

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PEGADA DE CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CACAU E  
SERINGUEIRA NO SUL DA BAHIA**

**Neide Ribeiro dos Santos**

**Orientadora: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (UENF)**

VITÓRIA DA CONQUISTA - BA

AGOSTO-2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PEGADA DE CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CACAU E  
SERINGUEIRA NO SUL DA BAHIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre

**Neide Ribeiro dos Santos**

**Orientadora: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (UENF)**

VITÓRIA DA CONQUISTA - BA

AGOSTO-2024

S236p Santos, Neide Ribeiro dos.

Pegada de carbono em sistemas agroflorestais de cacau e seringueira no sul da Bahia. / Neide Ribeiro dos Santos, 2024. 84f.

Orientador (a): Dr<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Vitória da Conquista, 2024.

Inclui referências. 57 - 73.

1. Estoque de Carbono. 2. Mitigação de emissões. 3. Sistemas agrícola integrados. I. Gama-Rodrigues, Emanuela Forestieri da. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós- Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD: 551.523

**Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134**

UESB – Campus Vitória da Conquista - BA

**NEIDE RIBEIRO DOS SANTOS**

**PEGADA DE CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CACAU E  
SERINGUEIRA NO SUL DA BAHIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 13 de agosto de 2024

Comissão Examinadora:



---

Prof. Dr. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues (Ph.D.; Solos e Nutrição de Plantas)  
UENF



---

Prof. Dr. Jaime Honorato Júnior (Ph.D.; Fitopatologia) - EARTH UNIVERSITY



---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D.; Ciências do Solo) - UENF

Orientadora

## **DEDICO**

Ao meu pai, José Torres dos Santos (*in memoriam*), que não pôde vivenciar esse momento, e à minha mãe, Maria Aparecida Ribeiro.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, que mesmo distante, sempre me apoiou incondicionalmente ao longo da minha jornada acadêmica. Em especial, quero expressar minha profunda gratidão à minha mãe, Maria Aparecida Ribeiro, e aos meus irmãos, cunhados e sobrinhos, cujo apoio e incentivo foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e ao programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, pela oportunidade de realização desse curso. E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos.

À minha orientadora, professora Dra. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues, pela dedicação, contribuição, atenção, paciência e pelo apoio incansável durante todo o processo da dissertação. Mesmo a distância, sua presença e orientação foram constantes e fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) pela colaboração na coleta de dados; e ao Laboratório de Solos da UENF pelo acolhimento durante minha estadia em Campos, especialmente ao Ederaldo, à Kátia e à Vanilda, que tornaram minha experiência mais agradável.

Ao Instituto Sucupira, pelo apoio crucial na coleta de dados e na criação de uma rede de apoio fundamental para o desenvolvimento desta dissertação. Sua função como facilitador de comunicação entre os produtores foi essencial para o sucesso deste trabalho.

À Cooperativa Ouro Verde da Bahia (COOPERVERDE), à Casa Familiar Rural de Igrapiúna e ao Consórcio Intermunicipal-Ciapra Baixo Sul, por todo apoio durante a realização da coleta de dados e a todos os proprietários das Fazendas pelo fornecimento dos dados.

À Fabrícia, secretária da Pós, e todos os meus colegas de curso, por toda ajuda e companheirismo durante o curso, e que fizeram da minha estadia em Vitória da Conquista mais agradável.

Ao Ilé Asé Ojisé Amonilê, pela acolhida, pelo apoio fundamental na manutenção do meu equilíbrio e foco ao longo desta jornada acadêmica.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigada!

## RESUMO

SANTOS, Neide Ribeiro dos, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, março de 2024. **Pegada de Carbono da Agrofloresta de Cacau e Seringueira no Sul da Bahia.** Orientadora: Profa. Dra. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem incentivado a pesquisa sobre sistemas agroflorestais (SAFs), que conciliam a produção agrícola com a conservação ambiental. Esses sistemas são essenciais para a acumulação de carbono no solo, na biomassa arbórea e para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. O presente estudo teve como objetivo estimar a pegada de carbono associada aos sistemas agroflorestais de cacau e seringueira, no sul da Bahia. As emissões de GEE e os estoques de carbono associados à atual produção de cacau e seringueira, conforme avaliados em 7 fazendas no Sul da Bahia, foram estimados usando o Cool Farm Tool. A produção média de cacau foi de 493,6 kg de amêndoas/ha<sup>-1</sup>, um pouco acima da média nacional, enquanto a seringueira produziu 861 kg/ha<sup>-1</sup>, ligeiramente abaixo da média nacional. A pegada de carbono para 1 kg de grãos de cacau seco e borracha foi de 3,3 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg, sendo o uso intenso de fertilizantes (300 a 818 kg de NPK/ha) o principal fator para as emissões. A biomassa das árvores e o solo até 30 cm de profundidade contribuem para o estoque de carbono com média de -50,16 Mg CO<sub>2</sub>eq/ha. Observou-se uma correlação positiva moderada entre o aumento do rendimento do cacau e a aplicação intensa de fertilizantes, que resultou em 1,37 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg. As emissões associadas à produção de fertilizantes e ao manejo de fertilizante no solo se correlacionaram-se positivamente com o gerenciamento de resíduos e a pegada de carbono total. Conclui-se que os SAF de cacau e seringueira no sul da Bahia são fundamentais para a sustentabilidade agrícola. Na padronização das metodologias de avaliação de emissões e sequestro de carbono, considerando o solo até 100 cm de profundidade, é essencial evidenciar o potencial desses sistemas.

**Palavras-Chave:** Estoque de Carbono; Mitigação de emissões; Sistemas agrícola integrados.

## **ABSTRACT**

SANTOS, Neide Ribeiro dos, M.Sc., State University of Southwestern Bahia, March 2024. **Carbon Footprint of Cocoa and Rubber Agroforestry in Southern Bahia.** Advisor: Prof. Dr. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

The growing concern about climate change has encouraged research on agroforestry systems (AFS), which reconcile agricultural production with environmental conservation. These systems are essential for carbon accumulation in the soil and tree biomass and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions, contributing to climate change mitigation. The present study aimed to estimate the carbon footprint associated with cocoa and rubber tree agroforestry systems in southern Bahia. The greenhouse gas (GHG) emissions and carbon stocks associated with the current production of cocoa and rubber, as evaluated on seven farms in southern Bahia, were estimated using the Cool Farm Tool. The average cocoa yield was 493.6 kg of almonds/ha, slightly above the national average, while rubber production was 861 kg/ha, slightly below the national average. The carbon footprint for 1 kg of dry cocoa beans and rubber was 3.3 kg of CO<sub>2</sub>eq/kg, with the intensive use of fertilizers (300 to 818 kg of NPK/ha) being the main factor contributing to emissions. Tree biomass and soil up to 30 cm deep contribute to carbon storage with an average of -50.16 Mg CO<sub>2</sub>eq/ha. A moderate positive correlation was observed between increased cocoa yield and intensive fertilizer application, which resulted in 1.37 kg of CO<sub>2</sub>eq/kg. Emissions associated with fertilizer production and fertilizer management in the soil were positively correlated with waste management and the total carbon footprint. It is concluded that cocoa and rubber agroforestry systems in southern Bahia are fundamental for agricultural sustainability. Standardizing methodologies for evaluating emissions and carbon sequestration, considering soil up to 100 cm deep, is essential to highlight the potential of these systems.

**Keywords:** Carbon Stock; Emission Mitigation; Integrated Agricultural Systems.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFOLU	Agricultura, Silvicultura e Outros Usos da Terra;
CFT	Cool Farm Tool;
CH <sub>4</sub>	Metano;
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono;
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de Carbono equivalente;
CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> /ano <sup>-1</sup>	Dióxido de carbono equivalente por hectare por ano;
CO <sub>2</sub> eq./ha <sup>-1</sup>	Dióxido de carbono equivalente por hectare;
CO <sub>2</sub> -eq./kg <sup>-1</sup>	Dióxido de carbono equivalente por quilograma;
COP	Conferência das Partes;
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura;
GEE	Gases de Efeito Estufa;
GWP	Potencial de Aquecimento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
IP	Indicação Geográfica;
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;
kg CO <sub>2</sub> eq Kg <sup>-1</sup>	Quilograma de Dióxido de carbono equivalente por quilo;
LULUCF	Mudança do Uso da Terra e Florestas;
Mg C ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	Mega grama de carbono por hectare ano;
Mg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup>	Mega grama Dióxido de Carbono equivalente por hectare;
Mg/ha <sup>-1</sup>	Mega grama por hectare;

MtCO <sub>2</sub> eq	Milhões de toneladas de Dióxido de Carbono equivalente;
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso;
PAG	Potencial de Aquecimento Global;
Plano ABC	Plano Agricultura de Baixo Carbono;
SAF	Sistema Agroflorestal;
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa.
tCO <sub>2</sub> eq/ha <sup>-1</sup>	Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente por hectare;
tCO <sub>2</sub> eq/t <sup>-1</sup>	Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente por tonelada.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
3.1 Cultivo de Cacau ( <i>Theobroma cacao</i> L.) e Seringueira ( <i>Hevea brasiliensis</i> (Willd. ex A. Juss.) Mull.Arg.).....	18
3.1.1 Cultura do Cacau.....	18
3.1.2 Seringueira.....	19
3.2 Sistemas Agroflorestais de Cacau e Seringueira.....	21
3.3 Emissão de GEE na Agropecuária.....	23
3.3 Pegada de Carbono.....	25
3.4 Aplicação prática do Cool Farm Tool no cálculo da Pegada de Carbono.....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1 Caracterização da área.....	28
4.2 Cálculo da pegada de carbono.....	32
4.2.1 Gestão de resíduos.....	32
4.2.2 Emissões oriundas de fertilizantes.....	34
4.2.3 Emissões oriundas da utilização de proteção de culturas.....	36
4.2.4 Emissões oriundas da utilização de Combustível e Energia.....	37
4.2.5 Emissões oriundas de transporte.....	37
4.2.6 Estoque de Carbono.....	37
4.3 Análise estatística.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1 Análise do Rendimento, Pegada de Carbono e Estoque de Carbono.....	39
5.1.1 Análise do Rendimento.....	39
5.1.2 Emissões oriundas do gerenciamento de resíduos.....	41
5.1.3 Emissões oriundas da produção e aplicação de fertilizantes.....	43
5.1.4 Emissões oriundas da utilização de proteção de culturas.....	48
5.1.5 Emissões oriundas da utilização de energia e transporte.....	51
5.1.6 Pegada de carbono.....	52

5.1.7 Estoque de carbono .....	54
6. CONCLUSÃO .....	56
APÊNDICES.....	75
APÊNDICE A-QUESTIONÁRIO .....	75
APÊNDICE B-TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO .....	84

## 1.INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEEs), mas também possui o potencial de contribuir significativamente para limitar o aquecimento global a menos de 2°C até o final do século. Esse objetivo pode ser alcançado por meio da redução das emissões diretas nas produções agrícolas e pecuárias, bem como das emissões indiretas associadas às mudanças no uso da terra, além de promover o aumento do sequestro de carbono (THORSTENSEN; ZUCHIERI, 2021). Reduzir as emissões de GEE para a atmosfera é uma tarefa essencial que pode ser efetivamente realizada a partir de uma compreensão aprofundada da pegada de carbono (OZLU et al., 2022). A pegada de carbono refere-se ao total de emissões de gases de efeito estufa, expressas em dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> eq), geradas direta ou indiretamente por indivíduos, organizações, eventos ou produtos ao longo de seu ciclo de vida (NAIR, 2022). Compreender esses processos detalhadamente permite identificar oportunidades para minimizar o impacto ambiental e promover práticas mais sustentáveis.

Em 2020, as emissões brutas totais de GEE no Brasil atingiram 2,16 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> eq, sendo as mudanças de uso da terra as maiores responsáveis, com 998 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> eq (MtCO<sub>2</sub> eq), o que representa 46% do total bruto. Considerando as remoções por áreas protegidas, vegetação secundária e outras mudanças de uso da terra (636 MtCO<sub>2</sub> eq), o setor registrou uma emissão líquida de 362 MtCO<sub>2</sub> eq no último ano, correspondendo a aproximadamente 24% das emissões líquidas totais do Brasil (SEEG, 2021).

A maior parte das emissões nacionais está direta ou indiretamente relacionada à produção agrícola. O consumo de fertilizantes tem crescido anualmente, variando entre 30 e 35 milhões de toneladas no período de 2013 a 2020, impulsionado pelo avanço da agricultura no país e pela necessidade de aumentar a produtividade em solos predominantemente de baixa fertilidade e alta acidez (GAMA-RODRIGUES et al., 2022). Outros insumos, como pesticidas e herbicidas, também seguem a mesma tendência, com um aumento de cerca de 380% entre 2000 e 2019. O uso inadequado desses insumos, incluindo a aplicação excessiva ou incorreta, compromete o crescimento do setor

agropecuário e florestal brasileiro, afetando a qualidade do meio ambiente e do produto gerado (GAMA-RODRIGUES et al., 2022).

Dada a alta concentração de emissões de GEE no Brasil, a produção de alimentos de forma sustentável se torna uma prioridade para a sociedade. O desafio da agricultura está em aumentar a produção sem comprometer o ambiente (SALA et al., 2017; ZAREI et al., 2019). Para enfrentar esse desafio, é essencial a adoção de práticas agrícolas inovadoras e sustentáveis que promovam a eficiência dos recursos, a conservação da biodiversidade e a redução das emissões de GEEs (REHMAN et al., 2022). Entre essas práticas, destacam-se os Sistemas Agroflorestais (SAF), que integram árvores, culturas agrícolas e/ou animais. Essa diversidade oferece diversas vantagens: intensifica a produção, melhora a fertilidade do solo, reduz a erosão, aumenta a biodiversidade e sequestra carbono (SANTOS, 2007; STEENBOCK et al., 2013).

Os SAF têm ganhado destaque no Brasil, tanto pela contribuição econômica quanto pelos benefícios ambientais. Segundo dados autodeclarados dos Censos Agropecuários, a área plantada com SAFs no Brasil aumentou de 8,4 milhões de hectares em 2006 para 13,9 milhões em 2017, um crescimento de aproximadamente 67%. De acordo com Manzatto et al. (2019), esse aumento em área representaria a mitigação de GEE de aproximadamente 36,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> eq. A importância desses sistemas é ainda maior quando são utilizadas espécies perenes, como a seringueira e o cacau, que são altamente eficientes na fixação e armazenamento de carbono (C) (SOMARRIBA e HARVEY, 2003; CONCHA et al., 2007).

No Brasil a área plantada sob SAF cacau (*Theobroma cacao* L.) abrange mais de 621.753 ha, com destaque para o Pará, que é o principal produtor dessa cultura. Os maiores volumes de produção são registrados no Pará, com 149,4 mil toneladas, e na Bahia, com 120,0 mil toneladas (IBGE, 2023). A Bahia é o único estado produtor no Nordeste, ocupando uma área de 403 mil ha (BRAINER, 2021). Historicamente reconhecida pela sua alta produtividade de cacau, a região Sul da Bahia enfrentou desafios significativos devido à vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa* (Stahel) Aime & Phillips-Mora), resultando em quedas abruptas na produção e impactos econômicos locais (IBGE, 2023).

Enquanto a produtividade do cacau no Pará é de 967 kg de amêndoa/ha, na Bahia é de apenas 273 kg/ha (IBGE, 2023). O cacau do sul da Bahia é reconhecido pela Indicação Geográfica - IP Cacau Sul da Bahia, que abrange uma área de 61.460 km<sup>2</sup>, incluindo sete territórios (Litoral Sul, Baixo Sul, Extremo Sul, Vale do Jiquiriça, Costa do Descobrimento, Médio Rio de Contas e Médio Sudoeste da Bahia), e engloba 83 municípios (SEAGRI, 2023).

A seringueira (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Mull. Arg.) tem se mostrado uma alternativa viável para o sombreamento do cacau, devido ao seu alto valor econômico e à qualidade da sombra que proporciona (Marques e Monteiro, 2003). Além disso, contribui para a deposição contínua de serapilheira. O cacau e a seringueira são espécies ecologicamente complementares e trazem benefícios conjuntos, o que torna viável a utilização desses sistemas (DAWOE et al., 2016; MAGGIOTTO et al., 2014; SCHORTH et al., 2014). Contudo, apesar dos esforços para avaliar o estoque de carbono nesses sistemas, ainda existem lacunas no entendimento do impacto específico da produção do SAF cacau-seringueira na pegada de carbono. Estudos como os de Recanati et al. (2018) e Neira (2016) destacam a pegada de carbono associada ao cacau, revelando que uma parte significativa das emissões provém do processo produtivo de cacau variando de 1,63 a 1,96 kg CO<sub>2</sub> eq. /kg de cacau. Além disso, Schroth et al. (2016) confirmaram que as maiores emissões relacionadas à produção de cacau estão associadas à utilização de insumos, com valores superiores a 1 kg CO<sub>2</sub> eq./kg de cacau. Isso ressalta a importância de investigar mais profundamente como a integração dessas culturas pode influenciar positivamente a sustentabilidade e a mitigação de emissões.

Além disso, o gerenciamento eficaz das fazendas pode ser uma ferramenta crucial para mitigação de emissões de GEE. Compreender as relações entre práticas de manejo e as emissões associadas é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de redução de emissões de GEE (LEDO et al., 2018). Para permitir que o gerenciamento seja efetivo, é necessário primeiro identificar e quantificar as fontes de emissões de GEE.

Diante do exposto, são necessárias pesquisas mais detalhadas sobre o impacto ambiental dos sistemas de cultivo de cacau, incluindo suas emissões de

GEE (RECANATI et al., 2018; SILATSA et al., 2017). Isso permitirá identificar quais práticas de manejo contribuem para as emissões de GEE e quais podem mitigá-las, resultando em uma compreensão mais precisa do potencial desses sistemas no sequestro de carbono.

Com base no exposto, este trabalho busca responder às seguintes questões: 1) Qual o efeito das práticas agrícolas adotadas nos SAFs cacau-seringueira nas emissões de GEE? Os SAFs cacau-seringueira podem contribuir para acúmulo de C no sistema solo-planta? Ao explorar essas questões, pretendemos contribuir para o entendimento dos desafios e oportunidades associadas à sustentabilidade da produção desses sistemas. As respostas a essas questões são essenciais para orientar práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis em SAF cacau-seringueira, no sul da Bahia.

