que você rejeitou a hipótese nula, ou seja, seus dados não possuem distribuição normal. As fases da compostagem foram submetidas à análise de variância (ANOVA), e as médias foram

comparadas utilizando o teste de agrupamento de Scott-Knott, adotando-se um nível de significância de 5%.

#### **4.4 Obtenção dos Índices Espectrais por meio do Espectrorradiômetro**

As obtenções dos dados espectrais foram realizadas no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Rural do Rio de Janeiro-UFRRJ. Dois experimentos foram conduzidos: o Experimento 1 (fase do processo de compostagem), referente às fases do processo de compostagem, e o Experimento 2 (Avaliação da variação da quantidade matéria orgânica no solo), para avaliar a variação da quantidade de matéria orgânica no solo. As leituras dos fatores de reflectância dos experimentos foram realizadas em uma sala escura (dark room), utilizando o espectrorradiômetro FieldSpec 4 (Figura 9), que possui faixa espectral de 350 a 2500 nm e tempo de coleta de 0,2 segundos por espectro.



**Figura 9.** Análise laboratorial dos espectros no dark room.

### **Experimento 1 – Fases do Processo de Compostagem**

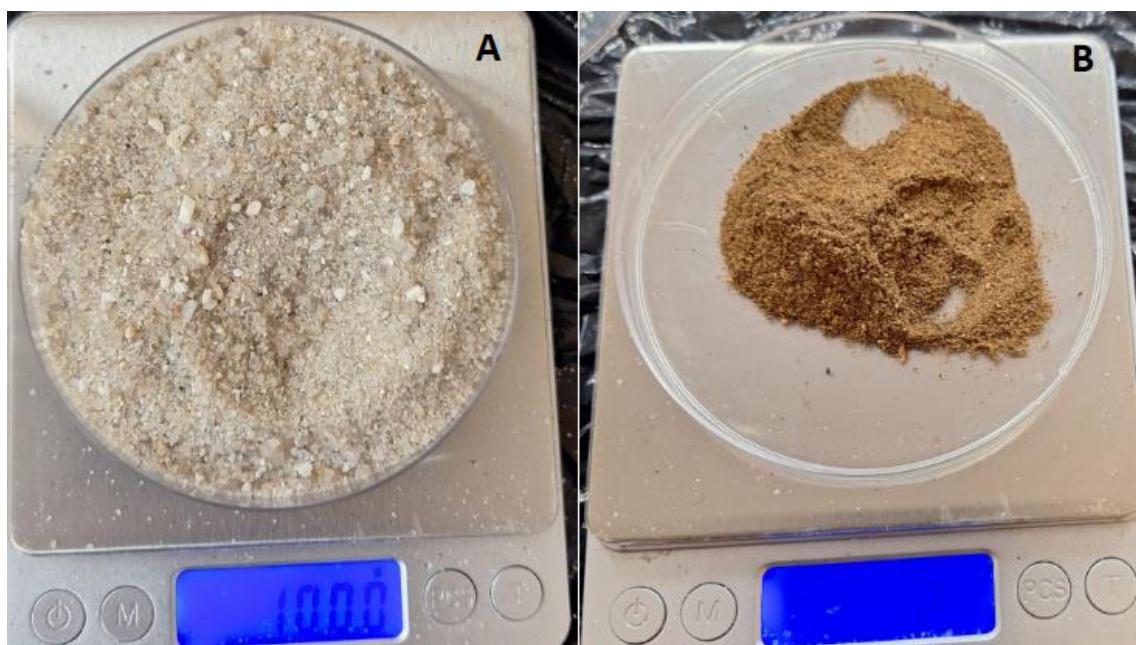
Para aquisição dos dados espectrais associados ao Experimento 1, foram realizadas as análises espectrais nas amostras, para cada dia das fases do processo da compostagem, mantendo o tamanho natural das partículas. Em cada dia foram coletados dados em 5 amostras e a cada amostra foram realizadas 3 leituras (Figura 10).



**Figura 10.** Amostras da compostagem para as leituras espectrais.

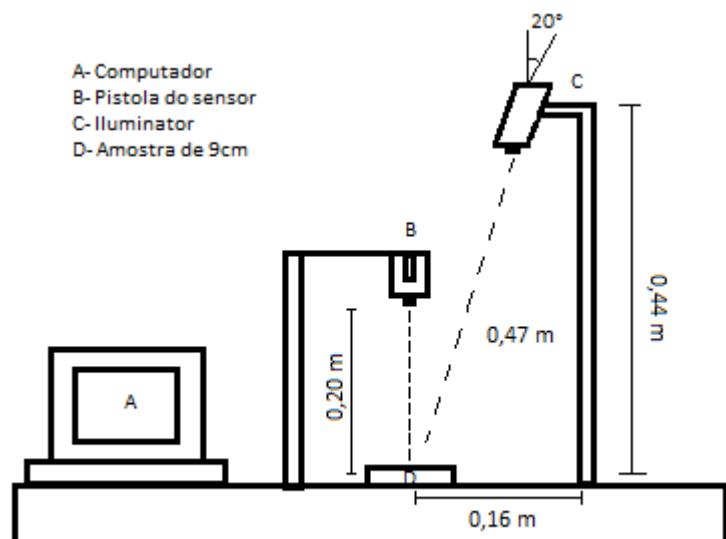
## Experimento 2 – Avaliação da Variação da Quantidade de Matéria Orgânica no Solo

Foram realizadas análises espectrais em amostras compostas por 100% areia, assim como em misturas de areia com matéria orgânica (MO), com o objetivo de simular solos arenosos típicos do Brasil e caracterizar o comportamento espectral do solo conforme a variação na quantidade de MO. Foram analisadas proporções de areia com diferentes concentrações de MO (areia + 1% MO, areia + 2% MO, areia + 3% MO, areia + 4% MO e areia + 5% MO), representando tanto as concentrações mais comuns quanto as menos frequentes em solos brasileiros. As amostras da MO foram moídas em peneira de 1mm de diâmetro (20-40mesh), visando assegurar a homogeneização (Figura 11).



**Figura 11.** A: 100g de areia lavada e seca em estufa. B: 1% do Composto orgânico moído. Ambos utilizados nas análises de spectrorradiômetro.

Em ambos os experimentos, as amostras coletadas foram acondicionadas em placas petri com 9 cm de diâmetro e 15 mm de altura. Para a realização das leituras, o sensor foi posicionado verticalmente a 0,20 m de distância da amostra. Foram utilizadas como fonte de iluminação uma lâmpada halógena de 75 W, posicionadas a distância de 0,44 m da amostra e ângulo zenital de 20° (Figura 12). Para a calibração do sensor foi utilizada uma placa branca de spectralon (sulfato de bário) como padrão de referência absoluta (100% de reflectância). A calibração do sensor foi realizada no início das leituras espectrais e posteriormente a cada 15 amostras. A reflectância de cada amostra foi obtida pela média de três (3) leituras espectrais equivalentes a rotações na placa de Petri de 120°.



**Figura 12.** Esquematização para a coleta das análises espectrais.

#### 4.5 Análises Espectrais de Reflectância.

As curvas espectrais foram obtidas nos comprimentos de onda, de 350 a 2500 nm, para todas as amostras. Para o presente estudo, foi definido a região espectral usando como parâmetro a ISO 20473:2007 que especifica a divisão da radiação óptica em bandas espectrais para óptica e fotônica. As bandas na região do visível foram obtidas nos comprimentos de onda de 380 a 780nm. E nas bandas da região do IV, foram obtidas nos comprimentos de onda de 780 a 2500nm. Dessa forma, o comportamento foi observado

em todo o espectro, para identificação visual de possíveis ocorrências de variação nas curvas espectrais dos experimentos. Os arquivos foram obtidos em formato de texto (“.txt”) foram separados em pastas e importados para o software Rstudio.

A partir dos dados espectrais brutos obtidos, foi possível observar os comportamentos espectrais. No experimento 1, observou-se o comportamento das diferentes fases do processo de compostagem. Essa abordagem permitiu uma análise temporal do comportamento espectral. E ao calcular as médias entre os dias correspondentes a cada fase, para identificar de forma mais clara as variações no comportamento espectral ao longo das etapas do processo. No experimento 2, avaliou-se o comportamento espectral da areia, tanto isoladamente quanto com a adição de diferentes concentrações de matéria orgânica (MO), variando de quantidades mais comuns em solos brasileiros (1 a 2%) até concentrações mais elevadas e menos frequentes (acima de 3%).

#### **4.6 Pré-tratamento das Análises Espectrais**

Os dados brutos de reflectância (REF) das amostras coletadas passaram por três tipos de pré-processamento, que são amplamente utilizados nas análises espectrais. O objetivo foi avaliar qual dessas estratégias seria mais apropriada para o tratamento dos dados, garantindo que informações espectrais relevantes não fossem eliminadas. Os pré-tratamentos utilizados foram: suavização por média móvel simples com janela de tamanho 3 (SMO), correção de espalhamento de luz (MSC) e derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem com largura de janela (FL) de 5 e ordem do polinômio (FORDER) de 2 (SGD).

Para as análises espectrais, utilizou-se o software R para o processamento dos dados, empregando pacotes específicos para etapas analíticas essenciais. Para suavização dos dados, foram empregadas as funções filter(), correspondendo à suavização por média móvel, enquanto a correção de espalhamento de luz foi realizada com o pacote PLS. A derivada de Savitzky-Golay de primeira ordem foi aplicada com o auxílio do pacote SIGNAL,

#### **4.7 Análise de Componentes Principais**

Para a realização da Análise de Componentes Principais (ACP), foi essencial a correta organização da matriz de dados. A matriz foi estruturada da seguinte maneira:

Cada linha corresponde a uma amostra distinta. Os dados de entrada foram organizados de acordo com os tratamentos realizados. No Experimento 1, foram utilizadas 9 linhas, cada uma representando um dia específico de cada fase do processo de compostagem. No Experimento 2, foram utilizadas 6 linhas, cada uma representando uma amostra específica, incluindo areia pura e as com as diferentes concentrações de Matéria Orgânica (MO) adicionadas. As colunas correspondem aos comprimentos de onda, que representam as variáveis observadas durante os experimentos.

Após a montagem da matriz, a análise de componentes principais (ACP) foi aplicada para reduzir a dimensão dos dados e expressá-los de acordo com sua variabilidade. As amostras foram processadas de acordo com os comprimentos de onda da região do visível (380-780 nm) e a também com os comprimentos de ondas da região do infravermelho (780 -2500 nm). Foram realizadas as análises utilizando os dados brutos e com os pré-tratamentos (SMO, MSC E SGD).

Sendo adotado componentes principais que expliquem pelo menos 70% da variação total dos dados, de modo a identificar as principais componentes responsáveis pela maior parte da variabilidade observada. Os gráficos de dispersão foram utilizados para representar a estrutura dos dados, buscando imagens planas que melhor capturassem a disposição dos pontos-indivíduos no espaço. Essa abordagem permitiu a visualização da dispersão dos tratamentos com base nos escores dos componentes principais, em espaços bidimensionais ou tridimensionais. O objetivo principal foi identificar qual pré-tratamento seria mais adequado, avaliando padrões, agrupamentos e a variabilidade explicada pelos componentes principais.

Por meio da análise de ACP, também foram determinados os valores de loadings sendo adotados para identificar quais foram os comprimentos de ondas mais representativos nos experimentos. Para melhorar e facilitar a interpretação dos loadings, foi realizada uma normalização que ajusta a escala de visualização. Esse procedimento visa tornar a representação gráfica mais clara, mantendo as relações entre as variáveis intactas. A normalização consiste em reescalonar os valores dos loadings para uma faixa padronizada, o que permite uma análise comparativa mais intuitiva sem alterar a essência dos dados. Esse ajuste foi feito utilizando a Equação 1, descrita a seguir, que aplica um fator de escala aos valores originais, garantindo que fiquem dentro de uma amplitude adequada para interpretação visual.

$$\text{Loading Normalizado} = \frac{\text{Loading original}}{\text{máximo valor encontrado}} \quad \text{eq. 1}$$

Foram utilizados valores padronizados iguais a 1 para facilitar a visualização das faixas espectrais ideais. Esse critério simplifica a identificação dos comprimentos de onda com maior representatividade, destacando de forma clara as regiões espectrais mais relevantes. Assim, torna-se mais fácil analisar e interpretar o comportamento das amostras, evidenciando as áreas espectrais de maior importância no contexto estudado.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análises dos Atributos Químicos C e N da Compostagem

A compreensão química do processo de compostagem contribuiu para definir parâmetros químicos que expressem a qualidade do composto obtido. Como pode ser observado na Tabela 4, o carbono apresenta uma redução, enquanto o teor de nitrogênio aumenta ao longo dos dias, exceto no dia 60, o que resulta na diminuição da relação C/N.

**Tabela 3.** Análise de carbono e nitrogênio do composto orgânico.

Análise Descritiva Carbono			
Dias de coleta	C [%]	Média C [%]	Coeficiente de variação (CV)
0	48,349		
	46,399		
	45,726	46,5	2,77
	45,496		
15	44,26		
	44,551		
	44,934	45,1	2,49
	46,759		
30	44,507		
	44,554		
	43,708	44,1	1,05
	43,749		
45	43,655		
	44,199		
	41,471	42,9	2,85
	42,448		
60	42,149		
	42,737	42,6	0,87

	43,024			
	42,581			
	41,253			
75	45,183	43	3,81	
	42,952			
	42,538			
	41,696			
90	41,558	41,8	0,75	
	41,698			
	42,262			
	37,686			
105	42,285	41	5,35	
	41,949			
	41,946			
	42,783			
120	38,725	41,3	4,35	
	41,303			
	42,207			

#### Análise Descritiva Nitrogênio

Dias de coleta	N [%]	Média N [%]	Coeficiente de variação (CV)
	3,003		
0	3,173	3,1	3,16
	3,058		
	3,214		
	3,757		
15	3,813	3,7	2,69
	3,62		
	3,615		
	3,858		
30	4,098	3,9	4,09
	3,746		
	3,783		
	3,479		
45	4,292	3,7	10,4
	3,605		
	3,496		
	3,383		
60	2,712	3	9,53
	3,007		

		2,878		
		3,867		
	75	4,517		
		4,387	4,3	6,67
		4,364		
		3,972		
	90	3,88		
		4,378	4,1	5,66
		4,25		
		4,341		
	105	4,161		
		4,434	4,3	2,93
		4,428		
		4,365		
	120	4,187		
		4,361	4,4	3,3
		4,54		

Carbono (C), Nitrogênio (N).

Conforme observado no coeficiente de variação (CV), o carbono e o nitrogênio apresentaram baixa variação, com valores de carbono oscilando entre 0,75 e 5,35 e os de nitrogênio oscilando entre 2,69 a 10,4 ao longo dos dias das fases do processo de compostagem. Esses resultados indicam que os conjuntos de dados são homogêneos e estáveis. O CV de C e N considerados baixos estão de acordo com os resultados também observados por BRUNET et al, (2007).

A análise de variância agrupada foi utilizada para identificar diferenças significativas nas fases do processo de compostagem. Desta forma, foi revelado uma diferença estatisticamente significativa nos teores de carbono e nitrogênio ao longo das fases do processo de compostagem, conforme indicado pelo teste F ( $p \leq 0,01$ ). Como pode ser observado na tabela 4.

