

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Breno Magno Silva dos Santos

**BIODIVERSIDADE E CARBONO: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES
COMPARTIMENTOS FLORESTAIS COMO ALTERNATIVA NA
MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Frederico Westphalen, RS
2023

Breno Magno Silva dos Santos

**BIODIVERSIDADE E CARBONO: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES
COMPARTIMENTOS FLORESTAIS COMO ALTERNATIVA NA MITIGAÇÃO
DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) - Campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. (Felipe Turchetto)

Frederico Westphalen, RS
2023

Breno Magno Silva dos Santos

**BIODIVERSIDADE E CARBONO: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES
COMPARTIMENTOS FLORESTAIS COMO ALTERNATIVA NA MITIGAÇÃO
DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) - Campus Frederico Westphalen, como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Florestal**.

Aprovado em 30 de novembro de 2023:

Felipe Turchetto, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Rafaelo Balbinot, Dr. (UFSM)

Juliana Tramontina, Engenheira Florestal (ADAMI S/A)
(Videoconferência)

Frederico Westphalen, RS
(2023)

*A minha querida e amada mãe, Rosângela Maria Silva Fernandes.
Aos meus amigos que me incentivaram e acreditaram em minha capacidade.
A todas as pessoas que me tranquilizaram e me confortaram quando foi necessário.
Vocês fizeram parte desse estudo, e eu o dedico a vocês!*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me proteger e iluminar minha trajetória desde o início.

A toda minha família, pelo apoio, confiança e o amor incondicional.

Agradeço imensamente ao meu orientador, professor Dr. Felipe Turchetto, pela confiança, paciência, parceria, dedicação e por não medir esforços na contribuição deste estudo.

A empresa ADAMI S/A Madeiras por disponibilizar a área para o estudo, por todas as informações repassadas e assistência prestada.

Meu profundo agradecimento ao Laboratório de Estatística e Manejo Florestal (LEMFLOR) pela estrutura cedida e aos colegas Gabriel Waimer, Kellin Andriguetto e Lorena Gabrielle que estiveram comigo nas atividades de campo e estavam sempre dispostos a me ajudar.

A Universidade Federal de Santa Maria *campus* Frederico Westphalen pela oportunidade a mim concedida, gostaria de agradecer também aos professores do Departamento de Engenharia Florestal (DEF) que cederam o espaço para realização desse estudo, ao professor Edison Rogério Perrando por todo apoio desde o início do estudo, ao professor Rômulo Trevisan que disponibilizou a serraria e a estufa, ao professor Edison Cantarelli que disponibilizou o laboratório de silvicultura e a estufa, aos professores Nilton Mantovani e Magda Zanon por disponibilizarem os laboratórios, ao laboratório de análise química do solo por realizarem os teores de carbono nas amostras de solo e biomassa.

As minhas grandes amigas que fizeram parte dessa fase da minha vida, que por mais que trabalhosa também foi muito gratificante, foi mais fácil com vocês por perto Kelly Cristina e Laura Regina. Aos que me apoiaram e confortaram quando precisei, sou grato a vocês meus amigos Adriana Iora e André Luís, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste estudo.

O meu muito obrigado!

*"Para o equilíbrio do mundo, tudo faz sentido,
em ciclos, onde há espaço para toda forma de vida.
A natureza é sábia e justa. O vento sacode as árvores,
move os galhos, para que todas as folhas tenham o seu
momento de ver o sol e contribuir à sua maneira.
Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente,
mas sim aquele que melhor se adapta às mudanças.
O tempo é curto e se o mundo não mudar, MUDE VOCÊ!"*

(Adaptado de Leon C. Megginson)

RESUMO

BIODIVERSIDADE E CARBONO: AVALIAÇÃO DE DIFERENTES COMPARTIMENTOS FLORESTAIS COMO ALTERNATIVA NA MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

AUTOR: Breno Magno Silva dos Santos

ORIENTADOR: Felipe Turchetto

As mudanças climáticas estão se intensificando devido ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), provenientes da industrialização e do uso de fontes não renováveis de energia. A preservação das florestas desempenha um papel crucial no ciclo global de carbono, influenciando significativamente na mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, o conhecimento sobre a compartimentação do estoque de carbono (EC) total em florestas da Mata Atlântica, especificamente em Floresta Ombrófila Mista (FOM) ainda são escassos no Brasil. Este estudo objetivou avaliar o EC em fragmento de FOM, contemplando os compartimentos: biomassa arbórea acima do solo, necromassa lenhosa (grossa e fina), serrapilheira acumulada, biomassa de raízes e solo. O estudo foi realizado em parcelas permanentes, localizadas em área de conservação pertencente a empresa ADAMI S/A Madeiras no município de Passos Maia/SC. Em inventário florestal realizado em 2021, obteve-se os dados para as estimativas da biomassa arbórea acima do solo e radicular, onde foi realizada a quantificação do EC através de equações alométrica. Para a estimativa do EC na necromassa lenhosa grossa (acima de 10 cm de diâmetro), foi utilizado o método da linha interceptadora. Na coleta da necromassa lenhosa fina (2 a 10 cm de diâmetro) foi utilizado um gabarito de 1,00 x 1,00 m. Para a coleta da serrapilheira acumulada utilizou-se um molde de 0,25 x 0,25 m. O EC no solo foi determinado através de amostras deformadas de 0-30 cm de profundidade no solo. O valor de Diversidade de Shannon (H') obtido para o presente estudo foi de 3,43 e para o índice de Pielou (J) foi obtido 0,85, confirmando a alta diversidade e baixa dominância de uma ou poucas espécies presentes na área de estudo. Com relação aos estoques de carbono, as espécies que mais contribuíram foram *Ocotea porosa*, *Araucaria angustifolia* e *Eugenia uruguayensis*, sendo que a primeira se mostrou como a espécie mais representativa da área avaliada. O fragmento de FOM analisado estoca 289,97 t/ha de carbono total, 56,32 % se encontram no compartimento do solo, 35,98 % na biomassa florestal (acima do solo e radicular), 5,49 % na necromassa (grossa e fina) e a serrapilheira corresponde a 2,21 %. A empresa possui uma grande área conservada, foi feita uma estimativa de 32.882,60 toneladas de EC e 120.678,01 toneladas de sequestro de dióxido de carbono, em relação a um pequeno fragmento avaliado na área (113,4 ha). Os resultados deste estudo poderão auxiliar no aprimoramento de futuras estimativas no EC nessa tipologia florestal, minimizar a incerteza nos inventários de emissões de GEE relacionadas ao uso da terra, ser base inicial para quantificação para projetos de créditos de carbono na Mata Atlântica, além de demonstrar a grande importância da conservação das florestas como alternativa para a mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Floresta Ombrófila Mista. Hotspot. Sustentabilidade Global. Sequestro de carbono.

ABSTRACT

BIODIVERSITY AND CARBON: EVALUATION OF DIFFERENT FOREST COMPARTMENTS AS AN ALTERNATIVE IN THE MITIGATION OF CLIMATE CHANGE

AUTHOR: Breno Magno Silva dos Santos
ADVISOR: Felipe Turchetto

Climate change is intensifying due to the increase in greenhouse gas (GHG) emissions, resulting from industrialization and the use of non-renewable energy sources. Forest preservation plays a crucial role in the global carbon cycle, significantly influencing climate change mitigation. However, knowledge about the compartmentalization of the total carbon stock (EC) in Atlantic Forest forests, specifically in Mixed Ombrophylous Forest (FOM) is still scarce in Brazil. This study aimed to evaluate the EC in a FOM fragment, covering the compartments: above-ground tree biomass, woody necromass (thick and fine), accumulated litter, root biomass and soil. The study was carried out on permanent plots, located in a conservation area belonging to the company ADAMI S/A Madeiras in the municipality of Passos Maia/SC. In a forest inventory carried out in 2021, data was obtained to estimate above-ground and root tree biomass, where EC was quantified using allometric equations. To estimate EC in thick woody necromass (above 10 cm in diameter), the interceptor line method was used. To collect the fine woody necromass (2 to 10 cm in diameter), a 1.00 x 1.00 m template was used. To collect the accumulated litter, a 0.25 x 0.25 m mold was used. Soil EC was determined using deformed samples 0-30 cm deep into the soil. The Shannon Diversity value (H') obtained for the present study was 3.43 and for the Pielou index (J) 0.85 was obtained, confirming the high diversity and low dominance of one or a few species present in the area of study. Regarding carbon stocks, the species that contributed most were *Ocotea porosa*, *Araucaria angustifolia* and *Eugenia uruguayensis*, with the first being the most representative species of the area evaluated. The FOM fragment analyzed stores 289.97 t/ha of total carbon, 56.32% is found in the soil compartment, 35.98% in forest biomass (above ground and root), 5.49% in necromass (thick and fine) and litter corresponds to 2.21%. The company has a large conserved area, an estimate of 32,882.60 tons of EC and 120,678.01 tons of carbon dioxide sequestration was made, in relation to a small fragment evaluated in the area (113.4 ha). The results of this study may help to improve future EC estimates in this forest typology, minimize uncertainty in inventories of GHG emissions related to land use, be an initial basis for quantification for carbon credit projects in the Atlantic Forest, in addition to demonstrating the great importance of forest conservation as an alternative to mitigating climate change.

Keywords: Mixed Ombrophylous Forest. Hotspot. Global Sustainability. Carbon sequestration.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo, situada no município de Passos Maia - Santa Catarina, em fragmento de Floresta Ombrófila Mista27
- FIGURA 2 - Representação gráfica da parcela permanente principal de 1.000 m² (20 m x 50 m), das 10 subparcelas de 100 m² (10 m x 10 m) e das respectivas subparcelas onde foram realizadas as coletas das amostras de necromassa fina, serrapilheira e solo28
- FIGURA 3 - Procedimento de tradagem (A e B), verruma após a coleta (C), acondicionamento e identificação das verrumas em tubos falcon (D), pesagem das verrumas saturadas pelo método hidrostático (E) e pesagem da verruma seca a 103°C (F), visando a determinação da massa específica de 20 espécies florestais nativas 30
- FIGURA 4 - Separação das verrumas secas a 103°C (A) e moedor de cavacos (B)31
- FIGURA 5 - Compartimentos do estoque de carbono considerados nesse estudo.....32
- FIGURA 6 - Ilustração da metodologia adotada para quantificação da necromassa lenhosa grossa em fragmento de Floresta Ombrófila Mista.....34
- FIGURA 7 - Determinação da necromassa lenhosa grossa caída em diferentes classes de (A, B e C) e realização da cubagem rigorosa na necromassa lenhosa grossa (D e E) 34
- FIGURA 8 - Determinação da necromassa lenhosa fina caída, com auxílio de um gabarito de 1 m x 1 m (A), galhos úmidos com 2 a 10 cm de diâmetro (B), envelopes utilizados e secagem em estufa a 65 °C até estabilização do peso (C) e galhos secos com 2 a 10 cm de diâmetro (D).....37
- FIGURA 9 - Detalhe do procedimento de coleta da serrapilheira acumulada em moldura de 25 cm x 25 cm (A), coleta da serrapilheira (B), materiais encontrados nas parcelas (C) e secagem em estufa a 65 °C (D) 38
- FIGURA 10 - Detalhe da coleta de solo em profundidade de 0-30 cm (A e B), identificação das amostras em sacos plásticos a campo (C) e identificação em envelopes de papel pardo para secagem (D)41
- FIGURA 11 - Maceração e peneiramento do solo (A), diferentes tipos de solos encontrados no estudo (B), identificação das amostras para determinação do carbono orgânico no solo (C e D).....41

