

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SERAPILHEIRA EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS DE CACAU E SERINGUEIRA NO SUL DA  
BAHIA, BRASIL

**MICKAELLE ALVES DE SOUSA LIMA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO – 2021

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SERAPILHEIRA EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS DE CACAU E SERINGUEIRA NO SUL DA  
BAHIA, BRASIL

**MICKAELLE ALVES DE SOUSA LIMA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
MARÇO – 2021

### FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

L732

Lima, Mickaelle Alves de Sousa.

Composição química da serapilheira em sistemas agroflorestais de cacau e seringueira no sul da Bahia, Brasil / Mickaelle Alves de Sousa Lima. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.

57 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2021.

Orientadora: Emanuela Forestieri da Gama Rodrigues.

1. Infravermelho. 2. Grupos funcionais. 3. Compostos. 4. Espectros . 5. Seringueira . I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SERAPILHEIRA EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS DE CACAU E SERINGUEIRA NO SUL DA  
BAHIA, BRASIL

**MICKAELLE ALVES DE SOUSA LIMA**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”.

Aprovada em 10 de março de 2021

Comissão Examinadora:



---

Seldon Aleixo (D. Sc., Produção Vegetal) - UENF



---

Prof. Fabrício Marinho Lisboa (D.Sc., Produção Vegetal) - IFRO



---

Lais de Carvalho Vicente (D. Sc., Produção Vegetal) – UENF  
(Coorientadora)



---

Prof<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) - UENF  
(Orientadora)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as dádivas, e por tudo que tem feito em minha vida, pela oportunidade, por estar sempre me aparando nos momentos difíceis, pela força e coragem durante está caminhada;

À minha mãe Luzeni Alves de Sousa Lima e ao meu pai Antônio Carlos dos Santos Lima pelos ensinamentos e por sempre me apoiarem e incentivarem e por terem que abdicar muitas vezes de suas vidas, por amor a mim, a minha irmã, para que pudéssemos sempre ter o melhor;

À minha irmã Martha Alves de Sousa Lima, pelo companheirismo, compreensão e paciência e por sempre torcer e acreditar na minha capacidade em conquistar e realizar aquilo que almejo;

À minha orientadora, professora Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues pela orientação e compreensão e contribuição para melhoria intelectual, confiança, por sempre ter acreditado no meu potencial e sempre estar disposta a ajudar;

À minha coorientadora, Lais de Carvalho pelos ensinamentos, orientação, compreensão, oportunidade, paciência e pela disponibilidade que sempre demonstrou quando precisei, muito obrigada!

Às técnicas Katia e Vanilda, pela ajuda nas análises, por sempre estarem à disposição, pelos cafezinhos e conversas;

Ao senhor Ederaldo pelas coletas das amostras, pelos cafezinhos e conversas e risadas;

Ao técnico Marcelo, por ceder o acessório para realização das análises de infravermelho;

Ao Dsc. Seldon Aleixo e Dsc. Fabrício pelas contribuições para melhoria do trabalho;

Às minhas amigas Ruth e Nayara, pelo companheirismo e ensinamentos durante o mestrado;

Aos meus companheiros de casa, Rafael e Maria Ivanessa, pelo apoio, risadas e companheirismos e por estarem sempre comigo em todos os momentos;

Aos professores da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pelos ensinamentos;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela concessão da bolsa e oportunidade;

E, a todos que contribuíram direta e indiretamente, muito obrigada!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Sistemas Agroflorestais (SAFs) .....	4
2.2.1. SAFs de serapilheira e cacau .....	5
2.2. Composição química da serapilheira .....	6
2.3. Espectroscópica de Infravermelho com transformada de Fourier por Refletância Difusa (DRIFTS, sigla em inglês) .....	8
3. OBJETIVO GERAL .....	11
3.1. Objetivos específicos .....	11
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
4.1. Caracterização da área .....	12
4.1.1. Descrição da adubação.....	13
4.1.2. Coleta da serapilheira .....	14
4.2 Análises química e orgânica da serapilheira .....	14
4.3. Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Difusa (DRIFTS) .....	15
4.4. Análises estatísticas.....	17
5.RESULTADOS.....	19
5.1. Caracterização química da serapilheira a partir da técnica de DRIFTS.....	19
5.2. Análise de Componentes Principais (ACP) da serapilheira .....	24

6.DISSCUSSÃO .....	27
6.1. Caracterização química da serapilheira a partir da técnica de DRIFTS.....	27
6.2. Análise de Componentes Principais (ACP) da serapilheira .....	30
7. RESUMO E CONCLUSÕES .....	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33



## RESUMO

Lima, Mickaelle Alves de Sousa, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2021. Composição química da serapilheira em sistemas agroflorestais de cacau e seringueira no sul da Bahia, Brasil. Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama Rodrigues. Coorientadora: D.Sc., Laís de Carvalho Vicente.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) por possuírem uma diversidade de espécies favorecem a deposição contínua de material orgânico no solo via serapilheira e raízes, com isso mostram-se importantes na acumulação de carbono (C) e manutenção do sistema, além de serem uma estratégia para a diminuição do CO<sub>2</sub>. A serapilheira possui uma diversidade de compostos orgânicos (lignina, polifenol, celulose, hemicelulose e etc.), com diferentes labilidades, e estes são de grande importância para a formação da matéria orgânica e compreensão do funcionamento dos agrossistemas. Com o auxílio da técnica de espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância (DRIFTS), é possível determinar os grupos funcionais e, através destes, obter caracterização da serapilheira. Com isso, o objetivo principal desse estudo consistiu em caracterizar a composição química da serapilheira aportada em solos sob floresta e SAFs de seringueira e cacau de diferentes idades e seringueira pura. A coleta da serapilheira foi realizada em uma propriedade no Sul da Bahia onde foram selecionadas áreas de SAF antigo (SAF<sub>A</sub>; Seringueira de 40 anos e Cacau de 14 anos), SAF Jovem (SAF<sub>J</sub>; seringueira e cacau, 9 anos), Seringueira pura (S<sub>p</sub>; 40 anos) e floresta natural. Em todas as áreas, exceto no SAF antigo foram coletadas quatro amostras. Já no SAF antigo, foram coletadas apenas duas

amostras compostas. O material da serapilheira foi seco ao ar, posteriormente seco em estufa, em seguida foram realizadas as análises de DRIFT utilizando espectro de infravermelho, em seguida os espectros foram plotados utilizando o software OriginPro. Foram realizadas análises do teor de lignina, polifenol, celulose e nitrogênio. Para análises de componentes principais (ACP) foi utilizado o programa XLSTAT. Os resultados mostraram que SAF<sub>A</sub> (Lc) apresentou principalmente bandas que associam a compostos aromáticos (1600-1500 cm<sup>-1</sup>), enquanto no SAF<sub>A</sub> (Ls) a maior intensidade de absorbância no intervalo de 1097-1040 cm<sup>-1</sup>, atribuído à presença de celulose, no SAF<sub>J</sub> (Ls) observa-se na Lc a ausência de grupos funcionais de polissacarídeos (1380-1240 cm<sup>-1</sup>), os sistemas SAF<sub>J</sub> (Lc e Ls), SAF<sub>A</sub> (Ls) e S<sub>p</sub>, apresentaram semelhança principalmente por apresentarem as bandas em torno de 1040 cm<sup>-1</sup>. A floresta natural mostrou-se dissimilar aos demais sistemas. A ACP, também mostra a dissimilaridade entre os sistemas, confirmando os resultados obtidos pelo DRIFTS. Os picos de polissacarídeos (1051, 1040 e 918 cm<sup>-1</sup>) correlacionam com a floresta, possivelmente, foram os responsáveis para que esse sistema formasse um grupo isolado. As bandas de absorção: 1651, 1541, 1518, 1454 e 1240 cm<sup>-1</sup> e % N e polifenol, por sua vez, explicam a dissimilaridade do SAF<sub>A</sub> (Lc) dos demais sistemas. Nota-se também que picos de álcoois ou fenóis (3690, 3620, 3290 cm<sup>-1</sup>) e alifático (2922 cm<sup>-1</sup>) se correlacionaram ao grupo de SAF<sub>J</sub> (Lc e Ls), SAF<sub>A</sub> (Ls) e S<sub>p</sub>, possivelmente sendo as bandas de absorção mais responsivas para a similaridade entre esses sistemas. Os resultados permitem concluir que conversão de floresta em SAFs de cacau e seringueira e seringueira pura afeta a composição química da serapilheira.

## ABSTRACT

Lima, Mickaelle Alves de Sousa, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March, 2021. Chemical composition of litter in agroforestry systems of cocoa and rubber tree in southern Bahia, Brazil. Advisor: Prof.<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama Rodrigues. Co-advisor: D.Sc., Laís de Carvalho Vicente.

The agroforestry systems (AFS), by having a species diversity, favor the continuous organic material deposition in the soil via litter and roots, because of that the ASs show important in the carbon (C) accumulation and system maintenance, besides being a strategy for the reduction of the CO<sub>2</sub>. The litter has a diversity of organic compounds (lignin, polyphenol, cellulose, hemicellulose and etc.), with different abilities, and these are of great importance for the organic matter formation and agrosystems functioning understanding. With the aid of diffuse reflectance infrared fourier transform spectroscopy (DRIFTS), it is possible to determine the functional groups and, through these, obtain characterization of the litter. Thus, the main objective of this study was to characterize the chemical composition of the litter provided in soils under forest and SAFs of rubber tree and cocoa of different ages and pure rubber tree. The collection of litter was carried out on a property in the south of Bahia where areas of old AFS were selected (AFS<sub>A</sub>; 40-year-old rubber tree and 14-year-old cocoa), young AFS (AFS<sub>J</sub>; rubber tree and cocoa 9-year-old), Pure rubber tree (S<sub>p</sub>; 40-year-old) and natural forest. In all areas, except the old AFS, four samples were collected. In the old SAF, only two composed samples were collected. The litter material was air-dried, then dried in

an oven, then DRIFT analyzes were performed using infrared spectrum, then the spectra were plotted using OriginPro software. Analyzes of lignin, polyphenol, cellulose and nitrogen were performed. For principal component analysis (PCA), the XLSTAT program was used. The results showed that AFS<sub>A</sub> (Lc) showed mainly bands that associate with aromatic compounds (1600-1500 cm<sup>-1</sup>), while in AFS<sub>A</sub> (Ls) the highest absorbance intensity in the range of 1097-1040 cm<sup>-1</sup>, attributed to the presence of cellulose, in AFS<sub>J</sub> (Ls) the absence of functional groups of polysaccharides is observed in Lc (1380-1240 cm<sup>-1</sup>), the AFS<sub>J</sub> (Lc and Ls), AFS<sub>A</sub> (Ls) S<sub>p</sub> systems showed similarities mainly because they presented bands around 1040 cm<sup>-1</sup>. The natural forest proved to be dissimilar to the other systems. ACP also shows the dissimilarity between the systems, confirming the results obtained by DRIFTs. the polysaccharide peaks (1051, 1040 e 918 cm<sup>-1</sup>) correlate with the forest, possibly responsible for this system to form an isolated group. The absorption bands: 1651, 1541, 1518, 1454 and 1240 cm<sup>-1</sup> and % of N and polyphenol, in turn, explain the dissimilarity of AFS<sub>A</sub> (Lc) from the other systems. It is also noted that peaks of alcohols or phenols (3690, 3620, 3290 cm<sup>-1</sup>) and aliphatic (2922 cm<sup>-1</sup>) correlated with the group of AFS<sub>J</sub> (Lc e Ls), SAF<sub>A</sub> (Ls) and S<sub>p</sub>, possibly being the absorption bands more responsive to the similarity between these systems. The results allow us to conclude that forest conversion into cocoa and rubber tree SAFs and pure rubber tree SAFs affect the chemical composition of the burlap.

## 1. INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas, em todo o mundo, causam grande preocupação para a sociedade e para a comunidade científica e, por isso, existe o consenso de que é fundamental reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) da atmosfera, por meio de ações efetivas para diminuição do aquecimento global (Torres et al., 2008).

O Brasil é o oitavo emissor de gases do efeito estufa no mundo, com estimativa que 50 % das emissões de GEE são oriundas principalmente do desmatamento e atividades agropecuárias (Copertino et al., 2019). Segundo os dados em termos globais, as concentrações de CO<sub>2</sub> chegam a 409 ppm, crescendo a 2,5 ppm ao ano (Artaxo, 2020). Neste contexto, existe um grande interesse na adoção de sistemas de uso da terra de mitigadores da concentração atmosférica e das emissões de CO<sub>2</sub> (Singh, 2000).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são apontados como uma estratégia para reduzir as concentrações de CO<sub>2</sub>, e a importância desses sistemas é maior quando são utilizadas espécies perenes como, por exemplo, a seringueira e o cacau, que apresentam grande eficiência na fixação e armazenamento de carbono (C) (Somarriba e Harvey, 2003; Concha et al., 2007). Isso pode ser explicado devido a algumas características dessas culturas, tais como deposição de grandes quantidades de materiais orgânicos no solo via serapilheira e também via sistema radicular (exsudação e *turnover* de raízes) (Montagnini e Nair et al., 2004; Oelbermann e Voroney et al., 2007).