**Tabela 4.** Análise de variância referente aos teores de carbono e nitrogênio das fases do processo de compostagem.

Anova Carbono				
	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	2	87,95	43,97	22,31**

<b>Erros</b>	33	65,05	1,97
<b>Anova Nitrogênio</b>			
	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>
<b>Tratamentos</b>	2	5,724	2,862
<b>Erros</b>	33	3,937	0,119

Grau de Liberdade (GL), Soma dos quadrados (SM), Quadrado médio (QM), Valor F (F), \*\* significativo a 1% de probabilidade.

Como a ANOVA identificou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, o teste de Scott-Knott foi aplicado para detalhar essas diferenças. Ele agrupou as fases que não apresentaram distinções significativas entre si e separou aquelas que diferiram, facilitando a interpretação dos resultados. O teste de Scott-Knott, Tabela 5, permitiu detectar a variabilidade do carbono nas três fases do processo de compostagem. Para o nitrogênio, a variabilidade foi identificada sendo consistentemente maior na fase de maturação em comparação as fases mesofílica e fases termofílica.

**Tabela 5.** Comparação das médias dos teores de carbono e nitrogênio das fases do processo de compostagem pelo Teste de Scott Knott.

<b>Teste de Scott Knott - Carbono</b>		
<b>Fases do processo de compostagem</b>	<b>Médias</b>	
Fase mesofílica	45,81	a
Fase termofílica	43,23	b
Fase de maturação	41,75	c
<b>Teste de Scott Knott - Nitrogênio</b>		
<b>Fases do processo de compostagem</b>	<b>Médias</b>	
Fase mesofílica	3,41	a
Fase termofílica	3,53	a
Fase de maturação	4,28	b

\*Médias seguidas da mesma letra minúscula entre linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5 % de probabilidade.

ARAÚJO, (2021) relatou em seu estudo que a medida que o processo de compostagem avança a intensidade de perda de carbono diminui. As fontes mais acessíveis de carbono são as primeiras a serem consumidas, e na etapa final do processo a síntese de substâncias complexas e polimerizadas formadas pelo processo de humificação prevalecem sobre o processo de mineralização. Isto ocorre em decorrência da oxidação da matéria orgânica pelos microrganismos, que liberam CO<sub>2</sub> através da sua respiração, diminuindo assim a concentração de C (HÖFIG, (2024); VALENTE et al., (2009)).

Nos teores de nitrogênio, como apresentado no teste de Scott-Knott, existe similaridade entre as fases mesofílica e termofílica, que pode ser atribuída à dinâmica contínua e eficiente de mineralização ocorrendo em ambas as fases. Isto pode ser observado na Tabela 3, que os teores variam de 3 a 3,9% entre as fases. Durante este intervalo, os processos de decomposição da matéria orgânica e liberação de nitrogênio mantêm-se relativamente constantes, sem grandes variações significativas em função do tempo. Já na fase de maturação, observamos um aumento nos teores de nitrogênio, com valores superiores a 4%. Esse crescimento pode ser explicado, em parte, pela riqueza da leguminosa *Gliricidia* em nitrogênio proteico, que, após o processo de mineralização, libera nitrogênio inorgânico no meio (SILVA et al., 2013).

Devido à redução dos teores de carbono e ao aumento do nitrogênio, ao final do processo de compostagem a relação C/N se torna inferior a inicial, sendo comuns valores variando entre 10:1 e 20:1. Esse comportamento foi observado também nas avaliações realizadas neste experimento. Como pode ser observado na Tabela 6, no dia 0 da compostagem, a relação C/N foi de 15:1 e, ao longo dos dias, foi diminuindo, atingindo o valor de 9:1 na última coleta de amostras, após 120 dias.

**Tabela 6.** Relação C/N em relação aos dias das fases do processo de compostagem.

Dias de coleta	Relação C/N
0	15/1
15	12/1
30	11/1
45	12/1
60	14/1
75	10/1
90	10/1
105	09/1
120	09/1

De acordo com a legislação brasileira, Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009 do Ministério da Agricultura (BRASIL, 2009). Os índices para a vigência são valores mínimos de 0,5%, para N, 10% para C e relação C/N, no valor máximo de 14/1. Conforme apresentado na Tabela 7, todos os parâmetros obtidos superaram os valores exigidos pela legislação.

**Tabela 7.** Parâmetros exigidos pela legislação de C e N e parâmetros obtidos nestes experimentos.

	Índices da legislação	Índices obtidos
<b>C (valor mín.)</b>	10%	41,30%
<b>N (valor mín.)</b>	0,50%	4,40%
<b>Relação C/N (valor máx.)</b>	14/1	09/1

Carbono (C), Nitrogênio (N).

## 5.2 Análise Química dos Macro nutrientes (Ca, K, Mg e P) da Compostagem

Ao analisarmos a Tabela 8, nota-se que os elementos minerais Ca, P, K e Mg obteve-se disponibilidade crescente em relação a avaliação inicial. É importante ressaltar que em um composto orgânico, teores elevados de macro nutrientes, são importantes já que são utilizados como fertilizantes.

**Tabela 8.** Análise de dados Cálcio (Ca2+), Magnésio (Mg2+), Potássio (K+) e Fósforo (P).

dias corridos	Amostras	Ca (g/Kg)	K (g/Kg)	Mg (g/Kg)	P (g/Kg)	Média Ca	Média K	Média Mg	Média P
1	1	7,48	6,74	7,42	1,39	7,1	7,2	7,3	1,4
	2	7,08	7,05	6,89	1,41				
	3	6,67	7,74	7,92	1,42				
	4	6,98	7,21	6,93	1,48				
15	5	9,8	10	8,11	2,06	10,1	10,2	8,5	2,1
	6	10,37	10,4	8,3	2,16				
	7	10,32	10,34	9,13	2,09				
	8	9,96	9,94	8,45	1,99				
30	9	14,25	10,85	8,46	2,41	14,9	11,2	8	2,5
	10	16,66	11,1	8,96	2,58				
	11	15,79	11,38	5,26	2,42				
	12	13,05	11,4	9,18	2,49				
45	13	11,78	10,65	7,8	2,24	13,5	10,8	9,1	2,6
	14	15,46	11,02	10,22	2,88				
	15	13,59	10,64	9,6	2,66				
	16	13,03	10,9	8,95	2,62				
60	17	13,76	12,59	9,31	2,52	13,8	12,1	8,7	2,5
	18	13,12	11,59	8,41	2,4				
	19	15,47	12,48	8,79	2,5				
	20	12,72	11,73	8,44	2,38				
75	21	16,41	11,9	10,62	2,91	16,5	11,9	10,3	2,8

	22	17,77	12,43	10,98	3,01				
	23	14,99	11,56	9,37	2,68				
	24	16,9	11,76	10,2	2,79				
90	25	16,35	11,2	9,05	2,64				
	26	17,86	9,94	9,89	2,53	19,1	10,7	9,5	2,7
	27	22,98	11,62	9,46	2,98				
	28	19,34	9,98	9,67	2,72				
105	29	18,56	11,66	10,77	3,01				
	30	16,96	10,69	9,2	2,75	17,1	11,3	9,7	2,9
	31	16,72	11,35	9,39	2,93				
	32	15,96	11,46	9,56	2,86				
120	33	17,55	10,49	9,19	2,72				
	34	18,1	11,06	10,36	3,01	17,2	11,3	9,6	2,9
	35	16,74	11,69	9,34	2,9				
	36	16,45	11,88	9,61	2,91				

Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Potássio ( $\text{K}^+$ ), Fósforo (P).

Entre os macros nutrientes, o cálcio, aumenta no decorrer dos dias, sendo as principais funções do cálcio manter a integridade da parede celular, e auxiliar no crescimento radicular. (SENA et al, 2019). Isso pôde ser observado no dia 0, obtemos o valor de 7,1 g/Kg e com o decorrer da compostagem o valor mais que dobrou chegando no dia 120 com o valor de 17,2 g/Kg.

O magnésio também teve uma tendência de crescimento, e é um nutriente requerido para a multiplicação das bactérias fixadoras de nitrogênio e atividade de enzimas do processo de FBN (SILVA et al., 2013). No dia 0, foi obtido o valor de 7,3 g/Kg, tendo um crescimento não tão acentuado, no dia 120 foi obtido 9,6 g/Kg.

O potássio (K), participa dos processos fotossintético e o fósforo (P) geralmente seu teor é relativamente baixo. Contudo, a presença de microrganismos e plantas presentes geralmente na compostagem podem mobilizar o fósforo e o potássio tornando-os disponíveis (SILVA, 2019). Ambos os elementos tiveram crescimento durante a compostagem o valor inicial do K foi de 7,2 g/Kg e do P foi de 1,4 g/K, no final da compostagem se obteve valores de 11,3 g/Kg e 2,9 g/Kg.

Os critérios de índices para a vigência de compostos orgânicos também valem para os atributos magnésio e cálcio (Tabela 9). Sendo então considerados apropriados, já

que os valores obtidos em ambos os atributos na compostagem final, foram acima dos valores de vigência para a qualidade do composto.

**Tabela 9.** Parâmetros exigidos pela legislação de Ca e Mg e parâmetros obtidos nestes experimentos.

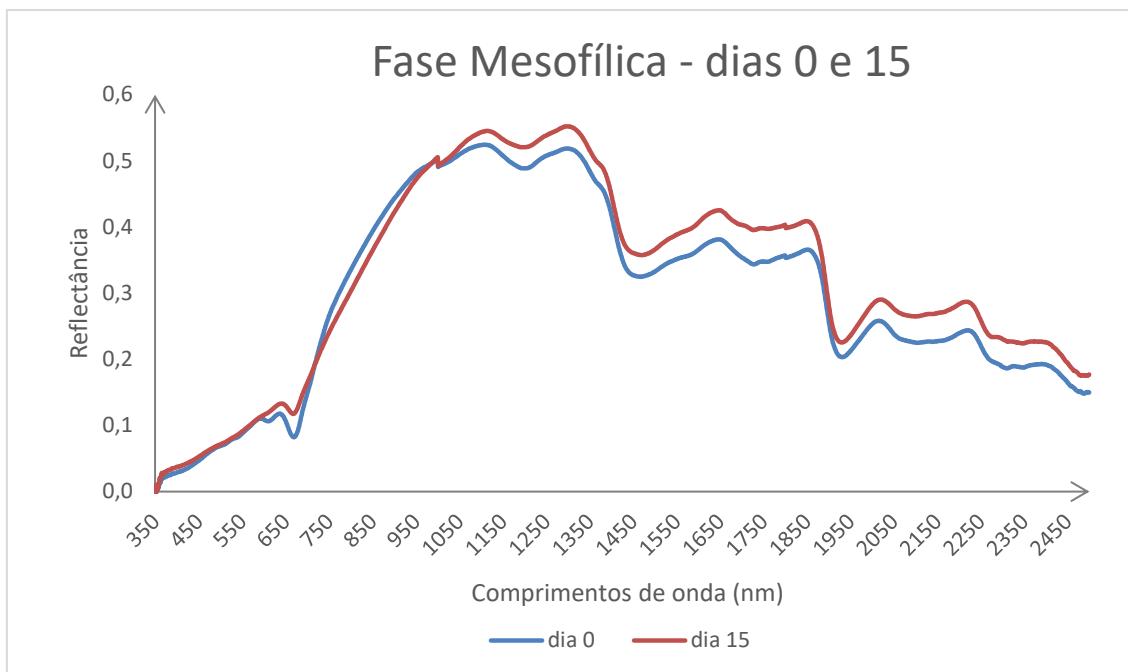
Índices da legislação	Índices obtidos
<b>Ca (valor mín.)</b>	1 g/Kg
<b>Mg (valor mín.)</b>	1 g/Kg

Cálcio (Ca), Magnésio (Mg).

### **5.3 Análise do Comportamento Espectral Do Experimento 1 – Fases do Processo de Compostagem**

A análise do comportamento espectral realizada no Experimento 1 – Fases do Processo de Compostagem foi essencial para compreender e identificar padrões característicos associados às transformações nas amostras ao longo das diferentes fases do processo. Essa etapa permitiu correlacionar mudanças espectrais específicas com as características distintas de cada fase, contribuindo para um entendimento mais detalhado das dinâmicas envolvidas no processo de compostagem.

Para facilitar o entendimento das análises espectrais do processo de compostagem, os dados foram organizados e divididos conforme as diferentes fases da compostagem. Essa abordagem permitiu uma análise mais detalhada e específica de cada etapa, facilitando a identificação de padrões espectrais associados a cada fase do processo. Do dia 0 ao dia 15, ocorre a fase mesofílica, como demonstra as curvas espectrais apresentadas na Figura 13, onde os microrganismos se proliferam quando entram em contato com a matéria orgânica agregada, colaborando para a decomposição do resíduo orgânico e metabolizando nutrientes. (DE AZEVEDO VILLARINHO et al., 2020)

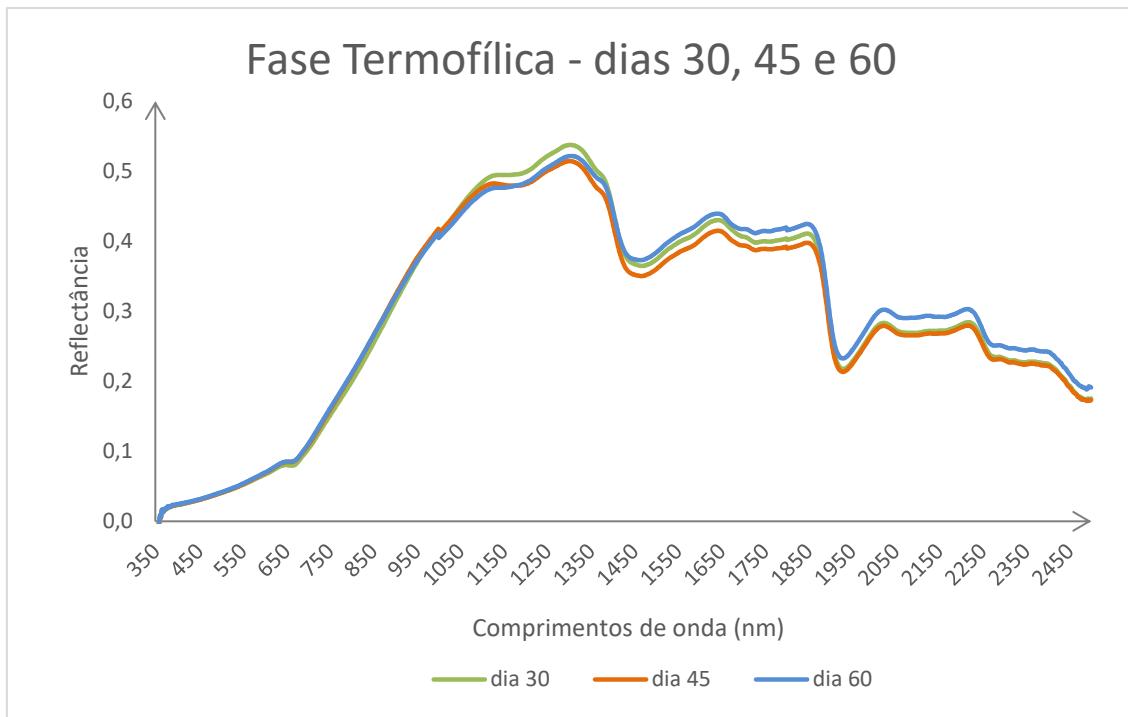


**Figura 13.** Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 0 e 15 da fase mesoflora do Experimento 1.

Os primeiros dias de compostagem são caracterizados pela maior quantidade de carbono. E o menor teor do nitrogênio. Respectivamente são os dias que geralmente apresentam maior relação C/N.