É importante considerar que a relação entre produção e pegada de carbono nos sistemas agroflorestais (SAFs) é complexa e representa um dos principais desafios para a sustentabilidade agrícola. Uma alta produtividade, frequentemente associada ao uso intensivo de insumos externos, como fertilizantes e defensivos, tende a aumentar as emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultando em uma maior pegada de carbono. Por sua vez, a redução na aplicação desses insumos pode diminuir a pegada de carbono, mas também levar a uma menor produtividade, comprometendo a viabilidade econômica da produção (Gama-Rodrigues et al., 2022). Assim, o dilema entre maximizar a produção e minimizar o impacto ambiental é central para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis. É necessário, portanto, buscar um equilíbrio que permita a produção eficiente sem comprometer a sustentabilidade ambiental. Inovações no manejo que aumentem a eficiência do uso de recursos e promovam a adoção de tecnologias de baixo carbono podem ser soluções viáveis para alcançar esse objetivo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estimar a pegada de carbono associada aos SAF cacau-seringueira, no sul da Bahia.

### **2.2 Objetivos específicos**

- I. Avaliar o impacto de práticas de manejo na pegada de carbono em SAF cacau-seringueira, no sul da Bahia;
- II. Identificar quais práticas de manejo contribuem para redução da pegada de carbono em SAF cacau-seringueira, no sul da Bahia;
- III. Identificar oportunidades de mitigação para reduzir a pegada de carbono em SAF cacau-seringueira, no sul da Bahia.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

**3.1 Cultivo de Cacau (*Theobroma cacao* L.) e Seringueira (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull.Arg.).**

### **3.1.1 Cultura do Cacau**

O cacau tem sua origem nas florestas tropicais pluviais da região Amazônica (ZARRILLO, 2018), abrangendo as bacias dos rios Amazonas e Orinoco. Essa cultura apresenta grande diversidade genética que confere maior adaptabilidade a várias regiões (Hora et al., 2022).

O cacauero se caracteriza por ser uma planta perene, seu ciclo produtivo pode ultrapassar os 100 anos, sendo considerado o ciclo ideal em torno de 35 anos, tendo como início da produção econômica a partir do sexto ano após o plantio. Desenvolve-se bem em regiões com temperaturas médias superiores a 21°C, tolerando por curto espaço de tempo temperaturas mínimas próximas a 7°C (SERRA, 2021).

A cultura foi inicialmente classificada na família Sterculiaceae (CRONQUIST, 1981), contudo, com estudos filogenéticos, a planta sofreu modificação quanto à sua classificação botânica, passando a integrar a família Malvaceae (JUDD, et al., 2009). O cacau é produzido em clima tropical, quente e úmido, e seus principais produtores mundiais localizam-se, predominantemente, ao longo da linha do Equador (TOBING, 2018).

A Costa do Marfim lidera como o maior produtor global, sendo responsável por 39,0% da produção total. Os países: Gana (14,5%) Indonésia (14,0%), Nigéria (6,3%), Equador (5,1%), Camarões (5,0%) e o Brasil (4,6%), estes países reúne 88,5% da produção mundial (FAOSTAT, 2020). O Brasil é o sétimo maior produtor mundial de cacau, com 265 mil toneladas, porém nem sempre foi assim, na década de 1980, o país chegou a ser o segundo maior produtor mundial, produzindo mais de 430 mil toneladas de amêndoa seca de cacau (BRAINER, 2021).

Atualmente no Brasil, o cacauzeiro é cultivado em quatro regiões: Norte, Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, sendo as regiões Norte, Nordeste e Sudeste as maiores produtoras. As três regiões que sobressaem como produtoras de cacau são, respectivamente: o Sul da Bahia, o norte do Espírito Santo e a Região Amazônica (PINTO et al, 2022). A Bahia é o único estado produtor do Nordeste, ocupando a área de 403 mil ha, com 111,4 mil toneladas (BRAINER, 2021).

O cacau tem importância econômica no contexto internacional por ser commodity de participação relevante no comércio mundial de produtos agrícolas, tanto em importações quanto exportações (DEUS, 2022).

Além da importância econômica, o cacau tem um grande valor ecológico. Cultivado racionalmente, em condições que se assemelham às do seu “habitat” natural, sendo cultivado em associação com outras espécies para proporcionar sombreamento durante seu estágio de crescimento e maximizar a produtividade, com um sombreamento permanente de árvores de maior porte, o cacauzeiro protege o solo dos efeitos da erosão e da lixiviação de nutrientes (EFRAIM, 2009).

### **3.1.2 Seringueira**

A seringueira é uma espécie que ocorre naturalmente na Amazônia brasileira e em países vizinhos (RAMOS et al., 2018). Pertencente à família Euphorbiaceae, a seringueira é a fonte comercial mais importante para a produção de borracha natural. Ela tem sido plantada em áreas tropicais com o objetivo de extrair látex para a fabricação de borracha (NOBUCHI et al., 2011). É uma espécie decídua, perene, com crescimento rítmico e ortotrópico, pode

atingir 30 metros de altura e um perímetro de mais de 3 metros em espécies nativas (VAYSSE et al., 2012).

A área de distribuição geográfica da seringueira no Brasil abrange os estados do Amazonas, Acre e Amapá até o meridiano 77, parte do noroeste do Maranhão e norte dos estados do Mato Grosso e Rondônia (VIÉGAS; CARVALHO, 2000).

A cultura é responsável por produzir uma das principais commodity agrícola, a borracha natural que é matéria-prima utilizada na produção de mais de 50 mil produtos, que incluem materiais médico-hospitalares, preservativos, calçados, roupas, pneus, peças automotivas, pisos, manta asfáltica, utensílios domésticos, brinquedos, móveis, material bélico e muitos outros. Esses produtos são essenciais ao nosso cotidiano (BRAGA, 2015; ALVARENGA, 2021).

Além de sua ocorrência natural, a seringueira vem sendo cultivada em vários estados brasileiros, como Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo e Paraná (CECÍLIO et al., 2006; GONÇALVES e MARQUES, 2008). De acordo com Gonçalves e Marques (2008), essa expansão é importante e deve-se principalmente à elevada demanda comercial por borracha natural e pela busca por não infestadas pelo fungo *Pseudocercospora ulei* (Henn) B.T. Hora & Mizubuti, que no passado dizimou grandes plantios de seringueira com a incidência da doença conhecida como “mal-das-folhas”.

O Brasil possui hoje, aproximadamente, 180 mil hectares de seringueira plantada. Porém, muitas dessas áreas são plantios recentes, ainda em crescimento, somadas a áreas no final do ciclo, de baixa produtividade e precisando de renovação, bem como aquelas em estado de abandono (ALVARENGA, 2023). Considerando seringais instalados ou de cultivo, o Estado com maior área plantada e maior produtor é São Paulo, seguido da Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais empatados, Espírito Santo, Mato Grosso e Tocantins (ALVARENGA, 2023).

O ciclo de produção do látex dura até 30 anos. Depois de decorrer esse período, a madeira da seringueira é frequentemente utilizada nos setores de energia, devido à sua baixa durabilidade (SANTOS et al., 2019). A madeira pode

ser comercialmente explorada e utilizada para fabricação de móveis, caixotes, utensílios de cozinha, construção civil e outras finalidades (INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ, 2023).

O Brasil contribui aproximadamente com 1,5% de toda a produção mundial de borracha natural. Todavia, a produção nacional não consegue atender à demanda interna brasileira, sendo necessário importar em torno de 65% da borracha natural, principalmente dos países asiáticos (SILVA et al., 2022). Nas regiões produtoras em que a atividade é considerada como de cultivo, ou seja, plantada, e a atividade é bem tecnificada, a produção está em torno de 7,0 kg/árvore/ano, equivalentes a 3.500 kg de coágulo/ha<sup>-1</sup>, considerando uma densidade de 500 plantas/ha<sup>-1</sup> (ALVARENGA, 2023).

A seringueira desempenha um papel positivo no aspecto ambiental, sendo eficiente na estocagem de carbono, contribuindo para o cumprimento das metas brasileiras de redução de emissão de carbono, estipuladas por acordos internacionais. Além de desempenhar resultados satisfatórios em áreas degradadas, podendo ser utilizada para recuperação de solos degradados. (BRAGA, 2015, ALVARENGA, 2023).

### **3.2 Sistemas Agroflorestais de Cacau e Seringueira**

Com o advento da Revolução Industrial, houve um aumento da capacidade de intervenção humana no meio ambiente, o que acarretou maiores impactos ambientais. A exploração do meio ambiente manteve-se durante todo o século XIX e a maior parte do século XX, visto que se achava que os recursos naturais eram ilimitados (BARROSO, 2024). Somente a partir da década de 1970 é que este comportamento exploratório e a limitação dos recursos naturais começaram a ser questionados, isso porque, nesse período, o processo de desgaste da natureza e a possibilidade de esgotamento de determinados recursos naturais se tornaram mais evidentes (DIAS, 2009).

De acordo com Perosa et al. (2020), o Brasil tem assumido um papel relevante nos acordos internacionais de enfrentamento das mudanças do clima. Na Conferência do Clima de Copenhague, em 2009, o Brasil firmou um compromisso voluntário de reduzir as suas emissões de GEE, tendo o setor

agropecuário um papel de destaque nesse compromisso por meio do Plano ABC, na ocasião o País propôs a adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono. Ainda de acordo com os autores, a contribuição da agricultura de baixa emissão de carbono também foi considerada no compromisso mais recente assumido pelo País, no Acordo de Paris em 2015, visando à redução de emissões até 2025 e 2030.

Nesse sentido surge os SAFs que são constituídos pelo cultivo integrado de árvores, culturas agrícolas e/ou animais, obedecendo à certa disposição espacial e temporal. Dada essa complexidade, os SAFs possuem a capacidade de aliar benefícios econômicos com a sustentabilidade dos recursos naturais (ALMEIDA et al., 2021). Para Gama-Rodrigues et al. (2021), o SAF-cacau é uma tecnologia adequada, pois contribui para a melhoria do padrão de vida da população de uma região agrícola baseada no uso da terra sem causar alterações ambientais indesejáveis. Pois propicia à cultura condições ideais para o seu desenvolvimento e produção, uma vez que a espécie é tolerante à sombra e apresenta bom desenvolvimento quando associada com espécies que a complementam ecologicamente (MULLER; GAMA-RODRIGUES, 2012).

No Brasil, a região sul do estado da Bahia constitui um dos maiores celeiros agroflorestais do mundo, somando mais de 400.000 hectares de cacau cultivados em SAFs (LEITE, 2018). Diferentemente de outras regiões produtoras de borracha natural do Brasil, na Bahia, a seringueira vem sendo implantada em SAFs com o cacau e, ou, outros cultivos agrícolas (Marques et al., 2014). Para Sanches (2019), o método de cultivo de SAF cacau-seringueira é, atualmente, um dos principais métodos de cultivo na região. Ainda segundo o autor, esse sistema começou a ser adotado na década de 1980 com o objetivo de reintroduzir os seringais que haviam sido abandonados, transformando-os em um modelo agrícola produtivo. Segundo Marques et al. (2002), o cacau e a seringueira são espécies que se completam ecologicamente, como o aumento da biodiversidade, a melhoria da saúde do solo e a otimização do uso de recursos e trazem benefícios em conjunto ao sistema, o que torna viável a utilização desses sistemas

O modelo agroflorestal cacau seringueira, apesar de não ser um modelo considerado biodiverso (com várias espécies cultivadas), é um modelo que tem se mostrado viável economicamente (SANCHES, 2019). Além disso, segundo Marques et al. (2002), o plantio consorciado entre essas duas culturas já é um dos mais conhecidos e bem-sucedidos exemplos de consórcio sustentável, constituindo-se como boa alternativa para diversas regiões do Brasil e do mundo.

Apesar de sua menor biodiversidade, o modelo agroflorestal cacau-seringueira demonstra não apenas viabilidade econômica, mas também um significativo potencial ambiental, especialmente no que diz respeito ao sequestro de carbono. Estudos como o de Cotta (2005) revelam que esses sistemas podem armazenar uma quantidade considerável de carbono no solo em camadas superficiais, armazenando C equivalente a 91,54 Mg C ha<sup>-1</sup>, reforçando sua importância na mitigação das mudanças climáticas.

Essa capacidade de estocagem é corroborada por outras pesquisas, como a de Monroe et al. (2016), que indicam altos níveis de carbono no solo na profundidade de 0-100 cm, com valores médios em torno de 183 Mg ha<sup>-1</sup> de C., e o trabalho de Cotta et al. (2008), que fornece dados específicos sobre o estoque arbóreo na região de Igrapiúna-BA, estimaram-se um estoque de carbono arbóreo de 89,9 Mg C ha<sup>-1</sup>, estando 84,7 Mg C ha<sup>-1</sup> armazenados nas árvores de seringueira e 5,22 Mg C ha<sup>-1</sup> nos cacauzeiros.

O modelo SAF cacau-seringueira, não apenas contribui para a produção agrícola, mas também para a conservação ambiental. A capacidade desses sistemas de armazenar carbono é crucial, especialmente em um contexto global em que a redução das emissões de carbono é uma prioridade.

### **3.3 Emissão de GEE na Agropecuária**

A importância do setor agropecuário para a economia brasileira é inegável e há tempos é reconhecida (CARRARA; BARROS, 2020). A produção agropecuária tem se desenvolvido muito nos últimos 40 anos, resultando em um aumento significativo na produtividade e posicionando o Brasil como um potencial fornecedor de alimentos no futuro (CNA, 2022). As atividades humanas, principalmente as relacionadas à queima de combustíveis fósseis e à

agricultura, silvicultura e outros usos da terra (conhecido pela sigla AFOLU, de Agriculture, Forestry and Other Land Use) têm aumentado a emissão de GEE na atmosfera, contribuindo assim para a intensificação do efeito, afetando o balanço energético da terra, acarretando modificações climáticas no planeta (FELIX et al., 2020).

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), a previsão para os próximos 100 anos é de um aumento entre 1,4°C e 5,8°C na temperatura média da Terra. Os principais GEEs relacionados a este setor são o dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, o óxido nitroso N<sub>2</sub>O e metano CH<sub>4</sub> (ROTZ et al., 2019).

De acordo com o relatório oficial do governo brasileiro, estimativas anuais de emissões de GEE, referente ao ano de 2020, indicaram que os setores LULUCF (Mudança do Uso da Terra e Florestas), agropecuária e energia tiveram participação de 38,0%, 28,5% e 23,2% nas emissões totais de GEE, respectivamente. Sendo que as emissões totais de 2020 representaram um total de 13,7% maior quando comparadas às emissões de 2016 (BRASIL, 2020).

O relatório mostrou ainda que o setor Agropecuária teve diminuição de 1,9% em suas emissões em relação a 2016, isso se deve, principalmente, pela diminuição da produção Agropecuária, sobretudo de gado bovino. Quando comparada com 2019, a produção pecuária diminuiu cerca de 2,2%, sendo observada queda de 6,2% para a produção de bovinos, estagnação na produção de frango e redução de 2% para a de leite. Já para o setor LULUCF foi identificado aumento de 56,8% das emissões líquidas em comparação a 2016 (BRASIL, 2020).

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do observatório do clima, que publica anualmente análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa, mostrou que o setor viu suas emissões aumentarem em vez de cair: a alta foi de 2,5%, a maior elevação percentual desde 2010, puxada pela redução do consumo de carne - que manteve mais gado no pasto e, portanto, mais metano sendo emitido pelo rebanho (SEEG, 2021).

Olhando para as emissões globais, o Brasil ocupa o quinto lugar entre os maiores poluidores climáticos, com cerca de 3,2% do total mundial, ficando atrás apenas da China, dos EUA, da Rússia e da Índia (SEEG, 2021). De 1970 a 2020, as emissões do setor agropecuário saltaram 171,1%, atreladas principalmente ao aumento da população total de bovinos e ao uso de fertilizantes sintéticos. Somente em 2020 as emissões de pecuária e agricultura aumentaram 1,4% e 7,2%, respectivamente, sendo que a produção agropecuária no País manteve a tendência de crescimento de forma satisfatória, com seu PIB crescendo 2,2% (SEEG, 2021). Ainda de acordo com o relatório, em nível estadual, houve redução das emissões da agropecuária somente no Amazonas (-0,4%), na Bahia (-1,5%) e no Rio Grande do Sul (-4,6%). Para todos os demais Estados houve aumento, à exceção de Mato Grosso do Sul, com emissões praticamente estabilizadas em 46 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq.

### **3.3 Pegada de Carbono**

As mudanças climáticas globais caracterizam-se como um desafio a ser enfrentado por toda sociedade no século XXI, já que seus impactos, principalmente negativos, são percebidos de forma variada em diferentes atividades econômicas e regiões ao redor do mundo (CARLOS et al., 2019).

O efeito estufa por sua vez é um dos fenômenos responsáveis pelas mudanças climáticas e é necessário para a manutenção da temperatura terrestre, porém, em excesso, os gases de efeito estufa (GEE) formam uma espécie de cobertura muito densa que retém o calor, aquecendo a superfície da Terra além do necessário, produzindo alterações no clima e causando problemas ambientais (SANTOS; PONTES, 2022). No último século, a temperatura do planeta já subiu 0,7°C e, para os próximos cem anos, a projeção do IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change é que possa haver um aumento entre 1,4°C e 5,8°C (IPCC, 2021).

Recentemente, diversos instrumentos foram desenvolvidos no intuito de descrever e quantificar tanto os efeitos diretos como os indiretos da apropriação humana sobre o meio ambiente, bem como os impactos decorrentes destes (ANDRADE et al., 2021). Com o propósito de promover a sustentabilidade das cadeias produtivas, tem-se empregado a utilização da determinação da pegada do carbono, que identifica atividades com maior potencial de emissão de GEE e

possibilita a definição de práticas de manejo que reduzam essas emissões (SANTOS et al., 2013).

As emissões de GEE são reportadas como pegada de carbono, em kg de CO<sub>2</sub> eq. O processo de obtenção do CO<sub>2</sub> eq, consiste na soma da quantidade emitida e fator de conversão de cada gás, de acordo o potencial de aquecimento global. Normalmente utiliza-se um horizonte de 100 anos, CO<sub>2</sub> =1, CH<sub>4</sub>=27,2 e N<sub>2</sub>O=273 (IPCC, 2021).