FIGURA 12 - Compartimentação do estoque de carbono total em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	55
FIGURA 13 - Estrutura de correlação e o grau de associação das diferentes variáveis analisadas nas nove parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Equações de modelos lineares para biomassa de matéria seca.....	22
TABELA 2 - Densidade básica da necromassa lenhosa grossa em fragmento na Floresta Ombrófila Mista, de acordo com as classes de decomposição	35
TABELA 3 - Teores de carbono (g/kg) da necromassa lenhosa grossa em fragmento na Floresta Ombrófila Mista, conforme as classes de decomposição	36
TABELA 4 - Teor de carbono em diferentes frações encontradas na serrapilheira acumulada em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	39
TABELA 5 - Relação das famílias, espécies, grupo ecológico (GE) e número de indivíduos (NI), em inventário realizado em fragmento em Floresta Ombrófila Mista em Santa Catarina, em fevereiro de 2021	43
TABELA 6 - Estrutura horizontal das espécies arbóreas com CAP>15,7 cm realizada em 2021	45
TABELA 7 - Determinação da massa específica básica, carbono orgânico e estoque de carbono na biomassa acima do solo, de 20 espécies florestais com maior IVI em fragmento em Floresta Ombrófila Mista.....	46
TABELA 8 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa acima do solo (BAS), estoque de carbono na biomassa acima do solo (EC _{BAS}) e do dióxido de carbono na biomassa acima (CO ₂) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	47
TABELA 9 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes ao volume de necromassa grossa (VN), do estoque da necromassa grossa (W), do estoque de carbono na necromassa grossa (EC _{NG}) e do dióxido de carbono na necromassa grossa (CO ₂) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista.....	48
TABELA 10 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa seca da amostra na necromassa fina (BSA _{NF}), estoque de carbono na necromassa fina (EC _{NF}) e do dióxido de carbono na necromassa fina (CO ₂) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	50
TABELA 11 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa seca da amostra na serrapilheira acumulada (BSA _{SA}), do estoque de carbono na	

serrapilheira acumulada (EC_{SA}) e da estimativa de dióxido de carbono (CO_2) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	51
TABELA 12 - Valores médios e desvio padrão (DP) de biomassa seca radicular (BSR), carbono orgânico (CO), estoque de carbono na biomassa seca radicular (EC_{BSR}) e do dióxido de carbono (CO_2), em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista	52
TABELA 13 - Valores médios e desvio padrão (DP) de carbono orgânico (CO) no solo, estoque de carbono no solo (EC_S) e do dióxido de carbono (CO_2), em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista.....	53
TABELA 14 - Determinação dos estoques de biomassa, carbono e sequestro de dióxido de carbono, através do somatório das médias de todos os componentes analisados em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	SEQUESTRO DE CARBONO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	17
2.2	FATORES QUE INTERFEREM NO ESTOQUE DE CARBONO	20
2.3	QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FLORESTAIS ...	21
2.3.1	Biomassa florestal.....	22
2.3.2	Necromassa	23
2.3.2.1	Necromassa lenhosa grossa.....	22
2.3.2.2	Necromassa lenhosa fina.....	23
2.3.3	Serrapilheira	24
2.3.4	Solo.....	24
2.4	O MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO	25
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1	ÁREA DO ESTUDO	27
3.2	AMOSTRAGEM E COLETA DE DADOS	28
3.2.1	Inventário florestal.....	28
3.2.2	Análise fitossociológica	29
3.2.3	Quantificação da massa específica.....	29
3.2.4	Quantificação do teor de carbono orgânico na madeira	31
3.2.5	Compartimentos do estoque de carbono	31
3.2.6	Quantificação da biomassa acima do solo.....	32
3.2.7	Quantificação da necromassa lenhosa grossa	33
3.2.8	Quantificação da necromassa lenhosa fina	36
3.2.9	Quantificação da serrapilheira acumulada.....	38
3.2.10	Quantificação da biomassa nas raízes	39
3.2.11	Quantificação do carbono no solo.....	40
3.3	ANÁLISE DE DADOS.....	42
3.3.1	Análise no Excel.....	42

3.3.2	Análise multivariada	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	ANÁLISE FLORÍSTICA E FITOSSOCIOLÓGICA	43
4.2	ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA ACIMA DO SOLO	46
4.3	ESTOQUE DE CARBONO NA NECROMASSA.....	48
4.4	ESTOQUE DE CARBONO NA SERRAPILHEIRA ACUMULADA.....	51
4.5	ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA RADICULAR	52
4.6	ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO.....	53
4.7	ESTOQUE DE CARBONO TOTAL.....	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

A evolução dos estudos em diferentes áreas da ciência, nos demonstra cada vez mais, como os resultados de ações antrópicas estão cada vez mais preocupantes e impactando nas mudanças climáticas no planeta. O crescimento da industrialização, da atividade agrícola e o uso de fontes de energias não renováveis aumentam e perpetuam o aquecimento da atmosfera através do efeito estufa (MARANDOLA, 2009). Estes processos emitem os gases de efeito estufa (GEE), que são a principal fonte de absorção de calor de maneira desequilibrada na atmosfera, transformando um fenômeno natural de regulação da temperatura em uma questão alarmante para a humanidade (UE, 2009). O carbono é um dos maiores contribuintes na emissão de GEE, dessa forma as políticas mundiais de mitigação de emissões são fundamentais.

As mudanças no clima ocasionadas pela intensificação do efeito estufa têm sido assunto amplamente discutido nos últimos anos devido aos seus efeitos diretos e indiretos no planeta, (OJIMA & MARANDOLA, 2013). Estudos já demonstraram tendências de aumento na temperatura média global do ar e dos oceanos, derretimento generalizado do gelo e aumento global do nível do mar, evidenciando que o aquecimento do sistema climático global é inequívoco e a temperatura global poderá aumentar 2° C até o final do século XXI, devido a intensificação dos extremos climáticos acima dos registros da era pré-industrial, conforme previsto pelo Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (IPCC, 2014). Entre as causas apontadas estão o uso crescente de fontes de energia não renovável, a degradação e desmatamento de florestas, a industrialização e a queima de biomassa, que contribuem para o aumento da concentração de GEE (PARMESAN, 2006).

A conscientização sobre a conexão e a interdependência entre a natureza e a humanidade está aumentando, o que torna a abordagem dos serviços ecossistêmicos (SEs) cada vez mais importante. A oferta de serviços naturais é fundamental para melhorar a qualidade de vida humana (HAINES & POTSCHIN, 2017). Segundo a Millenium Ecosystem Assessment (2003), os SEs incluem serviços de provisão, regulação, suporte e culturais. Destacam-se os serviços de regulação, decorrentes de funções ecológicas de regulação do clima, armazenamento de carbono, ciclagem de nutrientes, polinização e controle da erosão e inundações na biosfera terrestre.

As florestas oferecem múltiplos benefícios ecológicos, tais como estabilização e retenção do solo, proteção contra a erosão, regulação do ciclo hidrológico, produção de sombra nas margens de rios (MARTELLI & CARDOSO, 2018) e remoção de GEE da atmosfera, principalmente, com o sequestro do dióxido do carbono (CO₂) (SANQUETTA et al., 2011). A

remoção de GEE, principalmente CO₂, é vista como alternativa sustentável para combater o aquecimento global e seus efeitos desastrosos, contrapondo-se às emissões constantes de CO₂ (ZHU et al., 2019). Segundo Vieira (2019), as florestas são responsáveis por 90% da biomassa mundial e cobrem 40% da superfície terrestre, com alta capacidade de armazenamento de carbono em comparação com outros tipos de vegetação.

Assim, considerando os efeitos adversos da emissão de GEE, os órgãos reguladores têm traçado objetivos e metas para mitigar as mudanças climáticas. A 27^a Conferência do clima das nações unidas (COP 27), visou disponibilizar uma plataforma para que governos, organizações e outras partes interessadas trabalhem em conjunto para mitigar as emissões de GEE e alcançar metas climáticas ambiciosas. Isso inclui a promoção de tecnologias limpas, a implementação de políticas públicas eficazes para reduzir as emissões de carbono, aumentar a eficiência energética e a capacitação de comunidades para lidar com os impactos das mudanças climáticas.

Com a proliferação de compromissos de neutralidade climática por parte de países e empresas de todo o mundo e o término da elaboração das regras do Acordo de Paris para governar as transações internacionais de créditos de carbono, os mercados de créditos de carbono têm experimentado uma grande demanda, o que tende a aumentar nos próximos anos. Este cenário oferece muitas oportunidades para governos e empresas desenvolverem projetos direcionados à redução de emissões, que podem se beneficiar de um mercado com perspectivas de crescimento de até quinze vezes em 2030 e cem vezes em 2050 (TSVCM, 2021). A procura por créditos de carbono para fins regulatórios é uma fonte importante de demanda pelos ativos, devido ao diferencial entre sistemas regulados e mercados de carbono voluntários. Nesse sentido, o relatório *States and Trends of Carbon Markets*, do Banco Mundial, ressalta que o interesse no estabelecimento de padrões comuns para a precificação do carbono nas jurisdições está aumentando. De acordo com o relatório, em 2021 este mercado global atingiu um valor recorde de US\$ 84 bilhões, um aumento de 60% em relação a 2020 (WORLD BANK, 2022).

O Brasil tem condições privilegiadas para desenvolver um mercado vibrante de créditos voluntários de carbono, com 15% de todo o potencial global de captura de carbono por meios naturais em território nacional (WORLD BANK, 2023). Entretanto no país, a maioria das pesquisas voltadas ao sequestro de carbono e a estudos sobre a quantificação de biomassa acima do solo são realizados na Floresta Amazônica (OLIVEIRA et al., 2020), com poucas pesquisas voltadas para a Mata Atlântica. A vegetação remanescente do bioma Mata Atlântica se encontra extremamente fragmentada (RIBEIRO et al., 2009), e sua cobertura vegetal original está reduzida a cerca de 28% (REZENDE et al., 2018), o que a classifica como um hotspot de

biodiversidade mundial, sendo uma área rica em biodiversidade, marcada pela presença de espécies endêmicas, contudo bastante ameaçada (MYERS et al., 2000).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estimar a biomassa e o estoque de carbono em fragmento de Floresta Ombrófila Mista, contemplando os compartimentos: biomassa arbórea acima do solo, necromassa lenhosa (grossa e fina), serrapilheira acumulada, biomassa de raízes e solo em área conservada da Mata Atlântica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estimar o estoque de biomassa e carbono na biomassa acima do solo e nas raízes;
- Quantificar a biomassa e o estoque de carbono presentes na necromassa grossa e fina;
- Verificar o estoque de biomassa e carbono na camada de serrapilheira acumulada;
- Estimar o estoque de carbono no solo na camada de 0-30 cm de profundidade;
- Verificar a influência da composição de espécies, da densidade e da área basal nos estoques de carbono nos diferentes compartimentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SEQUESTRO DE CARBONO E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De acordo com a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), as mudanças climáticas são definidas como variações climáticas ao longo do tempo, que podem ser atribuídas direta ou indiretamente às atividades humanas e que resultam em uma mudança na composição da atmosfera global, intensificando as alterações climáticas naturais (UNFCCC). A questão das emissões de GEE e seus efeitos sobre a mudança climática tem sido amplamente discutida no âmbito governamental global. O modelo produtivo global é intensivo em carbono, baseado em fontes como combustíveis fósseis e emissões de GEE, e os impactos climáticos decorrentes apresentam grandes desafios, especialmente diante da

perspectiva de aumento da temperatura global acima de 2° C em comparação com os níveis pré-industriais (BRASIL, 2020).