A curva espectral do dia 0, tem valores bem próximo à curva espectral do dia 15, nos comprimentos de onda de 350 nm a 600 nm, tendo valores menores na região 600 nm a 700 nm e também ocorrendo em grande parte da região espectral do IV acima de 1000 nm. Em uma pequena região espectral do IV, podemos observar valores maiores de reflectância do dia 0 ao dia 15, que são na faixa de 700 nm a 1000 nm.

A segunda fase é mais longa, a fase termoflora, dura aproximadamente até dois meses que seriam os dias 30, 45 e 60, tendo as curvas espectrais representadas na Figura 14. Nesta etapa ocorre a degradação dos componentes devido à alta temperatura (DE AZEVEDO VILLARINHO et al., 2020).

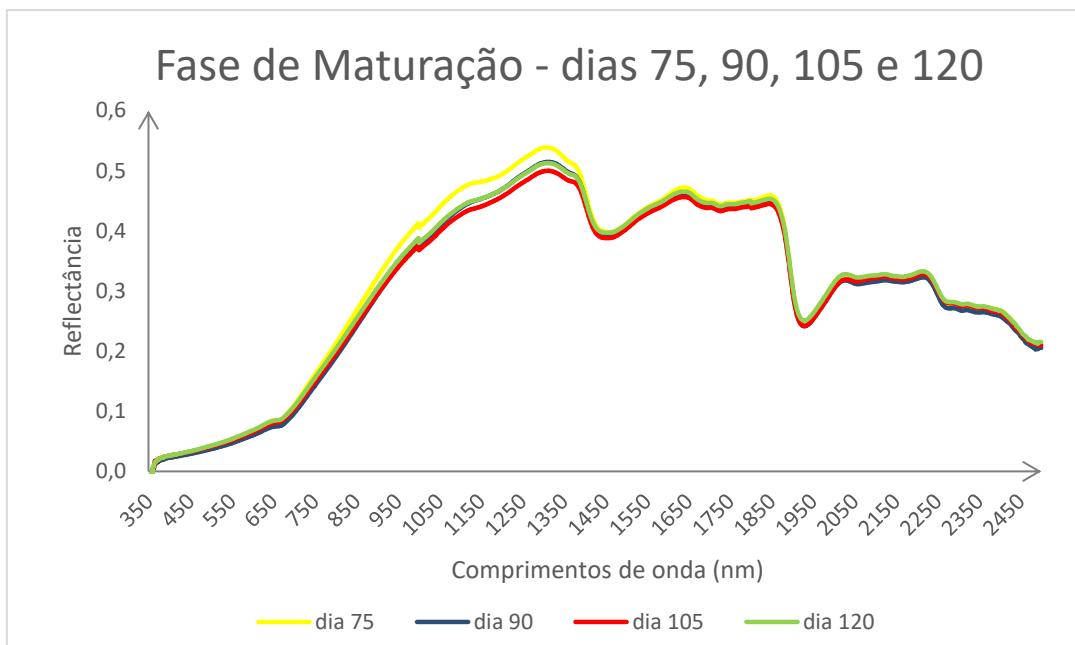


**Figura 14.** Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 30, 45 e 60 da fase termofílica do Experimento 1.

As curvas espectrais dos dias 30, 45 e 60 apresentam reflectância similares na região espectral do visível e na região espectral do IV em 950 nm. O dia 60 apresenta os valores maiores de reflectância acima de 1300 nm. As diferenças na curva espectrais foram bem discretas, sendo bem próximas em todo os comprimentos de onda.

Nos dias 30, 45 e 60, é notável uma queda dos valores no teor de carbono ao passar dos dias, e um crescimento nas taxas do teor de nitrogênio, exceto no dia 60. Tendo sua relação C/N diminuída.

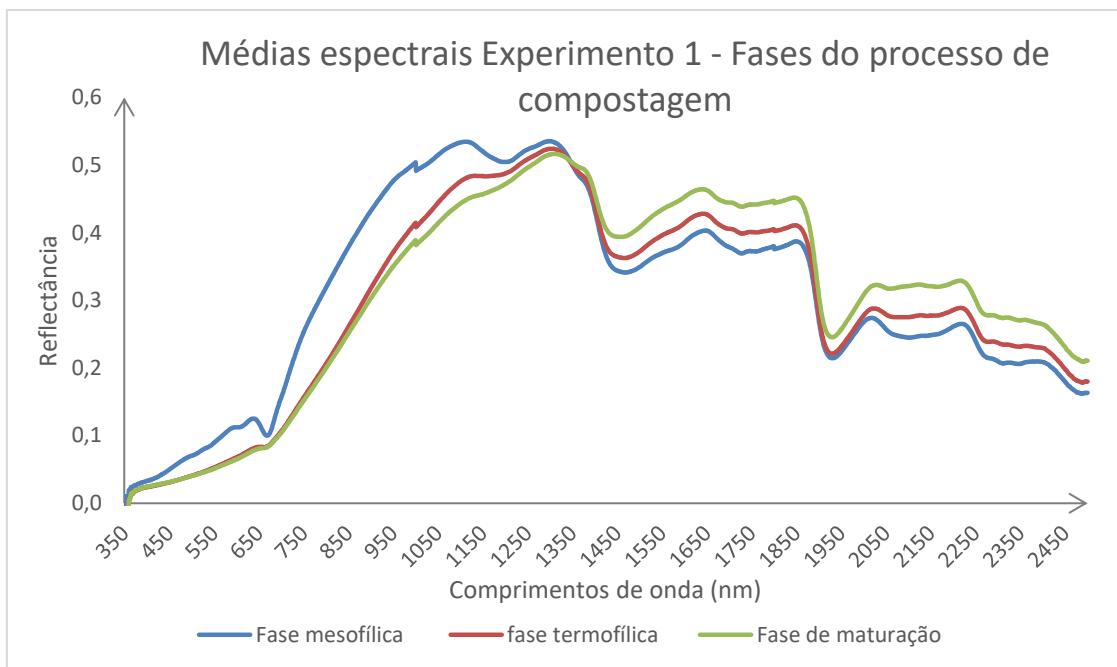
A fase de maturação, são os últimos dias da decomposição, do dia 75 até o dia 120, Figura 15, no qual há a diminuição da temperatura, da ação dos microrganismos e as modificações estruturais no material da leira. As curvas espectrais dos dias 75, 90, 105 e 120 foram bem similares, uma se sobrepondo a outra. Ocorrendo apenas uma diferença entre os comprimentos de onda entre 900 nm a 1300 nm do dia 75.



**Figura 15.** Curvas espectrais sem tratamentos dos dias 75, 90, 105 e 120 da fase de maturação do Experimento 1.

Após os 120 dias o material se encontrou totalmente estabilizado, tendo assim sua relação C/N mais baixa. Neste momento pôde-se, que a matéria da gliricidia sofreu oxidação em um processo chamado de humificação (SANTANA, 2022).

Ao observar as curvas espectrais correspondentes às médias das fases do processo de compostagem, foi possível identificar uma melhor separação visual entre as diferentes fases. Essa separação evidencia a capacidade da análise espectral em discriminar diferentes estágios do processo, refletindo mudanças nas propriedades físico-químicas das amostras ao longo do tempo, como pode ser observado na figura 16.



**Figura 16.** Médias espectrais do Experimento 1- Fases do processo da compostagem.

A respostas das regiões do espectro eletromagnético da vegetação podem ser demonstradas da seguinte forma na região espectral do visível, a reflectância é baixa em função da absorção da radiação pelos pigmentos da folha (clorofila, carotenos, xantofilas); sendo forte absorção na luz azul (~400 a 500 nm) e na luz vermelha (~ 675 nm). Em contrapartida, tem-se um máximo de reflectância na luz verde (~550 nm) e um pico de reflectância proeminente na borda do vermelho (~690 a 700 nm), em que a resposta espectral na borda do vermelho ocorre devido à interação de espalhamento celular da radiação fotossintética, utilizada pelas plantas nos processos fisiológicos de acúmulo para biomassa (MARINHO, (2022); LUZ et al, (2008)).

Outro fator importante para a diminuição da refletância durante a compostagem foi relatado por AMARAL (2022). O fósforo (P) participa dos processos de produção de energia para a fotossíntese, o aumento dos teores desse nutriente acarreta uma diminuição da refletância na região do visível, como ocorre em uma planta que está em processo de senescência. Neste estudo, o P com o decorrer dos dias da compostagem dobrou o seu valor, assim também afetando a reflectância na região do visível.

Já na região espectral do infravermelho próximo a absorção é pequena, sendo resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo esponjoso. Quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maior espalhamento interno, maior

reflectância. No infravermelho devido ao conteúdo de água no material existem os picos de absorção em 1400 nm e 1900 nm.

RIBEIRO (2021), relatou que os picos de absorção em 1400 e 1900 nm podem ser considerados em aquisição laboratoriais de dados espectrais, por se tratar da água remanescente em ambiente controlado, porém não podem ser utilizados em análises em campo ou por imagens de satélite pela influência da umidade in situ.

Com o passar dos dias, o material fica cada vez mais degradado, obtendo um material totalmente decomposto, possuindo como característica a cor mais escura, e sendo rico em húmus. E também por possuir estas características, se tem a menor reflectância, e maior absorção.

RIBEIRO, (2021) relatou esse comportamento de que materiais altamente decompostos, têm baixa reflectância na região de 500 a 2300 nm se comparado com material hêmico, moderadamente decomposto. Já o material fíbrico, ligeiramente decomposto, apresenta reflectância elevada, principalmente na região do infravermelho próximo. Este comportamento de diminuir a reflectância pelo decorrer dos dias de compostagem também foi notado por MULDER et al. (2011) que afirmou que atributos físicos e químicos podem influenciar no seu comportamento espectral, podendo-se destacar a cor, determinada pela matéria orgânica.

### **5.3.1 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 1 - Fases de processo da compostagem na região espectral do visível (380 - 780 nm)**

Os dados gerados a partir da reflectância bruta e a reflectância com os pré-tratamentos foram submetidos a uma análise multivariada de componentes principais na região espectral do visível, a qual possibilitou avaliar a dispersão em um plano bidimensional (componentes principais mais relevantes).

Os resultados apresentados na Tabela 10 indicam as componentes principais do modelo de Análise de Componentes Principais (ACP) que conseguiram explicar mais de 70% da variância dos dados. Isso demonstra que o modelo é eficaz em capturar as principais informações presentes nos dados originais. A reflectância bruta apresentou 93,79% de toda informação contida sendo explicada pela PC1. O pré-tratamento SMO apresentou 93,89% na PC1. O pré-tratamento MSC apresentou 67,83% na PC1 e 29,79% na PC2 e o pré-tratamento de SGD apresentou 93,79% na PC1.

É possível perceber que a maior concentração de informação explicada (variância) está contida na PC1, não sendo necessário uma PC2, exceto na análise espectral do experimento 1 com pré-tratamento MSC. Além disso, pode-se identificar ainda na Tabela 10, a variância somada pelas PCs (variância total).

**Tabela 10.** Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda_i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o Experimento 1- Fases da compostagem na região espectral do visível

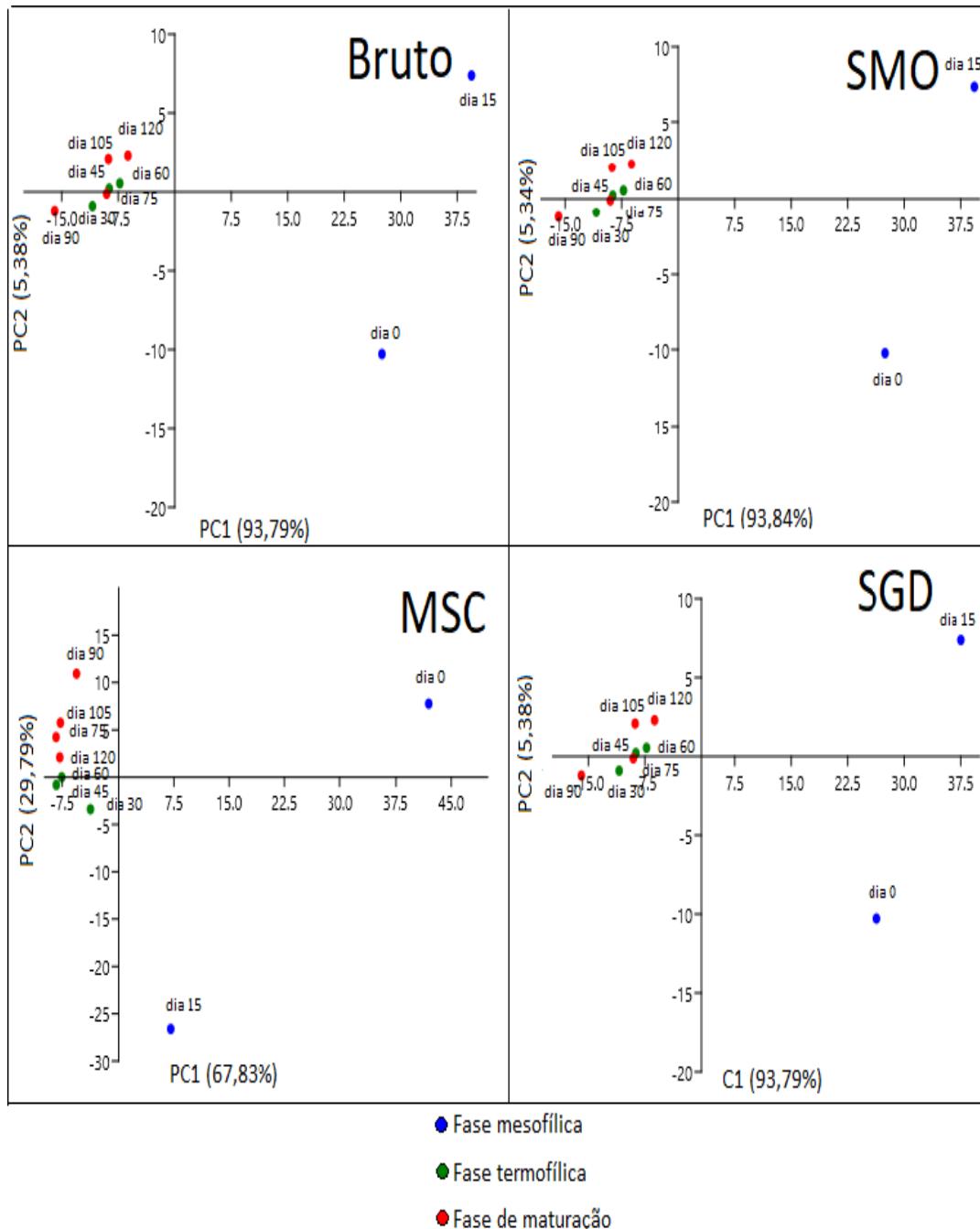
<b>Tratamento</b>	<b>Componente Principal</b>	<b>Autovalores</b>	<b>Proporção (%)</b>	<b>Proporção Acumulada (%)</b>
<b>Bruto</b>	PC1	376,10	93,79	93,79
	PC2	21,57	5,38	99,17
<b>SMO</b>	PC1	374,40	93,84	93,84
	PC2	21,31	5,34	99,18
<b>MSC</b>	PC1	272,02	67,83	67,83
	PC2	119,47	29,79	97,63
<b>SGD</b>	PC1	376,11	93,79	93,79
	PC2	21,57	5,38	99,17

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD). Componente principal 1 (PC1), componente principal 2 (PC2).