As variáveis que influenciam a pegada de C no nível da fazenda incluem o uso de fertilizantes minerais e orgânicos, pesticidas, uso de combustível fóssil para operações agrícolas e transporte e qualquer processamento na fazenda. (VAN-RIKXOORT et al., 2014).

Os estudos sobre a emissão de GEE advindos do setor agrícola, no Brasil, concentram-se, principalmente, em áreas como a pecuária (CERRI et al., 2016; Figueiredo et al., 2017), em que as pegadas de carbono variaram de 5,0 a 7,2 kg de CO<sub>2</sub> eq por kg<sup>-1</sup> de ganho de peso vivo. E grandes culturas, como o café (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2015), em que o inventário demonstrou que os principais GEE gerados na cafeicultura corresponderam a uma pegada de carbono 2,13 tCO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup>, feijão (CARMO et al., 2016), em que a pegada de carbono estimada por kg<sup>-1</sup> de feijão produzido no PI (0,301 kg CO<sub>2</sub> eq/kg<sup>-1</sup> entre outras. No Brasil há poucos trabalhos referentes à emissão de GEE e pegada de carbono na produção de cacau (SCHROT et al., 2016; IMAFLORA, 2019; HERNANDEZ et al., 2022), sendo necessária a realização de trabalhos que avaliem o impacto deste setor e proponha alternativas de sistemas mais eficientes e com menores emissões.

### **3.4 Aplicação prática do Cool Farm Tool no cálculo da Pegada de Carbono**

O Cool Farm Tool (CFT) é uma ferramenta de código aberto que integra vários modelos empíricos globalmente determinados em uma calculadora de emissões de GEE. Desenvolvido inicialmente em 2008, por meio de uma colaboração entre a Universidade de Aberdeen, o Sustainable Food Lab e a Unilever, o CFT passou por uma evolução significativa desde sua concepção em formato de planilha Excel até sua disponibilização online em 2012 (HILLIER et

al., 2011). Seu método de cálculo segue a abordagem recomendada pelo IPCC, garantindo robustez científica na medição dos gases (KUMAR et al., 2021).

A interface interativa do CFT facilita sua utilização, enquanto sua base científica sólida o torna amplamente adotado por pesquisadores, empresas e fornecedores na medição, gestão e redução das emissões de GEE, como parte dos esforços para mitigar as mudanças climáticas globais (ALMEIDA, 2023).

Além de calcular a pegada de carbono das culturas, o CFT também oferece estimativas da pegada hídrica e quantificação de perdas e desperdícios de alimentos. Com seções dedicadas a culturas, pecuária e avaliação da biodiversidade da fazenda, o CFT proporciona uma ampla gama de ferramentas para estimativa da pegada de carbono (CFT).

Na seção de culturas, o CFT oferece três subseções: "Todas as Culturas", "Específico para Batatas" e "Específico para o Arroz". Este estudo concentrou-se na aba "todas as culturas".

Na maioria das situações, as colheitas capturam uma quantidade inferior à biomassa total de uma cultura, resultando na permanência de biomassa residual no campo, tanto acima quanto abaixo do solo. Uma das características essenciais do CFT é sua capacidade de determinar a quantidade de resíduos acima do solo com base em observações diretas de campo e na experiência adquirida. Essa funcionalidade é fundamental, uma vez que a quantidade de resíduos varia consideravelmente, dependendo da cultura e do método de colheita empregado (HILLIER et al., 2011).

Os cálculos associados às emissões de fertilizantes minerais no CFT são fundamentados nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), abrangendo todas as atividades e emissões relevantes desde a aquisição da matéria-prima até a obtenção do produto. O software disponibiliza informações para fertilizantes predefinidos e apresenta um método adicional para estimar as emissões, utilizando a proporção de ingredientes e o local de produção como base (HILLIER et al., 2011).

As emissões oriundas da utilização de proteção de culturas são calculadas no CFT utilizando fatores de emissão provenientes do Banco de

Dados Mundial do Ciclo de Vida dos Alimentos, que abrange uma diversidade de fatores específicos para diferentes tipos de culturas agrícolas e categorias de proteção de culturas (NEMECEK et al., 2019).

Além disso, o CFT aborda as emissões relacionadas à energia e ao transporte, considerando toda a energia consumida para a produção agrícola, incluindo operações de campo, armazenamento e transporte. Para essas emissões, são consideradas diferentes fontes de energia e modos de transporte, garantindo uma avaliação abrangente dos impactos ambientais associados à produção agrícola (HILLIER et al., 2011).

O CFT é amplamente utilizado para estimar a pegada de carbono em vários setores da agropecuária. Originalmente desenvolvido para estimar a pegada de carbono de batatas (HAVERKORT; HILLIER, 2011), o software já foi aplicado para avaliar as emissões de GEE em sistemas de cultivo de milho e trigo sob diferentes doses de fertilizantes nitrogenados (KUMAR et al., 2021), além de explorar o potencial de redução de emissões na produção de ovos (VETTER et al., 2018) e para estimar a pegada de carbono de Sistemas Agroflorestais de cacau (SCHROT et al., 2016; VERVUURT et al., 2022), entre outros estudos. Sua aplicabilidade em diferentes contextos agrícolas, como evidencia a importância de ferramentas que pode ser adaptada a diversas culturas e sistemas, permitindo uma melhor gestão das emissões e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área**

O estudo foi conduzido em SAF cacau-seringueira localizados no município de Igrapiúna - Bahia (13°50'S 39°10'W), a 18 km do litoral, na região Sul da Bahia (Figura 1). Sete fazendas participaram deste estudo (Figura 2). As fazendas estudadas se destacaram pela sua diversidade de tamanhos, abrangendo uma extensa faixa que variou de 42,2 a 107,4 hectares de área de produção de SAF cacau-seringueira. Essa variação de dimensões ofereceu uma ampla possibilidade de contextos e condições para a análise, permitindo uma compreensão mais abrangente dos diferentes aspectos relacionados à implementação e gestão desses sistemas agrícolas.

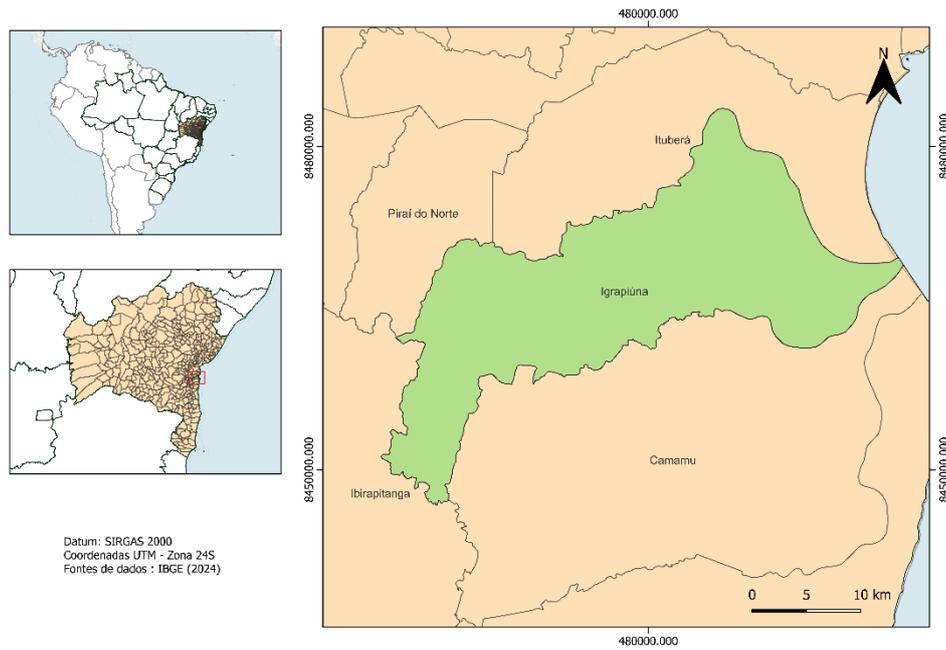


Figura 1. Localização do município

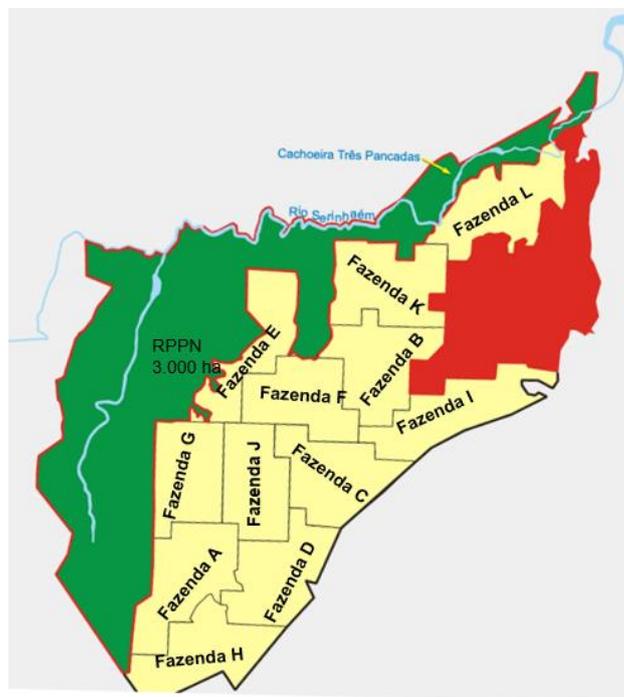


Figura 2. Localização das fazendas.

Todas as informações relacionadas à produção agrícola, práticas de adubação, implementação de medidas de proteção e consumo energético

referem-se ao ano de 2022. Os SAF estudados possuem idades diferentes de inserção para cada componente do sistema (seringueira e cacau) e apresentam diferentes arranjos. A seguir, a descrição das Fazendas que participaram desse estudo:

**Tabela 1.** Informações gerais por Fazenda sobre o SAF cacau-seringueira.

<b>Detalhes dos SAF cacau-seringueira</b>	<b>Fazenda A</b>	<b>Fazenda B</b>	<b>Fazenda C</b>	<b>Fazenda D</b>	<b>Fazenda E</b>	<b>Fazenda F</b>	<b>Fazenda G</b>
Espaçamento seringueira (m)	3x2,5x17						
Espaçamento cacau (m)	3x3	3x3	3x3	3x3	3x3	8 x 2,5	3x3
Idade da seringueira (anos)	48 a 14	17 a 15	47 a 17	28 a 11	47 a 12	48 a 8	48 a 17
Idade do cacau (anos)	17 a 14	17 a 15	17 a 16	16 a 11	17 a 12	17 a 7	17 a 16
Área de cultivo (ha)	76,98	42,2	71	107,4	92,19	80	61,2
Produção amêndoas de cacau em kg	50.903,4	18.600	15.355,2	86.607,4	54.688,5	53.338	10.667
Produção seringueira em kg	40.149,92	18.000	93.931,7	55.686,0	0	118.778	52.569,4
Montante total colhido (amêndoas e borracha em kg)	91.053,32	36.600	109.286,	142.293,	54.688,5	172.116	63.236,4
Quantidade de NPK em kg/ha	600	300	819	400	400	600	400
Quantidade de Inseticida em kg/ha	0	1,5	0	0,18	0	0,109	0
Quantidade de Herbicida em kg/ha	0	1,5	1,7	1	5,4	1,7	1,7
Quantidade de Fungicida em kg/ha	0	3	0	1,5	0	1,09	0
Quantidade de Diesel em l	800	800	600	720	1200	1200	800
Quantidade de gasolina em l	250	300	300	360	1200	1200	800
Quantidade de Gás de cozinha em kg	0	0	0	0	0	52	0
Energia elétrica em Kw/h	0	700	0	360	0	960	0

## **4.2 Cálculo da pegada de carbono**

A pegada de carbono foi estimada separadamente para cada fazenda utilizando a calculadora de gases de efeito estufa Cool Farm Tool (CFT). O CFT é uma ferramenta baseada em Excel desenvolvida por Hillier et al. (2011), que estima as emissões de GEE da produção agrícola, utilizando equações empíricas e as abordagens Tier 1 e 2 do IPCC. Este software estima as emissões de GEE, com base nos recursos utilizados (agroquímicos e métodos de manejo), convertendo essas emissões em equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq) por unidade de produto (amêndoas de cacau e borracha) usando os potenciais de aquecimento global (PAG) empregando um horizonte de 100 anos da seguinte forma: CO<sub>2</sub> (1), CH<sub>4</sub> (27,9) e N<sub>2</sub>O (273) (FORSTER et al., 2007).

A pegada de carbono foi determinada no nível da fazenda, abrangendo exclusivamente as emissões diretamente associadas aos SAF cacau-seringueira, sem incluir as emissões relacionadas a outras culturas cultivadas nas fazendas.

Para estimar a pegada de carbono realizou-se uma entrevista, de aproximadamente 1 hora, com base em um questionário (Apêndice A) com o proprietário ou gerente de cada Fazenda. O questionário foi elaborado baseado no CFT, além disso, para dar transparência e confiança, bem como proteção legal, os entrevistados assinaram um termo de consentimento (Apêndice B), contendo Identificação da pesquisa e do entrevistador, objetivos da pesquisa, riscos e benefícios.

Abaixo serão listadas as informações solicitadas durante a entrevista para cálculo da pegada de carbono:

### **4.2.1 Gestão de resíduos**

#### **4.2.1.1 Estimativa da Biomassa residual**

No escopo da pesquisa, foram considerados como resíduos a serapilheira, a casca de cacau, frutos infectados e resíduos de poda que permanecem no campo. Para calcular a quantidade de resíduo, o CFT fornece padrões específicos para culturas com base na entrada de rendimento, que foi utilizado.

Para estimar a quantidade de resíduos o CFT utiliza as seguintes equações:

$$R_{\text{solo}} = \text{Rendimento Fresco}_{(T)} * F_{\text{matéria seca}} * R_{AG(T)}$$

$$R_{\text{Subterrâneo}} = R_{\text{acima do solo}} * R_{S(T)}$$

$$R_{\text{total}} = R_{\text{abaixo}} + R_{\text{acima}}$$

Onde:

$R_{\text{solo}}$ : Quantidade de resíduos acima do solo em kg;

$\text{Rendimento Fresco}_{(T)}$ : Rendimento fresco colhido para o SAF cacau-seringueira, (kg de peso fresco);

$F_{\text{matéria seca}}$ : Fração de matéria seca do SAF cacau-seringueira (kg MS/kg<sup>-1</sup> peso fresco);

$R_{AG(T)}$ : Relação entre a matéria seca dos resíduos acima do solo e o rendimento colhido para o SAF cacau-seringueira de (IPCC, 2019);

$R_{S(T)}$ : Relação entre biomassa radicular abaixo do solo e biomassa aérea acima do solo para o SAF cacau-seringueira (IPCC, 2019);

$R_{\text{total}}$ : Quantidade total de resíduos em kg;

$R_{\text{abaixo}}$ : Quantidade de resíduos subterrâneos em kg;

$R_{\text{acima}}$ : Quantidade de resíduos acima do solo em kg.

#### **4.2.1.2 Emissões oriundas do Gerenciamento dos resíduos**

Todos os proprietários adotam práticas semelhantes para o manejo dos resíduos agrícolas, que incluem deixá-los no campo, incorporá-los ao solo ou utilizá-los como cobertura morta. Esses resíduos contribuem para as emissões de nitrogênio. Para quantificação do nitrogênio adicionado, o CFT soma os teores de resíduos acima e abaixo do solo, pela aplicação do fator de emissão correspondente, a fim de calcular as emissões diretas e indiretas. Embora originadas do solo, essas emissões são registradas na seção de gestão de resíduos da ferramenta, devido à sua origem nos resíduos. A seguir as equações utilizadas:

$$N_{\text{resíduo}} = R_{\text{acima}} * N_{\text{AG(T)}} + R_{\text{abaixo}} * N_{\text{BG(T)}}$$

$$L_{\text{resíduo, N2O-solo}} = ((N_{\text{resíduo}} * EF_1) + (N_{\text{resíduo}} * EF_5 * \text{Frac}_{\text{Lixiviado(H)}})) * \frac{44}{28}$$

$$L_{\text{resíduo}} = L_{\text{resíduo, N2O-solo}} * GWP_{\text{N2O}}$$

Onde:

$L_{\text{resíduo, N2O-solo}}$ : N<sub>2</sub>O emissões de N em resíduos de culturas devolvidos ao solo (kg N<sub>2</sub>O);

$N_{\text{resíduo}}$ : Teor de nitrogênio em resíduos kg;

$R_{\text{acima}}$ : Quantidade de resíduos acima do solo em kg;

$N_{\text{AG(T)}}$ : Fração de N em resíduos acima do solo;

$R_{\text{abaixo}}$ : Quantidade de resíduos subterrâneos em kg;

$N_{\text{BG(T)}}$ : Fração de N em resíduos subterrâneos;

$EF_1$ : N<sub>2</sub>O direto, fator de emissão, 0,006 em climas úmidos e 0,005 em climas secos;

$EF_5$ : N<sub>2</sub>O indireto, fator de emissão por lixiviação e escoamento de N, 0,011 em climas úmidos e NA em climas secos;

$\text{Frac}_{\text{Lixiviado -(H)}}$ : fração de todo o N adicionado/mineralizado em solos manejados em regiões onde ocorre lixiviação/escorrência que é perdida por lixiviação e escoamento, 0,24 em climas úmidos e 0 em climas secos;

$GWP_{\text{N2O}}$ : Potencial de aquecimento global para N<sub>2</sub>O em kg de CO<sub>2</sub>eq;

$\frac{44}{28}$ : Razão de peso molecular (N<sub>2</sub>O N<sup>-1</sup>).

## 4.2.2 Emissões oriundas de fertilizantes

### 4.2.2.1 Emissões da produção de fertilizantes

Dado que nenhuma das opções predefinidas na seção de fertilizantes, corresponde a formulação de fertilizantes em uso pelos proprietários, o CFT disponibiliza um método adicional para estimar as emissões decorrentes da produção desses fertilizantes. Este método leva em consideração a composição

específica dos ingredientes e a região de produção. A metodologia é formalizada por meio de uma equação específica, que permite uma análise precisa das emissões associadas à produção de fertilizantes, a seguir a equação.

$$EF_{\text{fertilizante personalizado}} = EF_i + \sum_j P_j * EF_{\text{ingrediente}}$$

$EF_{\text{fertilizante personalizado}}$ : Fator de emissão para produção de fertilizantes em kg de  $CO_2eq/kg^{-1}$ ;

$EF_i$ : Fator geral de emissões de produção para compor o seu próprio em kg de  $CO_2eq/kg^{-1}$ ;

$P_j$ : Proporção de ingredientes;

$EF_{\text{ingrediente}}$ : Fator de emissão para produção de ingredientes em kg de  $CO_2e/kg^{-1}$ , esses fatores são definidos por região.