A Terra já passou por muitas mudanças naturais de temperatura ao longo de sua história. Entretanto, a atividade humana está afetando esses processos ao elevar a concentração de gases na atmosfera e conseqüentemente, aumentando a temperatura média global. Isso tem levado a outras conseqüências, incluindo variações nas precipitações, eventos climáticos extremos e agravamento de períodos de seca (PBMC, 2016). A presença de CO₂ na atmosfera tem experimentado uma significativa elevação, passando de 280 partes por milhão (ppm) no início do século XVIII para 400 ppm no início do século XXI. Estimativas indicam que, no futuro, essas concentrações podem atingir valores de 600 ppm até 2050 e de 800 a 1000 ppm até 2100. Conseqüentemente, é esperado um aumento na temperatura média global, que pode variar de 2 a 4° C, o que pode causar mudanças do clima de proporções globais jamais observadas em tão curto período (PORTER et al., 2014).

Nos últimos anos, houve um esforço para restaurar as concentrações dos GEE na atmosfera. Esses gases absorvem uma parte da radiação solar e a redistribuem como radiação na atmosfera, contribuindo para o aquecimento do planeta. Os principais GEE presentes na atmosfera incluem CO₂, metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃), halocarbonos e vapor d'água. Atualmente, duas questões são discutidas com relação a estes gases: a redução de suas emissões e o aumento de sua captura (IPCC, 2023). Segundo Carvalho et al. (2010) como solução para as crescentes emissões de GEE, destacam-se a produção de biocombustíveis, melhorias na eficiência energética e o reflorestamento, estando este último associado ao sequestro de carbono.

A fim de combater o aquecimento global e suas conseqüências, foi assinado em 2015 o Acordo de Paris, que visa reunir esforços coletivos e limitar o aumento da temperatura global a menos de 2° C acima dos níveis pré-industriais. Para alcançar as metas estabelecidas no acordo, é imprescindível que sejam feitas significativas reduções nas emissões globais de GEE (PROLO et al., 2021). Para equilibrar as emissões de GEE e controlar as mudanças climáticas, estima-se que sejam necessárias remoções simultâneas de GEE e que as emissões sejam nulas até 2050. Como solução para essa transição climática, o mercado de sequestro de carbono tem se tornado uma alternativa cada vez mais atrativa (ROGELJ et al., 2018).

Uma das definições mais conhecidas do sequestro de carbono é a descrita por Silva (2012), que afirma tratar-se do processo pelo qual o carbono é removido da atmosfera e incorporado na biomassa vegetal, um processo natural que ocorre na fase de crescimento das plantas, que em seu desenvolvimento demandam grande quantidade de carbono. Por isso, está

sendo considerado como uma solução importante para mitigar o aquecimento global. O termo sequestro de carbono ganhou destaque com a Conferência das Partes realizada em 1997 em Kyoto, que resultou no Protocolo de Kyoto. O protocolo visou o estabelecimento de metas de redução das emissões dos GEE por parte dos países desenvolvidos. Além disso, foram estabelecidos mecanismos adicionais de implementação, como forma de flexibilização para se atingir as metas de redução de GEE (BARBIERI, 2016; SILVA et al., 2013).

O Brasil possui uma das maiores áreas de florestas do mundo, com uma estimativa de 488 milhões de hectares de florestas nativas e 9,8 milhões de hectares de florestas plantadas, totalizando mais de 58% da cobertura do território nacional (COLATTO, 2020). Essas florestas desempenham um papel importante como sumidouro de carbono, contribuindo para o inventário nacional de emissões e remoções de GEE (COLATTO, 2020). Os estoques de carbono no solo e biomassa vegetal é fundamental para o funcionamento dos ecossistemas e a redução dos impactos negativos das mudanças no clima. Por esse motivo, profissionais e pesquisadores buscam frequentemente avaliar a eficiência das medidas mitigatórias existentes e propor novas soluções, incluindo florestas nativas e plantadas (COLATTO, 2020).

A compensação do carbono pelo plantio de árvores acontece através do sequestro de carbono da atmosfera que é armazenado na biomassa da planta. Em média, uma árvore pode sequestrar até 15,6 quilos de CO₂ por ano, o que ajuda a calcular quantas árvores são necessárias para compensar as emissões de GEE de uma empresa. Além disso, o plantio de árvores é a alternativa mais acessível para pessoas físicas que buscam compensar suas emissões cotidianas (DUARTE & MARCHETTO, 2014). A fotossíntese é um processo natural que permite que as árvores absorvam CO₂ e o utilize para seu crescimento, armazenando-o em sua biomassa. No entanto, também é importante lembrar que as árvores emitem CO₂ durante o ciclo da respiração e a decomposição ou queima da biomassa. Quando o carbono armazenado em uma floresta supera as emissões de CO₂ da respiração das árvores, este processo é conhecido como sequestro de carbono (OHSE et al., 2007).

Nesse contexto, o excesso de carbono na atmosfera, devido às grandes quantidades emitidas anualmente, é o fator predominante na intensificação do efeito estufa, sendo sua neutralização um objetivo frequente nas políticas públicas de desenvolvimento sustentável. (MARENCO 2006). Dessa forma, tendo em vista a capacidade expressiva de transformação do carbono atmosférico em matéria vegetal existente em árvores, é evidente a eficiência das florestas nativas e plantações florestais em combater o efeito negativo das emissões de CO₂. (AHOLOUKPÈ et al., 2013). No entanto, para que as medidas compensatórias de sequestro de

carbono sejam sustentáveis, é importante considerar também os aspectos socioeconômicos envolvidos em projetos nessa área (RODRIGUES et al., 2014).

2.2 FATORES QUE INTERFEREM NO ESTOQUE DE CARBONO

As florestas desempenham um papel fundamental na sobrevivência e evolução de todas as espécies, incluindo a humana. Através da fotossíntese, as plantas absorvem radiação solar, CO₂ e água, transformando-os em energia, oxigênio e matéria orgânica. Esses elementos são cruciais para a existência de todas as formas de vida no planeta e servem como matéria-prima para diversas indústrias. Portanto, tanto o contexto biótico quanto o abiótico possuem papéis decisivos na taxa fotossintética das plantas e suas interações ecológicas nos ecossistemas. Como as plantas usam diretamente CO₂, luz, nutrientes e água em seus processos biológicos, é esperado que as mudanças climáticas afetem diretamente as plantas, o que pode resultar em graves consequências globais. Diante disso, é previsto mudanças no microclima e biodiversidade nos ecossistemas terrestres em um futuro próximo (TAIZ; ZEIGER, 2006).

O solo é um grande depósito de CO₂, com capacidade de armazenar cerca de três vezes mais CO₂ do que a atmosfera. O aumento de carbono na atmosfera e da temperatura global pode agravar o efeito estufa, alterar a dinâmica das trocas gasosas das plantas e o ciclo de carbono nos ecossistemas. Outros fatores, como a umidade do solo, também podem afetar esses processos. A quantidade de carbono na vegetação e no solo é regulada por uma série de fatores climáticos e biogeoquímicos e é diretamente impactada por mudanças no uso e ocupação do solo, especialmente através da transformação de florestas nativas em áreas agrícolas e pecuárias, o que leva a uma redução na quantidade de carbono armazenado (TAIZ; ZEIGER, 2006).

Estima-se que o desmatamento das florestas tropicais tenha contribuído com mais de 60% das emissões globais por mudança de uso do solo entre 1990 e 2010 (ACHARD et al., 2014). As principais causas desse tipo de degradação são a exploração intensiva dos recursos florestais, corte seletivo, coleta de madeira, agricultura itinerante e os efeitos decorrentes da fragmentação, que ocasiona o desmatamento (ASNER et al., 2009). A redução de florestas leva a uma diminuição de carbono no solo, tanto pela redução da deposição de matéria orgânica quanto pela erosão causada pelos danos ao solo sem a cobertura (LAGANIERE et al., 2010).

A fragmentação tem como consequência a criação de fronteiras artificiais entre a floresta e outros usos do solo. Dessa forma, áreas localizadas nas bordas dos fragmentos estão mais expostas à influência do ambiente externo, resultando em uma diferença na temperatura,

umidade, luminosidade e variação na distribuição de organismos entre a borda e o interior (RIES et al., 2004). Essas alterações modificam a estrutura e composição da floresta e podem influenciar no EC (LAURANCE et al., 2011). A perda de carbono causada pelos efeitos de borda representam 9 a 24% da emissão anual de CO₂ decorrente do desmatamento (PUTZ et al., 2014) e, se considerar em conjunto as emissões de carbono da exploração florestal, elas podem ser igualmente ou até mais significativas do que as emissões de carbono resultantes do desmatamento (HOUGHTON, 2013).

Na presença de paisagens compostas por diferentes tipos de uso do solo, os impactos das bordas tornam-se complexos e mais dificilmente detectados (HARPER et al., 2005). Paisagens altamente fragmentadas podem sofrer mais perdas de carbono por efeitos de borda do que paisagens menos fragmentadas, mesmo que tenham a mesma porcentagem de cobertura vegetal, devido à sua maior extensão de bordas, além disso, quanto mais heterogênea for a paisagem, mais intensas serão as interações entre seus fragmentos e usos do solo (PÜTZ et al., 2011).

Além das alterações na estrutura florestal, as mudanças de uso do solo também afetam os estoques de carbono. Essas mudanças influenciam fatores como a taxa de decomposição da matéria orgânica (temperatura, umidade, microbiota do solo) e a estrutura e estabilidade do solo contra a erosão, fatores que afetam a formação e manutenção do EC do solo (DAVIDSON & JANSSENS, 2006). Compreender a variação nos estoques de carbono na vegetação e no solo em paisagens altamente fragmentadas e heterogêneas requer levar em conta a ação simultânea dos fatores mencionados anteriormente, assim como suas interações múltiplas. Desmatamento, práticas de manejo, fragmentação, efeito de borda, consórcio com outras espécies, variáveis ambientais, tipo de solo, umidade do solo, temperatura e intensidade luminosa são exemplos de influências externas que podem influenciar o crescimento das plantas e alterar os padrões de assimilação e alocação do carbono (SHARKEY, 2015).