O modelo que obteve a melhor correlação explicativa foram os dados espetrais com pré-tratamento SMO. Isso ocorreu, pois, os pré-tratamentos minimizam a influência de efeitos físicos e variações óticas, fazendo com que se tenha alterações no espectro e realçando feições de refletância de energia, desta forma fazendo com que as curvas espetrais fiquem mais uniforme. Com a pequena diferença observada entre os dados brutos e os dados com pré-tratamentos, Ferraz (2022) destacou que, embora o uso de pré-tratamentos deva ser considerado para melhorar a qualidade dos dados em diversas análises, em algumas situações, os dados não tratados podem ser a melhor opção.

O gráfico de scores foi utilizado para apresentar a disposição espacial das amostras, permitindo visualizar como elas se agrupam de acordo com suas características espetrais. Neste gráfico, as amostras que possuem menor variância (ou seja, aquelas que apresentam menor diferença ou variação entre si) estão mais próximas umas das outras. Por outro lado, as amostras com maior variância (que possuem maiores diferenças espetrais) estão mais espalhadas no gráfico. Esse comportamento ilustra como as amostras se relacionam entre si e permite identificar agrupamentos naturais com base nas características espetrais avaliadas.

Cada fase do processo da compostagem está designada por uma cor. Nota-se que as amostras estão agrupadas conforme as fases. Portanto, o objetivo de separar as amostras foi alcançado, de acordo com o gráfico de scores PC1 versus PC2. Na Figura 17, foram apresentadas para a demonstração dos gráficos de dispersão e quais conseguimos uma melhor separação das fases de compostagem.



**Figura 17.** Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD do Experimento 1 na região espectral do visível.

O gráfico de scores dos comprimentos de onda brutos, e com os pré-tratamentos SMO e SGD mostram que as amostras pertencentes à fase mesofílica podem ser separadas de forma clara, enquanto as fases termofílica e de maturação não apresentam uma separação visual significativa, apesar de terem demonstrado maior correlação na PC1. No entanto, ao analisar o gráfico de scores dos comprimentos de onda com pré-tratamento MSC, observa-se uma melhor separação das três fases do processo de compostagem, e permitiu uma distribuição mais distinta das amostras nos quadrantes do gráfico, como mostrado na figura acima, evidenciando uma separação mais eficaz entre as fases, apesar de ter obtido uma correlação menor.

Como apresentado na Tabela 11, para a verificação dos comprimentos de onda ideais, foram analisados os loadings. O loading bruto e submetido ao pré-tratamento SGD apresentaram as seguintes faixas de comprimentos de onda ideais: 452–470 nm, 599–642 nm e 699–706 nm, totalizando 68 comprimentos de onda representativos. O comportamento dos loadings com pré-tratamento SMO revelou faixas ideais de 451–471 nm, 599–642 nm e 698–706 nm, abrangendo aproximadamente 71 comprimentos de onda representativos. Já os loadings submetidos ao pré-tratamento MSC apresentaram como faixa ideal os comprimentos de onda entre 482–526 nm, sendo os mais indicados para a separação das fases do processo de compostagem. Este pré-tratamento destacou-se por apresentar a maior quantidade de comprimentos de onda representativos, totalizando 79.

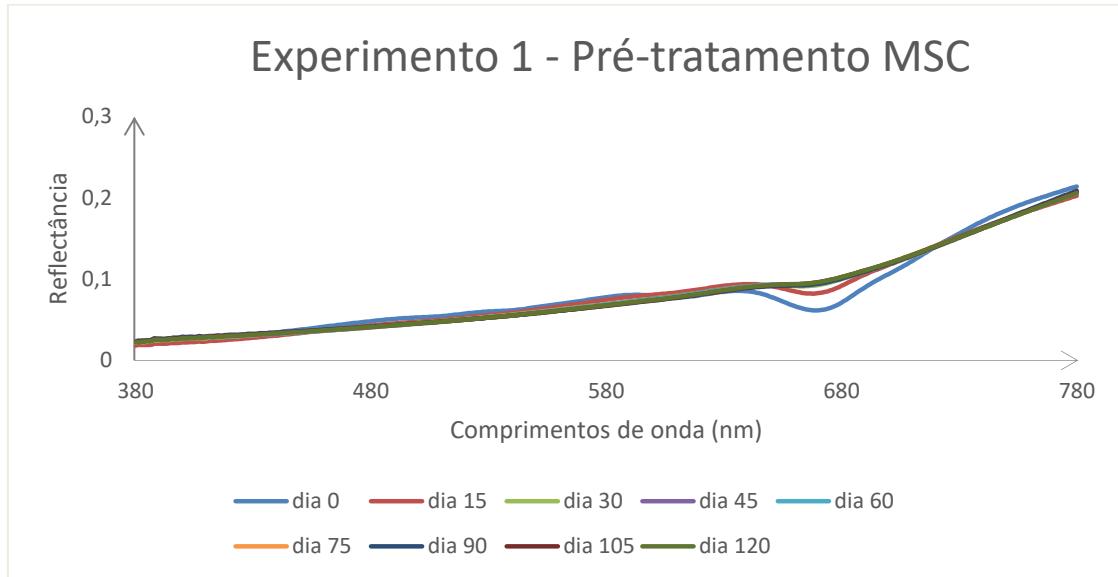
**Tabela 11.** Faixas ideais de comprimentos de ondas para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do visível.

	<b>BRUTO</b>	<b>SMO</b>	<b>MSC</b>	<b>SGD</b>
<b>Faixas de comprimentos de onda (nm)</b>	452 - 470	451 - 471	482-526	451 - 471
	599 - 642	599 - 642	656 - 691	599 - 642
	699 - 706	698 - 706		699- 706

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD).

O pré-tratamento MSC destacou-se por apresentar a melhor separação visual das fases do processo de compostagem, além de possuir a maior quantidade de comprimentos de onda representativos (Figura 18). Esse resultado é atribuído ao uso dos dados espectrais observados por Chu et al. (2014), que evidenciam a importância da faixa

compreendida entre 650 e 750 nm (borda vermelha) para o entendimento da reflectância em função das alterações bioquímicas na vegetação.



**Figura 18.** Análise comportamental do Experimento 1 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do visível.

### 5.3.2 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 1 - Fases de processo da compostagem na Região espectral do IV (780 – 2500 nm).

Os dados gerados a partir da reflectância bruta e a reflectância com os pré-tratamentos foram submetidos a uma análise multivariada de componentes principais na região espectral do IV, a qual possibilitou avaliar a dispersão em um plano bidimensional (componentes principais mais relevantes).

As análises mostraram que em todos os pré-tratamentos, a primeira componente principal explicou acima de 70% da variância contida nas variáveis originais (Tabela 12). Sendo na PC1, a responsável por 80,99% na reflectância bruta e nos pré-tratamentos SMO e SGD e 85,61% no pré-tratamento MSC

**Tabela 12.** Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda_i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do infravermelho.

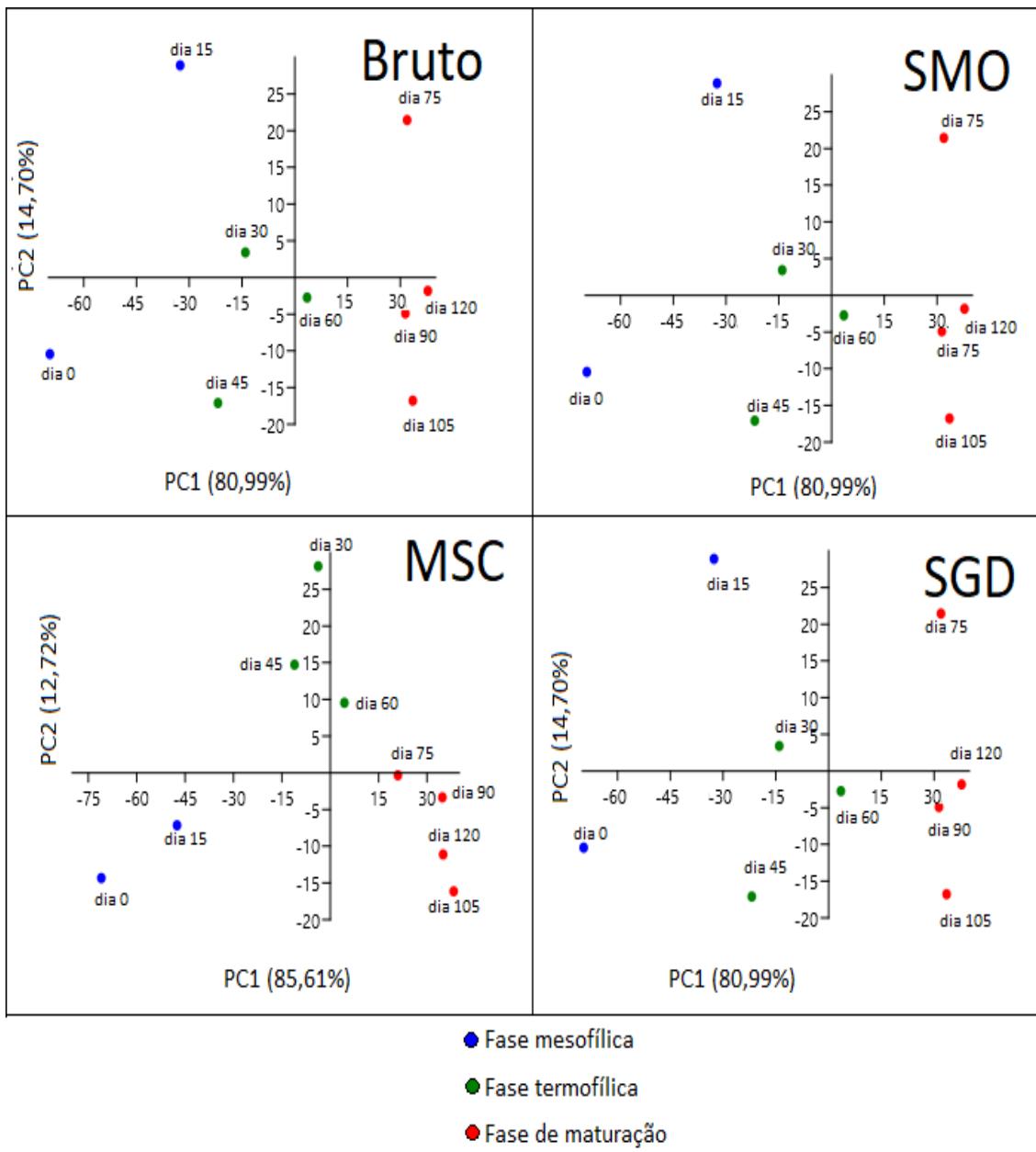
Tratamento	Componente Principal	Autovalores	Proporção (%)	Proporção Acumulada (%)
Bruto	PC1	1393,78	80,99	80,99
	PC2	253,01	14,70	95,69
SMO	PC1	1392,15	80,99	80,99

	PC2	252,93	14,71	95,70
<b>MSC</b>	PC1	1473,27	85,61	85,61
	PC2	218,97	12,72	98,33
<b>SGD</b>	PC1	1393,78	80,99	80,99
	PC2	253,01	14,70	95,69

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD). Componente principal 1 (PC1), componente principal 2 (PC2).

O modelo que obteve a melhor performance foi o MSC. SOUZA, MADARI & GUIMARÃES (2012), relatam que isso ocorre pois amenizam problemas de dispersão de luz, muito comuns em varreduras espectrais por refletância difusa, onde a radiação é incidida diretamente na amostra.

Diferentemente do que foi notado na região espectral do visível, todos os tratamentos realizados na região espectral do IV, a separação visual que representam as fases do processo de compostagem foi significativamente aprimorada dentro dos quadrantes, como apresentado na Figura 19. RODRIGUES (2017) verificou a aplicabilidade do IV para a determinação do conteúdo de carbono concluíram que essa técnica pode ser adotada como método usual de análise. Portanto, desta forma, a técnica na região espectral do IV, também se mostrou satisfatória para a separação das fases do processo de compostagem.



**Figura 19.** Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD do Experimento 1 na região espectral do IV.

Com base nos dados de loadings obtidos na Análise de Componentes Principais (ACP), foram identificadas as melhores faixas de comprimento de onda para a separação das fases do processo de compostagem. Na análise realizada na região espectral do infravermelho (IV), os dados de loadings relacionados ao pré-tratamento MSC não exigiram reescalonamento, pois já apresentavam uma escala apropriada para visualização. Em contraste, os dados brutos e aqueles resultantes dos pré-tratamentos SMO e SGD passaram por um processo de reescalonamento. Essa etapa foi essencial para

ajustar a escala e facilitar a visualização e interpretação dos resultados, garantindo que as relações entre as variáveis permanecessem intactas.

Os dados de loadings obtidos a partir dos dados brutos e dos pré-tratamentos SMO e SGD apresentaram as mesmas faixas de comprimento de onda. Essas faixas, consideradas relevantes, são as seguintes: 1475 - 1604 nm, 2051 - 2197 nm, 2245 - 2406 nm, 2473 - 2479 nm e 2491 - 2495 nm, totalizando 446 comprimentos de ondas representativos. Já para o pré-tratamento MSC, as faixas de onda relevantes são: 956 - 1079 nm e 2030 – 2167 nm, teve uma menor quantia de comprimentos de ondas representativos, totalizando 260.