As emissões totais de GEE provenientes da produção de fertilizantes são dadas por:

$$L_{\text{produção de fertilizante}} = \sum_i Ri * EF_{\text{fertilizante}}$$

Onde:

$L_{\text{produção de fertilizante}}$ : Emissões para a produção de fertilizantes em kg de  $CO_2eq$ ;

$\sum_i Ri$ : Taxa de aplicação do tipo de fertilizante em kg;

$EF_{\text{fertilizante}}$ : Fator de emissões do tipo de fertilizante em kg de  $CO_2eq/kg^{-1}$ .

#### 4.2.2.2 Emissões da aplicação de fertilizantes

Para estimar as emissões diretas resultantes do uso de fertilizantes, o CFT adota a abordagem Tier 1 proposta pelo IPCC (2019). Essa abordagem é baseada na equação a seguir:

$$L_{N_2O\text{direto}} = \sum n(A_n * EF_n) \frac{44}{28}$$

Onde:

$L_{N_2O\text{direto}}$ : Emissões diretas em Kg  $N_2O$ ;

$A_n$ : Aplicação de N via fertilizante sintético ou esterco em kg de N.

$EF_n$ : Fator de emissão para emissões diretas da aplicação de nitrogênio, que irá variar dependendo do tipo de fertilizante e da definição úmido/seco.

A aplicação de nitrogênio também desencadeia emissões indiretas por meio de processos como lixiviação e volatilização. As emissões indiretas provocadas pela aplicação de fertilizantes são modeladas com base na metodologia estabelecida pelo IPCC (2019), baseada nas equações a seguir:

$$LN_2O_{\text{lixiviado}} = N_{\text{total}} * \text{Frac}_{\text{Lixiviado(H)}} * EF_5 * \frac{44}{28}$$

$$LN_2O_{\text{volatilizado}} = \sum n(A_n * F_{\text{volatilizado, n}} * EF_4) * \frac{44}{28}$$

$$LN_2O_{\text{indireto}} = LN_2O_{\text{lixiviado}} + LN_2O_{\text{volatilizado}}$$

Onde:

$LN_2O_{\text{lixiviado}}$ : Emissões resultantes da lixiviação em kg  $N_2O$ ;

$N_{\text{total}}$ = Total aplicado de N via fertilizantes sintéticos ou esterco em kg N;

$\text{Frac}_{\text{Lixiviado(H)}}$ = Fator de lixiviação, 0,24 em climas úmidos, 0 em climas secos (IPCC, 2019);

$EF_5$ : Fator de emissão para lixiviação/escoamento, 0,011 (IPCC, 2019);

$\frac{44}{28}$ = Razão de peso molecular ( $N_2O$   $N^{-1}$ ).

$LN_2O_{\text{volatilizado}}$ : Emissões resultantes da volatilização em kg  $N_2O$ .

$A_n$ : Nitrogênio total aplicado para fertilizante em kg N;

$F_{\text{volatilizado, n}}$ : Fator de volatilização para fertilizante n;

$EF_4$ : Fator de emissão para volatilização e redeposição, 0,014 em climas úmidos e 0,005 em climas secos (IPCC 2019);

$LN_2O_{\text{indireto}}$ : Emissões indiretas em kg  $N_2O$ .

#### 4.2.3 Emissões oriundas da utilização de proteção de culturas.

Para estimar as emissões resultantes da aplicação de produtos fitossanitários, o CFT emprega a equação a seguir:

$$L_{\text{pesticida}} = A * R_{\text{aplicado}} * A_{\text{fração}} * EF_{\text{produto fitossanitário}}$$

Onde:

$L_{\text{pesticida}}$ : Emissões de pesticidas em kg de  $CO_2eq$ ;

A: Area em ha;

R<sub>aplicado</sub>: Taxa de aplicação em kg/ha<sup>-1</sup>;

A<sub>fração</sub>: Fração do Ingrediente ativo;

EF<sub>pesticida</sub>: Fator de emissões em kg de CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>-1</sup>.

#### 4.2.4 Emissões oriundas da utilização de Combustível e Energia

$$L_{\text{combustível e energia}} = \sum_i C_{\text{combustível e energia}} * EF_{\text{combustível e energia}}$$

Onde:

L<sub>combustível e energia</sub>: Emissões provenientes de máquinas e uso de energia;

C<sub>combustível e energia</sub>: Consumo de combustível ou energia em l ou kWh;

EF<sub>combustível e energia</sub>: Fator de emissão de combustível ou energia em kg de CO<sub>2</sub>eq/l<sup>-1</sup> ou kg de CO<sub>2</sub>eq kWh<sup>-1</sup>.

#### 4.2.5 Emissões oriundas de transporte

$$L_{\text{transporte}} = EF_{\text{veículo}} * D * M$$

Onde:

L<sub>transporte</sub>: Emissões do transporte em kg CO<sub>2</sub>eq;

EF<sub>veículo</sub>: Fator de emissão para transporte específico para o tipo de veículo em kg de CO<sub>2</sub>eq/ t<sup>1</sup>/km<sup>-1</sup>;

D: Distância em km;

M: Massa transportada.

#### 4.2.6 Estoque de Carbono

O CFT considera três tipos de estoque de carbono: o carbono orgânico do solo (COS) a 30 cm de profundidade, o carbono armazenado na biomassa das florestas e o carbono em plantas perenes e sistemas agroflorestais.

Para calcular o estoque de carbono no solo o CFT, utiliza a seguinte fórmula:

$$\text{Estoque} = \frac{\text{Estoque} + 20 \text{ anos} - \text{Estoque}}{20}$$

Onde:

Estoque: Mudança anual no estoque de carbono em 20 anos, em kg de C/ha<sup>-1</sup>;

Estoque+20<sub>anos</sub>: estoque de C orgânico do solo mineral no último ano de um período de inventário, em toneladas C;

Estoque: estoque de C orgânico do solo mineral, no início do período de inventário, toneladas C.

As mudanças nos estoques totais de carbono da biomassa nas florestas são determinadas como IPCC (2006):

$$C_{\text{floresta}} = \Delta C_G - \Delta C_P$$

Onde:

C<sub>floresta</sub>: Mudança nos estoques de carbono da biomassa florestal em t/C/ano<sup>-1</sup>;

ΔC<sub>G</sub>: Ganho em biomassa C dentro do período contábil anual t/C/ano<sup>-1</sup>;

ΔC<sub>P</sub>: Perda de biomassa C no período contábil anual t/C/ano<sup>-1</sup>.

O armazenamento de carbono/ha e o acúmulo anual são calculados no CFT, com base no número de árvores/ha e no diâmetro à altura do peito (DAP). Como este último não foi obtido para cada respondente, o diâmetro da seringueira foi estimado com base na idade da árvore (x), utilizando uma função obtida de Onyekwelu (2007):

$$(1) \text{ DAP (cm)} = 21,648 \times \ln(x) - 18,705$$

Onde x é a idade da árvore em anos. Quanto ao DAP do cacau, foram utilizados dados provenientes de um inventário realizado nas áreas em 2019.

Para calcular o estoque de carbono na biomassa em plantas perenes e sistemas agroflorestais, o CFT utiliza a seguinte equação:

$$G_{\text{árvore}} = \exp(-2,289 + 2,659 \cdot \ln \text{DBH} - 0,021 \cdot (\ln \text{DBH})^2)$$

Onde:

DBH: Diâmetro do tronco à altura do peito m;

A mudança no carbono proveniente desses estoques é convertida em um valor de emissões utilizando as equações:

$$L_{\text{Cestoque}} = (C_{\text{solo}} + C_{\text{floresta}}) \cdot \frac{44}{28}$$

$$L_{\text{Cestoque}} = (\Delta \text{SOC} + C_{\text{floresta}} + G_{\text{árvore}}) \cdot \frac{44}{28}$$

### **4.3 Análise estatística**

A análise estatística foi conduzida utilizando o software R Studio. Inicialmente, foram realizadas análises descritivas para caracterizar as variáveis estudadas, incluindo medidas de tendência central (média) e dispersão (desvio padrão e intervalo interquartil). Em seguida, para investigar a relação entre o rendimento de cacau, a intensidade de uso de fertilizantes, as pegadas de carbono oriundas do tipo de manejo e a pegada de carbono dos SAFs cacau-seringueira, montou-se a matriz de correlação de Pearson utilizando o ambiente R (R CORE TEAM, 2022).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análise do Rendimento, Pegada de Carbono e Estoque de Carbono**

#### **5.1.1 Análise do Rendimento**

A produção média de amêndoas de cacau foi de 493,6 kg/ha<sup>-1</sup> (Tabela 2), representa um avanço significativo em relação a pesquisas anteriores. Souza Filho et al. (2021) encontraram uma produtividade média de 262,5 kg/ha<sup>-1</sup> em 83 fazendas de cacau na Bahia, em que diversos tipos de sistemas agroflorestais (SAFs), como cacau-cabruca, cacau-eritrina, cacau-seringueira, foram empregados. Os resultados obtidos também se encontram na faixa de 177 a 909 kg/ha<sup>-1</sup>, relatada por Gateau et al. (2012), para cacau na Bahia, e superam a média nacional de 464 kg/ha, conforme dados do IBGE (2022).

Este desempenho positivo pode ser atribuído, em parte, ao manejo adequado e à integração de espécies perenes, como a seringueira nos SAFs, o que contribui para melhorias nas condições edáficas, como a maior retenção de umidade e a mitigação de estresses ambientais, criando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento do cacau (SANTOS et al., 2020). Esses resultados sugerem que o manejo eficiente e a escolha de espécies complementares podem ter um papel importante na elevação da produtividade, sem comprometer a sustentabilidade ambiental, um ponto central para os SAFs.

**Tabela 2.** Rendimento médio de cacau e seringueira, estoque de carbono e emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas aos insumos de produção em Sistemas Agroflorestais (SAFs) de cacau e seringueira em 7 fazendas no sul da Bahia.

Variável	Média	Desvio Padrão	Intervalos
Produção Cacau (kg ha <sup>-1</sup> )	493,6	261,7	(20.80) - (1126.30)
Produção Seringueira (kg ha <sup>-1</sup> )	861,0	517,2	(394.74) – (2777.78)
Gerenciamento de resíduos (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	0,38	0,30	(0.03) - (1.92)
Produção de fertilizantes (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	0,85	1,18	(0.06) – (6.26)
Fertilizantes no solo (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	1,37	1,84	(0.09) – (9.76)
Proteção de culturas (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	0,04	0,13	(0) – (0.68)
Uso de energia no campo (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	0,66	0,95	(0) – (4.09)
Transporte (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	0,19	0,37	(0) - (1.68)
Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> eq kg <sup>-1</sup> )	3,3	3,7	(0.26) – (19.91)
Estoque de carbono (Mg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> )	-50,16	16,68	(-89.4) – (-17.18)

No entanto, ao comparar essa produtividade com a do estado do Pará, o maior produtor nacional, cuja média é de 955 kg/ha (IBGE, 2022), e com a produtividade média do cacau na Colômbia, que varia de 671 a 1.000 kg/ha (Ortiz-Rodrigues et al., 2014), observa-se que o resultado é relativamente inferior. Essa menor produtividade pode ser atribuída a uma série de fatores, incluindo variações regionais, condições climáticas adversas e a incidência de doenças como a vassoura-de-bruxa (*Moniliophthora perniciosa*) (EFRAIM, 2009). Além disso, práticas de manejo agrícola inadequadas, características edafoclimáticas desfavoráveis e menor, investimento em tecnologia e infraestrutura afetam diretamente o rendimento. Outros fatores determinantes incluem o tamanho das propriedades, a disponibilidade de mão de obra qualificada, e o capital disponível para investimentos (SUH e MOLUA, 2022). Aspectos como políticas públicas, acesso a mercados e a flutuação nos preços dos insumos agrícolas também desempenham um papel crucial na determinação da produtividade.

O rendimento médio da seringueira foi de 861 kg/ha (Tabela 2), valor ligeiramente inferior à média estadual de 987 kg/ha<sup>-1</sup> conforme dados do IBGE (2022). Esses resultados se alinham com as produtividades observadas na Indonésia, maior produtor mundial de borracha, onde as plantações comunitárias de borracha registram uma produtividade entre 700 e 900 kg/ha anualmente (SIMANJUNTAK; HARTAL, 2018). A diferença observada pode ser atribuída a fatores como variações climáticas, práticas de manejo, tipos de clones de seringueira. Outros elementos, como disponibilidade de água, fertilidade do solo, incidência de pragas e doenças específicas da cultura além de políticas públicas de incentivo ao setor, também exercem um impacto considerável sobre os rendimentos das plantações.

Embora a maioria das propriedades tenha fornecido dados sobre a produção de amêndoas de cacau e borracha, esses valores poderiam ser significativamente maiores para ambas as culturas. Durante as entrevistas, diversos produtores relataram que a escassez de mão de obra na região impede a plena colheita da produção. Além disso, a incidência da crosta-negra (*Phyllachora huberi* P. Henn.) nas plantações de seringueira em Igrapiúna e Ituberá foi apontado como um fator crítico, provocando severas epidemias, que resultaram no desfolhamento extensivo das árvores. Essas epidemias atingiram tal intensidade que inviabilizaram a exploração de áreas inteiras, levando à queda da produção e da renda. Esse cenário, foi agravado pela migração de seringueiros para o Estado de São Paulo, o que reduziu ainda mais a disponibilidade de mão de obra qualificada, causando um declínio na oferta de borracha para a agroindústria (VIRGENS FILHO et al., 2022).

### **5.1.2 Emissões oriundas do gerenciamento de resíduos**

Os SAFs de cacau-seringueira analisados neste estudo apresentam uma significativa produção de resíduos, que, se bem manejados, podem oferecer não apenas uma redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), mas também contribuir para a formação de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes. Esse processo resulta em um solo mais fértil, capaz de reduzir a necessidade de adubação química, e, conseqüentemente, os custos associados a ela.

Este estudo considerou as emissões de GEE provenientes do gerenciamento de resíduos, principalmente pela permanência destes no solo, uma prática adotada por todas as fazendas estudadas. Quando resíduos, como folhas e cascas, são deixados no campo, incorporados ou usados como cobertura morta, o nitrogênio presente contribui para o acúmulo de nutrientes no solo. Embora isso resulte em alguma emissão de GEE, esse processo também estimula a ciclagem de nutrientes, melhorando a qualidade do solo e reduzindo a dependência de fertilizantes comerciais (HILLIER et al., 2011).

As fazendas apresentaram emissões de CO<sub>2</sub>eq/kg relativamente baixas, com uma média de 0,38 kg CO<sub>2</sub>eq/kg, representando 11,51% das emissões totais (Tabela 2). Esses valores são inferiores aos relatados por Ortiz-Rodrigues et al. (2016) para sistemas de cacau na Colômbia, onde as emissões de GEE chegaram a 7,69 kg CO<sub>2</sub>eq/kg, o que destaca a eficiência do manejo de resíduos nas propriedades analisadas. Fatores como o clima, tipo de solo e práticas agrícolas desempenham um papel crucial na variação dessas emissões, tornando o manejo adequado dos resíduos fundamental para mitigar os impactos ambientais.

Embora os resultados deste estudo tenham sido comparados com os de Ortiz-Rodrigues et al. (2016), é importante ressaltar que as metodologias empregadas para quantificar a pegada de carbono diferem entre os estudos. Ortiz-Rodrigues et al. (2016) utilizaram uma abordagem metodológica distinta, considerando fatores específicos da região e sistema produtivo avaliado, o que pode ter influenciado os valores de emissões relatados. Essas diferenças metodológicas devem ser levadas em consideração ao comparar os resultados.

Ainda, estudos como os de Chepote et al. (2003) mostram que a compostagem de resíduos, como as cascas de cacau, é uma solução promissora. A compostagem não só recicla macro e micronutrientes para as plantas, mas também reduz as emissões de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. A incorporação de compostos orgânicos ao solo melhora a estrutura do solo e a retenção de água, além de promover o crescimento das plantas e aumentar a produção, como observado por Chepote et al. (2005).

Adicionalmente, a transformação de resíduos em biochar, como proposto por Villasana et al. (2023), pode ser uma estratégia interessante para reduzir a emissão de GEE e melhorar a sorção de nutrientes essenciais no solo. Essa técnica tem demonstrado potencial em mitigar emissões e melhorar a qualidade do solo de forma sustentável.

Por fim, os sistemas agroflorestais estudados apresentam uma grande oportunidade para transformar resíduos agrícolas em recursos valiosos, promovendo a sustentabilidade, a redução de custos com insumos agrícolas e, principalmente, a mitigação das emissões de GEE, assegurando uma produção mais eficiente e ambientalmente amigável.

### **5.1.3 Emissões oriundas da produção e aplicação de fertilizantes**

A análise das emissões oriundas da produção e aplicação de fertilizantes destaca a relevância desse fator na pegada de carbono nas fazendas estudadas. As emissões associadas à produção de fertilizantes são consideradas indiretas, originadas no processo de fabricação, enquanto as emissões derivadas da aplicação são diretas, resultantes do uso no solo. A aplicação de fertilizantes no solo foi a principal variável responsável pelas emissões de GEE (Tabela 2). Os valores observados nas fazendas, com médias de 0,85 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg para a produção de fertilizantes e 1,37 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>-1</sup> para a aplicação, contrastam com estudos anteriores, como o de Schroth et al. (2016), que reportaram emissões menores, em torno de 0,24 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg em sistemas de cacau-cabruca no sul da Bahia. Além disso, há uma discrepância em relação aos resultados de Vervuurt et al. (2022) na Costa do Marfim, onde a contribuição dos fertilizantes para as emissões de GEE em SAF cacau foi significativamente reduzida (de 3,4 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg) após a adoção de boas práticas de manejo, como a combinação de adubação orgânica e sintética e o uso de árvores de sombra.

A discrepância nos resultados pode ser atribuída ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados nas fazendas, que variou de 300 a 818 kg de NPK/ha· um valor superior à recomendação regional de 270 kg de NPK/ha<sup>-1</sup> (CHEPOTE et al., 2012). Esse uso excessivo pode indicar uma falta de

otimização desses recursos, resultando em um impacto significativo nas emissões de GEE.