2.3 QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO EM ECOSISTEMAS FLORESTAIS

Para quantificar o carbono existem métodos adaptados, os quais monitoram as mudanças nos estoques em diferentes compartimentos das plantas, podendo então prever o impacto das práticas de manejo sobre o comportamento do estoque de carbono em diferentes ecossistemas e assim quantificar o que se perde para a atmosfera ou se ganha incorporando esse elemento nas plantas. Assim, impedir que grandes quantidades de CO₂ sejam adicionadas à atmosfera

sendo então estocados nas plantas, pode ser uma solução que mimetize esse problema ambiental.

2.3.1 Biomassa florestal

Na literatura, há falta de acordo sobre o que define a biomassa. Para Martinelli et al. (1994) a biomassa é definida como a massa do material vegetal disponível em uma floresta. Brigadão (1992) refere-se ao termo fitomassa como sendo o material seco da planta, que combinado com a zoomassa, corresponde à biomassa. Sanquetta (2002) considera que o termo biomassa florestal pode significar toda a biomassa existente na floresta.

Segundo Larcher (2001), a composição química da biomassa vegetal varia com a espécie, fase de desenvolvimento, nutrição, condições do solo e clima e a parte da planta considerada. Em média, a biomassa de árvores é composta por 50% de carbono, 43% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% dos outros elementos minerais. Estudo realizado em fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana (FOMM), verificou-se uma variação nos teores de carbono de 34,01% a 47,34%, dependendo da espécie e do componente avaliado, que podem ser fuste, casca, galhos, folhagem, miscelânea, raízes ou a árvore total (WATZLAWICK et al., 2004). A biomassa florestal pode ser quantificada por métodos diretos, através de equipamentos específicos ou por métodos indiretos, através de modelos matemáticos, na literatura são encontrados vários modelos de diferentes autores, entretanto alguns estimam valores mais precisos (Tabela 1).

TABELA 1 - Equações de modelos lineares para biomassa de matéria seca

Modelo	Autor
$\text{Ln}Y = b_0 + b_1 \ln D + b_2 \ln h$	Schumacher; Hall (1933)
$Y = b_0 + b_1 D + b_2 D^2 + b_3 h + b_4 D^2 h$	Meyer (1941)
$Y = b_0 + b_1 (D^2 h)$	Spurr (1952)
$Y = b_0 + b_1 D + b_2 D^2 h$	Higuchi; Carvalho (1994)
$Y = b_0 + b_1 D + b_2 D^2 + b_3 D^2 h$	Higuchi; Carvalho (1994)
$Y = b_0 + b_1 D^2 + b_2 D^2 h$	Sanquetta (2001)
$BAS = 0,0559 * (ME * d^2 * h)$	Chave et al. (2014)

Sendo Y: BST (Biomassa de matéria seca total); D: Diâmetro a altura do peito (1,30 m); h: Altura total (m); b1, b2, b3, b4: Coeficientes de regressão estimados a partir da amostra e Ln: Logaritmo neperiano.

Fonte: Autor (2023)

2.3.2 Necromassa

A necromassa encontrada nos ecossistemas florestais é crucial para manter o EC. Por isso, sua quantificação é valiosa para uma gestão florestal eficiente. A necromassa é composta pelo material lenhoso de maiores dimensões, como árvores mortas em pé, e galhos e troncos caídos sobre o solo e pela serrapilheira (IPCC, 2003). Em ecossistemas florestais a necromassa apresenta elevada importância, as árvores mortas oferecem habitat para muitas espécies, é a chave para o retorno dos nutrientes para o solo (VITOUSEK, 1982; STOKLAND; SIITONEN; JONSSON, 2012). Além disso, é um importante componente de sistemas fluviais, influenciando a hidrologia e o transporte de sedimentos (KENNEDY; WOODS, 2012).

O IPCC define cinco reservatórios de carbono em ecossistemas florestais: 1) biomassa acima do solo; 2) biomassa de raízes; 3) matéria orgânica do solo; 4) madeira morta e 5) serrapilheira (incluídos na definição de necromassa) (IPCC, 2006). A necromassa grossa e fina (madeira morta) representam substanciais estoques de carbono do ecossistema florestal (WOODALL; LIKNES, 2008). Contudo, mesmo representando uma parte importante do carbono na biomassa acima do solo, a quantificação da necromassa não é uma prática comum em estudos florestais.

2.3.2.1 Necromassa lenhosa grossa

No que tange a madeira morta sobre o piso florestal, a abordagem para determinação do EC inclui a estimação do volume de material por classe de densidade básica da madeira e a conversão para massa, a partir do volume obtido e a densidade básica, (IPCC, 2003). Assim, primeiramente deve-se quantificar o volume de material, sendo os métodos mais comumente utilizados o método da linha interceptadora (ARYAL et al., 2014) e o método da parcela de área fixa (FONSECA et al., 2011).

2.3.2.2 Necromassa lenhosa fina

A fração da necromassa florestal composta por materiais lenhosos de menores dimensões frequentemente não é avaliada nos inventários, uma vez que estudos de serrapilheira incluem, em geral, material lenhoso de até cerca de 2 cm de diâmetro e estudos de madeira morta incluem, em geral, material acima de 10 cm de diâmetro (MASS, 2015). Para quantificação da necromassa fina Harmon e Sexton (1996) sugerem parcelas de 1 m² para necromassa com diâmetro inferior a 10 cm, e devido à alta variabilidade recomendam o uso de pelo menos 10 parcelas para cada fragmento amostrado.

2.3.3 Serrapilheira

A camada superficial do solo em ambientes florestais é conhecida como serrapilheira, sendo uma camada orgânica formada por folhas, ramos, órgãos reprodutivos e miscelânea, ela desempenha várias funções importantes para o equilíbrio e dinâmica destes ecossistemas (COSTA et al., 2010). A quantidade e o teor de nutrientes da serrapilheira, resultante do povoamento florestal, afetam a produtividade do solo e seu potencial de recuperação ambiental. Isso ocorre devido a mudanças nas características físicas do solo causadas pelo adicionamento de material orgânico (SCHUMACHER et al., 2004).

A estimativa do estoque de serrapilheira apresenta diferentes métodos, sendo mais comum o uso de gabarito de dimensões conhecidas (WATZLAWICK et al., 2012; GODINHO et al., 2014). O método consiste em lançar o gabarito em diferentes pontos nas parcelas de estudo e coletar toda a serrapilheira presente dentro do quadro. Outra forma de estimar a quantidade de serrapilheira presente no piso florestal é pela medição da profundidade da camada desse material com uma régua (USDA, 2011).

2.3.4 Solo

Os solos florestais desempenham um papel crucial no ciclo global do carbono (CALDEIRA et al., 2002; DRESNER et al., 2007). Estima-se que esses solos representem aproximadamente 45% do carbono total armazenado nos ecossistemas florestais (FAO, 2010). Exceto pelas florestas tropicais, a maior proporção do carbono florestal é encontrada no solo (REICHSTEIN, 2007), embora esse compartimento seja altamente suscetível a emissões de GEE resultantes de distúrbios (DINCA et al., 2012). Distúrbios, como a introdução de práticas

agrícolas que quebram os agregados e expõem a matéria orgânica ao ataque microbiano, podem acelerar a decomposição, resultando na liberação de carbono para a atmosfera (LUO E ZHOU, 2006). Estudos adicionais indicam que o aumento da temperatura, associado às mudanças climáticas, pode intensificar os processos de decomposição e a liberação de carbono do solo para a atmosfera (VILLELA et al., 2012), implicando que o solo pode ser tanto fonte quanto sumidouro de carbono (BRUCE et al., 2010).

As principais contribuições para a entrada de carbono no solo provêm de plantas e animais em decomposição (BRUCE et al., 2010). Portanto, a matéria orgânica tende a se concentrar nas camadas superficiais, com cerca de metade do carbono orgânico (CO) presente nos primeiros 30 cm do solo (IPCC, 2006). Como resultado, amostras para a determinação do CO do solo são geralmente coletadas a uma profundidade de até 30 cm (RAVINDRANATH; OSTWALD, 2008). A determinação da densidade do solo é geralmente realizada por meio da secagem e pesagem de uma amostra de solo, cujo volume é conhecido ou precisa ser determinado. A obtenção da amostra de solo difere entre os métodos, sendo frequente o uso do método do anel volumétrico. Este método envolve a amostragem do solo com estrutura indeformada em um cilindro metálico de volume conhecido e bordas cortantes, conforme descrito pela Embrapa em 1997 (EMBRAPA, 1997).

2.4 O MERCADO DE CRÉDITO DE CARBONO

A nível global, o mercado de carbono surgiu na década de 1990 como uma ação política coletiva para combater as mudanças do clima. O comércio de carbono era considerado a solução mais eficiente para tributar entidades poluentes ou impor limites às emissões de forma compulsória, o que é típico de uma abordagem de "comando e controle" (MILNER 2007). Um crédito de carbono é um título negociável que assume a forma de uma unidade. Ele dá ao proprietário o direito de emitir uma tonelada de CO₂ ou gás de efeito estufa equivalente (CO₂-eq). Há dois tipos de créditos: licenças e certificados. Uma licença fornece a uma entidade o direito de liberar uma quantidade específica de GEE na atmosfera. Um certificado é uma forma de verificação por parte de fontes confiáveis de que uma organização ou indivíduo evitou ou reduziu as emissões de uma tonelada de CO₂-eq. O *Emission Trading System* (ETS) criado pelo Protocolo de Kyoto tem como objetivo incentivar os países a combater as mudanças climáticas através do comércio de créditos de carbono (SHOW e LEE 2008).

O comércio de créditos de carbono incentiva as empresas a reduzir suas emissões, pois podem vender créditos sobrando ou comprar créditos de outras empresas que excederam suas

metas de redução. A disposição para a negociação foi regulamentada por um tratado internacional. Este sistema permite que os participantes do mercado cumpram suas permissões de emissão de carbono determinadas pelo governo ou autoridade regional. Muitos países aderiram ao tratado de comércio de carbono internacional para estabelecer um sistema de negociação de permissões de emissão de carbono em seu país (KENTON, 2014).

Os mercados de créditos de carbono podem ser categorizados em três tipos: mercados obrigatórios e voluntários, mercados de alocação e compensação e mercados internacionais e regionais. Um mercado obrigatório é regido por um sistema de limites e comércio que estabelece as quotas de emissões de GEE para cada país, conforme o protocolo de Kyoto. Já o mercado voluntário não é regulamentado pelo protocolo de Kyoto, o que significa que não há normas ou regulamentações específicas, dependendo das ações climáticas voluntárias de empresas e pessoas. No mercado de alocação, os participantes podem negociar licenças de emissão emitidas dentro dos limites estabelecidos. Se alguma entidade não conseguir cumprir sua quota de carbono, ela precisará adquirir créditos no mercado de compensação. Compensações são compras de créditos de carbono que apoiam projetos como plantações florestais e fazendas de energia solar. Por fim, em um mercado internacional, o comércio de créditos de carbono ocorre entre países, enquanto em um mercado regional, as transações são restritas à fronteira interna da nação (SEI e GHGMI 2011).