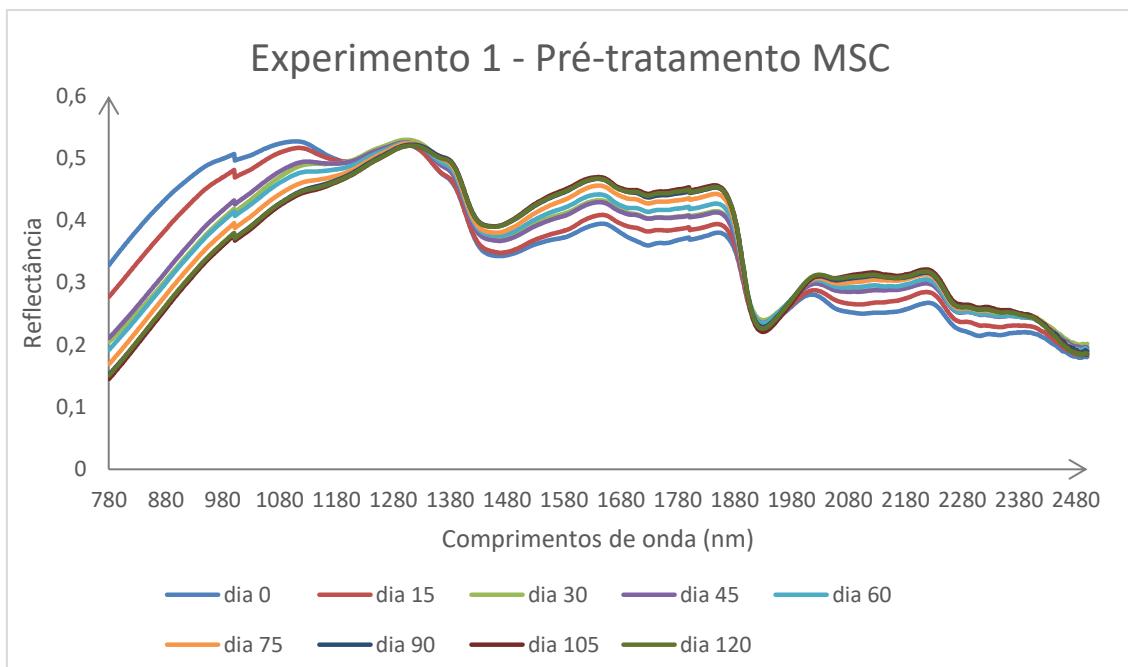
Ao analisar a Tabela 13, nota-se que a ACP com o pré-tratamento MSC apresenta um menor número de comprimentos de onda relevantes para a separação das fases do processo de compostagem. Isso ocorre porque, diferentemente dos dados brutos e de outros pré-tratamentos, os dados com MSC não necessitaram de reescalonamento, o que resultou em uma identificação mais direta e precisa das regiões espectrais relevantes. Podemos observar que as faixas espectrais ideais para a separação sendo utilizadas por todos os tratamentos, são as 2051 – 2167 nm.

**Tabela 13.** Faixas ideais de comprimentos de ondas para o experimento 1- fases da compostagem na região espectral do IV.

	<b>BRUTO</b>	<b>SMO</b>	<b>MSC</b>	<b>SGD</b>
	1475 - 1604	1475 - 1604	956 - 1079	1475 - 1604
<b>Faixas de comprimentos de onda (nm)</b>	2051 - 2197	2051 - 2197	2030 - 2167	2051 - 2197
	2245 - 2406	2245 - 2406		2245 - 2406
	2473 - 2479	2473 - 2479		2473 - 2479
	2491 - 2495	2491 - 2495		2491 - 2495

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD). (\*) Comprimentos de ondas da PC2.

O pré-tratamento MSC (Figura 20) no experimento 1 – fases do processo de compostagem na região espectral do infravermelho apresentou a melhor avaliação, uma vez que obteve a maior correlação, a melhor distribuição dentro dos quadrantes no gráfico e não necessitou de reescalonamento.



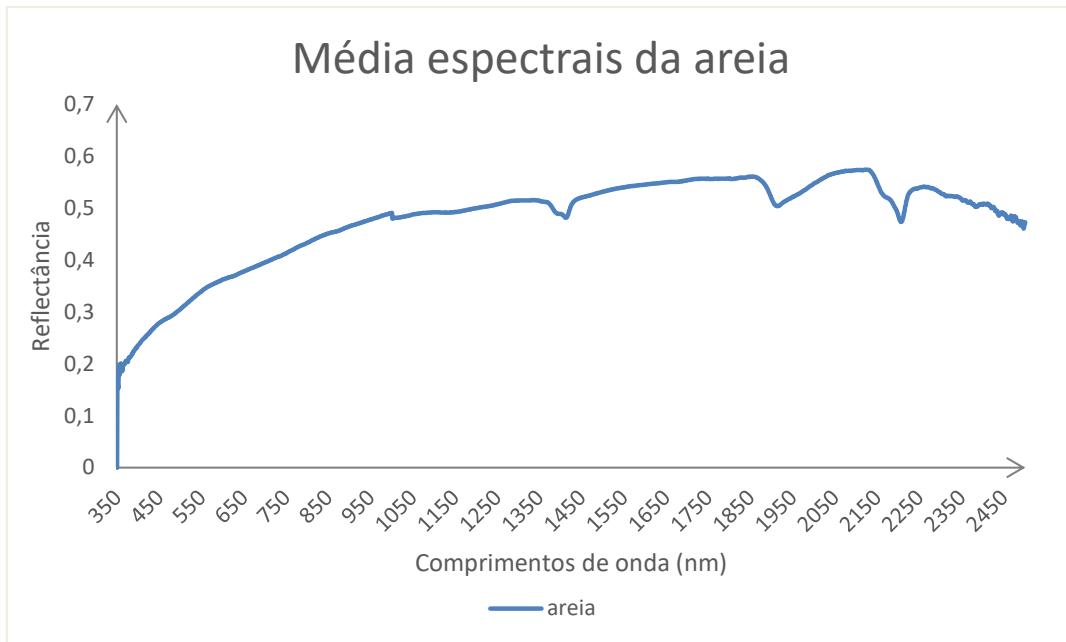
**Figura 20.** Análise comportamental do Experimento 1 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do infravermelho.

#### 5.4 Análise do comportamento espectral do Experimento 2 – Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo

A análise do comportamento espectral realizada no Experimento 2 – Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica (MO) no solo – foi fundamental para identificar padrões característicos associados às alterações nas amostras, conforme os diferentes níveis de MO. A quantificação dessa variação, baseada na resposta espectral, proporcionou uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas do solo à medida que o teor de matéria orgânica aumenta. Para facilitar a análise, foram apresentadas respostas espetrais obtidas por meio de simulações representando solos brasileiros, classificados em três grupos: areia pura, simulando solos arenosos; areia com 1% a 2% de MO, representando solos com teores de MO mais comuns; e areia com mais de 3% de MO, representam solos que possuem menor disponibilidade. Essa abordagem contribuiu para uma compreensão mais clara e detalhada das diferenças espetrais entre os tipos de solo.

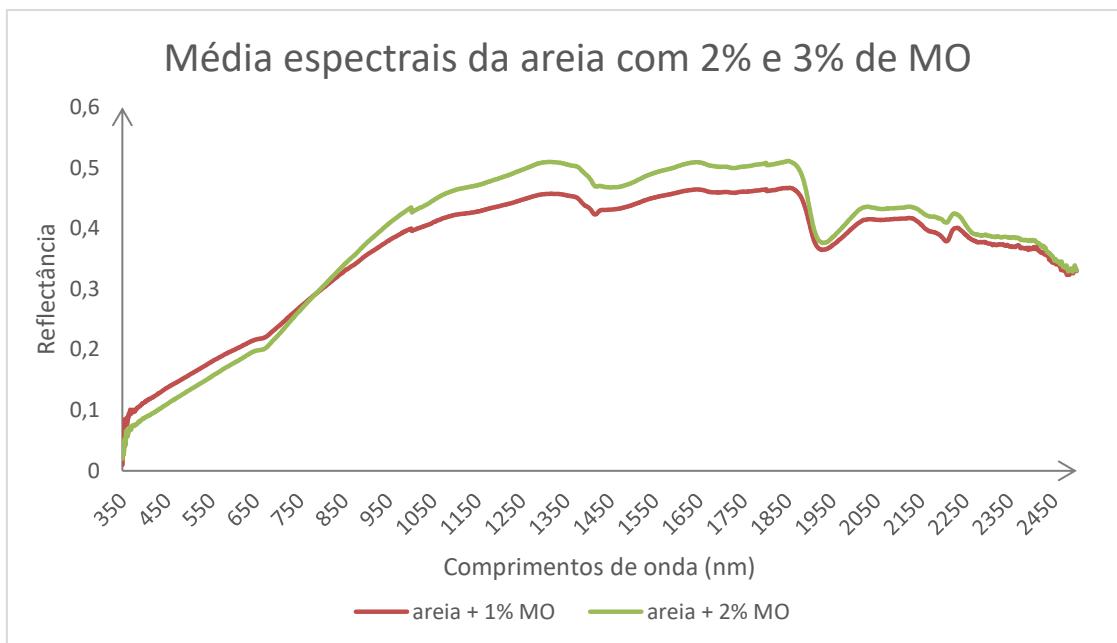
Simulando solos arenosos, a areia tem como principal mineral abundante o quartzo, que é amplamente predominante em sua composição. Este mineral, devido às suas propriedades físicas e químicas, desempenha um papel importante nas características

do solo, incluindo sua resposta espectral que tem como característica um forte albedo e ausência de feições de absorção (Figura 21).



**Figura 21.** Médias espetrais da areia.

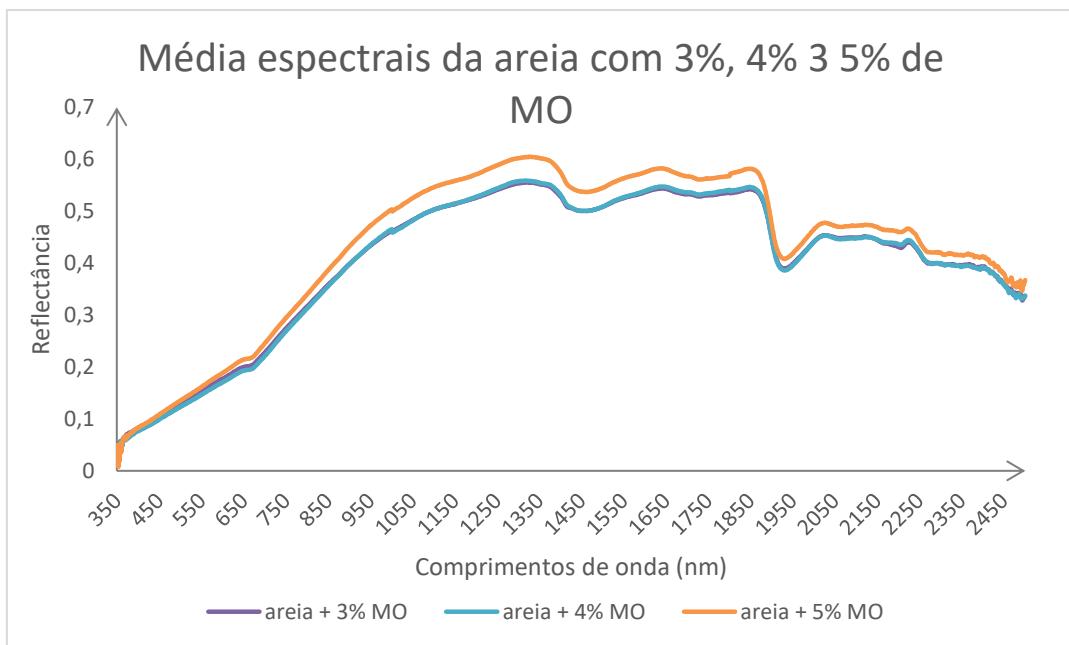
Representando solos com teores mais comuns de 1% a 2% de matéria orgânica (MO), as curvas espetrais estão apresentadas na Figura 22. Observou-se que, na região espectral do visível, a areia com 1% de MO apresentou maior refletância em comparação à areia com 2% de MO. Por outro lado, na região espectral do infravermelho (IV), o comportamento foi inverso, com a areia contendo 2% de MO exibindo maior refletância.



**Figura 22.** Resposta espectral representando solos com teores mais comuns de 1% a 2% de matéria orgânica (MO).

Esse comportamento nas curvas espetrais mostradas, também foram relatadas por PEARLSHTIEN e BEN-DOR (2020) que observaram os teores de matéria orgânica de 1-2%, independente do material, podem alterar o comportamento espectral em 25%. Resposta similar é relatada por RIBEIRO (2021) e BAUMGARDNER et al. (1985), o teor de MOS excedente a 2% é suficiente para representar importante papel na alteração das propriedades espetrais do solo, possuindo um efeito de máscara tanto na região espectral do visível (380-780 nm) quanto na região espectral do IV (780-2500 nm). Portanto, um teor de MO acima de 2% pode influenciar na resposta espectral de maneira significativa dependendo de sua origem.

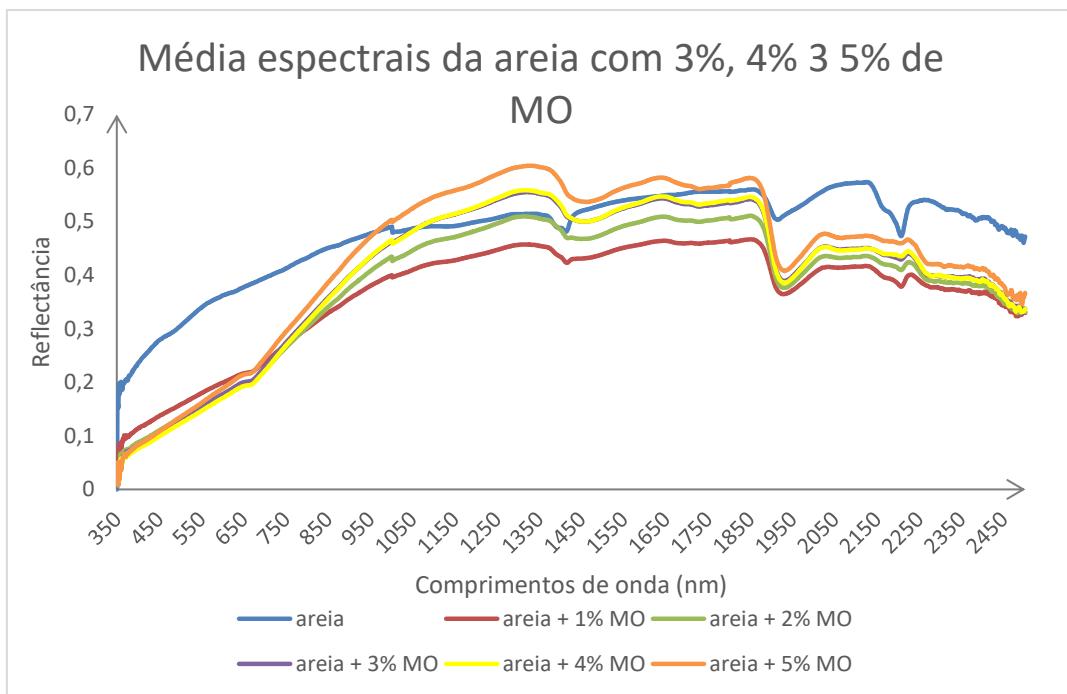
Devido à decomposição mais rápida em áreas tropicais, causada pela alta temperatura e umidade, solos com teores acima de 3% de matéria orgânica (MO) têm menor disponibilidade. Esses solos, ricos em MO, apresentam melhor estrutura e maior estabilidade em seus agregados. As curvas espetrais correspondentes a esses solos estão representadas na Figura 23.



**Figura 23.** Média espetrais representando solos com teores de menor disponibilidade acima de 3% de matéria orgânica (MO).