É importante ressaltar que a aplicação excessiva de fertilizantes, além de não aumentar significativamente a produtividade, pode gerar desperdícios e contribuir para o aumento das emissões. Tasca et al. (2017) e Vervuurt et al. (2022) reforçam a importância de otimizar o uso desses insumos, promovendo um equilíbrio entre práticas agrícolas eficientes e sustentabilidade ambiental.

Além disso, a aplicação de fertilizantes em quantidades superiores a 500 kg/ha não resultou em rendimentos significativamente mais elevados, embora seja uma correlação positiva moderada (Tabela 3). Isso sugere que níveis elevados de NPK não estão necessariamente associados a maiores rendimentos, apontando para uma possível ineficiência no uso de fertilizantes. Em contraste, Vervuurt et al. (2022) encontraram uma correlação negativa fraca entre o uso de fertilizantes e a produtividade, indicando que o uso excessivo pode, na verdade, prejudicar o rendimento das culturas. Por sua vez, Schroth et al. (2016) mostraram que a aplicação moderada de fertilizantes (até 150 kg/ha<sup>-1</sup>) teve um impacto positivo significativo na produtividade, com uma correlação de  $r = 0,47$  ( $p < 0,001$ ). Esses resultados indicam que, enquanto doses moderadas de fertilizantes podem aumentar a produtividade, o uso excessivo pode resultar em desperdício de recursos, perdas econômicas e aumento das emissões de GEE sem benefícios proporcionais na produção.

**Tabela 3.** Matriz de correlação linear simples do estoque de carbono e emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas aos insumos de produção em Sistemas Agroflorestais (SAFs) de cacau e seringueira em 7 fazendas no sul da Bahia.

Correlação	NPK	Rendimento SAF	Gerenciamento Resíduos	Produção de Fertilizantes	Fertilizante no solo	Proteção de Culturas	Energia no Campo	Pegada de Carbono	Estoque Carbono
NPK	1,0000	-	-	-	-	-	-	-	-
Rendimento SAF	0,5941	1,0000	-	-	-	-	-	-	-
Gerenciamento Resíduos	-0,4474	-0,0117	1,0000	-	-	-	-	-	-
Produção de Fertilizantes	-0,4332	-0,0280	0,9798**	1,0000	-	-	-	-	-
Fertilizante no solo	-0,4130	-0,0148	0,9767**	0,9993**	1,0000	-	-	-	-
Proteção de Culturas	-0,4433	-0,7756*	0,0305	0,1318	0,1364	1,0000	-	-	-
Energia no Campo	-0,7355	-0,2137	0,2656	0,2777	0,2485	0,6904	1,0000	-	-
Pegada de Carbono	-0,5286	-0,0701	0,9681**	0,9900**	0,9852**	0,5446	0,6253	1,0000	-
Estoque Carbono	-0,2962	-0,2072	0,4648	0,3031	0,2893	-0,9063**	-0,6765	-0,4649	1,0000

\*\* = significativo a 0,1% de probabilidade.

Além disso, Schroth et al. (2016) identificaram uma correlação positiva entre rendimento e as emissões associadas ao uso de insumos, algo que não se confirmou em nosso estudo (Tabela 3), assim como também foi observado por Vervuurt et al. (2022). Schroth et al (2016), que concluíram que altos rendimentos de cacau ( $570 \text{ kg/ha}^{-1}$ ) poderiam ser alcançados com baixas emissões associadas aos insumos ( $0,25 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ ). No entanto, essa conclusão não reflete os resultados obtidos nas fazendas analisadas, em que a utilização de fertilizantes foi identificada como a principal fonte de emissões, contribuindo de

maneira mais significativa para a pegada de carbono do que para o aumento da produtividade.

Esses resultados ressaltam a importância de um manejo equilibrado de insumos, evidenciando que a sustentabilidade da produção de cacau não depende apenas do aumento da fertilização, mas também da eficiência na utilização desses recursos. O uso excessivo de fertilizantes nitrogenados pode afetar negativamente as comunidades microbianas do solo, impactando sua fertilidade e o crescimento das plantas. Estudos indicam que a fertilização nitrogenada excessiva pode diminuir a diversidade microbiana do solo (ZHANG et al., 2021; SINGH, 2018), alterar a composição e diversidade bacteriana (YANG et al., 2022) e reduzir a abundância de grupos microbianos funcionais. Além disso, a aplicação excessiva de nitrogênio pode enfraquecer a ligação entre o teor de carbono do solo e a diversidade microbiana, prejudicando serviços ecossistêmicos como a mineralização e a nitrificação do nitrogênio (YANG et al., 2022). Esse desequilíbrio compromete a resiliência dos solos em longo prazo e pode resultar em perdas de produtividade, além de aumentar as emissões de gases de efeito estufa.

As emissões relacionadas à produção de fertilizantes e o gerenciamento de resíduos apresentaram uma correlação significativa e forte (Tabela 3), bem como entre as emissões do fertilizante no solo e o gerenciamento de resíduos (Tabela 3). Além disso, as emissões derivadas da produção de fertilizantes mostraram uma correlação extremamente alta com as emissões oriundas do fertilizante no solo (Tabela 3). Essas relações destacam a interdependência entre essas práticas de manejo e reforçam a necessidade de abordagens integradas. A otimização simultânea do gerenciamento de resíduos e da aplicação de fertilizantes pode ser particularmente eficaz na redução das emissões de GEE, contribuindo para a sustentabilidade e aumentando a resiliência desses sistemas. Ao adotar práticas mais eficientes e equilibradas, as fazendas podem reduzir sua pegada de carbono sem comprometer a produtividade agrícola.

Adotar métodos planejados de compostagem, em vez de descartar cascas de cacau como fertilizante, pode reduzir as emissões de metano e de GEE em aproximadamente 75%, resultando em uma diminuição para 2,59 kg

CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>-1</sup> de cacau (HERNANDEZ et al., 2022). Além disso, a aplicação adequada de fertilizantes nitrogenados também pode contribuir para a reduzir os impactos ambientais, diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub>. Quando combinadas, essas práticas reduziram a pegada de carbono do cacau produzido no Pará (Brasil) para 2,01 kg CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>-1</sup> de cacau, representando uma redução total de cerca de 81% (HERNANDEZ et al., 2022).

O manejo orgânico em SAFs de cacau tem mostrado um impacto positivo na produção, proporcionando um retorno de nutrientes comparável aos fertilizantes sintéticos. A serapilheira, que se acumula no solo, desempenha um papel essencial na ciclagem de macro e micronutrientes, como fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e micronutrientes como manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), zinco (Zn) e molibdênio (Mo), promovendo a fertilidade do solo e apoiando a produtividade. Estudos demonstram que a manutenção adequada da serapilheira reforça o potencial desses sistemas para uma produção sustentável de cacau (ASIGBAASE et al., 2021).

A serapilheira, desempenha é fundamental na conexão entre a vegetação e o solo, devolvendo nutrientes e sustentando processos ecológicos essenciais. Pesquisas de Fontes et al. (2014) em SAFs de cacau demonstraram que a produção média anual de serapilheira variou de 4,6 a 8,5 Mg/ha/ano, com uma quantidade acumulada varando de 7,7 a 16,8 Mg/ha<sup>-1</sup>, resultando em um balanço positivo de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) em todos os SAF estudados. Esses dados ressaltam a significativa capacidade produtiva dessas áreas. Pereira et al. (2023) investigaram a decomposição da serapilheira e a liberação de nutrientes em diferentes sistemas de uso da terra no semiárido brasileiro e encontraram uma produção média de 35,04 Mg/ha/ano em SAF de cacau.

Além disso, o padrão de deposição de serapilheira é essencial para a regular a ciclagem de nutrientes, a fertilidade do solo e a produtividade primária em sistemas produtivos de cacau (ASIGBAASE et al., 2021; MUHARDI et al., 2021). Uma abordagem promissora para o manejo integrado da fertilidade do solo é a utilização de fontes de fertilizantes orgânicos, como compostos de casca de cacau combinados com fertilizantes minerais. Estudos indicam que essa combinação não apenas melhora a fertilidade do solo e o rendimento das

culturas, mas também reduz a incidência de doenças fúngicas, promovendo uma produção mais sustentável (OGUNLADE e ORISAJO, 2020). Experimentos revelam que o uso de compostos de casca de cacau junto com fertilização NPK aumentou em 72,4% na produção de grãos de cacau secos, em comparação a 36,4% quando somente o composto ou NPK foram usados separadamente (OGUNLADE e ORISAJO, 2020).

Essa estratégia proporciona um manejo eficiente da fertilidade do solo e promove uma produção sustentável de cacau. Além disso, contribui para a destinação adequada dos resíduos de cacau, como a casca, e ajuda a reduzir as emissões associadas tanto ao uso de fertilizantes e ao gerenciamento de resíduos.

#### **5.1.4 Emissões oriundas da utilização de proteção de culturas**

O uso de proteção de culturas variou entre fazendas, com 85% adotando o controle químico de ervas daninhas principalmente por meio da aplicação de Roundup (glifosato), uma alternativa mais econômica em comparação com a capina manual, adotada pelos 15% restantes das fazendas. Além disso, inseticidas como Akito (Beta-cipermetrina), Delegate (Espinetoram) e Sivanto prime (Flupiradifurona) foram empregados para o controle de pulgões e tripes. A aplicação de produtos para o controle de formigas cortadeiras foi menos comum, assim como a aplicação de Cuprograb, Azimut e Triazol+Estrobilurina para o controle de doenças fúngicas.

A média de emissões associadas ao uso de pesticidas nas fazendas foi de 0,04 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>-1</sup> (Tabela 2), inferior à média de 0,08 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg encontrada por Schroth et al. (2016). Comparando com os resultados de Ortiz-Rodríguez et al. (2016), que observaram emissões de 0,62 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg, representando 9% das emissões totais na produção de cacau na Colômbia, a diferença é significativa. Essa discrepância pode ser atribuída a fatores como variações metodológicas, práticas agrícolas, tipos de pesticidas aplicados e condições climáticas e de solo. O uso elevado de herbicidas está relacionado à escassez de mão de obra, perpetuando um ciclo de dependência desses produtos. Para mitigar esse problema, é crucial adotar estratégias que integrem o controle químico de ervas daninhas com a valorização da mão de obra local, o

que pode reduzir o uso excessivo de herbicidas e, conseqüentemente as emissões associadas.

Ao considerar a valorização da mão de obra no cultivo do cacau e da seringueira, é fundamental não apenas abordar questões salariais, mas também assegurar condições de trabalho dignas, acesso à formação, segurança no trabalho e benefícios sociais (NICODEME et al., 2017). Além disso, é fundamental considerar o contexto familiar dos trabalhadores. Investimentos em educação e saúde para as famílias podem tornar a profissão agrícola mais viável e atraente, oferecendo aos trabalhadores perspectivas de um futuro melhor para seus filhos. Esse enfoque pode contribuir para reduzir o êxodo de mão de obra e promover uma força de trabalho mais estável e engajada (NICODEME et al., 2017).

A valorização da força de trabalho é essencial para o desenvolvimento sustentável e a longevidade dos indivíduos no setor agrícola. Políticas públicas e parcerias, desempenham um papel crucial na promoção e valorização dos trabalhadores rurais (ODAMAA et al., 2022). Quando os trabalhadores se sentem valorizados e percebem perspectivas de crescimento em suas comunidades, há uma maior tendência de permanência no campo. Além disso, políticas públicas que incentivem a profissionalização de jovens e adultos, assim como a experiência comunitária para os jovens rurais, têm um impacto positivo nas suas aspirações futuras e na preparação para a vida profissional (DELAHUNTY e HELLWIG, 2022).

Apesar de sua importância na produção de alimentos, a aplicação de produtos de proteção de culturas apresenta desafios significativos para a sustentabilidade, devido aos potenciais efeitos adversos na saúde humana e no ambiente. As principais preocupações estão nos impactos negativos na saúde pública e na preservação dos ecossistemas (LYKOGIANNI et al., 2021). Práticas inadequadas, como aplicação descontrolada, descarte incorreto, falta de uso de equipamentos de proteção, e a utilização de produtos ilegais e falsificados, podem levar à contaminação da água e do solo. Além de causar efeitos adversos na saúde humana e na segurança alimentar devido à exposição crônica a substâncias ativas lipossolúveis e bioacumulativas (ZIKANKUBA et al., 2019).

Esses fatores ressaltam a necessidade de abordagens mais responsáveis e regulamentadas no uso de defensivos agrícolas.

Estudos globais indicam que a aplicação excessiva de proteção de culturas tem um impacto negativo na diversidade e abundância da macrofauna do solo, essencial para a fertilidade do solo (BEAUMELLE et al., 2023). Um estudo conduzido pela CEPLAC, citado por Amorim et al. (2019), revelou que o biofungicida, derivado do fungo *Trichoderma stromaticum*, quando diluído em água e aplicado por pulverização, demonstrou eficácia na inibição da reprodução do fungo da Vassoura-de-bruxa. Esse biofungicida conseguiu inibir até 57% na copa e até 99% no solo, evidenciando sua eficácia no controle dessa importante doença do cacau.

Outro estudo conduzido por Oliveira et al. (2014) revelou que a eficiência média dos isolados de *Clonostachys* no controle de *Moniliophthora perniciosa* foi de aproximadamente 50%. Os autores destacaram que fungos desse gênero são agentes eficientes no biocontrole da vassoura-de-bruxa, principalmente por apresentarem habilidade para crescer endofiticamente em tecidos vegetais.

A valorização dos serviços ecossistêmicos é crucial para reduzir a dependência de produtos de proteção de culturas. SAFs de cacau oferecem diversos serviços ecossistêmicos, como controle de pragas e doenças, ciclagem de nutrientes e regulação climática (JAIMES-SUÁREZ et al., 2022). Otimizar esses serviços, por exemplo, criando microclimas para reduzir a suscetibilidade a doenças e melhorar a ciclagem de nutrientes por meio de espécies de árvores associadas, pode minimizar a necessidade de proteção química (JAIMES-SUÁREZ et al., 2022).

Para alcançar isso, é essencial aprimorar a conscientização dos produtores e seu conhecimento adaptativo em relação às variabilidades climáticas. Além disso, é necessário implementar estratégias que aumentem a resiliência e a eficiência no uso de recursos (SUH e MOLUA, 2022). A formulação de políticas públicas deve promover uma abordagem coordenada entre pesquisadores e agricultores, focando na adaptação climática e no financiamento sustentável. Dada a crescente vulnerabilidade do setor do cacau, é crucial desenvolver políticas que integrem práticas agrícolas sustentáveis,

considerando fatores institucionais e socioeconômicos para fortalecer a produção (SUH e MOLUA, 2022). Estudos realizados em sistemas agroflorestais de cacau no Peru demonstraram que aves e morcegos contribuem significativamente para o controle de pragas, como pulgões e cochonilhas, resultando em um aumento de 118% na produção de cacau e beneficiando economicamente os pequenos agricultores (OCAMPO-ARIZA et al., 2022).

#### **5.1.5 Emissões oriundas da utilização de energia e transporte**

Ao considerar o uso de energia e o transporte dos produtos no campo, observou-se que as emissões médias foram de 0,66 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg (Tabela 2) de produto para o uso de energia e 0,19 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg (Tabela 2) de produto para o transporte. Esses valores contrastam significativamente com os descritos por Schroth et al. (2016), que reportaram emissões de 0,04 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>1</sup> de produto para ambas as variáveis. Comparando com as emissões provenientes do transporte na produção do cacau na Colômbia que foram de 0,55 CO<sub>2</sub>eq/kg<sup>1</sup> (ORTIZ-RODRIGUEZ et al., 2016), nossos resultados são considerados baixos.

Essa disparidade considerável pode ser atribuída ao elevado consumo de combustíveis fósseis nas fazendas, que varia entre 600 e 1.200 litros/ano de Diesel e 250 a 1.200 litros/ano de gasolina. Nas fazendas estudadas por Schroth et al. (2016), o transporte era realizado por meio de mula, o que não impactou as emissões de carbono. É relevante destacar que nossos números englobam os combustíveis utilizados em diversos processos produtivos, como roçagem, transporte de matérias para o campo e transporte da colheita até o cocho. Além disso, o consumo de energia inclui não apenas combustíveis, mas também gás de cozinha e eletricidade, diferentemente dos estudos citados que consideraram apenas gasolina e diesel.

Apesar de existirem emissões significativas associadas ao uso de energia e transporte, não encontramos correlação entre nenhuma das variáveis analisadas e essas emissões. Isso sugere que outros fatores, além dos estudados, podem estar influenciando as emissões de GEE relacionadas a esses processos, indicando a necessidade de investigações mais aprofundadas para entender melhor a dinâmica envolvida.

Essa complexidade é corroborada por um estudo conduzido pelo Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola (IMAFLORA) em 2019, com produtores rurais em São Félix do Xingu, Pará, que constatou que, nas áreas de cultivo de cacau convencional, a principal fonte de emissão foi o uso de combustível fóssil, representando 52,3% das emissões. Nas áreas de cacau orgânico, essa fonte também predominou, representando 74,7% das emissões (IMAFLORA, 2019).

O uso predominante de combustíveis fósseis em atividades como transporte, embalagem e processos industriais resulta em emissões significativas. Por exemplo, as emissões associadas à produção de chocolate amargo na Indonésia alcançam 7,31 kg de CO<sub>2</sub>eq/kg (DIANAWATI et al., 2023). Esses resultados evidenciam a forte influência dos combustíveis fósseis nas emissões GEE associadas à produção de cacau, independentemente do sistema de cultivo. Isso ressalta a necessidade de medidas para reduzir o consumo desses combustíveis e promover práticas mais sustentáveis no setor agrícola (MIHARZA et al., 2023).

Investir em tecnologias mais eficientes, como o uso de energias renováveis e sistemas de transporte mais sustentáveis, pode ser uma abordagem importante para mitigar o impacto ambiental dessas atividades.