Compreensivelmente, o comércio de carbono tem sua parte de críticas. Pearse e Böhm (2014) destacam a visão de múltiplas “partes interessadas” sobre os mercados de carbono propagando a “injustiça climática”, pois esses mercados não conseguiram reduzir as emissões, ao mesmo tempo em que exacerbam as desigualdades no desenvolvimento. Michaelowa et al. (2019) traçaram a evolução e o desenvolvimento dos mercados de carbono desde seu surgimento e operação na década de 1990 até o período áureo entre 2005-2011, seguido por uma queda na demanda e fragmentação até cerca de 2014. Desde o ano de 2015, após o Acordo de Paris, há esforços crescentes de participação global, embora ambiciosos e cheios de desafios, como equilíbrio entre oferta e demanda, integridade ambiental, custos e conflitos com políticas e metas nacionais.

No entanto, existem apenas 16 nações operando em conformidade com os objetivos do tratado (PEARSE E BÖHM, 2014). Apesar do interesse dos governos em colaboração internacional, faltam realizações concretas. Atualmente, 57 sistemas de preços para o carbono foram estabelecidos ou estão em andamento. Destes, metade é realizada através de sistemas de negociação de emissões (ETS) e o restante por tributação. Ao todo, 46 países e 28 regiões provinciais já estão monetizando no mercado de carbono. Esses mercados regularam 11

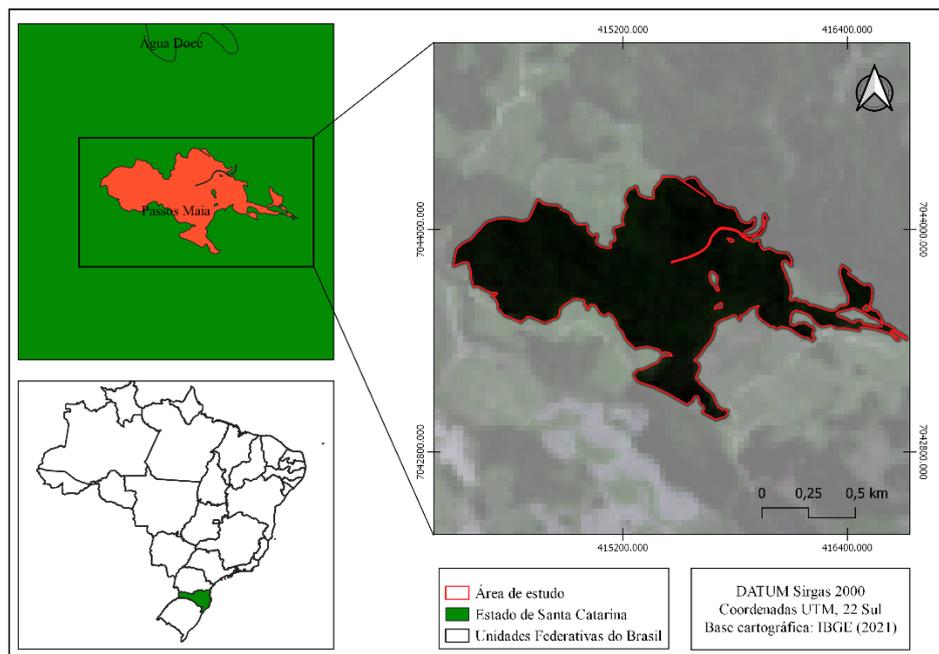
gigatoneladas de CO₂, quase o equivalente a 20% das emissões globais de GEE (RAMSTEIN et al., 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DO ESTUDO

O estudo foi realizado em um remanescente inserido na tipologia de Floresta Ombrófila Mista Altomontana (Mata de Araucárias) (Velooso et al., 1991), sob as coordenadas geográficas 26°42'22" Sul e 51°50'59" Oeste. A área avaliada compreendeu 1,2 ha de um fragmento de floresta nativa contendo 113,4 ha, pertencente a empresa ADAMI S/A Madeiras, localizado no município de Passos Maia - Santa Catarina (Figura 1).

FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo, situada no município de Passos Maia - Santa Catarina, em fragmento de Floresta Ombrófila Mista



Fonte: Autor (2023)

A área apresenta variação altimétrica na distribuição das unidades amostrais entre 1031 e 1120 metros em relação ao nível do mar. O clima da região, conforme classificação de Köppen é classificado como temperado (mesotérmico úmido e verão ameno), pertencente à variedade específica “Cfb”, com precipitação média anual entre 1.300 a 1.500 mm, umidade relativa do ar (média) entre 78 a 80%, apresentando temperatura média anual entre 15 - 16° C (PANDOLFO, 2002).

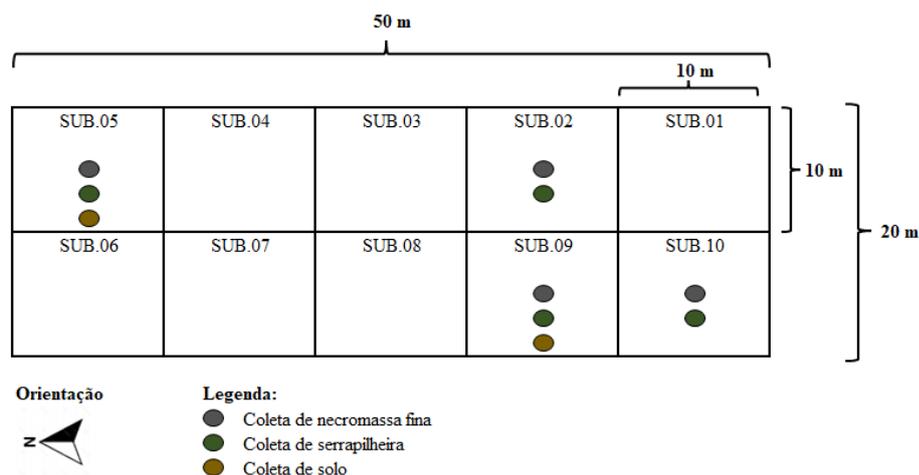
Na área há predomínio de cambissolos e neossolos (EMBRAPA, 2006). As características topográficas dividem-se em plano, ondulada e fortemente ondulada. O remanescente florestal estudado pertence a FOM, que compreende espécies popularmente conhecidas como: *Ocotea porosa* (Nees) Barroso (imbuia), *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. (erva-mate), *Eugenia uruguayensis* Cambess. (Guamirim-vermelho) e *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (araucária).

3.2 AMOSTRAGEM E COLETA DE DADOS

3.2.1 Inventário florestal

O inventário florestal foi realizado no ano de 2021, utilizando-se o método de amostragem através de parcelas de área fixa, em um total de 12 parcelas de 1.000 m² (20 m x 50 m) e subdivididas em 10 subparcelas de 100 m² (10 m x 10 m). As parcelas de 1.000 m², foram utilizadas para o levantamento do estrato arbóreo, sendo mensurados todos os indivíduos com diâmetro a altura do peito a 1,3 m do solo (DAP) \geq 5 cm, sendo obtidas as variáveis DAP, altura total e comercial de cada árvore (Figura 2).

FIGURA 2 - Representação gráfica da parcela permanente principal de 1.000 m² (20 m x 50 m), das 10 subparcelas de 100 m² (10 m x 10 m) e das respectivas subparcelas onde foram realizadas as coletas das amostras de necromassa fina, serrapilheira e solo



Fonte: Autor (2023)

No levantamento, todos os exemplares amostrados foram identificados quanto à família botânica, espécie e posição sociológica correspondente. Para as espécies não identificadas no local foram coletadas amostras representativas do indivíduo, como ramos, folhas,

inflorescências e/ou sementes. O material vegetativo foi avaliado por meio de consulta botânica conforme o sistema Angiosperm Phylogeny Group (APG) IV (2016) e auxílio de especialistas. Adicionalmente, as espécies foram classificadas em grupos ecológicos, conforme as diretrizes estabelecidas por Reitz et al. (1979) e pelo Instituto de Florestas e Conservação da Natureza do Estado (IFFSC, 2013).

3.2.2 Análise fitossociológica

Para a análise da estrutura da vegetação do ecossistema em estudo, foram calculados diversos parâmetros fitossociológicos com o intuito de avaliar a composição, a abundância e a distribuição das espécies. Esses parâmetros incluíram frequência absoluta (FA) e relativa (FR), densidade absoluta (DA) e relativa (DR), dominância absoluta (DoA) e relativa (DoR), o Índice de Valor de Importância (IVI) e o Índice de Valor de Cobertura (IVC). Os resultados dessas análises foram apresentados nesse estudo para as 20 espécies com o maior IVI, fornecendo uma visão mais detalhada das espécies mais significativas do fragmento.

Foram determinados os índices de Diversidade de Shannon-Wiener (H') e de equabilidade de Pielou (J). Esta abordagem permitiu uma compreensão da dinâmica da floresta no ecossistema, sua resposta a distúrbios ambientais em relação as mudanças climáticas e seu papel na sucessão ecológica. A análise dos dados e a estimativa dos parâmetros fitossociológicos foram conduzidas utilizando o software Excel (Microsoft, 2016).

3.2.3 Quantificação da massa específica

A massa específica (ME) foi determinada para as 20 espécies com maior IVI. Para cada espécie selecionada, foram escolhidos aleatoriamente nas parcelas de inventário, cinco indivíduos adultos para coleta de um filete de madeira (verruma), para posterior determinação da ME. Esta amostragem contemplou apenas indivíduos adultos, isto é, indivíduos com DAP superior a 5 cm. Para determinação do método direto da ME, foi empregado o método da árvore individual, sendo feita a verrumagem, utilizando o trado de Pressler. A tradagem do tronco foi realizada a 1,30 m do solo, na posição horizontal e mais cômoda para a coleta da amostra (Figura 3).

FIGURA 3 - Procedimento de tradagem (A e B), verruma após a coleta (C), acondicionamento e identificação das verrumas em tubos falcon (D), pesagem das verrumas saturadas pelo método hidrostático (E) e pesagem da verruma seca a 103°C (F), visando a determinação da massa específica de 20 espécies florestais nativas



Fonte: Autor (2023)

As amostras foram identificadas e acondicionadas em recipientes apropriados para mantê-las íntegras (tubos falcon) e com o mínimo de perdas de umidade. As amostras de madeira foram submersas em água, onde permaneceram até atingirem a saturação. Para a obtenção da ME das amostras, determinou-se o volume saturado utilizando o método hidrostático e o peso seco, determinado após permanecerem em estufa a $103 \pm 2^\circ \text{C}$ até atingirem o peso constante, o cálculo foi realizado utilizando a seguinte equação:

$$ME = \frac{Ps}{Vs} \quad (1)$$

Em que:

ME = Massa específica básica da madeira (g/cm^3);

Ps = Peso seco (g);

Vs = Volume saturado (cm^3).