A curva espectral da areia com 3%, 4%, e 5% de MO ficaram bem similares em várias partes da curva. Como podemos observar, a curva espectral da areia com 4% de MO ficou sobreposta da curva espectral de 3% de MO. A curva espectral de 5% de MO teve reflectância maior na região do IV.

A análise conjunta dos espectros permite identificar que a fração areia, com o quartzo como principal componente mineralógico, apresenta refletância elevada, enquanto a matéria orgânica se caracteriza por uma refletância significativamente mais baixa (DEMATTÉ et al, 2003). Percebeu-se que em algumas regiões do espectro a areia se sobressai a areia com matéria orgânica como pode ser observado na Figura 24.



**Figura 24.** Resposta espetrais da variação da quantidade de matéria orgânica no solo.

Na região do infravermelho médio (1300 a 2500 nm), a água é o fator que mais exerce influência sobre a reflectância, que pode ser alterada conforme a disponibilidade hídrica. Há uma diminuição na reflectância no visível, se comparado a areia, com areia com quantidade mensurada de MO, podendo ser explicado pela senescência das plantas, que se encontram com teores de clorofila reduzidos, o que aumenta a absorção da radiação por esses pigmentos e promove uma diminuição da reflectância (AMARAL, 2018).

VISCARRA ROSSEL, MCGLYNN e MCBRATNEY (2006) relataram picos discretos de absorção entre 400 nm e 700 nm que podem estar relacionados à influência do material mais escurecido na presença de ácido húmico, além de uma feição de absorção em 1700 nm, importante na predição de ligações carboxílicas presentes na estrutura das substâncias húmicas, ocorrendo o mesmo comportamento nas curvas espetrais apresentado na figura acima.

Assim como neste estudo, DE SOUZA & PÉREZ (2021), relatou o mesmo comportamento que o teor da MO não apresentou uma correlação inversamente proporcional, de modo que as amostras com elevado teor de MO apresentassem maiores fatores de reflectância. Ao comparar o comportamento espectral com os resultados encontrados por SILVA (2020), a influência da MO provoca uma diminuição da

refletância em 500nm, de modo que quanto menor o albedo nesse intervalo de onda maior é o teor de MO

#### **5.4.1 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 2 - Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível.**

Os dados obtidos do Experimento 2 - Avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo, a partir da reflectância bruta e a reflectância com os pré-tratamentos foram submetidos a uma análise multivariada de componentes principais na região espectral do visível, a qual possibilitou avaliar a dispersão em um plano bidimensional (componentes principais mais relevantes).

Como pode ser observado na Tabela 14, em todas as ACP realizadas o PC1, foi o responsável pela explicação da variação total dos dados. Na ACP com reflectância bruta e com pré-tratamento SGD, a PC1 foi responsável por 99,04%. A ACP com pré-tratamento SMO, a PC1 foi responsável por 99,05%. O pré-tratamento MSC, o PC1 foi responsável por 95,29%.

**Tabela 14.** Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível.

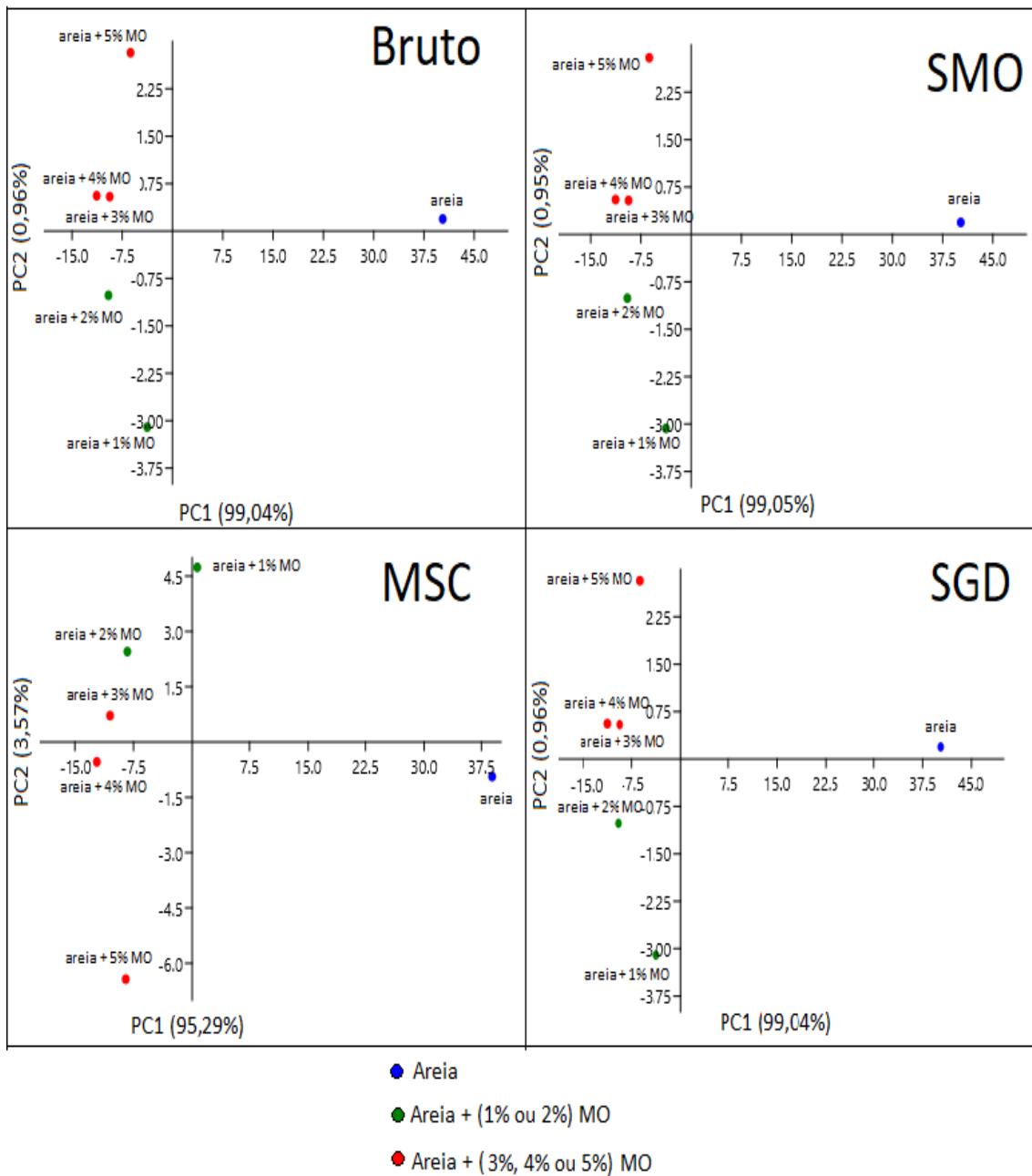
Tratamento	Componente Principal	Autovalores	Proporção (%)	Proporção Acumulada (%)
<b>Bruto</b>	PC1	397,14	99,04	99,04
	PC2	3,85	0,96	100
<b>SMO</b>	PC1	395,22	99,05	99,05
	PC2	3,77	0,95	0,95
<b>MSC</b>	PC1	382,13	95,29	95,29
	PC2	14,30	3,57	98,86
<b>SGD</b>	PC1	397,14	99,04	99,04
	PC2	3,85	0,96	100

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD). Componente principal 1 (PC1), componente principal 2 (PC2).

O modelo que obteve a melhor correlação foi o com os dados com pré-tratamento SMO. Como ocorreu no Experimento 1- fases do processo de compostagem, isto pode ter ocorrido pois, os pré-tratamentos minimizam a influência de efeitos físicos e variações

óticas, fazendo com que se tenha alterações no espectro e realçando feições de refletância de energia, desta forma fazendo com que as curvas espectrais fiquem mais uniforme e com menor variação.

Os resultados das análises visam tornar evidentes as eventuais correlações e a importância relativa dos componentes obtidos e das variáveis originais. Obteve-se ganhos significativos em substituir as variáveis originais por componentes principais, pois dessa forma conseguimos observar de forma clara as correlações (Figura 25).



**Figura 25.** Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD no Experimento 2 na região espectral do visível.

Observou-se que no Experimento 2, foi possível realizar a separação da areia, com diferentes quantidades mensuradas de matéria orgânica (MO), em todos os tratamentos, permitindo as correlações entre a areia pura, a areia com 1% e 2% de MO (mais comuns nos solos) e a areia com 3%, 4% e 5% de MO (menos comuns nos solos brasileiros).

GUPTA et al, (2023), afirmou que a região espectral do visível também pode capturar as propriedades do solo. Como alguns atributos importantes do solo são sensíveis

à luz visível, e a cor do solo desempenha um papel importante na classificação do solo, e são gerados bons resultados. LEVIN et al. (2005), demonstraram uma ideia sobre como calibrar radiometricamente o produto de uma câmera digital, em combinação com medições espectrais de laboratório, para estimar o teor de óxido de ferro na areia das dunas. Tais resultados corroboram com os resultados encontrados, em que a região espectral do visível, apresentou valores altos de correlação para separação de níveis de matéria orgânica.

PUDELKO e CHODAK, (2020) também relatou que em seus estudos com espectroscopia de reflectância, a influência também do carbono orgânico no comportamento espectral de amostras de solos, apresentando boas relações com a variação da reflectância em determinados comprimentos de ondas. Desta forma, mostrando que a MO modifica as respostas espectrais.

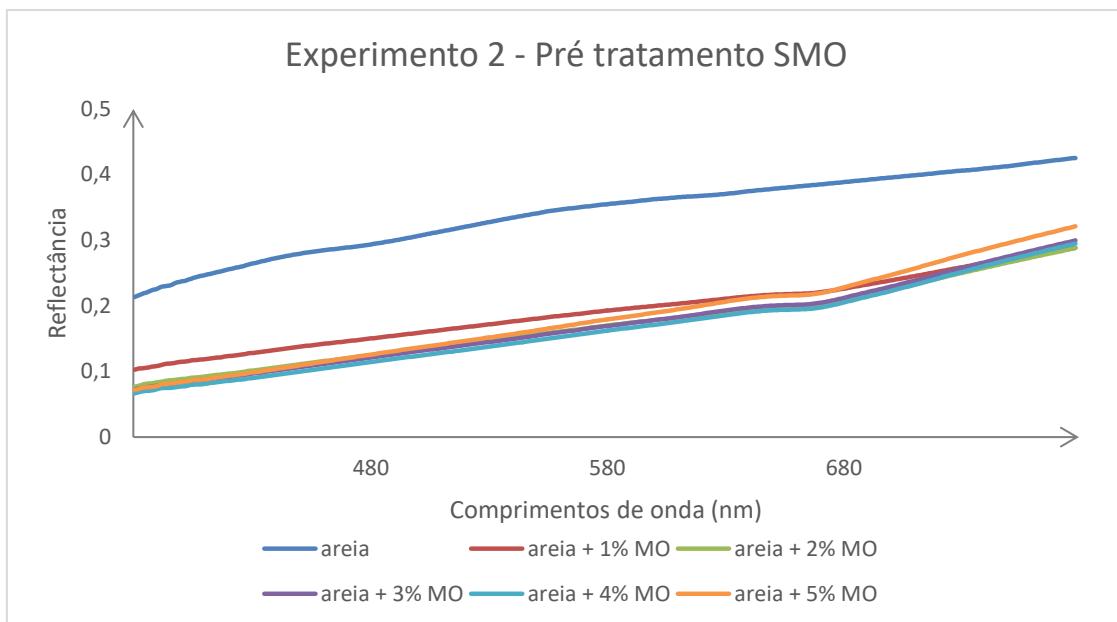
Assim, utilizando dos resultados dos loadings (Tabela 15) observou-se quais foram os comprimentos de ondas responsável para definir qual o melhor para a separação de níveis de matéria orgânica. Os loadings com reflectância bruta, com pré-tratamento SGD e pré-tratamento SMO, tiveram como faixa de comprimentos de onda ideal de 440 - 710 nm, totalizando 293 comprimentos de onda representativos. Nos loadings do pré-tratamento MSC, a faixa ideal de comprimento de onda são: 380-446 nm, 517 - 686 nm e 722 – 780 nm, totalizando 270 comprimentos de onda representativos.

**Tabela 15.** Faixas de comprimentos ideais componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do visível.

	<b>BRUTO</b>	<b>SMO</b>	<b>MSC</b>	<b>SGD</b>
<b>Faixas de comprimentos de onda (nm)</b>	440 - 710	440 - 710	380 - 446 517 - 686 722 - 780	440 - 710

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD).

Nota-se que na região espectral do visível, para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo, a reflectância com pré-tratamento SMO foi o que proporcionou uma melhor separação visual e também a maior correlação (Figura 26).



**Figura 26.** Análise comportamental do Experimento 2 obtida pelo pré-tratamento SMO através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do visível.

#### 5.4.2 Análise de componentes principais para caracterização do Experimento 2 - Avaliação da variação do quantidadede matéria orgânica no solo na região espectral do IV (780 – 2500 nm).

Os dados obtidos do Experimento 2 - Avaliação da variação do quantidadede matéria orgânica no solo, a partir da reflectância bruta e a reflectância com os pré-tratamentos foram submetidos a uma análise multivariada de componentes principais na região espectral do infravermelho, a qual possibilitou avaliar a dispersão em um plano bidimensional (componentes principais mais relevantes).

Como pode ser observado na Tabela 16, a ACP com reflectância bruta e SGD, a PC1 foi responsável por explicar 74,44%. Na ACP com pré-tratamentos SMO, obteve a PC1 no valor de 74,47%. Na ACP com pré-tratamento de MSC, a PC1 foi responsável por explicar cerca de 97,15%.

**Tabela 16.** Tratamento, componentes principais (CPs), autovalores ( $\lambda i$ ) e porcentagem da variância explicada e proporção acumulada (%) pelos componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação do quantidadede matéria orgânica no solo na região espectral do IV.