Dessa forma, a diversidade das espécies florestais dos SAFs favorece a formação de uma serapilheira heterogênea (diferentes espécies florestais), que pode variar em relação à composição de folhas, galhos e etc. Uma das principais funções da serapilheira nos agrossistemas consiste em contribuir para a manutenção da sua produtividade. Além de fornecer energia e habitat para um grande número de organismos decompositores (Martius et al., 2004). Dessa forma, ela atua como um sistema de entrada-saída de nutrientes, e a sua quantidade e composição química pode controlar a ciclagem de nutrientes, acúmulo de carbono e manutenção da fertilidade do solo (Berg, 2000; Ranger et al., 2003; Dawoe et al., 2010; Julien et al., 2018).

A composição química da serapilheira varia de acordo com as espécies e seu ciclo de desenvolvimento (anual ou perene), clima e das formas de manejo que são adotadas (Pinheiro et al., 2015). Além disso, a composição química da serapilheira está relacionada às características intrínsecas ao material, pela presença de compostos fenólicos, álcoois, lignina, celulose e hemicelulose, lipídios, polissacarídeos, dentre outros compostos, em diferentes proporções (Hättenschwiler e Jørgensen, 2010; Prescott, 2010; Cotrufo et al., 2013; Mckee et al., 2016). Estes compostos orgânicos que entram no solo via serapilheira apresentam, portanto, uma composição altamente variável, de diferentes tempos de ciclagem e fortemente influenciada por fatores ambientais e bióticos (Schmidt et al. 2011).

Diante do exposto, através da utilização de técnicas espectroscópicas, como a Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Difusa (DRIFTS, sigla em inglês), é possível identificar os grupos funcionais, e através destes inferir sobre a composição química da serapilheira (Pimentel et al., 2019). Dessa forma, tem-se uma melhor compreensão do tempo de ciclagem da serapilheira aportada nos solos sob SAFs de cacau e plantações de seringueira e, portanto, seu potencial de reserva ou fonte de C no sistema serapilheira-solo, que dependerá da dinâmica de decomposição do material vegetal, que é influenciada pelo ambiente edáfico e este contribui para a preservação ou não destes compostos de C.

Neste contexto, pretende-se responder às seguintes questões: Qual o efeito da conversão da floresta em plantios de seringueira e SAFs cacau e seringueira na composição química da serapilheira? Há diferenças na composição química entre

o cacau e a seringueira? Há diferenças na composição química entre as diferentes idades das serapilheiras? A conversão de floresta para SAFs afeta a composição química da serapilheira?

Deste modo, o objetivo principal desse estudo consistiu em caracterizar a composição química da serapilheira aportada em solos sob floresta e SAFs de seringueira e cacau de diferentes idades e plantação de seringueira pura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Sistemas Agroflorestais (SAFs)

Os SAFs são sistemas formados a partir de árvores associadas a cultivos agrícolas (anual e/ou perene) e/ou criação de animais na mesma área, de forma simultânea ou sequencial, buscando assim, uma otimização da agregação de valores socioeconômicos, culturais e ambientais, podendo apresentar grande potencial sustentável para o manejo dos recursos naturais (Assis-Júnior et al., 2003). Esses sistemas contribuem para melhorar as condições físicas e químicas do solo, em virtude da diminuição da erosão e do aumento de aporte da matéria orgânica (Mendonça et al., 2010), além da diversificação da produção, modificação do microclima, melhoria do sistema de produção (Somarriba, 1992) e auxílio na ciclagem de nutrientes (Raintree, 1990). A presença de componentes florestais nos SAFs, como as árvores perenes, proporciona a deposição contínua de material orgânico durante o ano e, conseqüentemente, pode favorecer a manutenção e/ou aumento da matéria orgânica do solo (Oelbermann et al., 2006; Smiley e Kroschel, 2008).

Os SAFs têm grande potencial de sequestro de carbono, que consiste na captação de CO<sub>2</sub> atmosférico durante a fotossíntese e transferência de carbono para as partes da planta, sendo, com isso, capazes de armazenar C no material vegetal (Nair et al., 2010; Maggiotto et al., 2014). Essa capacidade de



armazenamento de C pode variar de acordo com as espécies adotadas (Newaj e Dhyani, 2008).

Por exemplo, em estudos com plantios de cinco clones de seringueira com idades de 5 anos, Diniz (2015) observou uma variação de estoque de C na serapilheira de 1,22 a 2,17 Mg ha<sup>-1</sup> entre os clones. Já Cotta et al. (2008), em seu trabalho com cultivo em consórcio de seringueira de 34 anos, com o cacauero de 6 anos de idade, verificaram 1,67 Mg ha<sup>-1</sup> de C estocado na serapilheira.

De forma geral, as serapilheiras em SAFs são fontes de material orgânico que contribuem para melhorar a qualidade do solo e, conseqüentemente, as características físicas, químicas e biológicas. Com isso, contribui para melhoria da fertilidade do solo e aumento na acumulação da matéria orgânica, favorecendo a manutenção e produtividade dos agrossistemas (Goyal et al., 1999; Julien et al., 2018).

#### 2.2.1. SAFs de seringueira e cacau

No Brasil, a área plantada sob SAFs de cacau, é de aproximadamente 700 mil hectares, sendo a região da Bahia considerada a maior produtora dessa cultura (Gama-Rodrigues et al., 2011). Nesta região, os SAFs de cacau incluem dois tipos de plantio: o primeiro chamado de “cabruca”, onde o cacau é plantado sob floresta natural e sombreado por árvores provenientes da própria floresta, com uma área plantada de, aproximadamente, 600 ha (Fontes et al., 2014; Müller e Gama-Rodrigues, 2007). O segundo tipo de plantio se caracteriza pela derrubada total da floresta, e posterior plantio de árvores, que servirão de sombra para o cacau como, por exemplo, a seringueira, a eritrina e a gliricídia (Müller e Gama-Rodrigues, 2012). Esse sistema, em geral, apresenta uma densidade de, aproximadamente, 1.100 plantas por ha<sup>-1</sup>, sendo cerca de duas vezes maior quando comparado a “cabruca” (Müller e Gama-Rodrigues, 2007).

Os sistemas de cacau depositam grande quantidade de serapilheira no solo e, podem apresentar estoques de C similares aos encontrados em florestas nativas (Gama-Rodrigues et al., 2011), sendo as florestas consideradas como referência em estoque de C, quando comparadas a diferentes sistemas de uso da terra (Mutuo et al., 2005; Nair et al., 2009). Além disso, os SAFs de cacau contribuem para a proteção do solo e são considerados tolerantes a sombra,

podendo ser consorciados com diversas espécies como, por exemplo, a seringueira, permitindo sustentabilidade do sistema (Mülle e Gama-Rodrigues, 2012).

A seringueira tem sido uma alternativa viável para o sombreamento do cacau, substituindo a eritrina, devido a seu alto valor econômico e também fornecer sombra de boa qualidade (Marques e Monteiro, 2003). Somado a isso, a seringueira também contribui para deposição contínua de serapilheira. Segundo Marques et al. (2002), o cacau e a seringueira são espécies que se completam ecologicamente, e trazem benefícios em conjunto ao sistema, o que torna viável a utilização desses sistemas.

Monroe (2015) relatou que o aumento do C no solo nas camadas superficiais sob sistemas de cacau e seringueira é dado pela alta taxa de adição do material vegetal do cacau, onde as folhas podem contribuir para um incremento de C de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Müller e Gama-Rodrigues, 2007), com uma adição complementar da seringueira de  $1,1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , em profundidade 0-20, a partir dos quatro anos de idade (Maggiotto et al., 2014).

Schneidewind et al. (2019) trabalhando com SAFs de cacau, assim como sistemas de cacau em monocultura convencional e cacau em cultivo orgânico, observaram uma variação na quantidade de C na serapilheira em SAF de cacau de  $1,7- 2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , já no sistema de monocultura orgânico e convencional, os autores encontraram  $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $1,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente, enfatizando que essa diferença pode ser explicada pela maior densidade total de árvores e, também, pela composição química da serapilheira.

Diante do exposto e sabendo da influência da composição química da serapilheira para acumulação de C, é de grande importância o estudo visando à caracterização química da serapilheira para melhor compreensão sobre a dinâmica da matéria orgânica nesses sistemas, mostrando algo inovador devido à escassez de estudos na literatura.

## 2.2. Composição química da serapilheira

A serapilheira é considerada importante *pool* para o C no solo. Sua decomposição é mecanismo fundamental para a formação da MOS, ciclagem de nutrientes, e estes são processos importantes para o solo que influenciam na

produtividade e no ecossistema terrestre. À medida que a decomposição acontece, a serapilheira muda de tamanho, massa e composição química, pelo processo de transformação promovido pelos organismos edáficos (Diochon et al., 2016).

A decomposição da serapilheira influencia as propriedades do solo, podendo mudar a capacidade de troca de cátions e acumulação de C no solo (Sausen et al., 2014). A quantidade de carbono orgânico no solo depende, sobretudo, da composição química da serapilheira, que pode variar pela presença de lignina, polifenóis e demais compostos químicos característicos de materiais vegetais (Palm et al., 2004; Sá e Lal, 2009), em diferentes proporções, que são influenciados pelos fatores ambientais e edáficos, assim espécies vegetais apresentam variações na composição química. Cleveland et al. (2014) em estudo mostraram que a decomposição da serapilheira estava correlacionada com a espécie vegetal e também com a quantidade de C acumulado no solo.

Além disso, outros fatores podem influenciar a decomposição da serapilheira como: a proporção do material vegetal depositado no solo, o que vai refletir na quantidade de compostos orgânicos aportados, assim como a idade e a organização do sistema (homogêneo ou heterogêneo, nativo ou plantado) (Neves et al., 2001; Gama-Rodrigues e Barros, 2003; Dawoe et al., 2010; Pinto et al., 2016).

Dawoe et al. (2010), estudando sistemas de cacau de diferentes idades, observaram que o conteúdo de lignina foi semelhante entre o cacau jovem e o antigo. Além disso, esses autores observaram que as concentrações de lignina, nos sistemas de cacau foram significativamente maiores em comparação à floresta. Barreto et al. (2008), em estudo com eucalipto, observaram aumento na serapilheira acumulada devido à sua idade mais avançada, além do aumento do nível de recalcitrância dos resíduos em eucalipto antigo.

Mudanças no tipo de vegetação estão relacionadas a diferenças nos tipos de serapilheira, ou seja, a diferenças em relação à composição química do carbono associado ao material vegetal, que inclui a concentração de lignina, celulose e hemicelulose. A lignina e a celulose são os principais compostos de C dentro da parede celular das plantas, podendo apresentar características diferentes em relação à sua taxa de decomposição (Glaser, 2005).

Além da lignina, celulose e hemicelulose, existem outros componentes químicos que influenciam na compreensão do tempo de ciclagem da serapilheira aportada nos solos, como, por exemplo, açúcares, proteínas, lipídios, aminoácidos, fenóis, polissacarídeos e etc. Estes compostos diferem em seu tamanho, complexidade estrutural e o tipo de ligação química (Cotrufo et al., 2013). Materiais ricos em lignina, por exemplo, tendem a ser mais aromáticos (Rahman et al., 2013; Aoyama et al., 2016), já materiais ricos em polissacarídeos, tendem a ser alifáticos (Akhtar et al., 2018).

Sistemas agroflorestais que, normalmente, depositam uma grande quantidade de serapilheira heterogênea e têm maior acúmulo de materiais com alta complexidade estrutural, podem proporcionar um maior acúmulo de C, assim contribuindo para a preservação do sistema e comprovando que estes sistemas, através da serapilheira, influenciam na quantidade de C no solo. Devido à grande importância da composição química da serapilheira para a formação da MOS e para acumulação de C, estudos apenas com análises quantitativas se tornam limitados. Dessa forma, utilizar técnicas de análises qualitativas, como a técnica de espectroscópica de Infravermelho com transformada de Fourier e Refletância Difusa permite uma melhor compreensão da relação entre a composição química da serapilheira e C, ou seja, inferir sobre os grupos funcionais presentes no material da serapilheira e através deste identificar os compostos de C que diferem, em relação ao tempo de ciclagem e, portanto, o potencial de reserva ou fonte de C no sistema serapilheira-solo.

### 2.3. Espectroscópica de Infravermelho com transformada de Fourier por Refletância Difusa (DRIFTS, sigla em inglês)

A técnica de DRIFTS vem sendo utilizada para determinação dos grupos funcionais presentes nas estruturas das substâncias, como, por exemplo, compostos alifáticos C-H e carboxílicos C-O (Niemeyer et al., 1992; Amir et al., 2010; Calderón et al., 2013; Margenot et al., 2019), bem como sobre a natureza de suas ligações químicas e sua reatividade (Stevenson, 1994; Johnston et al., 1994; Johnston e Aochi, 1996). Auxilia na inferência sobre a complexidade química dos compostos de C, através das bandas referentes aos compostos moleculares presentes no material analisado (Davinic et al., 2012).