### **5.1.6 Pegada de carbono**

A pegada de carbono total associada aos SAFs cacau-seringueira analisados foi de 3,3 kg CO<sub>2</sub>eq kg (Tabela 2), um valor que se encontra dentro da faixa encontrada na literatura. Por exemplo, Vervuut et al. (2022) reportaram uma média de 1,47 kg CO<sub>2</sub>eq kg de cacau na Costa do Marfim, enquanto Hernandez et al. (2022) encontraram uma pegada de carbono para o cacau produzido no estado do Pará de 2,59 kg CO<sub>2</sub>eq kg. Outros estudos como o de Ntiamoah e Afrane (2008) registraram valores de 3,22 kg CO<sub>2</sub>eq Kg de cacau produzido em Gana, e ORTIZ et al. (2014), identificaram emissões variando de 2 a 4 kg CO<sub>2</sub>eq Kg na Colômbia. Em contraste, Schroth et al. (2016) encontraram uma pegada de carbono de 1,44 kg CO<sub>2</sub>eq Kg em cabucas no Sul da Bahia

Essas variações nas emissões de GEE podem ser atribuídas aos limites estabelecidos no estudo e à metodologia utilizada nos cálculos das emissões

(ADEWALE et al., 2018). A variação nos valores de pegada de carbono está intimamente ligada a uma série de fatores que influenciam as emissões de GEE ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo. As práticas de manejo desempenham um papel crucial, pois distintas técnicas agrícolas e florestais diferentes podem resultar em emissões variadas. Além disso, a localização geográfica impacta as condições ambientais, como clima, solo e disponibilidade de água, afetando diretamente a produtividade e o uso de insumos. Os métodos de produção também são determinantes, pois tecnologias mais eficientes e limpas contribuem para a redução das emissões (OZLU et al., 2022).

Quando esses valores são comparados à produção convencional de borracha no Sri Lanka, que apresenta uma pegada de carbono de 6,67 kg CO<sub>2</sub>eq/kg e a produção orgânica em 3,34 kg CO<sub>2</sub>eq/kg (GUNATHILAKA e GUNAWARDANA, 2015), observar-se que os SAFs de cacau-seringueira apresentam vantagens significativas em termos de sustentabilidade ambiental. Os SAF de cacau-seringueira estão consistentemente associados a pegada de carbono menores em comparação com métodos de produção convencionais.

De acordo com Bockel (2021), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) indica que a implementação de estratégias de renovação e reabilitação por meio de SAF, aliada a pesquisas e desenvolvimentos sustentáveis, pode mitigar significativamente o impacto ambiental nos próximos 20 anos, resultando em uma pegada de carbono negativa de -5,6 tCO<sub>2</sub>eq/t.

Além disso, a pegada de carbono está fortemente correlacionada com as emissões do gerenciamento de resíduos, com as emissões da produção de fertilizantes e com as emissões de fertilizante no solo, conforme apresentado na tabela 3. Essas correlações ressaltam que as práticas de manejo de resíduos e uso de fertilizantes impactam significativamente a pegada de carbono. Portanto, estratégias que otimizem essas áreas podem ser particularmente eficazes na redução da pegada de carbono em SAFs.

Em resumo, a produção de cacau em SAFs não apenas apresenta uma pegada de carbono significativamente menor em comparação a outros sistemas de produção agrícola, mas também demonstra um potencial substancial para a

mitigação das emissões de GEE. Apoiar essas práticas é essencial para promover a sustentabilidade e enfrentar os desafios das mudanças climáticas de maneira eficaz.

### **5.1.7 Estoque de carbono**

A análise do estoque de carbono revelou um potencial significativo de sequestro de carbono pelos SAF, com uma média de  $-50,16 \text{ Mg CO}_2\text{eq/ha}$ . Este valor inclui tanto a biomassa arbórea quanto o solo até 30 cm de profundidade, já que o CFT considera ambos os componentes (Tabela 2). Esses resultados estão em conformidade com a ampla faixa encontrada na literatura. Por exemplo, Borden et al. (2019) relataram estoques variando entre 41,9 e 83,7  $\text{Mg CO}_2\text{eq/ha}$  ao investigar a variação da biomassa das raízes do cacau em SAFs. Dawoe et al. (2016) observaram  $-57 \text{ Mg CO}_2\text{eq/ha}$  ao estudarem a diversidade de árvores de sombra em SAFs de cacau. Vervuut et al. (2022), utilizando metodologias semelhantes na Costa do Marfim, encontraram uma média de  $-23 \text{ Mg CO}_2\text{eq/ha}$ , valores significativamente inferiores aos deste estudo. Schroth et al. (2015) encontraram estoques médios acima do solo de  $-87$  e  $-46 \text{ Mg CO}_2\text{eq/ha}$  em SAFs de cacau tradicionais e intensificados, respectivamente. Cotta et al. (2008) relataram um estoque de  $89,9 \text{ Mg CO}_2\text{eq/ha}$  em SAF cacau-seringueira em Igrapiúna-Bahia. Esses resultados ressaltam o potencial dos sistemas perenes, como os SAF cacau, em armazenar e conservar quantidades consideráveis de carbono (HERNANDES et al., 2022; ALBERCHT e KANDJI, 2003).

Monroe (2015) observou que o aumento do carbono no solo nas camadas superficiais sob SAF cacau-seringueira se deve à alta taxa de adição de material vegetal do cacau. As folhas do cacau podem contribuir com um incremento de  $10 \text{ Mg C ha/ano}$  (Müller e Gama-Rodrigues, 2007), enquanto a seringueira adiciona, de forma complementar,  $1,1 \text{ Mg C ha/ano}$  nas camadas de 0 a 20 cm, a partir dos quatro anos de idade (MAGGIOTTO et al., 2014). Esses dados destacam a importância da contribuição contínua da serapilheira para o aumento dos estoques de carbono no solo, evidenciando o papel significativo dos SAF na captura e armazenamento de carbono.

Em um estudo realizado na região, Oliveira et al. (2019) relataram que  $72 \text{ Mg C ha}^{-1}$  foram armazenados nos primeiros 30 cm de profundidade do solo. Em outro estudo na região, em SAF cacau-seringueira nas camadas de 20 a 40 cm,

o carbono orgânico do solo variou de 35,5 a 41,5 Mg C/ha (Moroe et al., 2022). Ao estudar diferentes usos da terra na Mata Atlântica, Vicente et al. (2016) observaram que o estoque de carbono para seringueira nas profundidades de até 30 cm foi de 95 Mg C/ha.

As discrepâncias nos valores podem ser atribuídas principalmente ao número de plantas por hectare, idade das plantas, variáveis climáticas e edáficas que afetam o desenvolvimento vegetal e influenciam diretamente a quantidade de carbono armazenado (OZLU et al., 2022). Além disso, a metodologia utilizada para a quantificação desempenha um papel crucial na variabilidade dos dados.

Os resultados poderiam ser ainda mais promissores se o Cool Farm considerasse o carbono estocado no solo a profundidades superiores a 30 cm. Esses sistemas têm uma capacidade significativa de sequestro de carbono, frequentemente acumulando quantidades muito maiores quando considerados até 100 cm de profundidade. Estudos realizados por Gama-Rodrigues et al. (2010) revelaram um estoque de carbono no solo de até 302 Mg C/ha a uma profundidade de 100 cm em SAF cacau-cabruca e cacau-eritrina. Além disso, Oliveira et al. (2019) encontraram um estoque de carbono superior a 200 Mg C/ha em SAF cacau-seringueira na mesma região. O estoque de carbono pode ser superior a 200 Mg/ha em SAF ou sistemas florestais até 100 cm de profundidade (VICENTE et al., 2016; MONROE et al., 2016; SALGADO et al., 2019). Portanto, é fundamental considerar essas profundidades mais extensas para obter uma avaliação mais completa do potencial de sequestro de carbono dos SAF e, assim, otimizar estratégias de manejo para maximizar a captura e armazenamento de carbono.

Ao considerar o estoque de carbono no solo até 100 cm nos cálculos da pegada de carbono, podemos potencializar a mitigação das emissões de GEE e promover a sustentabilidade da produção em SAF. Essa ampliação não apenas nos proporciona uma visão mais completa do potencial de sequestro de carbono desses sistemas, mas também contribui para uma avaliação mais precisa e relevante do seu papel na mitigação das mudanças climáticas e na promoção da sustentabilidade da produção.

A contribuição dos SAFs para a sustentabilidade da produção e para a construção de sistemas agrícolas mais resilientes e eficientes é evidente. Esses benefícios têm implicações significativas para o desenvolvimento de políticas e práticas agrícolas sustentáveis, além de promover a preservação dos recursos naturais em longo prazo. Portanto, a integração de estratégias que considerem o armazenamento de carbono em profundidades maiores deve ser uma prioridade para maximizar o impacto positivo dos SAFs na gestão ambiental. Além disso, tais estratégias são fundamentais para serem implantadas no mercado de crédito de carbono, proporcionando uma nova oportunidade para a valorização e compensação das práticas de sequestro de carbono em SAF.

## **6. CONCLUSÃO**

A pegada de carbono total de 3,3 kg CO<sub>2</sub>eq/kg, observada para os SAFs cacau-seringueira no sul da Bahia, destaca sua relevância como uma alternativa mais sustentável em comparação com outros sistemas agrícolas. Os resultados indicam que os SAFs desempenham um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis.

A elevada dependência de fertilizantes químicos nas fazendas analisadas suscita preocupações sobre a viabilidade dessa abordagem em longo prazo. O uso excessivo desses fertilizantes pode comprometer a saúde da população, apesar de garantir um incremento significativo nos rendimentos. Portanto, é essencial explorar alternativas que reduzam essa dependência e promovam práticas agrícolas mais sustentáveis.

O potencial de sequestro de carbono, com uma média de -50,16 Mg CO<sub>2</sub>eq/ha, ressalta a capacidade dos SAFs de armazenar carbono, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas.

A implementação de uma abordagem padronizada para avaliar as emissões e o sequestro de carbono em diferentes sistemas de produção de cacau é crucial. A metodologia utilizada nesta pesquisa poderia servir como padrão para comparações mais justas e precisas, devendo incluir a consideração dos estoques de carbono no solo até 100 cm de profundidade para uma avaliação mais abrangente.

A adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, combinada com uma avaliação rigorosa e padronizada das emissões e dos estoques de carbono, é essencial para maximizar o potencial dos SAFs cacau-seringueira na mitigação das mudanças climáticas e na promoção de uma agricultura mais resiliente e eficiente. A integração dessas estratégias não só favorecerá a sustentabilidade ambiental, mas também contribuirá para a valorização das práticas de sequestro de carbono em mercados de crédito de carbono.

## REFERÊNCIA

ADEWALE, C.; REGANOLD, J. P.; HIGGINS, S.; EVANS, R. D.; CARPENTER-BOGGS, L. Improving carbon footprinting of agricultural systems: Boundaries, tiers, and organic farming. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p. 41-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.004>

ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 99, n. 1-3, p. 15-27, out. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5).

ALMEIDA, T. C.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PEREIRA, F. R.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MEDEIROS, W. P. Volume e biomassa lenhosa em Sistemas agroflorestais de seringueira e cacau no sul da Bahia. In: XII Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, 2021, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ESALQ/Piracicaba, 2021, p. 173-177.

ALMEIDA, T. F. A. **Estimativa do balanço de gases do efeito estufa em propriedade leiteira integrada com a produção vegetal: a partir das ferramentas GHG Protocol Agricultura e Florestas, e Cool Farm Tool**. Dissertação (Mestrado em Ciências) –Universidade de São Paulo, 2023.

ALVAREGA, A. P. **Seringueira**. Belo Horizonte: Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), 2021. 65 p.

ALVARENGA, A. P. Versatilidade e lucro no cultivo da seringueira, 2020. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/versatilidade-e-lucro-no-cultivo-da-seringueira/>. Acesso em: 19 mai. 2023.

AMORIM, A. O.; ORLANDELLI, R. C.; PAMPHILE, J. A. Controle de patógenos do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) por fungos endofíticos dos gêneros *Trichoderma* e *Clonostachys*. **Revista Uningá Review**, v. 34, n. 1, p. 1-10, 2019.

ANDRADE, L. P.; SILVA, R. N.; ROCHA, L. L.; ANDRADE, H. M. L. S. Pegada de Carbono de propriedades agroecológicas do Agreste Meridional de Pernambuco. **Ibero-American Journal of Environmental Sciences**, v. 12, n. 5, 2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.005.0013>

ASIGBAASE, M.; DAWOE, E.; LOMAX, B. H.; SJOGERSTEN, S. Temporal changes in litterfall and potential nutrient return in cocoa agroforestry systems under organic and conventional management, Ghana. **Heliyon**, v. 7, e08051, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08051>

BARROSO, A. Sérgio. Revoluções industriais e metamorfoses do capitalismo: aspectos históricos e teóricos. **Princípios**, n. 150, 2017.

BEAUMELLE, L.; TISON, L.; EISENHAUER, N.; HINES, J.; MALLADI, S.; PELOSI, C.; THOUVENOT, L.; PHILLIPS, H. R. P. Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis. **Journal of Applied Ecology**, v. 60, p. 1239–1253, 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14437R>

BOCKEL, L.; DEMBÉLÉ, U.; AROUNA, A.; GOPAL, P. Chaîne de valeur riz au Mali - Analyse prospective et stratégies pour une croissance inclusive et durable. **Accra: FAO**, 2021. <https://doi.org/10.4060/cb1504fr>

BORDEN, K. A.; ANGLAAERE, L. C. N.; ADU-BREDU, S.; ISAAC, M. E. Root biomass variation of cocoa and implications for carbon stocks in agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 369–381, 2019.

BRAGA, C. Indicadores econômicos da produção de borracha natural no Brasil. **CNA BRASIL**, 2015. Disponível em: [https://www.cnabrasil.org.br/assets/arquivos/artigostecnicos/artigo-07\\_0.91037400%201514912077.pdf](https://www.cnabrasil.org.br/assets/arquivos/artigostecnicos/artigo-07_0.91037400%201514912077.pdf). Acesso em: 10 abr 2024.

BRAINER, M. S. C. P. Produção de cacau. **Caderno Setorial ETENE**, ano 6, n. 149, p. 1-23, 2021. Banco do Nordeste.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA). Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA/MDA, 2011.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação. **Estimativas anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. Brasília, 2020.

CARLOS, S.; CUNHA, D.; PIRES, M. Conhecimento sobre mudanças climáticas implica em adaptação? Análise de agricultores do Nordeste brasileiro. **Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 57, n. 3, p. 455-471, 2019. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2019.187600>

CARRARA, A. F.; BARROS, G. S. C. A Relevância do Setor Agropecuário para a Dinâmica da Inflação: Uma análise para o Cenário Econômico Atual. **Economia ao Agronegócio**, Brasília, v. 18, n. 1, 2020. <https://doi.org/10.25070/rea.v18i1.7933>

CECÍLIO, R. A.; MEDEIROS, S. S.; JUNIOR, J. L. C. S.; SOUZA, J. A. Zoneamento agroclimático para a heveicultura na parte leste do Estado da Bahia. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, n. 1, p. 14-17, abr. 2006.

CERRI, C. C.; MOREIRA, C. S.; ALVES, P. A.; RAUCCI, G. S.; CASTIGIONI, B. A.; MELLO, F. F. C.; CERRI, D. G. P.; CERRI, C. E. P. Assessing the carbon footprint of beef cattle in Brazil: a case study with 22 farms in the State of Mato Grosso. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2593–2600, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.072>

CHEPOTE, R. E. Efeito do composto da casca do fruto de cacau no crescimento e produção do cacauzeiro. **Agrotropica**, v. 15, n. 1, p. 1-8, 2003.

CHEPOTE, R. E.; SANTANA, S. O. de; ARAUJO, Q. R. de; SODRÉ, G. A.; REIS, E. L.; PACHECO, R. G.; MARROCOS, P. C. L.; SERÔDIO, M. H. de C. F.; VALLE, R. R. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacauzeiro. In: VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacauzeiro. 2. ed. Brasília: Editora Científica**, 2012, p. 67-105.

CHEPOTE, R. E.; SODRÉ, G. A.; REIS, E. L.; PACHECO, R. G.; MARROCOS, P. C. L.; SERÔDIO, M. H. C. F.; VALLE, R. R. **Recomendações de corretivos e fertilizantes na cultura do cacauzeiro no sul da Bahia - 2ª aproximação**. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC, 2005. 43 p.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Panorama do agro. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 13 dez. 2022.

CONCHA, J. Y.; ALEGRE, J. C.; POCOMUCHA, V. 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**, v. 6, n. 12, p. 75-82, 2007.

COSTA, M. G.; MACHADO, R. C. R. Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. **Plant and Soil**, v. 383, p. 313–335, 2014.

COTTA, M. K.; JACOVINE, L. A. G.; PAIVA, H. N.; SOARES, C. P. B.; VIRGENS FILHO, A. de C.; VALVERDE, S. R. Quantificação de biomassa e geração de certificados de emissões reduzidas no consórcio seringueira-cacau. **Revista Árvore**, v. 32, n. 6, p. 100-108, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000600002>

CRONQUIST, A. **An integrated system of classification of flowering plants**. New York: Columbia University Press, 1981. 519p.

DAWOE, E.; ASANTE, W.; ACHEAMPONG, E.; BOSU, P. Shade tree diversity and aboveground carbon stocks in *Theobroma cacao* agroforestry systems: implications for REDD+ implementation in a West African cacao landscape. **Carbon Balance and Management**, v. 11, p. 1-13, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0061-x>

DELAHUNTY, J.; HELLWI, A. F. J. The legacies of community in building a future: rural young people envisioning “possible selves”. **Educational Review**, p. 1-19, 2022. <https://doi.org/10.1080/00131911.2022.2112149>

DEUS, V. L. Avaliação físico-química das mudanças na fermentação do cacau do Sul da Bahia para melhoramento do chocolate. In: DEUS, V. L. (Ed.). **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Editora Científica Digital, 2022, p. 56-64.

DIANAWATI, D.; INDRAMATI, N. S.; ISMAYANA, A.; YULIASIH, I.; DJATNA, T. Carbon footprint analysis of cocoa product Indonesia using life cycle assessment methods. **Journal of Ecological Engineering**, v. 24, n. 7, p. 187-197, 2023. <https://doi.org/10.12911/22998993/164750>

DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. 1. ed. Editora Atlas, São Paulo, 2006. 220 p.

EFRAIM, P. **Contribuição à melhoria de qualidade de produtos de cacau no Brasil, através da caracterização de derivados de cultivares resistentes à vassoura de bruxa e de sementes danificadas pelo fungo**. 2009. 226 p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) –Universidade Estadual de Campinas.

FAO. FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Data Production and trade. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

FELIX, A. S.; NASCIMENTO, J. W. B.; MELO, D. F.; FURTADO, D. A.; SANTOS, A. M. Análise Exploratória dos Impactos das Mudanças Climáticas na Produção Vegetal no Brasil. **Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, p. 397-407, 2020.