3.2.4 Quantificação do teor de carbono orgânico na madeira

Para a determinação do teor de carbono (TC) foram utilizadas as mesmas amostras para a determinação da ME. O material foi fragmentado e moído até a consistência de pó, empregando-se um moedor de cavacos e peneira metálica na primeira etapa, após as amostras passaram por um moinho e foram peneiradas novamente. No procedimento de moagem tomou-se o cuidado para não haver contaminação das amostras, mediante a limpeza do moinho com um jato de ar comprimido a cada moagem. Para a determinação dos teores de carbono as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de análise química do solo da Universidade Federal de Santa Maria *campus* de Frederico Westphalen, sendo utilizada para a determinação do TC a metodologia proposta por (TEDESCO et al., 1995) (Figura 4).

FIGURA 4 - Separação das verrumas secas a 103° C (A) e moedor de cavacos (B)



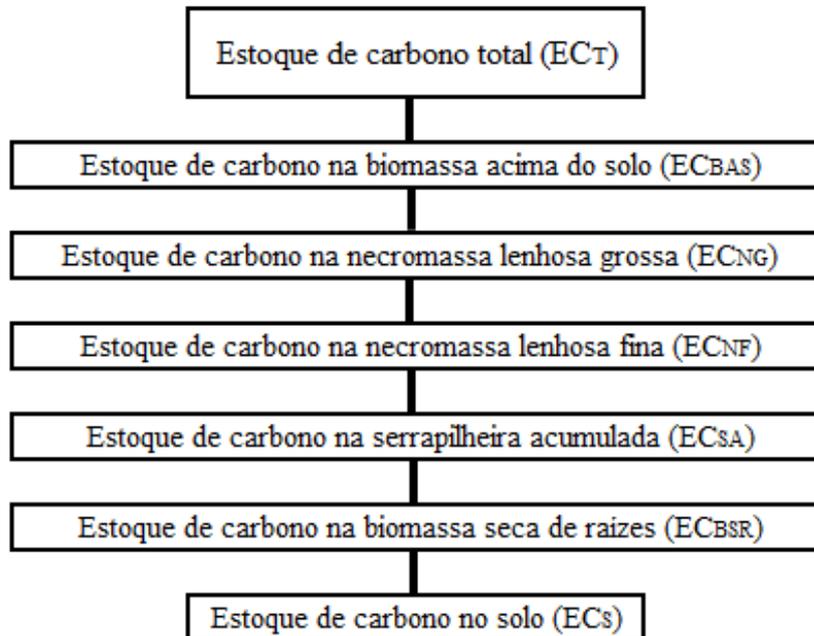
Fonte: Autor (2023)

3.2.5 Compartimentos do estoque de carbono

Neste estudo adotou-se as seguintes terminologias para melhor compreensão, o estoque de carbono total (EC_T) foi obtido pela soma das médias dos estoques de carbono na biomassa acima do solo (EC_{BAS}), da necromassa lenhosa grossa (EC_{NG}), da necromassa lenhosa fina (EC_{NF}), da serrapilheira acumulada (EC_{SA}), da biomassa seca de raízes (EC_{BSR}) e do solo (EC_S).

Cada compartimento seguiu as metodologias que serão descritas nos próximos tópicos, para estimação do EC_T em t/ha (Figura 5).

FIGURA 5 - Compartimentos do estoque de carbono considerados nesse estudo



Fonte: Autor (2023)

3.2.6 Quantificação da biomassa acima do solo

A estimativa da biomassa acima do solo foi realizada por meio de equação alométrica, utilizando-se como base os dados do inventário florestal. Assim, a biomassa foi estimada por meio da equação de (CHAVE et al., 2014), conforme descrita abaixo:

$$BAS = 0,0559 * (ME * d^2 * h) \quad (2)$$

Em que:

BAS = Biomassa acima do solo (t/ha);

ME = Massa específica básica da madeira (g/cm^3);

d = Diâmetro a altura do peito (cm);

h = Altura total (m).

Para estimar a quantidade de carbono estocado no componente arbóreo, realizou-se a multiplicação da biomassa acima do solo (BAS) pelo TC referente as espécies analisadas, através da seguinte equação:

$$EC_{BAS} = BAS * TC \quad (3)$$

Em que:

EC_{BAS} = Estoque de carbono na biomassa acima do solo (t/ha);

BAS = Biomassa arbórea acima do solo (t/ha);

TC = Teor de carbono das espécies analisadas (%).

Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO_2 . O fator de conversão utilizado foi igual a 3,67, obtido pela razão entre a massa molecular do dióxido igual a 44 e a massa atômica do carbono, igual a 12 (RAMÍREZ et al., 1997). Assim, a quantidade de CO_2 capturado foi estimado pela equação:

$$CO_2 = 3,67 * EC \quad (4)$$

Em que:

CO_2 = Captura de dióxido de carbono (t/ha);

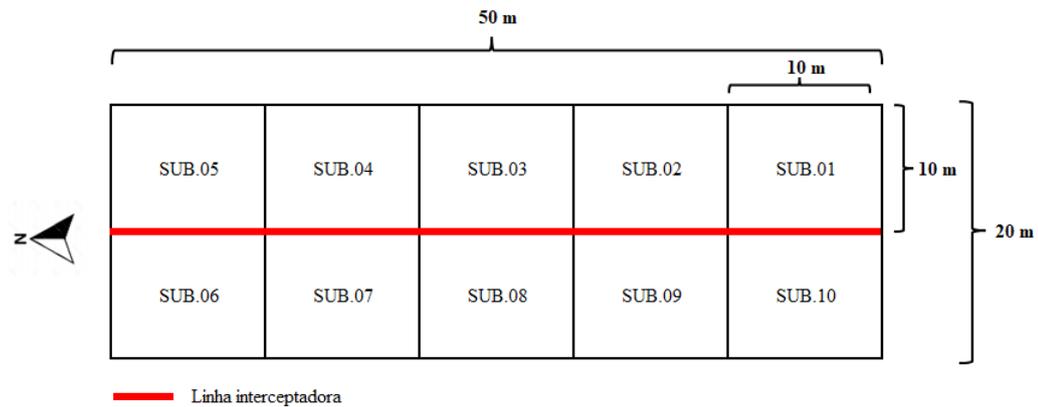
EC = Estoque de carbono no componente analisado (t/ha);

3,67 = Fator de conversão de carbono para dióxido de carbono.

3.2.7 Quantificação da necromassa lenhosa grossa

A mensuração da necromassa lenhosa grossa foi realizada em setembro de 2023, foram utilizadas nove parcelas permanentes de 20 m x 50 m (1.000 m²), onde foi traçado uma linha interceptadora no centro de cada parcela entre as duas extremidades, totalizando 50 m de comprimento, foram mensurados todos os indivíduos que interceptavam a linha com diâmetro igual ou superior a 10 cm, a 1,30 m em relação da base para o topo (Figura 6).

FIGURA 6 - Ilustração da metodologia adotada para quantificação da necromassa lenhosa grossa em fragmento de Floresta Ombrófila Mista



Fonte: Autor (2023)

Para a volumetria desse compartimento, foi realizada a cubagem rigorosa dos troncos caídos, adotando-se a combinação dos métodos de Smalian (que prevê as seções da base e do topo) e de Hohenald (que faz a divisão relativa do comprimento em dez seções) (SOUZA et al., 2017). Em seguida, foi medida a altura total, com o auxílio de uma fita métrica (quando pode ser identificado resíduo de copa ou galhos), o diâmetro da necromassa foi mensurado com o auxílio de uma suta (Figura 7).

FIGURA 7 - Determinação da necromassa lenhosa grossa caída em diferentes classes de decomposição (A, B e C) e realização da cubagem rigorosa na necromassa lenhosa grossa (D e E)



Fonte: Autor (2023)

A estimativa do volume de necromassa (V_n) por unidade de área foi efetuada para cada transecto conforme a equação (5), proposta por (VAN WAGNER, 1968):

$$Vn = \frac{\pi^2}{8 * L} * \sum_{i=1}^n d^2 \quad (5)$$

Em que:

Vn = Volume de necromassa caída (m³/ha);

L = Comprimento dos transectos (m);

d = Diâmetro da seção (cm).

O estoque de necromassa (W) foi então estimado por meio da multiplicação do volume (Vn) pela densidade básica (D) dos materiais coletados, através da equação 6, proposta por (VAN WAGNER, 1968):

$$W = D * \frac{1,234}{L} * \sum_{i=1}^n d^2 \quad (6)$$

Em que:

W = Estoque de necromassa estimada para o transecto (t/ha);

D = Densidade básica do material (t/m³);

L = Comprimento dos transectos (m).

Neste estudo foram utilizadas para o cálculo de necromassa as densidades propostas por (MAAS, 2015), onde a autora realizou os estudos na mesma tipologia florestal, conforme a classe de decomposição dos materiais (Tabela 2).

TABELA 2 - Densidade básica da necromassa lenhosa grossa em fragmento na Floresta Ombrófila Mista, de acordo com as classes de decomposição

Classe de decomposição	Densidade (t/m ³)
1	0,46
2	0,35
3	0,24

Fonte: MAAS (2015)

Para a determinação do EC utilizou-se os dados médios do TC por classe de decomposição, conforme os dados obtidos por (MAAS, 2015) para uma área de FOM (Tabela 3).

TABELA 3 - Teores de carbono (g/kg) da necromassa lenhosa grossa em fragmento na Floresta Ombrófila Mista, conforme as classes de decomposição

Classe de decomposição	Teor de carbono (g/kg)
1	437,7
2	429,6
3	424,6

Fonte: MAAS (2015)

A partir do TC, foi calculado o EC na necromassa em cada parcela, para cada classe de decomposição, conforme a equação (7):

$$EC_{NG} = \frac{W * TC}{1000} \quad (7)$$

Em que:

EC_{NG} = Estoque de carbono na necromassa grossa (t/ha);

W = Estoque de necromassa grossa estimada (t/ha);

TC = Teor de carbono orgânico total da classe (g/kg).

Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO₂ através da equação (4).

3.2.8 Quantificação da necromassa lenhosa fina

Em cada uma das nove parcelas foram sorteadas quatro subparcelas (10 m x 10 m) onde foi realizada a coleta de amostras de necromassa lenhosa fina. Realizou-se uma coleta em cada subparcela, totalizando 36 amostras (Figura 2). Neste estudo foi considerado como material lenhoso fino os ramos e galhos com 2 a 10 cm de diâmetro. A coleta de necromassa fina foi realizada como auxílio de um gabarito com 1 m², sendo que todo o material coletado foi pesado no campo com auxílio de uma balança portátil e armazenados em sacos plásticos, obtendo-se o peso fresco de cada amostra (Figura 8).

FIGURA 8 - Determinação da necromassa lenhosa fina caída, com auxílio de um gabarito de 1 m x 1 m (A), galhos úmidos com 2 a 10 cm de diâmetro (B), envelopes utilizados e secagem em estufa a 65° C até estabilização do peso (C) e galhos secos com 2 a 10 cm de diâmetro (D)



Fonte: Autor (2023)

Para a quantificação da biomassa seca, subamostras de aproximadamente 200 g foram retiradas e secas em estufa de circulação e renovação do ar a 65° C, para a determinação do peso seco. Assim, a biomassa seca das amostras foi obtida por meio da equação:

$$BSA = \frac{BS_{sub}}{BF_{sub}} * BFA \quad (8)$$

Em que:

BSA = Biomassa seca da amostra (g);

BS_{sub} = Biomassa seca da subamostra (g);

BF_{sub} = Biomassa fresca da subamostra (g);

BFA = Biomassa fresca da amostra (g).