De forma geral, a técnica de espectroscopia de infravermelho (IV) fundamenta-se na propriedade vibratória que é inerente aos átomos de determinada molécula. A frequência de vibração condiz ao nível de energia das massas dos átomos, da forma da superfície de energia das moléculas, geometria molecular e, possivelmente, da acoplagem no eixo de vibração (Stevenson, 1994; Anbalagan et al., 2010). A resposta de cada molécula é diferente da radiação emitida e, dessa forma, ocorrem diferentes bandas de absorção no espectro infravermelho, sendo sua intensidade indicada em Transmitância (T) ou Absorbância (A) (Stevenson, 1994; Martin-Neto et al., 1996).

Quando a radiação atinge a superfície da amostra analisada, a luz pode ser refletida, absorvida ou penetrar na amostra. E, a refletância difusa só ocorrerá se os centros de espalhamento da luz refletida forem orientados aleatoriamente. Assim, a refletância difusa é detectada e retransmitida para o equipamento do infravermelho (detector), sendo possível detectar o número de onda e, através dessa informação gerada, é possível identificar os grupos funcionais e, conseqüentemente, inferir sobre os compostos químicos presentes (Lucato, 2005; Anbalagan et al., 2010).

A radiação da técnica DRIFTS refere-se, aproximadamente, à parte do espectro eletromagnético que está entre as regiões do visível e micro-ondas, sendo que a faixa mais usada está entre  $4.000\text{ cm}^{-1}$  e  $400\text{ cm}^{-1}$  (Stevenson, 1994; Lisbôa, 2018), pelo fato de ser considerada a faixa mais importante para indicar os compostos químicos, apresentando bandas de absorção ao invés de linhas, visto que, cada mudança do nível vibracional, se associa uma série de transações rotacionais (Barbosa, 2007). Geralmente, o espectro produz picos bem precisos que indicam a presença dos grupos funcionais, tornando-se uma técnica de grande importância para análises de composição química (Lucato, 2005).

DRIFTS é uma técnica normalmente usada em análises de amostras em partículas ou fragmentos em forma de pó e apresenta algumas vantagens como, por exemplo: pequena quantidade de amostra requerida para análise, facilidade no preparo, requer um período de tempo menor durante análise e, é considerada bastante rápida (Reig et al., 2002; Ferraresi et al., 2012; Nuzzo et al., 2020).

Pimentel et al. (2019), em estudo com experimento com a decomposição da serapilheira de cana-de-açúcar em laboratório utilizando técnica de DRIFTS, observaram bandas em torno de  $1447$  e  $1369\text{ cm}^{-1}$ , referentes aos grupos amidas,

ligações fenólicas de CO ou grupos funcionais alifáticos (Bornemann et al., 2010). Akwu et al. (2019), trabalhando com serapilheira (caule, folha e casca) da *G. lasiocarpa*, observaram bandas nos espectros referente às amostras de folhas em torno de 2919,64 e 2851,34  $\text{cm}^{-1}$ , no qual atribui a presença de grupos funcionais de cadeia simples de ligações C-H, associada a componentes alifáticos (Demyan et al., 2012).

Mckee et al. (2016), trabalhando com fracionamento químico úmido em conjunto com a técnica de espectroscópica de Infravermelho com transformada de Fourier em *Andropogon gerardii* observaram a presença de bandas em torno de 1735  $\text{cm}^{-1}$ , atribuindo a presença de ésteres carboxílicos de polissacarídeos ou ácidos graxos, associando a materiais lábeis, observaram também um pequeno pico em 1427  $\text{cm}^{-1}$  atribuindo a presença de ligações simples de C-H de celulose e hemicelulose.

O estoque de C pode ser influenciado pela complexidade funcional do sistema, como a interações do clima, manejo e serapilheira (Lal, 2005). Estudos demonstram que as espécies de árvores diferem em relação ao estoque e à composição de C (Ussiri e Johnson 2003; Chen et al. 2004; Russell et al. 2007; Vesterdal et al. 2008). Isto devido ao fato de que a serapilheira presente nos sistemas, pode influenciar a estabilização do C como, por exemplo, a influência dos compostos de C que entram no solo via serapilheira e estes, apresentam diferentes tempos de ciclagem.

Dick et al (2008), trabalhando com áreas de mata nativa e pastagem observaram que o teor de C na vegetação foi semelhante em relação a todos os ambientes analisados, isso devido às diferentes espécies que estavam no ambiente em estudo e à menor disponibilidade de N, estes mesmos autores observaram um aumento na aromaticidade na mata nativa, devido a uma maior proporção de lignina. Monteiro e Gama- Rodrigues (2004), avaliando a serapilheira de uma floresta nativa, observaram que os galhos apresentaram maior nível de recalcitrância quando comparados a demais estruturas devido à maior quantidade de C presente nos galhos, observou-se também uma correlação positiva entre os teores de lignina, polifenol, celulose e C orgânico nesse compartilhamento.

### 3. OBJETIVO GERAL

Objetivo geral desse estudo consistiu em caracterizar a composição química da serapilheira aportada em solos sob floresta e SAFs de seringueira e cacau de diferentes idades e plantação de seringueira pura.

#### 3.1. Objetivos específicos

- Verificar diferenças na composição química da serapilheira produzida nos SAF seringueira e cacau (jovem e antigo), plantação de seringueira de 40 anos e floresta;
- Verificar diferenças na composição química da serapilheira entre as linhas da seringueira (Ls) e linha do cacau (Lc) nos SAF jovem e antigo.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização da área

As amostras de serapilheira dos SAFs e plantação de seringueira foram coletadas na Fazenda Sucupira e da floresta na Reserva Ecológica Michelin, no município de Ituberá no Sul da Bahia (Figura 1).

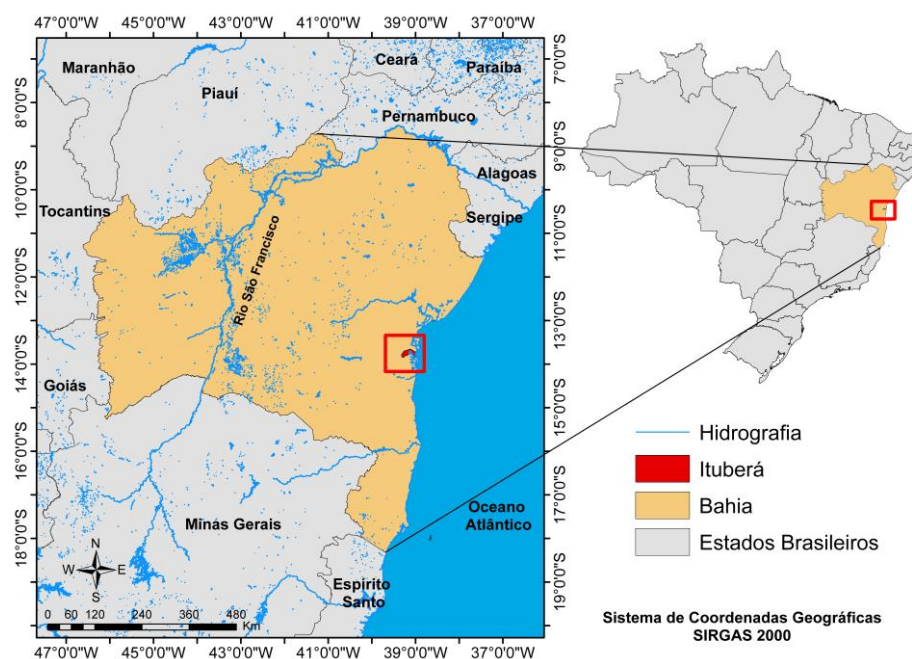


Figura 1. Localização da área.

Foram selecionadas quatro áreas de estudos:



- SAF seringueira e cacau com 9 anos de idade, espaçamento 3,5 x 2,5 m na seringueira e 2,8 x 2,8 m no cacau (SAF jovem - SAF<sub>J</sub>). Na implantação deste sistema, a vegetação foi suprimida com auxílio de trator de esteira e uso do fogo. Na sequência plantou-se seringueira e bananeira no primeiro ano e no segundo ano de plantio introduziu-se o cacau;
- SAF seringueira e cacau (seringueira de 40 anos e cacau de aproximadamente 14 anos), espaçamento 8 x 2,5 m na seringueira e 3 x 3 m no cacau (SAF antigo-SAF<sub>A</sub>). Na implantação do SAF<sub>A</sub> apenas o cacau foi plantado após a supressão manual da vegetação, sem uso de fogo;
- Seringueira pura de 40 anos de idade, espaçamento 8 x 2,5 m (S<sub>p</sub>; 40 anos). Não foi adotado nenhum manejo, formou-se um sub-bosque com aspecto denso, semelhante, a uma capoeira;
- Floresta natural contendo 58 famílias botânicas e 220 espécies arbóreas; 22 famílias botânicas e 64 espécies de plantas vasculares sem sementes; 80 famílias botânicas e 336 espécies de angiospermas (Rocha-Santos e Talora, 2012).

#### 4.1.1. Descrição da adubação

Na adubação do SAF<sub>J</sub> foi utilizado cerca de 100 g de calcário domítico e 100 gramas de superfosfato simples no primeiro ano. A calagem foi feita em toda área com 2 toneladas por hectares, sendo repetida a cada dois anos, sem incorporação. A aplicação de gesso foi realizada unicamente no ano de 2016, em proporção de 2 toneladas por hectares. No sistema de cacau jovem são realizadas adubação de 100g de 15-20-20 (ou similar) de NPK, três vezes ao ano, ou seja, a cada 4 meses, geralmente nos meses: fevereiro-março; maio-junho; novembro-dezembro. Os micronutrientes são adicionados a cada dois anos (via solo), em proporção de 20 gramas por cacauzeiro, do FTE BR12. Já para seringueira não é realizada adubação de reposição, apenas para o cacau.

No SAF<sub>A</sub> para as árvores de cacau é realizada conforme descrito para o SAF<sub>J</sub>. Na S<sub>p</sub> e SAF<sub>A</sub> nas plantações de seringueira, no período de 1973 até 1980 era realizada adubação de formação, que se referia em uma adubação anual de NPK (15-20-20), para a correção do solo, utilizando calcário dolomítico (padronizada por 2 toneladas por hectares), por cobertura, e no ano seguinte duas toneladas por hectares (no caso de excesso de acidez). Entre 1980 e 2000,

realizaram a adubação de reposição e a partir do ano de 2000, não foi mais realizado nenhum tipo de adubação.

Nos sistemas de SAF<sub>J</sub> (Lc e Ls) e SAF<sub>A</sub> (Lc) é realizada aplicação de herbicida utilizando glifosato a cada três meses (em média), geralmente é realizada a roçagem apenas quando se perde o período de aplicação do herbicida; normalmente quando ocorre o período de chuvas. A roçagem é realizada de forma manual e, na seringueira é feita apenas nas linhas, enquanto no cacau é realizada na coroa de cada árvore.

#### 4.1.2. Coleta da serapilheira

A coleta da serapilheira, considerada todo material acumulado sobre o solo (folhas, galhos, cascas etc.), em diferentes graus de decomposição, foi realizada em setembro de 2019, com auxílio de um gabarito quadrado de madeira de 0,25 m<sup>2</sup> que foi lançado aleatoriamente. No SAF jovem (SAF<sub>J</sub>) foram coletadas quatro amostras nas linhas das seringueiras (Ls) e quatro nas linhas de cacau (Lc). No SAF antigo (SAF<sub>A</sub>) foram coletadas duas amostras nas linhas das seringueiras (Ls) e duas nas linhas de cacau (Lc), devido à dificuldade de abertura de trincheiras nesse sistema. Na seringueira de 40 anos foram coletadas quatro amostras nas linhas das seringueiras (S<sub>p</sub>). E, por fim, na floresta foram coletadas aleatoriamente quatro amostras.

As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 60 °C e pesadas para determinação do estoque de serapilheira total. Em seguida, as amostras foram devidamente moídas em moinho de facas, tipo Willy, com peneira 20 mesh. Parte do material restante foi guardado para análises qualitativas de nitrogênio, polifenol, lignina e celulose. Antes da leitura no equipamento de infravermelho, as amostras foram passadas em peneiras de 150 µm.

#### 4.2 Análises química e orgânica da serapilheira

O teor de nitrogênio foi realizado pelo método Kjeldahl descrito por Bataglia et al. (1983), que tem como princípio transformar o nitrogênio da

respectiva amostra em sulfato de amônio, por meio da digestão com ácido sulfúrico e posteriormente a destilação com liberação da amônia.

O teor de polifenol foi realizado conforme Anderson e Ingram (1996): misturou-se uma alíquota de 100 mg de tecido vegetal com 40 mL de metanol 50 %, com uma temperatura mantida em torno de 77-80° C, por um período de 60 minutos. Posteriormente foi realizada a determinação dos polifenóis considerando-se os polifenóis solúveis, taninos hidrolisáveis e condensados, como também polifenóis não-tanínicos: A análise foi realizada em meio básico utilizando o reagente de Folin-Denis, para que ocorra transformação da cor, sendo que o padrão estabelecido foi o ácido tânico. A leitura foi realizada em espectrofotômetro em um comprimento de onda de 760 nm.