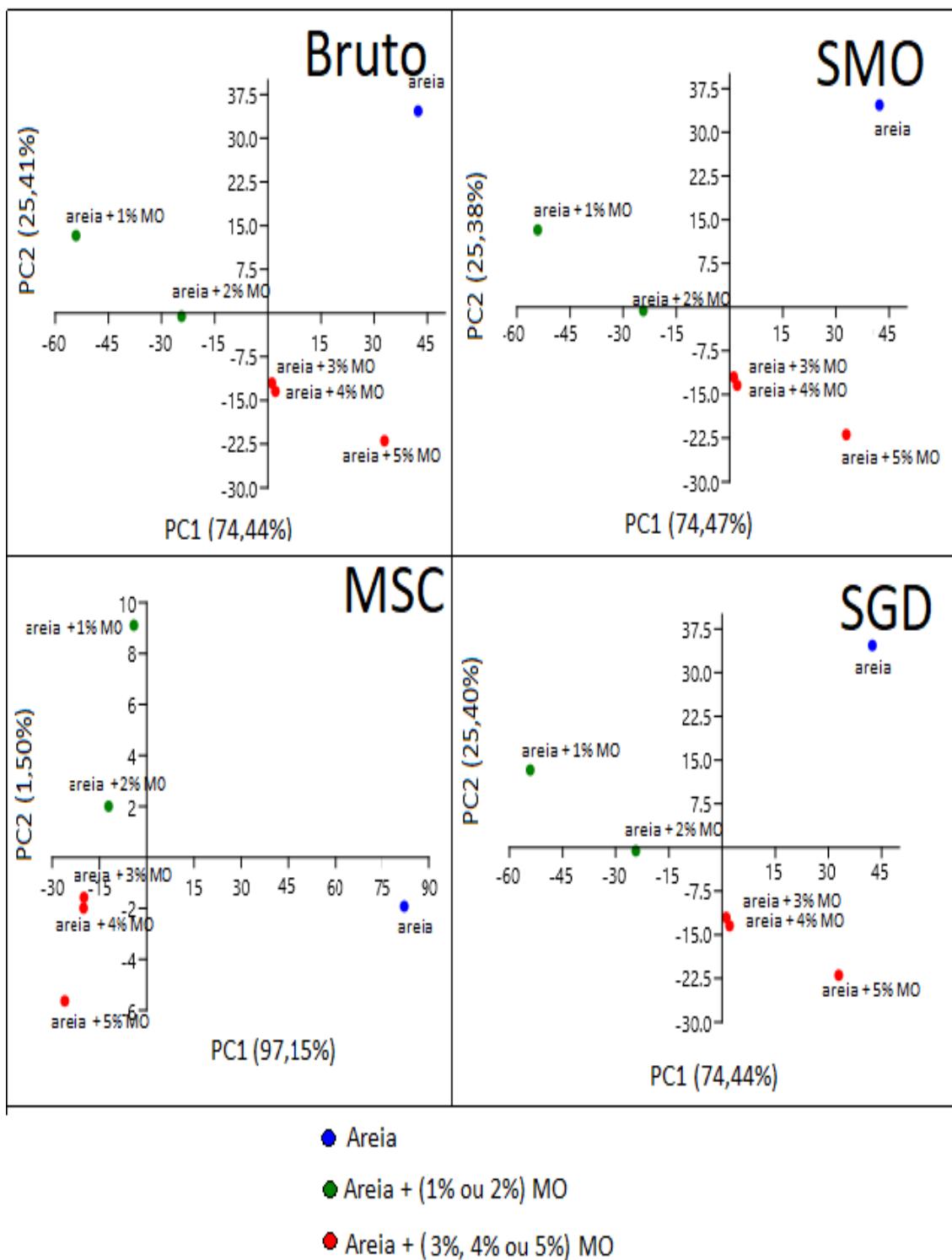
Tratamento	Componente Principal	Autovalores	Proporção (%)	Proporção Acumulada (%)
Bruto	PC1	1281,11	74,44	74,44

	PC2	437,23	25,41	99,85
<b>SMO</b>	PC1	1280,09	74,47	74,47
	PC2	436,3	25,38	99,85
<b>MSC</b>	PC1	1671,97	97,15	97,15
	PC2	25,77	1,5	98,65
<b>SGD</b>	PC1	1281,11	74,44	74,44
	PC2	437,23	25,41	99,85

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD). Componente principal 1 (PC1), componente principal 2 (PC2).

Conforme pode ser observado na Tabela 16, o pré-tratamento MSC apresentou o melhor desempenho na análise de componentes principais (ACP) obtendo o maior valor de correlação. QI MINGXUAN et al. (2024) relata que várias técnicas e modelos foram desenvolvidos para interpretar sinais de luz ou características espectrais para inferir as propriedades do solo, A detecção proximal do solo, particularmente a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), mostrou-se promissora para esse fim.

Para validar a correlação entre as variáveis, observou-se a formação de agrupamentos que demonstraram coerência com conhecimentos prévios da pesquisa. Além disso, os resultados apresentaram similaridades com a região espectral do visível, sendo que todos os pré-tratamentos resultaram em agrupamentos consistentes, como ilustrado na Figura 27.



**Figura 27.** Gráfico de scores dos comprimentos de onda bruto e com tratamentos MSC, SMO e SGD no Experimento 2 na região espectral do IV.

Assim, utilizando dos resultados dos loadings (Tabela 17) observou-se quais foram os comprimentos de ondas responsável para definir qual o melhor para a separação de níveis de matéria orgânica. Podendo ser observado quais foram as faixas de

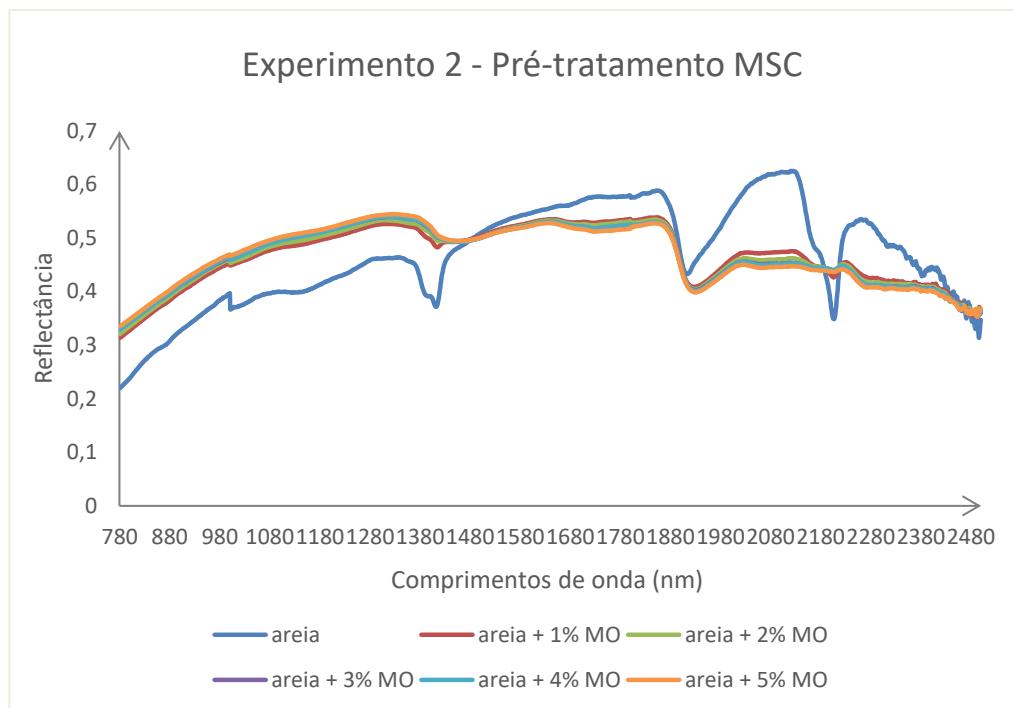
comprimento ideal na região espectral do IV. O tratamento com maior número de comprimentos ideais foi a ACP com pré-tratamento MSC, obtendo 1442 comprimentos de ondas que conseguem fazer a separação, as faixas são 780 -1443 nm, 1542 – 1786 nm, 1801 – 1897 nm, 1916 – 2176 nm, 2222 – 2378 nm, 2389 – 2402 nm, 2405 – 2407, 2411 – 2416 e 2424 - 2425. Pode ser notado também que as faixas de comprimentos de onda 933 – 966 nm, 1884 – 1891 nm e 2203 – 2210 nm são utilizadas tanto nos dados de reflectância bruta e com o pré-tratamento SGD para fazer a separação, totalizando 47 comprimentos de onda representativos. Sendo 933 – 967 nm, 1884 – 1891 nm e 2203 – 2210 nm foram usados também no pré-tratamento SMO, totalizando 48 comprimentos de onda representativos.

**Tabela 17.** Faixas de comprimentos ideais componentes para o Experimento 2 – avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica no solo na região espectral do IV.

	<b>BRUTO</b>	<b>SMO</b>	<b>MSC</b>	<b>SGD</b>
	933 - 966	933 - 967	780 - 1443	933 - 966
	1884 - 1891	1884 - 1891	1542 - 1786	1884 - 1891
	2203 - 2210	2203 - 2210	1801 - 1897	2203 - 2210
<b>Faixas de comprimentos de onda (nm)</b>			1916 - 2176 2222 - 2378 2389 - 2402 2405 - 2407 2411 - 2416 2424 - 2425	

Correção multiplicativa de sinal (MSC); Suavização por média móvel (SMO); Derivação Savitzky-Golay com polinômio de 1<sup>a</sup> ordem (SGD).

Chang et al. (2001) relataram que as bandas de 934 nm e 1227 nm são sensíveis à resposta de partículas orgânicas, enquanto as bandas de 953 nm e 1423 nm podem ser características e influenciadas por partículas orgânicas de 0,15 mm. Neste estudo, o pré-tratamento MSC abrangeu todas essas bandas, apresentando também a melhor correlação, a melhor separação visual e o maior número de comprimentos de onda representativos.



**Figura 28.** Análise comportamental do Experimento 2 obtida pelo pré-tratamento MSC através da Análise de Componentes Principais (ACP) na região espectral do IV.

## 6 CONCLUSÃO

Na etapa de caracterização dos atributos químicos, incluindo carbono (C), nitrogênio (N) e macronutrientes, foi possível concluir que os parâmetros analisados atendem à legislação vigente para fertilizantes orgânicos. Dessa forma, os resultados indicam que o material apresenta boa qualidade e procedência adequada. Além disso, o estudo concluiu que o uso do espectroradiômetro foi eficiente para caracterizar tanto o comportamento espectral do Experimento 1- fases do processo de compostagem e para o Experimento 2- avaliação da variação da quantidade de matéria orgânica.

A análise de componentes principais (ACP) foi eficiente na redução da dimensionalidade dos dados e na identificação das faixas espetrais ideais para a separação das fases e da variação dos níveis de matéria orgânica no solo. No Experimento 1, que avaliou as fases do processo de compostagem, observou-se que, na região espectral do visível, o pré-tratamento SMO apresentou a melhor correlação no valor de 93,89%, no entanto o pré-tratamento MSC apresentou melhor distribuição visual espacial e também mais comprimentos de ondas representativos, totalizando 79. Na região espectral do infravermelho (IV), o pré-tratamento MSC destacou-se com correlação de 85,61%, com

a identificação de 260 comprimentos de onda adequados para a distinção das fases do processo de compostagem.

No Experimento 2, que avaliou a variação dos níveis de matéria orgânica (MO) no solo, os resultados indicaram diferenças significativas entre as regiões espectrais analisadas. Na região espectral do visível, o pré-tratamento SMO apresentou o melhor desempenho, alcançando uma correlação de 99,05% e identificando 270 comprimentos de onda ideais para a avaliação dos níveis de MO no solo. Por outro lado, na região espectral do infravermelho (IV), o pré-tratamento MSC foi o mais eficiente, obtendo uma correlação de 97,15% e destacando 1.442 comprimentos de onda como ideais para a análise.

Ao analisar as correlações obtidas pela ACP nos Experimentos 1 e 2, verifica-se que a região espectral do visível e do infravermelho apresentaram altos índices de correlação em ambos os casos. Dessa forma, conclui-se que essas regiões espectrais são indicadas para o estudo da compostagem, demonstrando grande eficiência na discriminação e avaliação dos diferentes parâmetros analisados nos experimentos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, H. Coefficient of variation. **Encyclopedia of research design**, v. 1, n. 5, p. 169-171, 2010.

AGUIAR, M. I. D., RIBEIRO, L. P. D., RAMOS, A. P. D., & CARDOSO, E. L. (2021). Caracterização de solos por espectroscopia no infravermelho próximo e análise de componentes principais. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, p. e20196825, 2021.

ALVARENGA, S.T. Caracterização química e sensorial de cafés especiais do sul de Minas Gerais. 2017.

AMARAL, J. B. C.. Fator de reflectância espectral do feijão submetido à adubação orgânica e mineral. 2018.

AMARAL, J. B. C. Estimativa de parâmetros de vegetação e de qualidade de água usando sensoriamento remoto. 2022.

ARAÚJO, A. A. Variáveis influenciadoras das características físico-químicas em compostagem e predição da relação C/N. 2021.

ÁVILA G. C., DA SILVA SAMUEL, P. R., CAMPANI, D. B., & CANDIOTA, R. M. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE COMPOSTOS ORGÂNICOS DE PROCESSOS DE VERMICOMPOSTAGEM EM DIFERENTES AMBIENTES DA SOCIEDADE.

BARBOSA, R., SILVA, A., NEVES, M., GALVÃO, A., & NETO, C. O. (2013). Produção e sequestro de carbono na atmosfera. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. 25 anos de quimiometria no Brasil. **Química Nova**, v. 29, p. 1401-1406, 2006.

BAUMGARTNER, L. C., Cordeiro, R. C., RODRIGUES, R., MAGALHÃES, C. D. S., & MATOS, E. D. S. (2021). Estoque e mecanismo de proteção física do carbono no solo em manejos agrícolas. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA n.25, de 23 de julho de 2009. Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. Publicado no D.O.U. de 24 julho de 2009

BRUNET, D., BARTHÈS, B. G., CHOTTE, J. L., & FELLER, C. DIDIER et al. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: effects of sample grinding and set heterogeneity. **Geoderma**, v. 139, n. 1-2, p. 106-117, 2007.

CARMO, D. L. D.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1211-1220, 2012.

CARNEIRO, A. D. S. R., DE JESUS, T. B., DOS SANTOS, E. P., & SANTOS, R. L. Utilização da espectrorradiometria na caracterização do teor de matéria orgânica presente no solo. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 86-95, 2019.

CARVALHEIRO L. C. D. O., OLIVEIRA BERNARDO, S. D., COSTA, P. D., ORGAZ, M. D. M., & YAMASAKI, Y. Validação da Temperatura da Superfície do Mar a partir de medições de satélite. 2008.

CARVALHO, J. K. Avaliação de métodos de pré-processamento e modelagem matemática aplicados à espectroscopia de infravermelho próximo para estimar teores de argila e matéria orgânica do solo. 2019.

CENAMO, M. C. Mudanças climáticas, o protocolo de quioto e mercado de carbono. **CEPEA, ESALQ-USP**. Disponível em <[http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo\\_quioto.pdf](http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo_quioto.pdf)>., v. 14, n. 06, p. 2011, 2004.

CERRI, C. C., & CERRI, C. E. P. (2007).. Agricultura e aquecimento global. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 40-44, 2007.

DAI, L., XUE, J., LU, R., WANG, Z., CHEN, Z., YU, Q., ... & CHEN, S. (2024). In-situ prediction of soil organic carbon fractions in wheat-rice fields via visible near-infrared spectroscopy. **Soil & Environmental Health**, p. 100113, 2024.

DEMATTÊ, J. A. M., EPIPHANIO, J. C. N., & FORMAGGIO, A. R. (2003). Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. *Bragantia*, 62, 451-464.

DA SILVA SOARES, M.; DE SOUSA ANTUNES, L. F.; DE ALMEIDA LEAL, M. A. Avaliação do processo de compostagem a partir da mistura de capim-elefante, gliricidia e farelo de trigo. *Cadernos de Agroecologia*, v. 15, n. 2, 2020.

DE AZEVEDO VILLARINHO, A. C., SANTOS, B. D. S. P., DA COSTA, K. L. D. S., DA SILVA, L. K. C. L., JÚNIOR, M. D. N. R., & DA ROSA, P. S. D. M. (2020, March). DESCARTE DE RESÍDUOS ORGÂNICOS APLICADO À TÉCNICA DE COMPOS TAGEM. In: **Simpósio**. 2020.