FERNANDES JÚNIOR, E. **Pegada de carbono e uso da terra da produção de bovinos em sistemas produtivos extensivo, intensivo e orgânico**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, Brasil.

FIGUEIREDO, E. B.; JAYASUNDARA, S.; BORDONAL, R. O.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C.; LA SCALA JÚNIOR, N. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 420–431, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>

FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; SALES, M. V. S. Footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 420–431, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>

GAMA-RODRIGUES, A. C.; MULLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MENDES, F. A. T. Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon Biomes: An ecoregional analysis of land use. **Agricultural Systems**, v. 194, p. 103270, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103270>

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; VICENTE, L. C.; ALVARENGA, L. C. B. R.; MÜLLER, M. W.; PARTELLI, F. L.; GONÇALVES, J. L. M.; FREITAS, L. S.; ALVARISTO, D. M.; CRUZ, I. B.; SOUZA, I. N. G.; FAITANIN, M. A. Perspectives on carbon footprint of agricultural land-use in Brazil. **Carbon Footprints**, v. 1, p. 5, 2022. <https://doi.org/10.20517/cf.2022.01>

GATEAU, L.; TRAN, T.; GATTWARD, J.; BASTIDE, P. Avaliação ambiental por análise de ciclo de vida da cadeia do cacau brasileiro exportado para França. In: **MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO** (Org.). 3o Congresso Brasileiro do Cacau – Inovação Tecnológica para o Brasil Liderar a Produção Mundial de Cacau. Brasília: CPLAC, 2012.

GONÇALVES, P. S.; MARQUES, J. R. B. Melhoramento Genético da Seringueira: passado, presente e futuro. In: ALVARENGA, A. P.; CARMO, C. A. F. S. (Org.). **Seringueira**. Viçosa, MG: Epamig, 2008. p. 401-407.

GUNATHILAKA, L. F. D. Z.; GUNAWARDANA, K. D. Carbon Footprint Calculation from Cradle to Grave: A Case Study of Rubber Manufacturing Process in Sri Lanka. **International Journal of Business and Social Science**, v. 6, n. 10, p. 82, out. 2015.

HALE, S. E.; ALLING, V.; MARTINSEN, V.; MULDER, J.; BREEDVELD, G. D.; CORNELISSEN, G. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. **Chemosphere**, v. 91, n. 11, p. 1612-1619, jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.12.057>.

HAVERKORT, A. J.; HILLIER, J. G. Cool Farm Tool – Potato: model description and performance of four production systems. **Potato Research**, v. 54, p. 355–369, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11540-011-9194-1>.

HERNANDES, G. M. C.; EFRAIM, P.; SILVA, A. R. A.; QUEIROZ, G. de C. Carbon footprint of Brazilian cocoa produced in Pará state. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 25, 2022. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.26320>

HILLIER, J.; WALTER, C.; MALIN, D.; GARCIA-SUAREZ, T.; MILA-I-CANALS, L.; SMITH, P. A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 9, p. 1070-1078, 2011.

HORA, Y. O. S.; SANTOS, M. P.; LIMA, F. S.; JESUS, M. N.; CRUZ, R. L.; CASTELHANO, L. A.; MOREIRA, J. D. A.; MORAIS, V. V.; ALVES, A. S. Aspectos relevantes da cacauicultura no Sul da Bahia: do cacau certificado à fabricação de chocolate. **Agroecologia: métodos e técnicas para uma agricultura sustentável**, v. 2, p. 21-34, 2021. <https://doi.org/10.37885/210102681>

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cultivo da seringueira (*Hevea* spp.). Disponível em: <http://www.iapar.br/zippdf/cultsering.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)- Indicadores IBGE: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola - Estatística da Produção Agrícola, novembro 2023. Disponível em: [https://ftp.ibge.gov.br/Producao\\_Agricola/Levantamento\\_Sistematico\\_da\\_Producao\\_Agricola\\_%5Bmensal%5D/Fasciculo\\_Indicadores\\_IBGE/2023/estProdAgri\\_202311.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Levantamento_Sistematico_da_Producao_Agricola_%5Bmensal%5D/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2023/estProdAgri_202311.pdf). Acesso em: 29 jul. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de Cacau. 2022. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cacau/br>> Acesso em: 29 jun. 2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção de Borracha. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/borracha-latex-coagulado/br>. Acesso em: 23 jun. 2024

INSTITUTO IMAFLORA. **Balço das emissões e remoções de gases de efeito estufa na agricultura familiar**. 2019.

INSTITUTO IMAFLORA. **Estimativa das emissões e remoções de gases de efeito estufa do café brasileiro: a adicionalidade de carbono devido às boas práticas em fazendas de Minas Gerais, Brasil**. Projeto CECAFÉ. 2022.

IPCC-Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., & Caud, N. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers, Technical Summary, Frequently Asked Questions, Glossary**.

Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021.

JAIMES-SUÁREZ, Y. Y.; CARVAJAL-RIVERA, A. S.; GALVIS-NEIRA, D. A.; CARVALHO, F. E. L.; ROJAS-MOLINA, J. Cacao agroforestry systems beyond the stigmas: Biotic and abiotic stress incidence impact. **Frontiers in Plant Science**, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.921469>

JUDD, W. S.; CAMPBELL, C. S.; KELLOGG, E. A.; STEVENS, P. F.; DONOGHUE, M. J. **Sistemática vegetal: um enfoque filogenético**. 3. ed. Editora Artmed Porto Alegre, 2009.

KUMAR, R.; KARMAKAR, S.; MINZ, A.; SINGH, J.; KUMAR, A.; KUMAR, A. Assessment of Greenhouse Gases Emission in Maize-Wheat Cropping System Under Varied N Fertilizer Application Using Cool Farm Tool. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 710108, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.710108>

LEDO, A.; HEATHCOTE, R.; HASTINGS, A.; SMITH, P.; HILLER, J. Perennial-GHG: a new allometric model to estimate biomass accumulation and greenhouse gas emissions in perennial food and bioenergy crops. **Environmental Modelling & Software**, v. 102, p. 292–305, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.12.005>

LEITE, L. R. C. Estudo de competitividade do cacau e chocolate no Brasil: desafios na produção e comércio global. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. Brasília, DF, 128 p., 2018.

LYKOGIANNI, M.; BIMPELOU, E.; KARAMAOUNA, F.; ALIFERIS, K. A. Do pesticides promote or hinder sustainability in agriculture? The challenge of sustainable use of pesticides in modern agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 795, p.148625, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148625>

MAGGIOTTO, S. R.; OLIVEIRA, D.; MARUR, C. J.; STIVARI, S. M. S.; LECLERC, M.; WAGNER-RIDDLE, C. Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. **Acta**

**Scientiarum. Agronomy**, v. 36, p. 239-245, 2014. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i2.17404>

MARQUES, J. R. B.; MONTEIRO, W. R. Seringueira: uma opção econômica e ecológica para sombreamento de cacauzeiros. In: Congresso Brasileiro sobre Sistemas Agroflorestais, 4, 2002, Ilhéus. **Anais....** Ilhéus: CEPLAC/CEPEC, 2002.

MARQUES, J. R. B.; MONTEIRO, W. R. Substituição da eritrina por outras espécies arbóreas de valor econômico – um enfoque sustentável de modernização agrícola. In: **25ª Semana do Fazendeiro. EMARC – Uruçuca – BA, 2003. Agenda Técnica - Produzir, Alimentar, Vender e Conservar.** CEPLAC/EMARC, 2003, p. 143–147.

MARQUES, J. R. B.; MONTEIRO, W. R.; ABREU, A. G. Manejo da seringueira como árvore de sombra em sistemas agroflorestais (SAFs) com o cacauzeiro. **Lateks**, v. 22, p. 50-53, 2014.

MENDES, F. A. T. A cacauicultura na Amazônia brasileira: potencialidades, abrangência e oportunidades de negócio. **Movendo Idéias**, v. 5, n. 8, p. 53-61, 2000.

MIHARZA, T.; WIJAYANTO, N.; ROSHETKO, J. M.; SIREGAR, I. Z. Carbon stocks and footprints of smallholder cacao systems in Polewali Mandar, West Sulawesi. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 6800984, 2023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.680984>

MONROE, P. H. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARQUES, J. R. B. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 221, p. 99-108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>

MONROE, P. H. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; VICENTE, L. C. Carbon and Nitrogen Occluded in Soil Aggregates Under Cacao-Based Agroforestry Systems in Southern Bahia, Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1326–1339, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00525-3>

MUHARDI, A.; RAHIM, A.; KARIM, F. F.; SULILI, A. The use of litterfall from various land agroecosystems to increase the fertility of the land of community cocoa plantations. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 681, p. 012046, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/681/1/012046>

MULLER, M. P.; CORNELLI, J. F.; MARDER, M.; HICKMANN, E. V.; KONRAD, O. Avaliação do potencial energético da casca de cacau na produção de biogás e biometano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, XI, 2020, Vitória. **Anais....** Vitória: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2020.

MULLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Sistemas Agroflorestais com Cacaueiro. In: VALLE, R. R. (Ed.). **Ciência, tecnologia e manejo do cacaueiro**. Brasília – DF, 2012, p. 407-435.

Nair, P. K. R. Carbon footprints and land-use systems. **Carbon Footprints**. v.1, n. 2, 2022. <http://dx.doi.org/10.20517/cf.2022.07>

NEIRA, D. P. Energy sustainability of Ecuadorian cacao export and its contribution to climate change. A case study through product life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2560-2568, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.003>.

NEMECEK, T.; BENGUA, X.; LANSCH, J.; MOURON, P.; ROSSI, V.; HUMBERT, S. **Methodological guidelines for the life cycle inventory of agricultural products. World Food LCA Database (WFLDB)**. Quantis and Agroscope Lausanne and Zurich, Switzerland, 2019.

NICODEME, T. G.; SUQUN; BOSAMBE, M. N. The Economic Analysis of Resource Used Efficiency for Cocoa Production in Cameroon: The Case Study of Lekie Division. **American Journal of Rural Development**, v. 5, n. 5, p. 123-137, 2017. <https://doi.org/10.12691/ajrd-5-5-2>

NOBUCHI, T.; MUNIANDY, D.; SAHRI, M. H. Formation and anatomical characteristics of tension wood in plantation-grown *Hevea brasiliensis* (Willd.) Muell.-Arg. **Malaysian Forester**, Kuala Lumpur, v. 74, n. 2, p. 133-142, 2011.

NTIAMOAH, A.; AFRANE, G. Environmental impacts of cocoa production and processing in Ghana: life cycle assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 16, p. 1735-1740, 2008.

OCAMPO-ARIZA, C.; VANSYNGHEL, J.; BERTLEFF, D.; MAAS, B.; SCHUMACHER, N.; ULLOQUE-SAMATELO, C.; YOVERA, F. F.; THOMAS, E.; STEFFAN-DEWENTER, I.; TSCHARNTKE, T. Birds and bats enhance cacao yield despite suppressing arthropod mesopredation. **Ecological Applications**, v. 33, n. 5, p. e2886, 2023 <https://doi.org/10.1002/eap.2886>.

OGUNLADE, M. O.; ORISAJO, S. B. Integrated Soil Fertility Management for Smallholder Cocoa Farms: Using Combination of Cocoa Pod Husk Based Compost and Mineral Fertilizers. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 32, n. 2, p. 68-77, 2020. DOI: 10.9734/IJPSS/2020/v32i230248.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. G. de; SILVA, A. B. da; MANTOVANI, J. R.; MIRANDA, J. M.; FLORENTINO, L. A. Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 412-419, 2015.

OLIVEIRA, C. V.; VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARQUES, J. R. B.; BARRETO-GARCIA, P. A. B. Carbon and nitrogen stock of Acrisols and Nitisols in South Bahia, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 16, p. e00218, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00218>

OLIVEIRA, M. M.; de ASSIS, F. G. do V.; LEAL, P. L. Efficiency of filamentous fungi in the biological control of witches' broom disease of cocoa. **SITIENTIBUS**, v. 14, p.39, 2014. <https://doi.org/10.13102/scb386>.

ORTIZ-R, O. O.; VILLAMIZAR-G, R. A.; RANGEL, J. M. Applying life cycle management of Colombian cocoa production. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 34, n. 1, p. 62-68, 2014.

OZLU, E.; ARRIAGA, F. J.; BILEN, S.; GOZUKARA, G.; BABUR, E. Carbon Footprint Management by Agricultural Practices. **Biology**, v. 11, n. 10, p. 1453, 2022. <https://doi.org/10.3390/biology11101453>.

PINTO, J. M.; LIMA, I. O.; CAO, J.; FAVERO, R. G.; SILVA, M. B. Cacaucultura no Brasil: análise bibliográfica de como a luz altera a eficiência fotossintética em

genótipos do cacau. **Agriculturae**, v. 4, n. 1, p. 22-31, 2022. <https://doi.org/10.6008/CBPC2674-645X.2022.001.0003>.

RAHMAN, A. Y. A.; USHARRAJ, A. O.; MISRA, B. B.; THOTTATHIL, G. P.; JAYASEKARAN, K.; FENG, Y.; HOU, S.; ONG, S. Y.; NG, F. L.; LEE, L. S.; TAN, H. S.; SAKAFF, M. K. L. M.; TEH, B. S.; KHOO, B. F.; BADAI, S. S.; AZIZ, N. A.; YURYEV, A.; KNUDSEN, B.; DIONNE-LAPORTE, A.; MCHUNU, M. P.; YU, Q.; LANGSTON, B. J.; FREITAS, T. A. K.; YOUNG, A. G.; CHEN, R.; WANG, L.; NAJUMUDIN, N.; SAITO, J. A.; ALAM, M. Draft genome sequence of the rubber tree *Hevea brasiliensis*. **BMC Genomics**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2013.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. F.; LIMA, H. R. P.; SANTOS, G. C. Variação intra-específica na anatomia do lenho de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. Arg. Relacionada à extração de látex. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p. 255-264, 2018. <https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.55584>.

RECANATI, F.; MARVEGGIO, D.; DOTELLI, G. From beans to bar: a life cycle assessment towards sustainable chocolate supply chain. **The Science of the Total Environment**, v. 613–614, p. 1013-1023, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.187>.

REHMAN, A.; FAROOQ, M.; LEE, D. J.; SIDDIQUE, K. H. M. Sustainable agricultural practices for food security and ecosystem services. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 84076–84095, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23635-z>.

ROTZ, C. A.; ASEM-HIABLIE, S.; PLACE, S.; THOMA, G. Environmental footprints of beef cattle production in the United States. **Agricultural Systems**, v. 169, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.005>.

SALA, S.; ANTON, A.; MCLAREN, S. J.; NOTARNICOLA, B.; SAOUTER, E.; SONESSON, U. In quest of reducing the environmental impacts of food production and consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 387–398, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.054>.

SALGADO, G. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; ALEIXO, S.; MARQUES, J. R. B. Stable carbon in soils under rubber tree (*Hevea brasiliensis*) agroforestry systems in the south of Bahia,

Brazil. **Scientific Reports**, v. 9, p. 790, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0815-7>.

SANCHES, G. C. S. **Análise de viabilidade econômica dos principais modais de produção de cacau no Sul da Bahia: Cabruca e SAF-Cacau Seringueira**. Campinas-SP, 2019. 94 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico).

SANTOS, A. C. A. Agrofloresta Agroecológica: Um Momento de Síntese da Agroecologia, uma Agricultura que cuida do meio Ambiente. **DESER**, Brasil, p. 1-6, fev. 2007.

SANTOS, A. C. S.; PONTES, A. N. Emissões de Gases De Efeito Estufa e Mudanças Climáticas no Estado do Pará. **EDUCAmazônia - Educação Sociedade e Natureza**, v. 1, n. 1, p. 30-49, 2020. <https://doi.org/10.5935/educamazonia.2020.01104>.

SCHROTH, G.; LADERACH, P.; MARTINEZ-VALLE, A. I.; BUNN, C.; JASSOGNE, L. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: patterns, opportunities and limits to adaptation. **Science of The Total Environment**, v. 556, p. 231–241, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.024>

SEAGRI - SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA, DESENVOLVIMENTO, REGULARIZAÇÃO FUNDIÁRIA DA BAHIA. Brasil mantém reconhecimento de país exportador de cacau com 100% de qualidade e Governo do Estado da Bahia anuncia investimentos no setor produtivo. 2023. Disponível em: <http://www.seagri.ba.gov.br/noticias/2023/11/24/seagri-%C3%A9-articuladora-do-plano-inova-cacau-lan%C3%A7ado-com-foco-na-sustentabilidade>. Acesso em: 29 jul. 2024.

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões de gases de efeito estufa brasileiras e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. Brasília, 2021.

SERRA, W. S.; SODRÉ, G. A. **Manual do cacauicultor: perguntas e respostas**. Ilhéus, BA: CEPLAC/CEPEC (Boletim Técnico, nº 221), 2021. 190 p.

SILATSA, F. B. T.; YEMEFACK, M.; EWANE-NONGA, N.; KEMGA, A.; HANNA, R. Modelling carbon stock dynamics under fallow and cocoa agroforest systems

in the shifting agricultural landscape of Central Cameroon. **Agroforestry Systems**, v. 91, p. 993–1006, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9973-4>

SILVA, E. V. da.; SOUSA, A. C. O.; PEREIRA, M. G.; SILVA, O. M. das C. Crescimento de clones de *Hevea brasiliensis* sob doses crescentes de nitrogênio, fósforo e potássio. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 198-210, out./dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509864352>.

SILVA, L. C.; ALMEIDA, F. M.; MESSIAS, M. C. Dinâmica da Sustentabilidade na Produção de Cacau no Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 54-65, 2022. <https://doi.org/10.5935/abcambiental.2022.01109>.

SILVA, M. A.; GUEDES, E. T.; SILVA, D. R. F.; RAMOS, D. C.; SAMPAIO, M. S.; CAVALCANTI, J. J. A.; PAIVA, H. N. Georreferenciamento e Monitoramento da Produção de Cacau no Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura**, v. 18, n. 3, p. 47-58, 2020. <https://doi.org/10.5935/rba.2020.03242>.

SIMANJUNTAK, E.; PRASETYO, P.; HARTAL, H. The Effect of Local Organic Fertilizer from Rubber Processing Waste on the Yield of Rubber Plants. **Akta Agrosia**, v. 21, n. 1, p. 25–28, 2018.