Para determinação dos teores de cinzas, lignina e celulose foi utilizado o método da fibra em detergente ácido (FDA), que se baseia na separação de diferentes componentes da substância, utilizando reagentes específicos chamados de detergentes. O ácido sulfúrico e o brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB) foram utilizados para eliminar compostos de amido e nitrogênio, sobrando apenas a lignina, celulose e cinzas (Van Soest e Wine, 1968). A celulose foi destruída por 72% de ácido sulfúrico e a lignina determinada pela diferença de peso, no qual foi realizada a subtração das cinzas pela queima a 550 °C em mufla conforme descrito em Anderson e Ingram (1996).

Devido à metodologia empregada, para avaliação dos teores de polifenol, N, lignina e celulose, não conter repetições para este tipo de análise (na execução das análises, as repetições de campo de cada área foram misturadas, tendo assim apenas uma amostra de cada área), não foi possível realizar teste de média, sendo apresentado, nesse trabalho, apenas a caracterização química.

#### 4.3. Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Difusa (DRIFTS)

As análises foram realizadas pela espectroscopia de DRIFT, utilizando o equipamento (Shimadzu IRAFFINITI-1 com acessório DRIFT-8000A), e brometo de potássio (KBr) como padrão. Foram utilizados 40 "scans" e resolução de 4 cm<sup>-1</sup>, no intervalo espectral de 4.000 a 400 cm<sup>-1</sup>.

As amostras (repetições de campo) de cada área, em conjunto com o KBr, foram secas a 60° em estufa de circulação forçada de ar, durante 42 horas

(Helfrich et al., 2006). Posteriormente, as amostras foram misturadas e moídas com KBr com auxílio de um cadinho, sendo, em seguida analisadas pelo equipamento de DRIFTS. Os dados referentes às bandas de absorção foram obtidos pelo programa Shimadzu IR Solution 1.6, logo após, transferidos para o Excel (Microsoft Office Excel 2010).

Devido à similaridade espectral nas repetições, foram consideradas as amostras compostas calculadas a partir das médias, das quatro repetições de campo analisadas, tendo assim uma amostra composta para cada área. Com exceção do SAF<sub>A</sub>, em que foram analisadas duas repetições de campo na linha da seringueira e duas na linha de cacau, de forma que, nesse sistema, foram realizadas as médias das amostras com duas repetições de campo.

Os espectros foram plotados utilizando o pacote de software de análise de dados OriginPro versão 8.0 (OriginLab Corp., Northampton, EUA), considerando os dados de absorbância como eixo Y e de número de ondas como eixo X. A atribuição das bandas de absorção foi realizada com base na literatura (Tabela 1). As regiões espectrais 2225-2700 cm<sup>-1</sup> foram excluídas dos espectros, porque estas bandas podem indicar ruído de CO<sub>2</sub> ou presença de água (Haberhauer et al., 2000).

Os sistemas apresentaram padrão de absorbância semelhante, assim foram escolhidas as bandas que foram mais representativas ou responsivas para a maioria dos sistemas, para serem utilizadas no cálculo de intensidade relativa (% Ar) que revela de forma direta a quantidade de absorção de cada banda, por isso, não se utiliza a intensidade relativa no DRIFTS. A % Ar foi calculada dividindo-se a absorbância das bandas (3690, 3620, 3290, 2922, 1651, 1541, 1518, 1454, 1427, 1240 e 918 cm<sup>-1</sup>) com a soma total da absorbância de todas as bandas e multiplicado por 100 (como, por exemplo, [% Ar<sub>3690</sub> = Abs<sub>3690</sub>/ΣAbs<sub>3690</sub>]\*100) (Gerzabek et al. , 2006; Jindaluang et al., 2013; Dhillon et al., 2017).

Tabela 1. Atribuição das bandas

Comprimento de onda $\text{cm}^{-1}$	Grupo funcional /composto orgânico	Referências
3700-3290	Álcoois e Fenóis	Ellerbrock et al., 1999, Barbosa, 2007; Ludwig et al., 2008; Dhillon et al., 2017; Margenot et al., 2020
2930-2855 1450-1420	Alifáticos	Haberhauer e Gerzabek, 1999; Calderón et al., 2013; Lehmann et al., 2015; Ouellette et al., 2016
1600-1500	Carbonila de amida II <sup>(1)</sup> , Compostos Aromáticos <sup>(2)</sup> e Compostos Nitrogenados <sup>(3)</sup>	Madhavan et al., 2017 <sup>(1)</sup> Demyan et al., 2012 <sup>(2)</sup> ; Sales, 2012 <sup>(2)</sup> ; Pimentel et al. <sup>(2)</sup> , 2019 <sup>(2)</sup> Pavia et al., 2015.
1238 $\text{cm}^{-1}$	C-O de ésteres e fenóis ou polissacarídeos	Calderón et al., 2013; Parikh et al., 2014; Margenot et. al., 2020).
1117-1036	Celulose	Calderón et al., 2011
916-914	Celulose <sup>(1)</sup> ou polissacarídeos <sup>(2)</sup>	Chen et al., 2010 <sup>(1)</sup> ; Ludwig et al., 2008 <sup>(2)</sup> .
< 900	Misturas de compostos orgânicos e inorgânicos	Barbosa, 2007; Calderón et al., 2011; Haberhauer et al., 2000; Sales, 2012.

<sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup> e <sup>(3)</sup> Indica banda ou grupo/composto ao autor de referência.

#### 4.4. Análises estatísticas

Através dos resultados gerais obtidos da %Ar, porcentagem de nitrogênio, polifenol, lignina e celulose foi realizada a Análise de Componentes Principais (ACP), utilizando o XLSTAT (Statistical Software for Excel, 2018), visando verificar a dissimilaridade entre os diferentes sistemas de uso da terra em estudo. A ACP é uma análise da estatística existente na técnica de análise fatorial, usada para designação da correlação entre as variáveis numerosas, e interpreta-las em conjuntos comuns chamados de fatores. O desenvolvimento da ACP visa gerar um conjunto reduzido de variáveis, de forma que não prejudique as informações e características dos dados a serem analisados, e visa atingir o propósito de

confirmação com base nos parâmetros predeterminados e observados, podendo ser comprovados por meio de possíveis hipóteses (Hair et al., 2009).

A ACP envolve a transformação de um conjunto de variáveis da mesma dimensão, ou seja, com características semelhantes, chamados de componentes principais. Cada componente principal é dado como uma combinação linear de todas as variáveis originais, sendo consideradas independentes umas das outras e estimadas com o objetivo de reter o máximo de informação na ordem de estimativa de acordo com a variação total contida nos dados (Hongyu, 2015). O número de componentes usados para explicar as mudanças nos dados pode ser igual ao número de variáveis, no entanto o eixo subsequente contribui cada vez menos para a interpretação dos dados (Gama-Rodrigues et al., 2018).

## 5.RESULTADOS

### 5.1. Caracterização química da serapilheira a partir da técnica de DRIFTS

As bandas em torno de  $3700-3400\text{ cm}^{-1}$ ,  $2930-2920$ ,  $1650$ ,  $1450-1420$  e  $1040\text{ cm}^{-1}$ , em geral, foram observadas em quase todos os sistemas (Figura 2). As bandas  $3700-3400\text{ cm}^{-1}$  (formato de sino) são atribuídas a vibrações de O-H do grupo álcool ou fenol (Ellerbrock et al., 1999; Barbosa, 2007; Ludwig et al., 2008; Dhillon et al., 2017; Margenot et al., 2020), considerados grupos funcionais recalcitrantes por conta da ligação entre OH de cadeia fechada (Lorenz et al., 2007). Já as bandas próximas a  $2930-2920\text{ cm}^{-1}$  e  $1450-1420\text{ cm}^{-1}$  referem-se à cadeia de ligações simples de estiramento de C-H, representando compostos alifáticos (Haberhauer e Gerzabek, 1999; Calderón et al., 2013; Lehmann et al., 2015; Ouellette et al., 2016)..

Bandas próximas a  $1650\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas, possivelmente, à presença de duplas ligações conjugadas (Freixo et al., 2002) do grupo carbonila de amida II com estiramento C=O (Madhavan et al., 2017) ou a grupos aromáticos com vibrações C=C e estiramentos assimétricos de COO<sup>-</sup> (Demyan et al., 2012; Sales, 2012; Pimentel et al., 2019). Já a região em torno  $1040\text{ cm}^{-1}$  atribui-se ao estiramento C-H (Pavia et al., 2015) referente a celulose (Calderón et al., 2011), considerada mais lábil quando comparada a lignina (Berg e McClaugherty, 2003; Moreira e Siqueira, 2006, Ferreira, 2017).

Algumas bandas, entretanto, foram observadas apenas em alguns sistemas, o que contribuiu para a dissimilaridade entre eles: No SAF<sub>J</sub> (Figura 2) observa-se a região em torno de 1240 cm<sup>-1</sup> apenas nas (Ls) que pode indicar, a presença de grupos funcionais referentes aos polissacarídeos (C-O de ésteres e fenóis) (Calderón et al., 2013; Parikh et al., 2014; Margenot et. al., 2020).

Ao observar visualmente os espectros do SAF<sub>A</sub> nas (Lc) e (Ls) (Figuras 2) verifica-se de forma mais expressiva as bandas em torno de 1040-1097 cm<sup>-1</sup> nas (Ls), obtendo-se uma maior intensidade de absorbância nesse intervalo (Tabela 2), que atribui a presença de celulose (Calderón et al., 2011). Já na (Lc) observa-se uma intensificação dos picos em torno de 1500-1600 cm<sup>-1</sup> (Figura 2) (Tabela 2 e 3), que pode ser atribuída a compostos nitrogenados de estiramento COO<sup>-</sup> e dobramento NH, como, por exemplo, os aminoácidos (Pavia et al., 2015).

Nos espectros referentes às linhas de cacau de SAF<sub>J</sub> e SAF<sub>A</sub> (Figura 2, Tabela 2 e 3), nota-se um formato mais definido da banda em torno de 1540 cm<sup>-1</sup> no SAF<sub>J</sub> atribuindo à presença de compostos nitrogenados (Pavia et al., 2015). Em relação as (Lc) e (Ls), é importante notar, que nas (Lc), a banda próxima a 1040 cm<sup>-1</sup>, está presente apenas no SAF<sub>J</sub>, podendo sugerir possivelmente, que este sistema possui uma composição com estruturas mais alifáticas, em relação ao SAF<sub>A</sub>. Já nas (Ls), observa-se que a banda 2850 cm<sup>-1</sup> aparece apenas no SAF<sub>A</sub> (Figura 2), referindo-se a compostos alifáticos (Calderón et al., 2011).

Comparando os espectros de SAFs (jovem e antigo) e S<sub>p</sub> (Figura 2), observa-se que em quase todos os sistemas apresentaram as bandas em torno de 1040 cm<sup>-1</sup> (Tabela 2), referente a compostos alifáticos, com exceção do SAF<sub>J</sub> (Ls). Além disso, observa-se que a banda em torno de 2850 cm<sup>-1</sup> está presente apenas no SAF<sub>A</sub> (Ls).

Os espectros da floresta natural (Figura 2) mostraram-se dissimilares aos demais sistemas em função de uma maior intensidade das regiões em torno de 1051-1040 cm<sup>-1</sup> e 918 cm<sup>-1</sup> (ligação C-H simples ou deformação O-H) referentes a estruturas alifáticas (Tabela 2). Em todos os sistemas, as bandas abaixo de 900 cm<sup>-1</sup>, estão associadas à mistura de compostos orgânicos, inorgânicos e impurezas inorgânicas (Barbosa, 2007; Calderón et al., 2011; Haberhauer et al., 2000; Sales, 2012).