Para o cálculo do EC da necromassa lenhosa fina utilizou-se a equação (9), sendo utilizado o valor de TC de 448,9 g/kg (Tabela 4).

$$EC_{NF} = BSA * TC \quad (9)$$

Em que:

EC_{NF} = Estoque de carbono na necromassa fina (t/ha);

BSA = Biomassa seca da fração da necromassa fina (t/ha);

TC = Teor de carbono do material lenhoso de até 10 cm de diâmetro (g/kg).

Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO_2 através da equação (4).

3.2.9 Quantificação da serrapilheira acumulada

A amostragem da serrapilheira acumulada foi realizada em setembro de 2023 em nove parcelas (20 m x 50 m). Realizou-se quatro coletas em cada parcela, onde foram sorteadas quatro subparcelas (10 m x 10 m), totalizando 36 amostras (Figura 2). Neste estudo considerou-se como serrapilheira o material presente sobre o solo composto por folhas, material reprodutivo, casca e ramos de até 2 cm de diâmetro. A serrapilheira foi coletada com auxílio de um gabarito de madeira de 25 cm x 25 cm, sendo todo material localizado dentro do gabarito pesado no campo com auxílio de uma balança portátil, e após colocados em sacos plásticos com as devidas identificações (Figura 9).

FIGURA 9 - Detalhe do procedimento de coleta da serrapilheira acumulada em moldura de 25 cm x 25 cm (A), coleta da serrapilheira (B), materiais encontrados nas parcelas (C) e secagem em estufa a 65° C (D)



Fonte: Autor (2023)

Para a quantificação do peso seco, foram separadas subamostras de aproximadamente 200 g. O material coletado em campo foi transferido para sacos de papel pardo e seco em estufa de ventilação e circulação forçada de ar a 65° C até estabilização do peso. O material seco foi então pesado em balança de precisão para determinação da massa seca da serrapilheira acumulada (g), sendo calculada a partir da equação (8). Para determinar os teores de carbono das diferentes frações da serrapilheira acumulada, foi realizada a média dos TC dos diferentes compartimentos encontrados na serrapilheira acumulada (Tabela 4).

TABELA 4 - Teor de carbono em diferentes frações encontradas na serrapilheira acumulada em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Frações da serrapilheira acumulada	Teor de carbono (g/kg)
Folhas recentemente depositadas	476,6
Folhas com sinais de decomposição	453,7
Material lenhoso de até 2 cm de diâmetro	448,9
Órgãos reprodutivos	446,1

Fonte: MAAS (2015)

Após, foi obtido o EC da serrapilheira acumulada através da equação:

$$EC_{SA} = BSA * TC \quad (10)$$

Em que:

EC_{SA} = Estoque de carbono na serrapilheira acumulada (t/ha);

BSA = Biomassa seca da fração da serrapilheira acumulada (t/ha);

TC = Teor de carbono médio da fração da serrapilheira acumulada (g/kg).

Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO₂ através da equação (4).

3.2.10 Quantificação da biomassa nas raízes

Para a estimativa da biomassa das raízes foi utilizada a equação (11) ajustada por (NOGUEIRA et al., 2014). A equação resultou em estimativas compatíveis com os resultados obtidos para FOM em relação a biomassa de raízes.

$$\text{Log} (BSR) = -2,960 + 1,072\log (dap^2) \quad (11)$$

Em que:

BSR = Biomassa seca de raízes (kg);

dap = Diâmetro à altura do peito (cm).

O TC aplicado para o cálculo do EC nas raízes foi o valor médio obtido pelo trabalho desenvolvido por (WATZLAWICK, 2003) em FOMM em General Carneiro/PR (390,9 g/kg ou 0,39%), sendo o EC calculado através da seguinte equação:

$$EC_{BSR} = BSR * TC \quad (12)$$

Em que:

EC_{BSR} = Estoque de carbono na biomassa seca de raízes (t/ha);

BSR = Biomassa seca de raízes (t/ha);

TC = Teor de carbono nas raízes (%).

Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO_2 através da equação (4).

3.2.11 Quantificação do carbono no solo

A amostragem de solo foi realizada em setembro de 2023 em nove parcelas, com a profundidade de 0-30 cm, em cada parcela foram coletadas duas amostras, totalizando 18 amostras (Figura 2). O solo foi coletado com a abertura de uma trincheira com o auxílio de uma pá de corte e acondicionados em sacos plásticos (Figura 10).

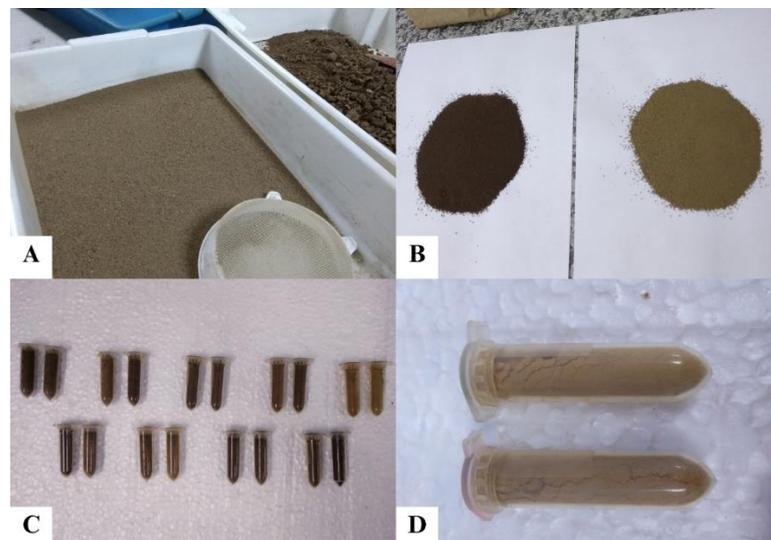
FIGURA 10 - Detalhe da coleta de solo em profundidade de 0-30 cm (A e B), identificação das amostras em sacos plásticos a campo (C) e identificação em envelopes de papel pardo para secagem (D)



Fonte: Autor (2023)

O material coletado em campo foi transferido para sacos de papel pardo e seco em estufa de ventilação e circulação forçada de ar a 65° C até estabilização do peso. Na sequência, o material foi macerado com o auxílio de um pistilo até os agregados do solo ficarem em consistência de pó. Aproximadamente 50 g de amostra foram encaminhadas para análise no Laboratório de análise química do solo da Universidade Federal de Santa Maria *campus* de Frederico Westphalen, para determinação dos teores de CO do solo, conforme metodologia proposta por (MENDONÇA & MATOS, 2005) (Figura 11).

FIGURA 11 - Maceração e peneiramento do solo (A), diferentes tipos de solos encontrados no estudo (B), identificação das amostras para determinação do carbono orgânico no solo (C e D)



Fonte: Autor (2023)

O cálculo do EC no solo foi realizado multiplicando o TC orgânico do solo, por sua densidade (g/cm^3), convertida para tonelada e pela profundidade adotada, conforme proposto por (VELDKAMP, 1994) por meio da seguinte equação:

$$ECs = CO \times D \times e \quad (13)$$

Em que:

ECs = Estoque de carbono no solo (t/ha);

CO = Teor de carbono orgânico do solo (%)

D = Densidade do solo (t/m^3)

e = Espessura da camada de solo considerada (cm).

A densidade utilizada na equação (13) foi estabelecida por (BERTOLINI et al., 2019). Os valores de carbono obtidos no estoque foram convertidos em CO_2 através da equação (4).

3.3 ANÁLISE DE DADOS

3.3.1 Análise no Excel

Utilizou-se o Excel para a tabulação e organização dos dados, ajustes nas equações para uma análise inicial, para posteriormente fazer a quantificação das variáveis analisadas neste estudo. O software também foi utilizado para a identificação de tendências e padrões, para a avaliação das incertezas associadas aos resultados, logo para todas as variáveis foram determinadas as médias e o desvio padrão, além de realizar uma análise fitossociológica.

3.3.2 Análise multivariada

Realizou-se análise de componentes principais (ACP) para verificar a estrutura de correlação e o grau de associação das diferentes variáveis consideradas no presente estudo, com o objetivo de analisar se os compartimentos tiveram relação ou influência no estoque de carbono. Essa análise permite a identificação de associações mais complexas entre os atributos mensurados e identifica aqueles com maior contribuição entre as diferentes parcelas e compartimentos analisados. A análise foi realizada com auxílio dos pacotes Factoextra e

FactoMineR do software R (R CORE TEAM, 2018), onde considerou-se apenas os componentes 1 e 2, cujos autovalores foram maiores que 1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE FLORÍSTICA E FITOSSOCIOLÓGICA

A partir da amostragem e classificação botânica foram quantificados 1.542 indivíduos arbóreos, pertencentes a 57 espécies, distribuídas em 30 famílias botânicas (Tabela 5).

TABELA 5 - Relação das famílias, espécies, grupo ecológico (GE) e número de indivíduos (NI), em inventário realizado em fragmento em Floresta Ombrófila Mista em Santa Catarina, em fevereiro de 2021

(continua)

Família	Nome científico	Nome popular	GE	NI
Anacardiaceae	<i>Lithraea brasiliensis</i> Marchand	Aroeira-brava	P	17
	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	Aroeira-vermelha	P	3
Annonaceae	<i>Annona sylvatica</i> A. St.-Hil.	Araticum	P	5
Aquifoliaceae	<i>Ilex microdonta</i> Reissek	Caúna	SI	18
	<i>Ilex paraguariensis</i> A. St.-Hil.	Erva-mate	ST	57
Araucariaceae	<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	Araucária	ST	58
Arecaceae	<i>Butia capitata</i> (Mart.) Becc.	Butiá	SI	1
Asteraceae	<i>Piptocarpha angustifolia</i> Dusén ex Malme	Vassourão-branco	P	3
	<i>Vernonanthura discolor</i> (Spreng.) H.Rob.	Vassourão-preto	P	58
Bignoniaceae	<i>Handroanthus albus</i> (Cham.) Mattos	Ipê-da-serra	SI	2
	<i>Jacaranda puberula</i> Cham.	Carobinha	SI	32
Canellaceae	<i>Cinnamodendron dinisii</i> Schwanke	Pimenteira	SI	38
Cannabaceae	<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	Esporão-de-galo	P	45
Celastraceae	<i>Maytenus evonymoides</i> Reissek	Coração-de-bugre	C	6
Clethraceae	<i>Clethra scabra</i> Pers.	Vassourão	P	1
Cunoniaceae	<i>Lamanonia ternata</i> Vell.	Guaraperê	SI	41
Dicksoniaceae	<i>Dicksonia sellowiana</i> Hook.	Xaxim	C	6
Elaeocarpaceae	<i>Sloanea guianensis</i> (Aubl.) Benth.	Laranjeira-do-mato	C	1
	<i>Sloanea monosperma</i> Vell.	Sapopema	ST	15
Euphorbiaceae	<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	Leiteiro	SI	90
	<i>Sebastiania commersoniana</i> (Baill.) L.B. Sm. & Downs	Branquilho	P	163
Fabaceae	<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth.) Brenan	Angico-branco	ST	1
	<i>Lonchocarpus campestris</i> Mart. ex Benth.	Rabo-de-bugio	SI	1
	<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	Bracatinga	P	14
Lauraceae	<i>Nectandra lanceolata</i> Nees	Canela-amarela	ST	8
	<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	Canela-preta	ST	19
	<i>Ocotea diospyrifolia</i> (Meisn.) Mez	Canela-louro	SI	1