SINGH, B. Are Nitrogen Fertilizers Deleterious to Soil Health. **Agronomy**, v. 8, p. 48, 2018. <https://doi.org/10.3390/agronomy8040048>.

SOMARRIBA, E.; HARVEY, C. Como integrar simultaneamente produção sustentável e conservação de la biodiversidad en cacao tales orgánicos indígenas? **Agroforestería en las Américas**, v. 10, p. 37–38, 2003.

SOUSA FILHO, H. R.; MOTA DE JESUS, R.; DA SILVA DE MAGALHÃES, P.; SANTOS ROCHA SOUSA, V. Análise do índice de desempenho da lavoura cacauzeira em municípios da Bahia. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 3, e8303, 2021. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n3e8303>

STEENBOCK, W.; SILVA, R. O.; FROUFE, L. C. M.; SEONAE, C. E. Agroflorestas e sistemas agroflorestais no espaço e no tempo. In: STEENBOCK, W.; COSTA E SILVA, L.; SILVA, R. O.; RODRIGUES, A. S.; PEREZ-CASSARINO, J.; FONINI, R. (Orgs.). **Agrofloresta, ecologia e sociedade**. Curitiba: Kairós, 2013a. p. 61-89.

SUH, N. N.; MOLUA, E. L. Cocoa production under climate variability and farm management challenges: Some farmers' perspective. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 8, p. 100282, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100282>.

TASCA, A. L.; NESSI, S.; RIGAMONTI, L. Environmental sustainability of agri-food supply chains: An LCA comparison between two alternative forms of production and distribution of endive in northern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 725–741, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.170>

THORSTENSEN, V.; ZUCHIER, A. M. OCDE e agricultura: meio ambiente e mudança climática. **São Paulo School of Economics**, São Paulo, v. 1, n. 39, p. 85, 2021.

TOBING, I. K. L. Cocoa Certification: Study on the costs, advantages and disadvantages of cocoa certification commissioned by The International Cocoa Organization (ICCO). 2018. Disponível em: [http://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat\\_view/30-relateddocuments/37-fair-trade-organic-cocoa.html](http://www.icco.org/about-us/international-cocoa-agreements/cat_view/30-relateddocuments/37-fair-trade-organic-cocoa.html). Acesso em: fev. 2023.

TOMAZ, E. M.; BARRETO, T. M. Diagnóstico das práticas agroecológicas na produção de cacau na região Sul da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura e Meio Ambiente**, v. 12, n. 2, p. 22-30, 2018. <https://doi.org/10.5935/rbama.2018.02220>.

VAN RIKXOORT, H.; SCHROTH, G.; LÄDERACH, P.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, B. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. *Agronomy for Sustainable Development*, in press. **Agronomy for sustainable development**, v.34, p.887–897, 2014. <https://doi.org/DOI 10.1007/s13593-014-0223-8>

VANDERMEER, J.; BROWN, J.; JONES, M.; MEYERS, L. Factors influencing the sustainability of cacao production systems. *Global Ecology and Biogeography*, v. 22, n. 4, p. 531-542, 2013. <https://doi.org/10.1111/geb.12025>.

VAYSSE, L.; BONFILS, F.; SAINTE-BEUVE, J.; CARTAULT, M. Natural Rubber. In: Matyjaszewski, K., Möller, M. (Eds.), **Polymer Science: A Comprehensive Reference**, v.10, p. 281–293, 2012. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00267-3>

VERVUURT, W.; SLINGERLAND, M. A.; PRONK, A. A.; VAN BUSSEL, L. G. J. Modelling greenhouse gas emissions of cacao production in the Republic of Côte d'Ivoire. **Agroforestry Systems**, v. 96, p. 417-434, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00729-8>

VETTER, S. H.; MALIN, D.; SMITH, P.; HILLIER, J. The potential to reduce GHG emissions in egg production using a GHG calculator – A Cool Farm Tool case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 1068-1076, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.245>

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Soil carbon stocks of Ultisols under different land use in the Atlantic rainforest zone of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 3, p. 330–337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.06.003>

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, p. 104139, 2019.

VIÉGAS, I. J. M.; CARVALHO, J. G.; FRAZÃO, D. A. C. Desordens nutricionais na cultura da seringueira: critérios de diagnose para solo e plantas e correção de deficiência. In: VIÉGAS, I. J. M.; CARVALHO, J. G. (Ed.). **Seringueira: nutrição e adubação no Brasil**. Brasília: Embrapa-SCT, 2000. p. 123173.

VILLASANA, Y.; ARMENISE, S.; ÁBREGO, J.; ATIENZA-MARTEUNEZ, M.; HABLICH, K.; BIMBELA, F.; CORNEJO, A.; GANDEU, L. M. Exploring a low-cost valorization route for Amazonian cocoa pod husks through thermochemical and catalytic upgrading of pyrolysis vapors. **ACS Omega**, v. 8, p. 37610-37621, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06672>

VIRGENS FILHO, A. de C.; CABRAL JÚNIOR, I. C.; HONORATO JÚNIOR, J.; BEZERRA, J. L. Ocorrência da crosta-negra em seringais do sudeste da Bahia. **Agrotropica**, v. 34, n. 1, p. 67-80, 2022. <https://doi.org/10.21757/0103-3816.2022v34n1p67-80>.

WILSON, R.; TYNAN, K.; LAMBERT, J.; YU, Z.; RITCHIE, M. Estimating the Carbon Footprint of Cocoa Production: A Review of Methods and Challenges. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 20, n. 1, p. 122-134, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jags.2021.01.012>.

YANG, Y.; CHEN, X.; LIU, L.; LI, T.; DOU, Y.; QIAO, J.; WANG, Y.; AN, S.; CHANG, S. X. Nitrogen fertilization weakens the linkage between soil carbon and microbial diversity: A global meta-analysis. **Global Change Biology**, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16361>

ZAREI, M. J.; KAZEMI, N.; MARZBAN, A. Life cycle environmental impacts of cucumber and tomato production in open-field and greenhouse. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Science**, v. 18, p. 249–255, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.07.001>

ZARRILLO, S. et al. The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 12, p. 1879, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0697-x>

ZHANG, M.; ZHANG, X.; ZHANG, L.; ZENG, L.; LIU, Y.; WANG, X.; HE, P.; LI, S.; LIANG, G.; ZHOU, W.; AI, C. The stronger impact of inorganic nitrogen fertilization on soil bacterial community than organic fertilization in short-term condition. **Geoderma**, v. 382, p. 114752, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114752>

ZIKANKUBA, V. L.; MWANYIKA, G.; NTWENYA, J. E.; JAMES, A. Pesticide regulations and their malpractice implications on food and environment safety. **Cogent Food & Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 1601544, 2019. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1601544>

## APÊNDICES

### APÊNDICE A-QUESTIONÁRIO

#### PEGADA DE CARBONO DE AGROFLORESTA DE CACAU NO SUL DA

#### BAHIA

Data da entrevista: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

Coordenadas geográficas da fazenda: \_\_\_\_\_

Nome da Fazenda: \_\_\_\_\_

Nome do responsável pela fazenda: \_\_\_\_\_

Telefone do responsável pela fazenda: \_\_\_\_\_

Nome do Aplicador: \_\_\_\_\_

#### DETALHE DA CULTURA

Inserir informações para o campo e o sistema de produção que está sendo avaliado.

1. **Nome da Cultura:** \_\_\_\_\_

2. **Ano de Colheita:** \_\_\_\_\_

3. **Qual área de cultivo:** (hectares, acres ou metros quadrados).

Obs.: Deve incluir faixas de proteção, margens de campo e cercas vivas dentro da área de cultivo.

\_\_\_\_\_

4. **Qual foi o montante total colhido? ( kg, L, ton).**

Obs.: Total da safra colhida na "Área de cultivo" acima. Isto é antes da secagem na fazenda, classificação ou qualquer outra perda. Exclui os coprodutos.

\_\_\_\_\_

5. **Qual a quantidade de produtos acabado? (kg, L, ton)**

Obs.: Cultura comercializável após secagem na fazenda, classificação e limpeza ou classificação NA FAZENDA. Exclui coprodutos.

\_\_\_\_\_

## GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

Os valores padrão para os pesos de matéria seca são fornecidos para a maioria das culturas. Se você tiver dados melhores, você pode sobrescrever o valor padrão.

### 6. Qual o valor residual? (toneladas/ha)

---

### 7. Qual o tipo de gerenciamento?

- Removido do campo;
- Queimado no campo;
- Distribuído ou incorporado ou mantido como cobertura morta;
- Removido e deixado em outro local (sem tratamento e/ ou em pilhas).

### 8. Existem coprodutos da produção?

- Sim.
- Não.

#### 8.1 Coprodutos do cacau?

- Chocolate;
- Manteiga de cacau;
- Cacau em pó;
- Cascas de cacau;
- Óleo de cacau;
- Vinho de cacau;
- Polpa;
- Casca;
- Lenha;

Outros: \_\_\_\_\_

---

---

---

### 8.2 Coprodutos da Seringueira?

- ( ) Madeira; ;
- ( ) Cavaco;
- ( ) Lenha;
- ( ) Compostagem;
- ( ) Resina;
- ( ) Biomassa;
- ( ) Tinturas e corantes;

Outros: \_\_\_\_\_

---

---

---

### 9. Se a resposta para questão anterior foi sim, qual coproduto e qual o valor relativo em porcentagem?

Obs.: O valor do coproduto como um % relativo à cultura primária.  
Por exemplo, se Grão R\$1000, Palha R\$100, digite 10%.

---

### CARACTERÍSTICAS DO SOLO

As características do solo para o campo na avaliação afetam as emissões de gases de efeito estufa. O solo pode variar dentro do campo, portanto, deve-se inserir valores típicos.

### 10. Qual a textura do solo?

- ( ) Fina;
- ( ) Média;

( ) Grossa.

**11. Qual o teor de Matéria Orgânica no solo?**

( )  $<1,72$ ;

( )  $1,72 < \text{MOS} < 5,16$ ;

( )  $5,16 < \text{MOS} < 10,32$ ;

( )  $\text{SOM} > 10,32$ .

**12. Qual a média de umidade do solo?**

( ) Seco;

( ) Úmido.

**13. Como é a drenagem do solo?**

( ) Boa;

( ) Ruim.

**14. Qual o pH do solo?**

Obs.: Insira aqui o pH médio de um teste de campo ou de laboratório. Se você não tiver esta informação, digite 5,5-7,3 que é pH neutro.

( )  $<5,5$ ;

( )  $5,5 < \text{pH} < 7,3$ ;

( )  $7,3 < \text{pH} < 8,5$ ;

( )  $>8,5$ .

**ENTRADAS**

Insira dados sobre as entradas de fertilizantes e aplicações de proteção à cultura, antes, durante e depois de sua colheita. Inclua uma proporção de quaisquer insumos para qualquer captura ou cultura de cobertura associada à sua cultura primária.

**INSUMOS E FERTILIZANTES**

**15. Quais os tipos de fertilizantes utilizados? (NPK proporção, superfosfato, ureia etc.).**

Citar todos que você utilizou

---

---

---

---

---

**16. Local de fabricação?**

---

**17. Qual a taxa de aplicação dos fertilizantes utilizados? (kg/ha ou toneladas/ha)**

Para cada utilizado

---

**18. Qual o método de aplicação dos fertilizantes?**

- ( ) Aplicado em solução;
- ( ) Incorporado;
- ( ) Fertirrigação.

### **ENTRADAS DE PROTEÇÃO À CULTURA**

Inserir dados para aplicações de pesticidas, herbicidas, fungicidas, etc.

**19. Qual/Quais tipo/os de proteção de cultura você utilizou? (Herbicida, Pesticida, Fungicida, Inseticida).**

---

---

---

---

---

**20. Em relação a resposta anterior, qual a taxa de aplicação e o ingrediente ativo que você utilizou para cada tipo de entrada de proteção utilizada?**

---

---

**21. Qual a Categoria dos produtos aplicados?**

- ( ) Pós-emergência;
- ( ) Tratamento do solo;
- ( ) Tratamento da semente.

**22. Quais as taxas de aplicações (doses) para cada produto utilizado?**

---

---

---

### **COMBUSTIVEL, GÁS E ENERGIA**

Digite os dados para combustível e eletricidade. Os dados de uso dos medidores e registros de combustível são mais precisos, e devem ser inseridos na opção uso direto da energia. Se você não tiver registros de dados de combustível para operações de campo, as estimativas de uso de combustível inserir dados em uso de energia nas operações de campo. Incluir todo o combustível usado para aplicação de entradas.

### **USO DIRETO DE ENERGIA**

**23. Qual fonte de energia utilizada?**

- ( ) Diesel;
- ( ) Gasolina;
- ( ) Eletricidade;
- ( ) Gás.

**24. Qual a quantidade de energia utilizada? (em litros, ou kW/h, por exemplo).**

---

### **USO DE ENERGIA NAS APLICAÇÕES DE CAMPO**

Use este estimador para qualquer operação de campo individual não capturada no item uso direto da energia.

**25. Em quais áreas utilizou-se energia?**

- ( ) Campo;
- ( ) Processamento.

**26. Quais maquinários foram utilizados? (escarificador, grade de disco, pulverizador etc.)**

---

---

**27. Quais combustíveis foram utilizados?**

- Diesel;
- Gasolina.

**28. Quantidade em litros de combustíveis utilizados?**

---

---

**MUDANÇAS DE CARBONO E SEQUESTRO DE CARBONO**

Responda as questões abaixo se você tiver feito mudanças no uso da terra, na lavoura ou no cultivo de cobertura/captura em sua área de produção durante os últimos 20 anos.

**29. Alguma parte deste campo foi convertida entre terras aráveis, pastagens ou florestas nos últimos 20 anos?**

- Sim;
- Não.

**30. Se a resposta da questão anterior for sim, responda qual foi a mudança, qual a idade da mudança? ( a área passou de gramínea para floresta, a área passou de areável para floresta, etc.)**

---

---

**31. Você mudou as práticas de lavoura neste campo nos últimos 20 anos?**

- Sim;
- Não.

**32. Se a resposta da questão anterior foi sim, como você mudou suas práticas de lavoura neste campo nos últimos 20 anos?**

- mudança de campo;
- convencional até/reduzindo até;
- convencional até/ não até;
- reduzindo até/convencional até;
- reduzindo até/não até;
- não até/ convencional até;
- não até/reduzindo até.

**33. Em quantos anos atrás e qual a porcentagem de campo realizou essa mudança?**

---

**34. Você começou ou parou de cultivar cobertura ou de colher colheitas nos últimos 20 anos?**

( ) Sim

( ) Não

**35. Se a resposta anterior for sim, que tipo de mudança você realizou?**

( ) mudança de cobertura;

( ) cultura de cobertura/sem cultura de cobertura;

( ) Sem cultura de cobertura/com cultura de cobertura.

**36. Há Quantos anos você realizou essa mudança e qual a porcentagem de campo foi realizada essa mudança?**

---

### **MUDANÇAS DE BIOMASSAS DA CULTURA**

Adicionar mudanças anuais para a biomassa das árvores que crescem dentro ou imediatamente adjacentes à área de avaliação do campo.

**37. Quais espécie de arvores?**

---

**38. Qual a densidade(árvores/hectare) ano passado, Diâmetro a altura do peito no ano passado (metros), tamanho esse ano?**

---

**39. Quantas árvores por hectare foram plantadas no ano passado? quantas das árvores plantadas foram perdidas?**

---

### **TRANSPORTE**

Exemplos de transporte de entrada incluem fertilizantes, pesticidas e sementes transportadas do ponto de compra para sua área de cultivo. Incluem o transporte mesmo que você não possua ou não opere os veículos. O transporte de insumos - tais como esterco de um vizinho, ou fertilizante do comerciante - para sua fazenda deve ser incluído.

**40. Modo de transporte utilizado?**

( ) Veículo pesado;

( ) Veículo leve;

( ) Aéreo;

( ) Navio.

**41. Qual peso transportado?**

---

**42. Qual a distância? (Quilômetros ou milhas).**

---

## **APÊNDICE B-TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO**

Você está sendo convidado/a participar da pesquisa “**Pegada de Carbono em Agrofloresta de Cacau e Seringueira no Sul da Bahia**” sob a responsabilidade da Mestranda **Neide Ribeiro dos Santos** sobre orientação da professora Dra. **Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues** e sua participação não é obrigatória. A qualquer momento você pode desistir de participar e poderá deixar a pesquisa sem nenhum prejuízo para você ou para o pesquisador.

1. O objetivo deste estudo é: Estimar a pegada de carbono associada a Agroflorestas de cacau e seringueira, no sul da Bahia.
2. Sua participação nesta pesquisa será: através de uma entrevista semiestruturada e questionário com perguntas relacionadas ao manejo do sistema de produção utilizado na propriedade.
3. O principal benefício relacionado com a sua participação será: contribuir para promover e fornecer dados a este setor tão importante para a economia do estado, fornecendo informações que servirão de base para verificar se o sistema de produção cacau-seringueira é ambientalmente saudável, em termos de mudanças climáticas, além de ajudar na promoção de discussões relacionado a produção sustentável de cacau e seringueira.
4. O principal risco relacionado com a sua participação será: os riscos da pesquisa são mínimos, podendo haver a possibilidade de desconforto ou constrangimento ao responder alguma pergunta da entrevista. Se isto chegar a ocorrer, o pesquisador se compromete a interromper a entrevista, e se você estiver de acordo, a entrevista poderá ser retomada posteriormente quando se sentir confortável/a. Além disso, você poderá deixar de participar da pesquisa a qualquer momento.
5. Serão incluídos nesta pesquisa: Produtores ou gerente de fazendas que utilizam o sistema cacau-seringueira no Sul da Bahia.

As informações desta pesquisa serão confidenciais e garantimos que somente a pesquisadora saberá sobre sua participação. Você receberá uma via deste termo com o endereço institucional e o telefone da pesquisadora principal e poderá tirar

suas dúvidas sobre o projeto e sua participação, agora ou a qualquer momento. Você poderá entrar em contato conosco, sempre que achar necessário, através do Email da pesquisadora responsável, Neide Ribeiro dos Santos, contato **2022a0062@uesb.edu.br**, caso tenha alguma dúvida.

Declaro que entendi os objetivos, riscos e benefícios de minha participação na pesquisa e concordo em participar.

---

**Participante da Pesquisa**