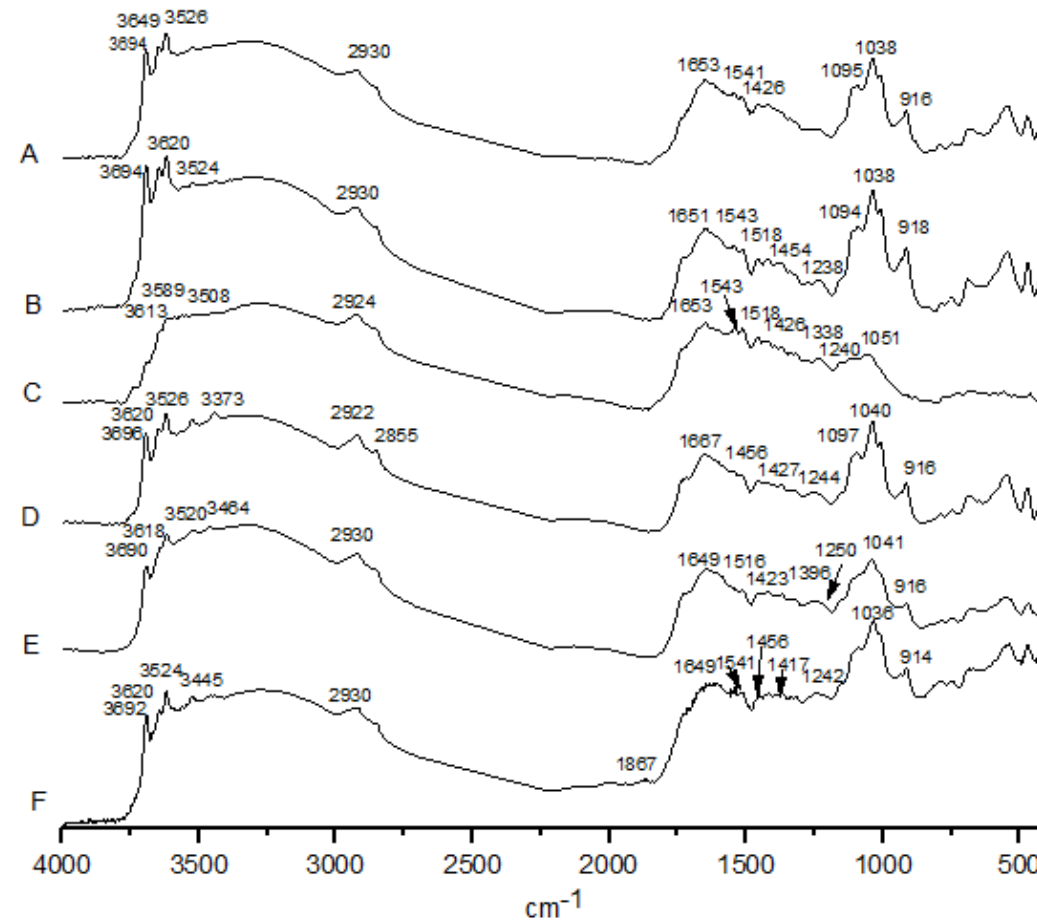


Figura 2. Espectros na serapilheira de todos os sistemas. (A) SAF<sub>J</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de cacau; (B) SAF<sub>J</sub> (Ls)- Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de seringueira; (C) SAF<sub>A</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de cacau; (D) SAF<sub>A</sub> (Ls) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de seringueira; (E) Seringueira S<sub>p</sub> - Pura- S<sub>p</sub>; (F) Floresta natural.

Tabela 2. Intensidade Relativa média (%) das principais bandas dos sistemas em estudo

	IR 3690	IR 3620	IR 3290	IR 2922	IR 1651	IR 1541	IR 1518 (%)	IR 1454	IR 1427	IR 1240	IR 1051	IR 1040	IR 918
Sistemas													
SAF <sub>J</sub> (Lc)	3,86	4,01	3,95	3,75	3,69	3,60	3,58	3,53	3,52	3,36	3,77	3,83	3,48
SAF <sub>J</sub> (Ls)	4,00	4,09	3,96	3,76	3,62	3,50	3,48	3,42	3,42	3,28	3,78	3,87	3,49
SAF <sub>A</sub> (Lc)	3,58	3,89	4,00	3,92	3,85	3,82	3,82	3,76	3,73	3,61	3,63	3,62	3,36
SAF <sub>A</sub> (Ls)	3,79	3,98	3,96	3,82	3,69	3,57	3,56	3,51	3,51	3,43	3,84	3,92	3,50
S <sub>p</sub>	3,74	3,95	4,02	3,83	3,72	3,58	3,58	3,56	3,57	3,51	3,77	3,79	3,49
Floresta	3,08	3,57	3,59	3,24	3,70	3,67	3,54	3,52	3,49	3,52	4,73	4,92	4,00

IR- Intensidade relativa em porcentagem. SAF<sub>J</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de cacau; SAF<sub>J</sub> (Ls)- Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de seringueira; SAF<sub>A</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de cacau; SAF<sub>A</sub> (Ls) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de seringueira; S<sub>p</sub> - Seringueira Pura- S<sub>p</sub>; Floresta natural.

Tabela 3. Caracterização química dos teores de nitrogênio, polifenol, lignina e celulose em porcentagem

Sistemas	% Nitrogênio	% Polifenol	% Lignina	% Celulose
SAF <sub>J</sub> (Lc)	1,35	0,08	31,10	10,72
SAF <sub>J</sub> (Ls)	1,18	0,17	25,74	10,08
SAF <sub>A</sub> (Lc)	2,58	0,28	42,76	25,74
SAF <sub>A</sub> (Ls)	1,51	0,42	35,42	26,48
S <sub>p</sub>	1,06	0,16	21,56	14,80
Floresta	1,25	0,17	24,60	14,38

SAF<sub>J</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de cacau; SAF<sub>J</sub> (Ls)- Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de seringueira; SAF<sub>A</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de cacau; SAF<sub>A</sub> (Ls) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de seringueira; Seringueira S<sub>p</sub> - Pura- S<sub>p</sub>; Floresta natural.

## 5.2. Análise de Componentes Principais (ACP) da serapilheira

A Análise de Componentes Principais (ACP), a partir da intensidade relativa (% Ar) das principais bandas observadas (3690, 3620, 3290, 2922, 1651, 1541, 1518, 1454, 1427, 1240 e 918  $\text{cm}^{-1}$ ) e dos teores de nitrogênio, polifenol, lignina e celulose, explicou aproximadamente 83% da variação total entre os sistemas estudados, sendo 43 % para o componente principal 1 (CP1) (Figura 3) e permitiu a formação de três grupos distintos (Figura 3).

As bandas em torno de 1651, 1541, 1518, 1454, 1427, 1240, e os teores de N total e lignina estão associados ao CP1. E, aquelas mais associadas ao CP2 foram as bandas 3690, 3620, 3290, 2922, 1051, 1040 e 918  $\text{cm}^{-1}$ . Os teores de polifenol e celulose foram mais relacionados ao CP3, apresentando pequena contribuição para explicar a dissimilaridade entre os sistemas de uso da terra e, portanto, não foram considerados no presente trabalho (Tabela 4).

A partir das variáveis analisadas, a ACP distribuiu os sistemas no diagrama da ordenação da seguinte forma:  $S_p$ , SAF<sub>J</sub> (Lc), SAF<sub>A</sub> e SAF<sub>J</sub> (Ls) no quadrante superior à esquerda próximo ao CP1, SAF<sub>A</sub> (Lc) no quadrante superior à direita próximo ao CP1 e a floresta no quadrante inferior à esquerda do diagrama, próxima ao CP2 (Figura 3).

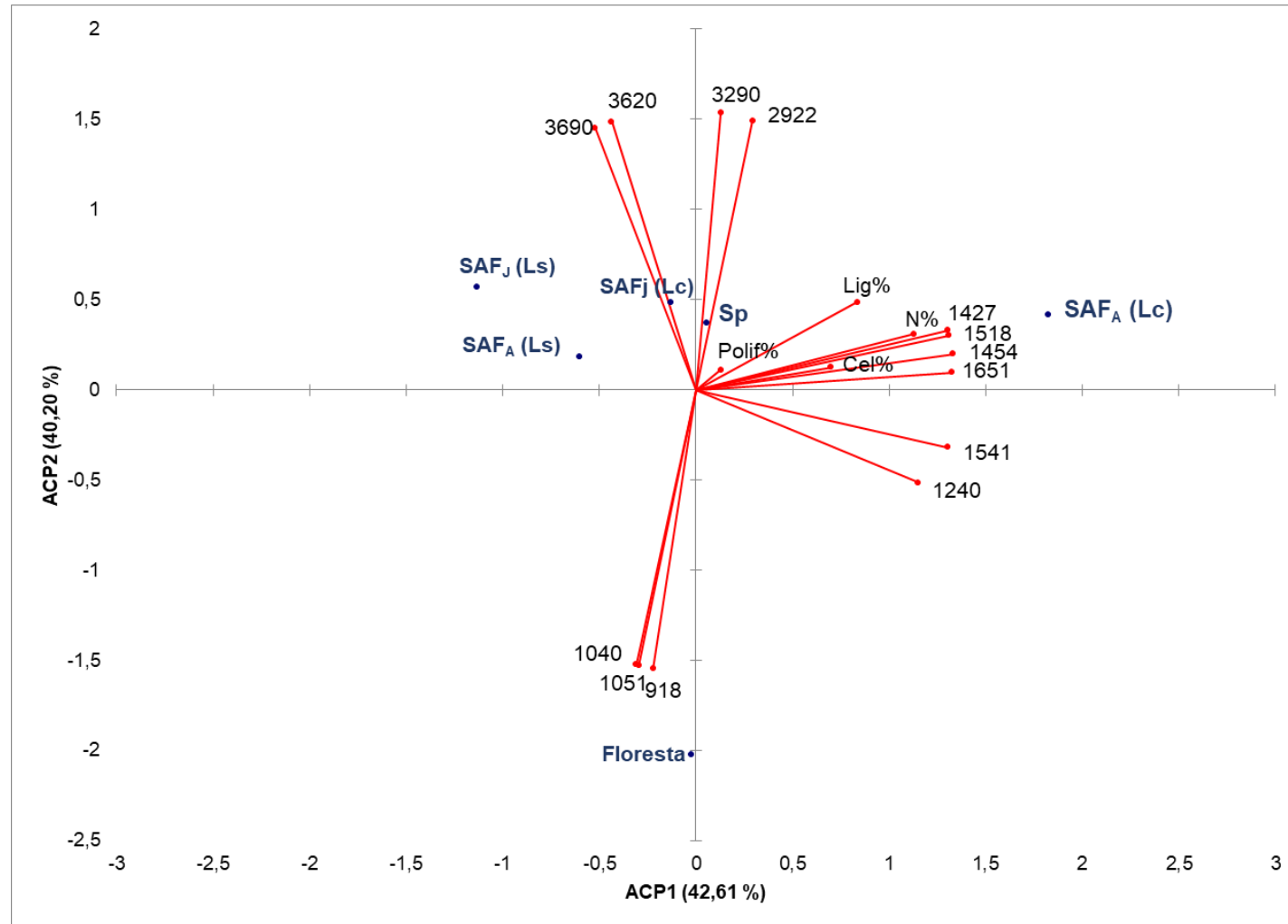


Figura 3. Análise de Componentes Principais na serapilheira. SAF<sub>J</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de cacau; SAF<sub>J</sub> (Ls)- Sistema Agroflorestal Jovem de linhas de seringueira; SAF<sub>A</sub> (Lc) - Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de cacau; SAF<sub>A</sub> (Ls)- Sistema Agroflorestal Antigo de linhas de seringueira; Seringueira Pura- S<sub>p</sub>; Floresta natural. Lig %: Porcentagem de lignina; N %: Porcentagem de Nitrogênio; Cel %: Porcentagem de celulose; Polif %: Porcentagem de polifenol.

Tabela 4. Cargas relativas das variáveis associadas aos componentes principais das análises de DRIFTS e análises químicas da serapilheira sob diferentes sistemas de uso da terra.

	CP1	CP2
3690	-0,3849	<b>0,9207</b>
3620	-0,3231	<b>0,9442</b>
3290	0,0967	<b>0,9753</b>
2922	0,2175	<b>0,9482</b>
1651	<b>0,9819</b>	0,0616
1541	<b>0,9632</b>	-0,2029
1518	<b>0,9630</b>	0,2086
1454	<b>0,9857</b>	0,1262
1427	<b>0,9676</b>	0,1908
1240	<b>0,8506</b>	-0,3272
1051	-0,1636	<b>-0,9844</b>
1040	-0,2183	<b>-0,9731</b>
918	-0,2286	<b>-0,9665</b>
Nitrogênio %	<b>0,8359</b>	0,1968
Polifenol %	0,0957	0,0705
Lignina %	<b>0,6173</b>	0,3091
Celulose %	0,5181	0,0787

CP1 componente principal 1; CP2 componente principal 2.

## 6.DISSCUSSÃO

### 6.1. Caracterização química da serapilheira a partir da técnica de DRIFTS

Na caracterização química da serapilheira é possível observar similaridade entre os espectros presentes em todos os sistemas, apesar de ligeiras variações nos valores das bandas (Figuras 2 e Tabela 2), que possivelmente está associada à acessibilidade da serapilheira à microbiota. A capacidade de seleção da microbiota está diretamente associada à palatabilidade do material, e das condições propícias para sua acessibilidade, com isso, mostra-se que para certos compostos de C presentes na serapilheira, houve tempo suficiente de transformação, obtendo semelhança entre os sistemas estudados. A região  $3700\text{-}3920\text{ cm}^{-1}$ , pode indicar a presença de grupos funcionais recalcitrantes (Lorenz et al., 2007), como os compostos fenólicos (Dhillon et al., 2017), podendo possivelmente ser preservados no solo (Vos et al, 2011).

Bandas em torno de  $2920\text{ cm}^{-1}$  e  $1450\text{-}1420\text{ cm}^{-1}$  representam, compostos alifáticos associados. Estudam relatam que a presença de compostos alifáticos é, possivelmente, proveniente de moléculas de cutina presentes nos tecidos das folhas (Prescott, 2010; Pisani et al., 2014), caracterizando um material mais lábil, sendo decomposto de forma mais fácil pela fauna do solo (Demyan et al., 2012).