DE JESUS, E. J. R., & BORGES, A. L. (2019). Impacto de tipos de compostagem no desenvolvimento vegetativo de plátanos em cultivo orgânico. 2019.

DE MATOS, S. M., ALVES, R. N., DA SILVA CHAVES, J., SOARES , R. B., DO NASCIMENTO, J. P. S., DA SILVA , L. S., ... & DE SOUZA, F. G. (2021). Efeitos do uso de gliricidia e rocha fosfatada no crescimento e nos teores de N, P e K nas culturas do quiabo e pepino. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, p. e50810615939-e50810615939, 2021.

DE MORAES NOVO, E. ML. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. Editora Blucher, 2010.

DE SOUZA BATALHA, O., ALFAIA, S. S., DA COSTA AYRES, M. I., NETO, J. G. F., & DE OLIVEIRA MORAES FILHO, J. (2023). Avaliação da composição química de compostos orgânicos oriundos de resíduos de pirarucu (Arapaima gigas) e gliricídia (Gliricidia sepium). *Terceira Margem Amazônia*, v. 9, n. 21, p. 11-22, 2023.

DE SOUZA, R. O. B.; PÉREZ, T. C. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO CARBONO ORGÂNICO NO SOLO EM ARGISOLO NO MUNICIPIO DE PETROLINA-PE. *Anais dos Seminários de Iniciação Científica*, n. 25, 2021.

DEMBOCURSKI, D. Influência do Uniconazole no crescimento e desenvolvimento da planta na composição química de grãos de milho. 2023.

DOBBSS, L. B., RUMJANECK, V. M., BALDOTTO, M. A., VELLOSO, A. C. X., & CANELLAS, L. P. (2009). Caracterização química e espectroscópica de ácidos húmicos e fúlvicos isolados da camada superficial de Latossolos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 51-63, 2009.

DUARTE, B. B.; TUPIASSU, L; NOBRE, S. O mercado de carbono na política de mitigação das mudanças climáticas. *Revista de Direito Ambiental e Socioambientalismo*, v. 6, n. 2, p. 93-108, 2020.

DUVAL, V. S., & CÁMARA ARTIGAS, R. (2021). Diversidad y captura de carbono en un bosque secundario de caldén (*Prosopis caldenia*) en La Pampa, Argentina. *Estudios Geográficos*, v. 82, n. 291, p. e073-e073, 2021.

FACCIN, F. **Impactos das metas do Acordo de Paris sobre a economia brasileira: uma abordagem de equilíbrio geral computável**. 2019. Tese de Doutorado.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria: conceitos, métodos e aplicações**. Editora da UNICAMP, 2015.

FORATO, L. A., BERNARDES FILHO, R., OSIRO, D., BICUDO, T. D. C., & COLNAGO, L. A. (2010). A Espectroscopia na região do Infravermelho e algumas aplicações. 2010.

GANASCINI DONATO, D. Caracterização espectral de trigo em lavoura comercial e estimativas biofísicas e qualidade de grãos baseada em quimiometria. 2021.

GATTO, A., BARROS, N. F. D., NOVAIS, R. F., SILVA, I. R., MENDONÇA, E. D. S., & VILLANI, E. M. D. A. (2009). Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 735-740, 2009.

GUPTA, Sharad Kumar et al. Smartphone-based spectroscopy as a tool to estimate soil attributes for the citizen science concept. **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100327, 2023.

HÖFIG, P. Compostagem conjunta de resíduos orgânicos e rochas moídas na cafeicultura: vida nova para a terra. 2024.

HUANG, B; YU, Z., CHEN, A., GEIGER, A., & GAO, S. 2d gaussian splatting for geometrically accurate radiance fields. In: **ACM SIGGRAPH 2024 Conference Papers**. 2024. p. 1-11.

INACIO, C. de T. Compostagem: curso prático e teórico. 2015.

JESUS, K. N., ALBURQUERQUE, E. R. G. M., SALES, A. T., & SAMPAIO, E. V. D. S. B. (2019)Estoques de carbono em solos de Pernambuco, Brasil (Carbon stocks in soil of Pernambuco state, Brazil). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 3, p. 714-721, 2019.

KNAPIK, H. G.; FERNANDES, C. V. S.; AZEVEDO, J. C. R. D. Aplicabilidade de técnicas de espectroscopia e da concentração de carbono orgânico dissolvido na caracterização da matéria orgânica em rios urbanos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 214-225, 2014.

KOVEN, C. D.; HUGELIUS, G., LAWRENCE, D. M., & WIEDER, W. R. (2017). Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 817-822, 2017.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004.

LEVIN, N; BEN-DOR, E.; SINGER, A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 24, p. 5475-5492, 2005.

LOPES, W. A. & FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química nova**, v. 27, p. 670-673, 2004.

LYRA, W. D. S., SILVA, E. C. D., ARAÚJO, M. C. U. D., FRAGOSO, W. D., & VERAS, G.. Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. **Química Nova**, v. 33, p. 1594-1597, 2010.

MACHADO, D., SCHLOSSER, T. R., ZUFFO, A. M., ANDRADE, F., & PIAUILINO, A. (2012). Atividades microbianas e as transformações no ciclo dos elementos no solo. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 8, n. 15, 2012.

MARCHAO, R., SATO, J., de FIGUEIREDO, C. C., VENDRAME, P., FÉLIX, J., MADARI, B., ... & BECQUER, T. (2019). Espectroscopia de infravermelho próximo na quantificação do carbono orgânico em solos do cerrado. 2019.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. Protocolo de Quioto(2019).

MARINHO, C. D. S. (2022). Estimativa de Clorofila-a por imagens multiespectrais de alta resolução espacial no Lago Paranoá-DF.

MARTÍN, A. P. S., MARHUENDA-EGEA, F. C., BUSTAMANTE, M. A., & CURAQUEO, G. Spectroscopy techniques for monitoring the composting process: a review. **Agronomy**, v. 13, n. 9, p. 2245, 2023.

MENESES, P. R.; DE ALMEIDA, T.; DE MELLO BAPTISTA, G. M. **Reflectância dos materiais terrestres**. Oficina de textos, 2019.

MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping – a review. **Geoderma**, [s.l.], v. 162, p. 1-19, 2011. DOI:10.1016/j.geoderma.2010.12.018

NANZER, M. C., ENSINAS, S. C., BARBOSA, G. F., BARRETA, P. G. V., de OLIVEIRA, T. P., DA SILVA, J. R. M., & PAULINO, L. A. (2019). Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 136-145.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G; SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas e o Brasil: contextualização. **Parcerias estratégicas**, v. 27, n. December, p. 7-17, 2008.

PEARLSHTIEN, D.H.; BEN-DOR, E. Effect of organic matter content on the spectral signature of iron oxides across the VIS–NIR spectral region in artificial mixtures: An example from a red soil from Israel. **Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 1960, 2020.

PEREIRA M. (2019) Estatística Descritiva Básica: o que é e para que serve. [S. l.], 2019. Dispoquantidadeem: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/estatistica-descritiva>. Acesso em: 1 jun. 2022.

PRADO, A. GS. Química verde, os desafios da química do novo milênio. **Química Nova**, v. 26, p. 738-744, 2003..

PRIMO, D. C., MENEZES, R. C., & SILVA, T. O. (2011). Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia plena**, v. 7, n. 5, 2011.

PROJETO MAPBIOMAS – Coleção [versão] da Série aAnual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [14/07/2023].

PUDEŁKO, A; CHODAK, M. Estimation of total nitrogen and organic carbon contents in mine soils with NIR reflectance spectroscopy and various chemometric methods. **Geoderma**, v. 368, p. 114306, 2020.

PULROLNIK, K., BARROS, N. F. D., SILVA, I. R., NOVAIS, R. F., & BRANDANI, C. B. (2009). Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1125-1136, 2009.

QI, M., CHEN, S., WEI, Y., ZHOU, H., ZHANG, S., WANG, M., ... & LUO, Z. (2024). Using visible-near infrared spectroscopy to estimate whole-profile soil organic carbon and its fractions. **Soil & Environmental Health**, v. 2, n. 3, p. 100100, 2024.

REZENDE, V. M. **Certificação de beta-N-metil-amino-alanina: um modelo para produção de materiais de referência de substâncias orgânicas obtidas in-house**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, S. G. (2021). Espectroscopia de reflectância na avaliação do carbono orgânico em solos do semiárido.

RODRIGUES, B. D. **ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS E K-MEANS APLICADOS A ESTUDOS DE SENSIBILIDADE DE CÉLULAS NEURONAIAS A ESTÍMULOS. Proceedings Seminário Interno da disciplina de Redes Neurais Artificiais**, p. 67, 2010.

RODRIGUES, M., da SILVA, L. M., MARCHAO, R., de SOUZA, A. M., WADT, P., & de OLIVEIRA, L. C. (2017). Espectroscopia no infravermelho próximo para a quantificação de carbono em solos da bacia do Acre.

ROMAGNOLI, F., NANNI, M. R., DA SILVA JUNIOR, C. A., DE CARVALHO GASPAROTTO, A., DA SILVA A. A., SACIOTO, M., & CEZAR, E. Utilização de Análise multivariada PLSR e espectroscopia Vis-NIR na predição de atributos físicos do solo.

ROMANO, R. A., DOS SANTOS, C. H., MILORI, D. M. B. P., & CONDRON, L. (2011) Renan Amon et al. Avaliação do grau de humificação da matéria orgânica de uma cronossequência de solos através de espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS). 2011.

ROUDIER, P., HEDLEY, C. B., LOBSEY, C. R., ROSSELI, R. V., & LEROUX, C. Evaluation of two methods to eliminate the effect of water from soil vis–NIR spectra for predictions of organic carbon. **Geoderma**, v. 296, p. 98-107, 2017.

RUEDA, M. P., DOMÍNGUEZ-VIDAL, A., LLORENT-MARTÍNEZ, E. J., ARANDA, V., & AVORA-CAÑADA, M. J. Monitoring organic matter transformation of olive oil production residues in a full-scale composting plant by fluorescence spectroscopy. **Environmental Technology & Innovation**, p. 103695, 2024.

SANTANA, G. G. **Estabilização da matéria orgânica em composto**. 2022. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.

SANTOS, T. C. D. S. (2019). Impactos das mudanças de uso da terra e manejo nos estoques de carbono do solo em diferentes biomas brasileiros.

SARTORIO, L. F., VARNIER, M., FELIPPE, L. D. S., ZANOTTA, D. C., FREITAS, M., & GRONDONA, A. (2023). Análise Comparativa Entre o Uso de Bandas Espectrais e o Uso da Análise de Componentes Principais (ACP) na Classificação de Uso e Cobertura da Terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, 75.

SATO, J. H., de FIGUEIREDO, C. C., & MARCHÃO, R. L. (2013). Potencial da espectroscopia NIR na predição de carbono em solos do Cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. Ciência do solo: para quê e para quem: anais. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, Amsterdam, v. 36, n. 8, p. 1627–1639, 1964.

SAYES, W.; MOUAZEN, A . M.; RAMON, H. Potencial for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v.91, p.393-402, 2005.

SENA, L. M., de ARRUDA, J. F., da SILVA COSTA, F. R., de ALMEIDA, F. B. B., de BRITO, P. O. B., & GONDIM, F. A. (2019). Compostagem e vermicompostagem como alternativa para tratamento e de destinação de resíduos orgânicos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14, n. 2, p. 266-272, 2019.

SILVA, J. C., SIGNOR, D., BRITO, A. M. S., CERRI, C. E. P., CAMARGO, P. B. D., & PEREIRA, C. F. (2020). espectroscopia no infravermelho próximo e análise de componentes principais para investigação de solos submetidos a diferentes usos da Terra na Amazônia Oriental Brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 51-62, 2020.

SILVA, L. (2019). Disponibilidade de macro e micronutrientes durante o processo de compostagem de resíduos orgânicos.

SILVA, L. L. Modelagem do carbono orgânico no solo por espetrorradiometria de reflectância em Morro do Chapéu-BA. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Ciências da Terra e Ambiente, Feira de Santana - BA.

SILVA, V. M. D., RIBEIRO, P. H., TEIXEIRA, A. F. R., & SOUZA, J. L. D. (2013). Qualidade de compostos orgânicos preparados com diferentes proporções de ramos de gliricidia (*Gliricidia sepium*). **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 1, p. 187-198, 2013.

SILVEIRA, C. S. D., & OLIVEIRA, L. D. (2021). Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos cadernos NAEA. Belém, PA. Vol. 24, n. 3 (set./dez. 2021), p. 11-31**, 2021.

SOARES, R., MADDOCK, J. E. L., DE CAMPOS, D. V. B., MADARI, B. E., & DE ALMEIDA, P. L. D. O. (2022). Determinação dos Estoques de Carbono e Nitrogênio nas Frações Físicas da Matéria Orgânica em Solos Antrópicos (Terra Preta de Índio) e Não Antrópicos da Amazônia Central. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 2, 2022.

SOUZA, A. M. D., & POPPI, R. J. (2012). Experimento didático de quimiometria para análise exploratória de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio e análise de componentes principais: um tutorial, parte I. **Química Nova**, v. 35, p. 223-229, 2012.

SOUZA, D. M., MADARI, B. E., & GUIMARÃES, F. F. (2012). Aplicação de técnicas multivariadas e inteligência artificial na análise de espectros de infravermelho para determinação de matéria orgânica em amostras de solos. **Química Nova**, v. 35, p. 1738-1745, 2012.

STONER, E. R., BAUMGARDNER, M. F., SILVA L. F. & BIEHL, L. L. (1986). Reflectance properties of soils. *Advances in agronomy*, 38, 1-44.

TOZO, M. L. D. L. Uso de métodos baseados em laser para caracterização da matéria orgânica em solos. 2022.

TELLES, T. S., VIEIRA FILHO, J. E. R., RIGHETTO, A. J., & RIBEIR, M. R. (2021). **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil**. Texto para Discussão, 2021.

UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, (2020).

VISCARRA ROSSEL, R.A.; CHEN, C. Digitally mapping the information content of visible-near infrared spectra of surficial Australian soils. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p. 1443-1455, 2011. DOI: 10.1016/j.rse.2011.02.004.

VISCARRA ROSSEL, R. A., BEHRENS, T., BEN-DOR, E., CHABRILLAT, S., DEMATTÊ, J. A. M., Ge, Y., ... & SHEN, Z. (2022). Diffuse reflectance spectroscopy for estimating soil properties: A technology for the 21st century. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 4, p. e13271, 2022.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; MCGLYNN, R. N.; MCBRATNEY, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 137, n. 1-2, p. 70-82, 2006.

WANG, Z., CHEN, S., LU, R., ZHANG, X., MA, Y., & SHI, Z. (2024). Non-linear memory-based learning for predicting soil properties using a regional vis-NIR spectral library. **Geoderma**, v. 441, p. 116752, 2024.

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

ZARBIN, A. J., & ORTH, E. S. (2020). Algumas estruturas do carbono elementar e sua importância para o desenvolvimento e soberania do Brasil. **Química Nova**, v. 42, p. 1225-1231, 2020.