A região próxima a  $1650\text{ cm}^{-1}$ , atribuí a presença de compostos aromáticos que, presumivelmente, caracteriza um material de alta resistência, difícil de ser decomposto pelos organismos, tendo maior permanência no solo (Moreira e

Siqueira 2006). E, a região em torno de  $1040\text{ cm}^{-1}$ , associa à presença de celulose (Calderón et al., 2011) que provavelmente, caracteriza material mais lábil que a lignina, apresentando rápida taxa de decomposição (Berg e McClaugherty, 2003; Moreira e Siqueira, 2006, Ferreira, 2017).

No entanto, diferenças são observadas entre os sistemas: No espectro  $\text{SAF}_J$  (Figura 2) a principal diferença observada entre as (Lc) e (Ls) é em relação à região em torno de  $1240\text{ cm}^{-1}$  presente apenas nas (Ls) que pode indicar presença de polissacarídeos (Calderón et al., 2013; Parikh et al., 2014; Margenot et. al., 2020). Os polissacáridos são importantes fontes de C para os microrganismos, além de serem considerados importantes durante a formação dos agregados no solo (Six et al., 2000) e possivelmente, produz material mais decomponível (Jindaluang et al., 2013). Assim, a forma mais expressiva de bandas associadas ao polissacarídeo nas (Ls), permite inferir que esse sistema produz um material mais acessível pela microbiota.

Nos espectros de  $\text{SAF}_A$ , na (Ls), a região referente à celulose ( $1097\text{-}1040\text{ cm}^{-1}$ ) apresentou-se de forma mais expressiva, que geralmente, caracteriza um material mais propenso à decomposição. Já na (Lc), existe uma intensificação da região  $1500\text{-}1600\text{ cm}^{-1}$  (Figura 2) (Tabela 2) associada a compostos aromáticos, que normalmente são considerados menos propensos à decomposição. E, ou, associadas a compostos nitrogenados (Pavia et al., 2015), que pode ser explicada devido à maior concentração de N na (Lc) (Tabela 3). Segundo Hartemink (2005) e Utomo (2016), árvores de cacau tendem a ter um maior acúmulo de N no material vegetal, quando comparadas a árvores de sombra, sendo influenciadas principalmente pela idade de plantio, diferença no cultivo e condições ambientais.

Quanto às diferenças entre  $\text{SAF}_J$  e  $\text{SAF}_A$  na (Lc) é notório a ausência das bandas  $1040\text{ cm}^{-1}$  no  $\text{SAF}_A$  (Figura 2), que conferem uma composição com estruturas menos alifáticas, em relação ao  $\text{SAF}_J$ , sugerindo possivelmente que a serapilheira dos  $\text{SAF}_A$ , pode apresentar um material mais resistente, podendo permanecer por um período mais prolongado no solo, quando comparada aos  $\text{SAF}_J$ . No entanto, nas (Ls), as estruturas alifáticas se mostram mais expressivas no  $\text{SAF}_A$ , devido à região  $2850\text{ cm}^{-1}$ . Angst et al. (2017), em estudo, mostraram que componentes alifáticos são menos estáveis quando comparados a compostos aromáticos, supondo que o  $\text{SAF}_A$  (Ls), pode apresentar um material mais propenso a decomposição em relação ao  $\text{SAF}_J$  (Ls).



Nota-se uma semelhança entre os espectros dos SAF<sub>J</sub> (Ls e Lc), SAF<sub>A</sub> (Ls) e S<sub>p</sub> (Figura 2), principalmente por apresentar uma maior intensidade da banda em torno de 1040 cm<sup>-1</sup>. Pode sugerir que esta similaridade entre os espectros desses sistemas seja em decorrência do tempo de transformação da serapilheira que foi suficiente ao ponto de apresentar semelhança entre a serapilheira.

Os espectros da floresta (Figura 2) mostram-se dissimilares aos demais sistemas, que talvez, estejam associados a diversidade de espécies e conseqüentemente heterogeneidade da serapilheira. Além do fato de que a floresta natural pode gerar um microclima próprio que, conseqüentemente, influencia o processo de decomposição. Relacionando-se a isso, a floresta por ser um sistema mais diversificado, conseqüentemente, possui uma fauna mais diversa (Ozanne et al., 2003; Villa et al., 2016; Grugiki et al., 2017) influenciando no tempo de ciclagem da serapilheira.

A técnica de infravermelho, permitiu avaliar a composição química da serapilheira aportada sob os sistemas em estudo, através da presença das bandas e identificação das mesmas. Foi possível verificar presença de materiais recalcitrantes ou lábeis associados a cada sistema: os SAF<sub>A</sub> e SAF<sub>J</sub> (Lc) apresentaram bandas mais expressivas associadas a compostos recalcitrantes em relação as (Ls). Geralmente a serapilheira presente nos sistemas de cacau é mais persistente, já a serapilheira da seringueira pode possuir material associado a compostos alifáticos, podendo ser perdido de forma mais rápida (Jindaluang et al., 2013; Vicente et al., 2019). O sistema S<sub>p</sub> também apresentou material mais lábil, principalmente quando relacionado ao SAF<sub>A</sub> (Lc). A floresta mesmo apresentando componentes recalcitrantes, mostrou de forma mais expressiva acúmulo de material lábil, devido à maior participação de picos referentes a este material.

A permanência desses materiais (compostos aromáticos, alifáticos, fenólicos, lignina, polissacarídeos e etc.) não está associada apenas às características intrínsecas dos mesmos, mas também à complexidade funcional do sistema, ou seja, as características edáficas, como o sistema se comporta como um todo (Powers, et al., 2009; Lehmann e Kleber, 2015; Lehmann et al., 2020) em relação a quantidade de nutrientes e C presente nesses materiais, tipo de enzimas associadas aos organismos, palatabilidade e diversidade da fauna, umidade, oxigênio, molécula entre outros fatores. Assim, a estabilidade e

preservação dos compostos de C, e a formação de uma matéria orgânica estável proveniente desses materiais, dependerá da interação entre estes atributos no ambiente solo.

Os SAFs de cacau e seringueira, seringueira pura e floresta, podem influenciar na quantidade de serapilheira, como na sua heterogeneidade de compostos orgânicos associados (Lorenz e Lal, 2014). Com os resultados obtidos da análise da caracterização química da serapilheira sob SAFs de cacau e seringueira, seringueira pura e floresta natural, foi possível identificar os grupos funcionais, que exercem influência na diversidade de compostos de C assim tendo uma melhor compreensão sobre a dinâmica de funcionamento dos sistemas.

## 6.2. Análise de Componentes Principais (ACP) da serapilheira

Os resultados confirmam as dissimilaridades espectrais que ocorreram na análise de DRIFTS. O SAF<sub>A</sub> (Lc), mostrou-se dissimilar aos demais sistemas pelas variáveis % N, lignina e maior intensidade relativa das bandas atribuída a compostos nitrogenados (1651,1518,1454, 1427 cm<sup>-1</sup>) (Tabelas 2, 3 e 4) (Figura 3). Este resultado sugere que a serapilheira deste sistema produziu uma serapilheira mais lignificada, ou seja, mais resistente à decomposição. Sistemas de cacau mais antigo, podem promover um alto conteúdo de serapilheira, devido a elevados níveis de lignina nas folhas (Dawoe et al., 2010), podendo favorecer a proteção de N da mineralização devido às ligações químicas e/ou isolamento físico (Boerjan et al., 2003; Talbot et al., 2012, Xu et al., 2017).

A similaridade entre os SAF<sub>J</sub> (Lc e Ls), SAF<sub>A</sub> (Ls) e S<sub>p</sub>, pode ser explicada pela presença de compostos fenólicos (3690,3620, 3290 cm<sup>-1</sup>) e alifáticos (2922 cm<sup>-1</sup>) (Figura 3) (Tabela 2 e 4). A presença da seringueira explicaria, em parte, a semelhança na composição química da serapilheira desses sistemas. O tempo de implantação do SAF<sub>J</sub>, provavelmente, não foi suficiente para o cacau atuar na formação deste material como observado no caso do SAF<sub>A</sub>. Até porque, a vegetação anterior à implantação deste SAF também foi seringueira.

A floresta, mostrou-se dissimilar em relação aos demais sistemas, em decorrência da diversidade de árvores que proporcionou uma diversidade de material vegetal aportado ao solo (Martius et al., 2004; Bini et al., 2013). Essa grande diversidade pode exercer efeito também sobre a quantidade da

serapilheira, e conseqüentemente, reflete na heterogeneidade dos compostos, sendo os mais responsivos os compostos referentes às bandas de absorção na faixa dos polissacarídeos (1051, 1040 e 918  $\text{cm}^{-1}$ ) (Tabela 2 e 4) (Figura 3), sugerindo supostamente, que esse sistema, tem material mais lábil. Fatores como, por exemplo, anaerobiose, temperatura, umidade, nutrientes e disponibilidade de C, ou até mesmo a diversidade dos organismos (Jindaluang et al., 2013, Lehmann et al., 2020), talvez tenham contribuído para retardar a decomposição, assim favorecendo a manutenção de compostos mais lábeis no sistema florestal.

Através da % Ar em conjunto com caracterização química da serapilheira, principalmente pela maior contribuição de N e lignina, foi possível verificar as similaridades e dissimilaridades dos sistemas em estudos e, portanto, uma melhor percepção sobre a composição química da serapilheira sob solos de SAFs de seringueira e cacau, seringueira pura e floresta natural.

## 7.RESUMO E CONCLUSÕES

A utilização da técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier por Refletância Difusa permitiu verificar a presença dos grupos funcionais e, através destes compreender sobre os compostos de C presente na serapilheira, sendo possível inferir sobre os tempos de permanência no solo. A conversão de florestas em SAFs ou plantações puras de seringueira afetou a composição química da serapilheira. As linhas de seringueira (SAF<sub>A</sub> e SAF<sub>J</sub>), assim como S<sub>p</sub>, demonstram a presença de compostos mais lábeis associados à serapilheira, enquanto as linhas de cacau (SAF<sub>A</sub> e SAF<sub>J</sub>) apresentam compostos mais recalcitrantes.

Diferenças entre os SAFs, jovem e antigo, também foram observadas. Os sistemas de SAF<sub>A</sub> (Lc) apresentam maior nível de compostos recalcitrantes em relação ao SAF<sub>J</sub> (Lc), enquanto que nos SAF<sub>A</sub> (Ls) apresentam maior nível de compostos lábeis em relação ao SAF<sub>J</sub> (Ls).

Desse modo, os resultados sugerem que a idade, assim como o material vegetal, pode influenciar nos grupos funcionais de C presente nos sistemas, sendo que a estabilidade destes, assim como sua preservação, podem ser influenciados por fatores ambientais e abióticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhtar, J., Galloway, A.F., Nikolopoulos, G., Field, K.J., Knox, P. (2018). A quantitative method for the high throughput screening for the soil adhesion properties of plant and microbial polysaccharides and exudates. *Plant and soil*. 428: 57-65.
- Akwu, N.A., Naidoo, Y., Singh, M. (2019). A comparative study of the proximate, FTIR analysis and mineral elements of the leaves and stem bark of *Grewia lasiocarpa* E. Mey. ex Harv.: An indigenous southern African plant. *South African journal of botany*. 123: 9-19.
- Almeida, R.F, Mikhael, Rodrigues, J.E.R, Franco, F.O, Santana, L.M.F, Wendling, B. (2019). Measuring the Labile and Recalcitrant Pools of Carbon and Nitrogen in Forested and Agricultural Soils: A Study under Tropical Conditions. *Forests*. 10(7): 544.
- Anderson, J.D., Ingram, J.S.I. (1996) Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. 2.ed. Wallingford, CAB International. 171p.
- Angst, Š., Mueller, C. W., Cajthaml, T., Angst, G., Lhotáková, Z., Bartuška, M., Špaldoň, A., Frouz, J. (2017). Stabilization of soil organic matter by earthworms is connected with physical protection rather than with chemical changes of organic matter. *Geoderma*. 289: 29-35.
- Amir, S., Jouraiphy, A., Meddich, A., El Gharousb, M., Wintertonc, P., Hafidi, M. (2010) Structural study of humic acids during composting of activated sludge green waste: Elemental analysis, FTIR and <sup>13</sup>C NMR. *Journal of Hazardous Materials*. 177: 524-529.
- Anbalagan, G., Sivakumar, G., Prabakaran, A.R., Gunasekaran, S. (2010) Spectroscopic characterization of natural chrysothole. *Vibrational Spectroscopy*. 52:122–127.

- Aoyama, M. (2016). DRIFT spectroscopy combined with sodium hypochlorite oxidation reveals different organic matter characteristics in density-size fractions of organically managed soils. *Canadian journal of soil science*. 96 (3): 317-327.
- Artaxo, P. (2020). As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*. 34(100): 53-66.
- Assis-Júnior, S.L., Zanuncio, J.C.; Kasuya, M.C.M.; Couto, L.; Melido, R.C.N. (2003). Atividade microbiana do solo em sistemas agroflorestais, monoculturas, mata natural e área desmatada. *Revista Árvore*. 27:35-41.
- Bataglia, O.C.; Furlani, A.M.C.; Teixeira, J.P.F.; Furlani, P.R., GALLO, J.R. (1983). Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agrônomo. 48p. (Boletim Técnico, 78).
- Barbosa, L.C.A. (2007). *Espectroscopia no Infravermelho na caracterização de compostos orgânicos*. Viçosa: UFV, 189p.
- Barreto, A.C., Freire, M.B.G. D.S., Nacif, P. G. S., Araújo, Q. R., Freire, F. J., Inácio, E. D. S. B. (2008). Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32(4):1471-1478.
- Berg, B. (2000). Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest ecology and Management*. 133(1-2): 13-22.
- Berg, B., McClaugherty, C. (2003). Decomposition and ecosystem function. In: *Plant Litter*. Springer, Berlin, Heidelberg. 203-237p.
- Bini, D., Figueiredo, A.F., Silva, M.C P.D., Vasconcellos, R.L.D.F., Cardoso, E. J.B.N. (2013). Microbial biomass and activity in litter during the initial development of pure and mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 37(1): 76-85.
- Boerjan, W., Ralph, J., Baucher, M., (2003). Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*. 54: 519-546.
- Bornemann, L., Welp, G., Amelung, W. (2010). Particulate organic matter at the field scale: Rapid acquisition using mid-infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*. 74(4): 1147-1156.
- Calderón, F., Haddix, M., Conant, R.; Magrini-Bair, K., Paul, E. (2013). Diffuse-reflectance Fourier-transform mid-infrared spectroscopy as a method of characterizing changes in soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*. 77: 1591-1600.
- Calderón, F.J., Reeves, J.B., Collins, H.P., Paul, E.A. (2011). Chemical differences in soil organic matter fractions determined by diffuse-reflectance

- mid-infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*. 75: 568-579.
- Carvalho, A.M., Dantas, R.A., Coelho, M.C., Lima, W.M., Souza, J.P.S.P., Fonseca, O.P., Guimarães Júnior, R. (2010). *Teores de hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no Cerrado. Planaltina*. DF: Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento.15p.
- Chen, H., Ferrari, C., Angiuli, M., Yao, J., Raspi, C., Bramanti, E. (2010). Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydrate polymers*. 82: 772-778.
- Chen, C.R., Xu, Z.H., Mathers, N.J. (2004). Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Science Society of America Journal*.68(1): 282-291.
- Cleveland, C.C., Reed, S.C., Keller, A.B., Nemergut, D.R., O'Neill, S. P., Ostertag, R., Vitousek, P.M. (2014). Litter quality versus soil microbial community controls over decomposition: a quantitative analysis. *Oecologia*. 174(1): 283-294.
- Concha J. Y., Alegre J. C., Pocomucha V. (2007). Determinación de las reservas de carbono en la biomasa aérea de sistemas agroforestales de *Theobroma cacao L.* En el Departamento de San Martín, Perú. *Ecología Aplicada*. 6 (12): 75-82.
- Copertino, M., Piedade, M.T.F., Vieira, I.C.G., Bustamante, M. (2019). Desmatamento, fogo e clima estão intimamente conectados na Amazônia. *Ciência e Cultura*. 71(4): 04-05.
- Cotrufo, M.F., Wallenstein, M. D.; Boot, C.M.; Deneff, K.; Paul, E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter?. *Global Change Biology*. 19: 988-995.
- Cotta, M.K., Gonçalves Jacovine, L.A., Paiva, H.N, Boechat, S.C.P., Virgens Filho, C., Valverde, S.R. (2008). Biomass quantification and emission reduction certificates for rubber-cocoa intercropping. *Revista Árvore*. 32: 969-978.
- Davinic, M., L.M. Fultz, V. Acosta-Martinez, F.J. Calderón, S.B. Cox, S.E. Dowd, E.S., Allen, V.G., Zack, J.C., Kucera, M.G. (2012). Pyrosequencing and mid infrared spectroscopy reveal distinct aggregate stratification of soil bacterial communities and organic matter composition. *Soil Biol. Biochemistry*, 46: 63–72.
- Dawoe, E.K., Isaac, M.E., Quashie-Sam, J. (2010). Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant and Soil*. 330(1-2): 55-64.

- Demyan, M.S., Rasche, F., Schulz, E., Breulmann, M., Müller, T., Cadisch, G. (2012). Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem. *European Journal of Soil Science*. 63: 189-199.
- Dhillon, G.S., Gillespie, A., Peak, D., Van Rees, K.C. (2017). Spectroscopic investigation of soil organic matter composition for shelterbelt agroforestry systems. *Geoderma*. 298: 1-13.
- Dick, D.P., Martinazzo, R., Dalmolin, R.S.D., Jacques, A.V.A., Mielniczuk, J., Rosa, A.S. (2008) Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 43: 633-640.
- Diniz, A.R. (2015). *Estoque de carbono e atributos edáficos em áreas de plantios de seringueira (Hevea Brasiliensis M. Arg.), mata e pastagem no Estado do Rio de Janeiro*. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro – UFRRJ. 112p.
- Diochon, A., Gillespie, A.W., Ellert, B.H., Janzen, H.H., Gregorich, E.G. (2016). Recovery and dynamics of decomposing plant residue in soil: an evaluation of three fractionation methods. *European Journal of Soil Science*. 67(2):196-205.
- Dixon, R.A., Xie, D.Y., Sharma, S.B. (2005). Proanthocyanidins—a final frontier in flavonoid research? *New phytologist*. 165: 9-28.
- Ellerbrock, R.H., Höhn, A., Gerke, H.H. (1999). Characterization of soil organic matter from a sandy soil in relation to management practice using FT-IR spectroscopy. *Plant and Soil*. 213: 55-61.
- Ferraresi, T.M., da Silva, W.T L., Martin, N., da Silveira, P.M., Madari, B.E. (2012). Infrared spectroscopy in determination of soil texture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 36(6): 1769 1777.
- Ferreira, T.E. (2017). *Decomposição da palha de cana-de-açúcar em área de recolhimento variável sob adubação nitrogenada mineral ou inoculação com bactérias diazotróficas*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Botucatu-SP, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho – UNESP, 90p.
- Fontes, A.G., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales; M.V.S., Costa, M.G., Machado, R.C.R., (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant Soil*. 383:313–335.
- Freixo, A.A., Canellas, L.P., Machado, P.D.A. (2002). Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve intra-agregado de dois Latossolos sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 26: 445-453.



- Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Nair, P.K.R. (2011). Soil carbon sequestration in cacao agroforestry systems: a case study from Bahia, Brazil. In: Kumar, B.M., Nair, P.K.R. (Eds.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems. Advances in Agroforestry 8*. Springer, New York, 85–99p.
- Gama-Rodrigues, E F., Araújo, S.P., Faustino, L.L., Moreira, R.V.S., Paulucio, V.O, Gama-Rodrigues, A.C. (2018). Atributos físicos, químicos e microbiológicos dos solos sob diferentes usos em topossequências no Noroeste Fluminense. *Brazilian Journal of Agricultural Sciences/Revista Brasileira de Ciências Agrárias*.13(3).
- Gerzabek, M.H., Antil, R.S., Kögel-Knabner, I., Knicker, H., Kirchmann, H., Haberhauer, G. (2006). How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. *European Journal of Soil Science*. 57(4): 485-494.
- Glaser, B. (2005). Compound-specific stable-isotope ( $\delta^{13}\text{C}$ ) analysis in soil science. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.168(5): 633-648.
- Goyal, S., Chander, K., Mundra, M.C., Kapoor, K.K. (1999). Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*. 29(2): 196-200.
- Grugiki, M.A., Andrade, F.V., Passos, R.R., Ferreira, A. C. F. (2017). Decomposição e atividade microbiana da serapilheira em coberturas florestais no sul do Espírito Santo. *Floresta e Ambiente*. 24.
- Haberhauer, G., Feigl, B., Gerzabek, M.H., Cerri, C. (2000). FT-IR Spectroscopy of Organic Matter in Tropical Soils: Changes Induced through Deforestation. *Applied Spectroscopy*. 54: 221–224.
- Haberhauer, G., Gerzabek, M.H. (1999). Drift and transmission FT-IR spectroscopy of forest soils: an approach to determine decomposition processes of forest litter. *Vibrational Spectroscopy*. 19:413-417.
- Hair, Jr.J.F., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. (2009) *Análise Multivariada de Dados*, Bookman, 6ª ed., Porto Alegre – RS, Brasil, p.688.
- Hartemink, A. E. (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: a review. *Advances in agronomy*. 86: 227-253.
- Hättenschwiler, S., Jørgensen, H.B. (2010). Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*. 98(4): 754-763.
- Helfrich, M., Ludwig, B., Buurman, P., Flessa, H., (2006). Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. *Geoderma* 136: 331–341.

- Holanda, A. C. D., Feliciano, A.L.P., Freire, F.J., Sousa, F.Q.D., Freire, S.R.D.O., Alves, A. R. (2017). Aporte de serapilheira e nutrientes em uma área de caatinga. *Ciência Florestal*. 27(2): 621-633.
- Hongyu, K. (2015). *Comparação do GGE biplot ponderado e AMMI-ponderado com outros modelos de interação genótipo x ambiente*. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agronômica). Piracicaba – SP. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 155p.
- Jindaluang, W., Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., Singh, B.P., Singh, B. (2013) Influence of soil texture and mineralogy on organic matter content and composition in physically separated fractions soils of Thailand. *Geoderma*. 195–196: 207–219.
- Johnston, C.T., Aochi, Y.O. Fourier transform infrared and raman spectroscopy. In: Sparks, D.L. (1996). *Methods of soil analysis. Chemical methods*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy. 269-321p.
- Johnston, C.T., Davis, W.M., Erickson, C., Delfino, J.J. Characterization of humic substances using Fourier transform infrared spectroscopy. In: Senesi, N.; Miano, T.M. (1994). eds., *Humic substances in the global environment and implications on human health*. New York: Elsevier Scientific Publ. Co., 145-152p.
- Julien, K.N., Guéi, A.M., Edoukou, E.F., Yéo, J.G., N’Guessan, K.K., Lagerlöf, J. (2018). Can litter production and litter decomposition improve soil properties in the rubber plantations of different ages in Côte d’Ivoire?. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 111(2-3): 203-215.
- Knicker, H., Schmidt, M.W., Kögel-Knabner, I. (2000). Nature of organic nitrogen in fine particle size separates of sandy soils of highly industrialized areas as revealed by NMR spectroscopy. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 241-252.
- Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*. 220(1-3): 242-258.
- Lehmann, J., Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 52: 60-68.
- Lehmann, J., Hansel, C. M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J.P., Torn, M.S., Wieder, W.R., Kögel-Knabner, I. (2020). Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*. 13(8): 529-534.
- Lisbôa, F.M. (2018). *Qualidade do carbono na região do infravermelho em solos sob floresta, pastagem e sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia*. Tese (Produção Vegetal). Campos dos Goytacazes – RJ. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 18-34p.

- Lorenz, K., Lal, R., Preston, C.M., Nierop, K.G., (2007). Strengthening the soil organic carbon pool by increasing contributions from recalcitrant aliphatic bio (macro) molecules. *Geoderma*, 142 (1): 1–10.
- Lorenz, K., Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 34: 443-454.
- Lucato, M.U. (2005). *Análise quantitativa por técnicas de reflectância e fotoacústica no infravermelho médio com transformada de Fourier e utilização de calibração multivariada*. Tese (doutorado em Ciências, área Química Analítica) – Campinas- SP, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química 269p.
- Ludwig, B., Nitschke, R., Terhoeven-Urselmans, T., Michel, K., Flessa, H. (2008). Use of mid-infrared spectroscopy in the diffuse-reflectance mode for the prediction of the composition of organic matter in soil and litter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 171: 384-391.
- Madhavan, D.B., Baldock, J.A., Read, Z.J., Murphy, S.C., Cunningham, S.C., Perring, M.P., Paul, K.I. (2017). Rapid prediction of particulate, humus and resistant fractions of soil organic carbon in reforested lands using infrared spectroscopy. *Journal of environmental management*. 193: 290-299.
- Maggiotto, S.R., Oliveira, D., Marur, C.J., Stivari, S.M.S., Leclerc, M., WagneRuddle, C. (2014). Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum Agronomy*, 36: 239-245.
- Margenot, A., O'Neill, T., Sommer, R., Akella, V. (2020). Predicting soil permanganate oxidizable carbon (POXC) by coupling DRIFT spectroscopy and artificial neural networks (ANN). *Computers and Electronics in Agriculture*. 168: 105098.
- Margenot, A.J., Parikh, S.J., Calderón, F.J. (2019). Improving infrared spectroscopy characterization of soil organic matter with spectral subtractions. *Journal of Visualized Experiments*. 143: 57464.
- Marques, J.R.B.; Monteiro, W.R. (2003). *Substituição da eritrina por outras espécies arbóreas de valor econômico – um enfoque sustentável de modernização agrícola*. Ilhéus. CEPLAC/EMARC. 143 – 147p.
- Marques, J.R.B.; Monteiro, W.R.; Lopes, U.V. (2002). *Seringueira: uma opção econômica e ecológica para sombreamento de cacauzeiros*. In: Congresso Brasileiro sobre sistemas agroflorestais. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC.
- Martin-Neto, L., Cruvinel, P.E., Mattoso, L.H.C., Colnago, L.A. (1996) Espectroscopias de infravermelho, ultravioleta-visível e puxe: alguns resultados disponíveis. In: Crestana, S.; Cruvinel, P.E.; Mascarenhas, S. Biscegli, C.I. (eds). Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século. São Carlos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1996. p.51-90.

- Martius, C., Höfer, H., Garcia, M. V., Römbke, J., Hanagarth, W. (2004). Litter fall, litter stocks and decomposition rates in rainforest and agroforestry sites in central Amazonia. *Nutrient cycling in agroecosystems*. 68(2): 137-154.
- McKee, G.A., Soong, J.L., Caldéron, F., Borch, T., Cotrufo, M.F. (2016). An integrated spectroscopic and wet chemical approach to investigate grass litter decomposition chemistry. *Biogeochemistry*. 128:107-123.
- Mendonça, L.A.R., Frischkorn, H., Santiago, M.F., Camargo, P.B., Lima, J.O.G., Mendes Filho, J. (2010). Identificação de mudanças florestais por  $^{13}\text{C}$  e  $^{15}\text{N}$  dos solos da Chapada do Araripe/Ceará. *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient.* 14: 314–319.
- Monroe, P.H.M. (2015). *Estoque de carbono no solo em sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia, Brasil*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Campos do Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 86 p.
- Montagnini F., Nair, P.K.R (2004) Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforest Systems* 61:281–295.
- Monteiro, M.T., Gama-Rodrigues, E.F. (2004). Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 28(5): 819-826.
- Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O. (2006). *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2.ed. Lavras: UFLA. 729 p.
- Müller, M.W., Gama-Rodrigues, A.C. (2007) Sistemas agroflorestais com cacauero. In: Valle, R.R. Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacauero. Ilhéus: CEPLAC, p.467.
- Müller, M.W., Gama-Rodrigues, A.C. (2012). Cacao agroforestry systems. In: Valle, R.R. (Ed.), Science, Technology and Management of Cacao Tree. CEPLAC/CEPEC, Brasília, p. 246–271.
- Mutuo, P.K., Cadisch, G., Albrecht, A., Palm, C.A., Verchot, L. (2005) Potential of agroforestry for carbon sequestration and mitigation of greenhouse gas emissions from soils in the tropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71:43–54.
- Nair, P.K.R, Nair, V.D, Kumar B.M, Showalter, J.M. (2010) Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv Agron*.108: 237–307.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., Nair, V.D. (2009) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 172: 10–23.
- Neves, E.J., Martins, E.G., Reissmann, C.B. (2001). Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. *Embrapa Florestas-Artigo em*

*periódico indexado (ALICE)*. Deposição de serapilheira e de nutrientes de duas espécies da Amazônia. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo. 47-60p.

- Newaj, R.; Dhyani S.K. (2008). Agroforestry for carbon sequestration: Scope and present status. *Indian Journal of Agroforestry* 10:1-9.
- Niemeyer, J., Chen, Y., Bollag, J.M. (1992). Characterization of humic acids, composts, and peat by diffuse reflectance Fourier-transform infrared spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*. 56: 135-140.
- Nuzzo, A., Buurman, P., Cozzolino, V., Spaccini, R., Piccolo, A. (2020). Infrared spectra of soil organic matter under a primary vegetation sequence. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 7(1): 1-12.
- Oelbermann, M, Voroney R.P (2007) Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecol Eng*. 29: 342–349.
- Oelbermann, M., Voroney, R.P., Thevathasan, N.V, Gordon, A.M, Kass, D.C.L, Schlonvoigt, A.M. (2006). Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 68: 27 36.
- Ouellette, L., Voroney, R.P., Van Eerd, L.L. (2016). DRIFT spectroscopy to assess cover crop and corn stover decomposition in lab-incubated soil. *Soil Science Society of America Journal*. 80: 284-293.
- Ozanne, C.M.P., Anhuf, D., Boulter, S.L.; Keller, M., Kitching, R.L., Körner, C., Meinzer, F.C., Mitchell, A.W., Nakashizuka, T., Silva Dias, P.L., Stork, N.E., Wright, S.J., Yoshimura, M. (2003). Biodiversity meets the atmosphere a global view of forest canopies. *Science*. 301: 183-186.
- Pavia, D.L.; Lampman, G.M.; Kriz, G.S.; Vyvyan. J.R. (2015). *Introdução à Espectroscopia*. São Paulo: Cengage Learning.
- Palm, C.A, Tomich, T., Van, N.M., Vosti, S., Gockowski, J., Alegre, J., Verchot, L. (2004). Mitigating GHG emissions in the humid tropics: case studies from the Alternatives to Slash-and Burn Program (ASB). *Environment, Development and Sustainability* 6: 145–162.
- Parikh, S.J., Goyne, K.W., Margenot, A.J., Mukome, F.N., Calderón, F.J. (2014). Soil chemical insights provided through vibrational spectroscopy. *Advances in agronomy*. 126: 1-148.
- Pimentel, L.G., Barreto, M.S.C., Oliveira, D.M.S., Cherubin, M.R., Demattê, J.A M., Cerri, C.E.P., Cerri, C.C. (2019). Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) Spectroscopy to Assess Decomposition Dynamics of Sugarcane Straw. *BioEnergy Research*.12: 909-919.

- Pinheiro, E.F.M., Campos, D.V.B., Balieiro, F.C., Anjos, L.G.C.A., Perira, M.G. (2015). Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter. *Agricultural Systems*, 137: 35-59.
- Pinto, H.C.A., Barreto, P A.B., Gama-Rodrigues, E.F.D., Oliveira, F.G.R., Paula, A. D., Amaral, A. R. (2016). Decomposição da serapilheira foliar de floresta nativa e plantios de *Pterogyne nitens* e *Eucalyptus urophylla* no Sudoeste da Bahia. *Ciência Florestal*. 26(4): 1141-1153.
- Pisani, O., Hills, K.M., Courtier-Murias, D., Haddix, M.L., Paul, E.A., Conant, R.T., Simpson, M.J. (2014). Accumulation of aliphatic compounds in soil with increasing mean annual temperature. *Organic geochemistry*. 76: 118-127.
- Powers, J.S., Montgomery, R.A., Adair, E.C., Brearley, F. Q., DeWalt, S. J., Castanho, C. T., Lerdau, M.T. (2009). Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient. *Journal of Ecology*. 97(4): 801-811.
- Prescott, C.E. (2010). Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*.101: 133-149.
- Rahman, M.M., Tsukamoto, J., Rahman, M.M., Yoneyama, A., Mostafa, K.M. (2013). Lignin and its effects on litter decomposition in forest ecosystems. *Chemistry and Ecology*. 29(6): 540-553.
- Raintree, J.B. Theory and practice of agroforestry diagnosis and design. In: Macdicken, K.G., Vergara, N.T. (1990) (Ed.) *Agroforestry: classification and management*. New York: John Wiley & Sons. 58-90p.
- Ralph, J., Lundquist, K., Brunow, G., Lu, F., Kim, H., Schatz, P.F., Marita, J.M., Hatfield, R.D., Ralph, S.A., Christensen, J.H., Boerjan, W. (2004). Lignins: natural polymers from oxidative coupling of 4-hydroxyphenyl-propanoids. *Phytochemistry reviews*. 3: 29-60.
- Ranger, J., Gerard, F., Lindemann, M., Gelhaye, D., Gelhaye, L. (2003). Dynamics of litterfall in a chronosequence of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* Franco) stands in the Beaujolais mounts (France). *Annals of forest Science*. 60(6): 475-488.
- Reig, F.B., Adelantado, J.G., Moreno, M.M. (2002). FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and silica (quartz) mixtures using the constant ratio method. Application to geological samples. *Talanta*. 58(4): 811-821.
- Rocha-Santos, L., Talora, D.C. (2012). Recovery of Atlantic Rainforest areas altered by distinct land-use histories in northeastern Brazil. *Tropical Conservation Science*. 5(4): 475-494.
- Russell, A. E., Raich, J.W., Valverde-Barrantes, O.J., Fisher, R.F. (2007). Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest. *Soil Science Society of America Journal*. 71(4): 1389-1397.

- Sá, J.C.M, Lal, R. (2009) Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Research*. 103:46–56.
- Sales, K.R.R.N. (2012) *Qualidade do carbono em frações da matéria orgânica e classes de agregados de solos sob sistemas agroflorestais de cacau por espectroscopia na região do infravermelho*. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Campos do Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 89 p.
- Sausen, T.L, Shaefer, G.F.P, Tomazi, M. (2014). Clay content drives carbon stocks in soils under a plantation of *Eucalyptus saligna* Labill. in southern Brazil. *Acta Botanica Brasilica*. 28: 266-273.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*. 478: 49-56.
- Schneidewind, U., Niether, W., Armengot, L., Schneider, M., Sauer, D., Heitkamp, F., Gerold, G. (2019). Carbon stocks, litterfall and pruning residues in monoculture and agroforestry cacao production systems. *Experimental Agriculture*. 55(3): 452-470.
- Schumacher, M.V., Brun, E.J., Hernandez, J.I., König, F.G. (2004). Produção de serapilheira em uma floresta de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no município de Pinhal Grande-RS. *Revista Árvore*. 28(1): 29-37.
- Silva, L.B.D., Dick, D P., Junior, I., Vasconcellos, A. (2008). Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. *Ciência Rural*. 38(4): 1167-1171.
- Singh, R., Lal, M. (2000), Sustainable forestry in India for carbon mitigation. *Current Science*. 78: 563-567.
- Six, J., Elliot, E.T., Paustian, K., (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*. 32: 2099–2103.
- Smiley, G.L., Kroschel, J. (2008) Temporal change in carbon stocks of cocoa gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 73: 219-231.
- Somarriba, E. (1992). Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*. 19 (3): 233–240.
- Somarriba, E.; Harvey C. (2003). Como integrar simultaneamente producción sostenible y conservación de la biodiversidad en cacao tales orgánicos indígenas? *Agroforestería en las Américas* 10: 37-38.

- Stevenson, J.F. (1994). Humus chemistry, genesis, composition, reactions. 2<sup>a</sup> ed. New York, John Wiley. 496p.
- Talbot, J.M., Yelle, D.J., Nowick, J., Treseder, K.K. (2012). Litter decay rates are determined by lignin chemistry. *Biogeochemistry* .108: 279-295.
- Tharayil, N., Suseela, V., Triebwasser, D., Preston, C.M., Gerard, P.D., Dukes, J.S. (2011). Changes in the structural composition and reactivity of *Acer rubrum* leaf litter tannins exposed to warming and altered precipitation: climatic stress-induced tannins are more reactive. *New Phytologist*. 191: 132–145.
- Torres, J., Tenorio, A., Gómez, A. (2008). Agroforestería: una estrategia de adaptación al cambio climático propuesta de adaptación tecnológica del cultivo de café y cacao en respuesta al cambio climático en San Martín. Ed. Soluciones Prácticas-ITDG. Lima, Perú. ed.124p.
- Ussiri, D.A., Johnson, C.E. (2003). Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by <sup>13</sup>C NMR spectroscopy and chemical methods. *Geoderma*.111(1-2): 123-149.
- Van Soest, P. Wine, R.H. (1968). Development of a comprehensive system of feed analysis and its applications to forages. *J. Ass. Agri. Chem.*, 51:780-785.
- Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., Boerjan, W. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant physiology*.153: 895-905.
- Vesterdal, L., Schmidt, I. K., Callesen, I., Nilsson, L. O., Gundersen, P. (2008). Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management*. 255(1): 35-48.
- Vicente, L. C., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C., Marciano, C. R. (2019). Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. *Catena*. 182: 104139.
- Villa, E.B., Pereira, M.G., Alonso, J. M., Beutler, S.J., Leles, P.S.D.S. (2016). Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. *Floresta e Ambiente*. 23(1): 90-99.
- Vos, V.C., Van Ruijven, J., Berg, M.P., Peeters, E.T., Berendse, F. (2011). Macro-detritivore identity drives leaf litter diversity effects. *Oikos*. 120: 1092-1098.
- Wickings, K., Grandy, A.S., Reed, S.C., Cleveland, C.C. (2012). The origin of litter chemical complexity during decomposition. *Ecology letters*. 15: 1180-1188.
- Utomo, B., Prawoto, A.A., Bonnet, S., Bangviwat, A., Gheewala, S.H. (2016). Environmental performance of cocoa production from monoculture and agroforestry systems in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*. 134: 583-591.



Xu, Y., Chen, Z., Fontaine, S., Wang, W., Luo, J., Fan, J., Ding, W. (2017). Dominant effects of organic carbon chemistry on decomposition dynamics of crop residues in a Mollisol. *Soil Biology and Biochemistry*. 115: 221-232.