	<i>Ocotea porosa</i> (Nees) Barroso	Canela-imbuia	ST	45
	<i>Ocotea puberula</i> (Rich.) Nees	Canela-guaicá	SI	8
	<i>Ocotea pulchella</i> (Nees) Mez	Canela-lageana	ST	11
Meliaceae	<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.	Cangerana	ST	13
	<i>Trichilia elegans</i> A. Juss.	Pau-de-ervilha	ST	3
Myrtaceae	<i>Campomanesia guazumifolia</i> (Cambess.) O.Berg.	Sete-capotes	SI	3
	<i>Campomanesia xanthocarpa</i> (Mart.) O.Berg	Guabiroba	ST	45
	<i>Eugenia involucrata</i> DC.	Cerejeira	ST	2
	<i>Eugenia pyriformis</i> Cambess.	Uvaia	ST	14
	<i>Eugenia uruguayensis</i> Cambess.	Guamirim-vermelho	ST	89
	<i>Myrceugenia mesomischa</i> (Burret) D. Legrand et Kausel	Guamirim-branco	ST	90
	<i>Myrcianthes gigantea</i> (D. Legrand) D. Legrand	Araçazeiro-do-mato	ST	14
	<i>Myrciaria tenella</i> (DC.) O. Berg	Camboim	C	8
Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	Capororoca	P	37
	<i>Myrsine umbellata</i> Mart.	Capororoca-branca	SI	3
Proteaceae	<i>Roupala brasiliensis</i> Klotzsch	Carvalho-brasileiro	ST	16
Rhamnaceae	<i>Rhamnus sphaerosperma</i> Sw.	Cangica	SI	6
Rosaceae	<i>Prunus myrtifolia</i> (L.) Urb.	Pessegueiro-bravo	SI	16
Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	Mamica-de-cadela	SI	41
Salicaceae	<i>Casearia decandra</i> Jacq.	Guaçatunga	SI	154
	<i>Casearia obliqua</i> Spreng.	Guaçatunga-vermelha	SI	2
	<i>Xylosma prockia</i> (Turcz.) Turcz.	Sucará	SI	48
Sapindaceae	<i>Allophylus edulis</i> (A.St.-Hil., Cambess. & A. Juss.) Radlk.	Chal-chal	P	6
	<i>Cupania vernalis</i> Cambess.	Camboatá-vermelho	SI	30
	<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	Camboatá-branco	ST	26
Solanaceae	<i>Brunfelsia cuneifolia</i> J.A.Schmidt	Manacá	P	28
	<i>Solanum pseudoquina</i> A. St.-Hill.	Canema	P	4
Styracaceae	<i>Styrax leprosus</i> Hook. & Arn.	Carne-de-vaca	P	26
Symplocaceae	<i>Symplocos uniflora</i> (Pohl) Benth.	Sete-sangrias	P	6
Winteraceae	<i>Drimys brasiliensis</i> Miers	Casca-de-anta	SI	44

Sendo P: Pioneiras, SI: Secundarias iniciais, ST: Secundarias tardias e C: Climáticas.

Fonte: Autor (2023)

A análise da diversidade florística indicou valores de 3,43 e 0,85 para os índices de Diversidade de Shannon-Wiener (H') e equabilidade de Pielou (J), respectivamente. Tais resultados estão de acordo com o observado por outros estudos realizados em remanescentes de FOM na região (GREFF, 2012; OLIVEIRA, 2020). Essas informações são fundamentais

para a caracterização do ecossistema, e servem de base para a tomada de decisão quanto a preservação da biodiversidade local.

No que se refere ao valor de importância, verificou-se que as 20 espécies representaram mais de 70% do IVI e aproximadamente 80% do IVC do remanescente florestal estudado. Dentre as espécies observadas, as cinco de maior IVI foram *O. porosa*, *A. angustifolia*, *S. commersoniana*, *C. decandra* e *E. uruguayensis* (Tabela 6).

TABELA 6 - Estrutura horizontal das espécies arbóreas com CAP>15,7 cm realizada em 2021

Espécie	NI	FR	DR	DoR	IVI	IVC
<i>Ocotea porosa</i> (imbuia)	45	3,27	2,92	15,79	7,33	9,36
<i>Araucaria angustifolia</i> (araucária)	58	3,92	3,76	11,90	6,53	7,83
<i>Sebastiania commersoniana</i> (branquilha)	163	3,59	10,57	5,31	6,49	7,94
<i>Casearia decandra</i> (guaçatunga)	154	3,59	9,99	4,80	6,13	7,39
<i>Eugenia uruguayensis</i> (guamirim-vermelho)	89	3,92	5,77	6,92	5,54	6,35
<i>Sapium glandulosum</i> (leiteiro)	90	2,94	5,84	4,29	4,35	5,06
<i>Myrceugenia mesomischa</i> (guamirim-branco)	90	3,92	5,84	2,31	4,02	4,07
<i>Vernonia discolor</i> (vassourão-preto)	58	2,29	3,76	5,04	3,70	4,40
<i>Campomanesia xanthocarpa</i> (guabiroba)	45	3,27	2,92	2,93	3,04	2,92
<i>Capsicodendron dinisii</i> (pimenteira)	38	2,29	2,46	3,65	2,80	3,06
<i>Drimys brasiliensis</i> (casca-de-anta)	44	3,59	2,85	1,58	2,68	2,22
<i>Cupania vernalis</i> (camboatá-vermelho)	30	3,27	1,95	2,46	2,56	2,20
<i>Ilex paraguariensis</i> (erva-mate)	57	2,94	3,70	0,99	2,54	2,34
<i>Lamanonia ternata</i> (guaraperê)	41	2,29	2,66	2,44	2,46	2,55
<i>Sloanea monosperma</i> (sapopema)	15	1,63	0,97	4,57	2,39	2,77
<i>Ilex microdonta</i> (caúna)	18	2,61	1,17	3,03	2,27	2,10
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> (mamica-de-cadela)	41	2,94	2,66	0,95	2,18	1,81
<i>Matayba elaeagnoides</i> (camboatá-branco)	26	2,61	1,69	2,11	2,14	1,90
<i>Myrsine coriacea</i> (capororoca)	37	3,27	2,40	0,75	2,14	1,57
<i>Xylosma sp.</i> (sucará)	48	2,29	3,11	0,73	2,04	1,92
Outras (37 espécies)	355	39,54	23,02	17,42	26,66	20,22

Sendo NI: Número de indivíduos, FR: Frequência relativa (%), DR: Densidade relativa (%), DoR: Dominância relativa (%), IVI: Índice de Valor de Importância (%) e IVC: Índice de Valor de Cobertura (%). Σ DoA: 37,63 e Σ DA: 1285.

Fonte: Autor (2023)

Em relação as famílias botânicas, as que apresentaram maior número de indivíduos (NI) no fragmento avaliado foram as Myrtaceae, Euphorbiaceae e Salicaceae, sendo contabilizados 265 (17,19%), 253 (16,41%) e 204 (13,23%) indivíduos, respectivamente. Devido a maior abundância, essas três famílias representam aproximadamente 47% da estrutura florestal da área avaliada.

Watzlawick et al. (2012) avaliando um fragmento de FOM localizado na região do Paraná, constataram que as espécies mais representativas foram *O. porosa*, *A. angustifolia*, *C. xanthocarpa*, *O. pulchella*, *C. vernalis* e *N. megapotamica*, as quais contribuíram com 70,43% de biomassa arbórea da área estudada. Adicionalmente, em outra pesquisa conduzida em FOM, as espécies que mais contribuíram com a biomassa e o carbono estocado também foram *A. angustifolia*, *O. porosa*, *M. elaeagnoides* e *N. grandiflora* (MAAS, 2015). Os resultados obtidos no presente estudo, aliados ao observado em outros estudos desenvolvidos na mesma tipologia, evidenciam, portanto, o destaque das espécies *O. porosa* e *A. angustifolia*, visto que essas duas espécies se sobressaem dentre as principais que integram a composição florística de remanescentes de FOM, estando também entre as de maior densidade. Desse modo, a *O. porosa* e *A. angustifolia* possuem elevada contribuição no EC em remanescentes conservados de FOM.

4.2 ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA ACIMA DO SOLO

As espécies que obtiveram os maiores valores de biomassas acima do solo foram *O. porosa*, *A. angustifolia* e *E. uruguayensis*, com valores de 52,89 t/ha, 33,10 t/ha e 15,10 t/ha respectivamente. Essas mesmas espécies expressaram os melhores resultados para o EC, estimados em 21,94 t/ha, 14,52 t/ha e 6,32 t/ha respectivamente (Tabela 7).

TABELA 7 - Determinação da massa específica básica, carbono orgânico e estoque de carbono na biomassa acima do solo, de 20 espécies florestais com maior IVI em fragmento em Floresta Ombrófila Mista

(continua)

Espécie	ME (g/cm ³)	BAS (t/ha)	CO (%)	EC _{BAS} (t/ha)	CO ₂ (t/ha)
<i>Ocotea porosa</i> (imbuia)	0,60	52,89	0,41	21,94	80,52
<i>Araucaria angustifolia</i> (araucária)	0,50	33,10	0,44	14,52	53,29
<i>Sebastiania commersoniana</i> (branquilho)	0,56	10,75	0,42	4,49	16,47
<i>Casearia decandra</i> (guaçatunga)	0,60	11,55	0,41	4,74	17,40
<i>Eugenia uruguayensis</i> (guamirim-vermelho)	0,63	15,10	0,42	6,32	23,20
<i>Sapium glandulosum</i> (leiteiro)	0,26	4,73	0,41	1,94	7,14
<i>Myrceugenia mesomischa</i> (guamirim-branco)	0,62	4,55	0,41	1,88	6,89
<i>Vernonia discolor</i> (vassourão-preto)	0,33	8,10	0,42	3,44	12,61
<i>Campomanesia xanthocarpa</i> (guabiroba)	0,59	7,66	0,43	3,29	12,06
<i>Capsicodendron dinisii</i> (pimenteira)	0,49	7,59	0,41	3,12	11,47
<i>Drimys brasiliensis</i> (casca-de-anta)	0,34	1,65	0,43	0,71	2,62
<i>Cupania vernalis</i> (camboatá-vermelho)	0,58	6,22	0,42	2,60	9,56
<i>Ilex paraguariensis</i> (erva-mate)	0,38	1,05	0,41	0,43	1,57
<i>Lamanonia ternata</i> (guaraperê)	0,42	4,81	0,41	1,95	7,17

<i>Sloanea monosperma</i> (sapopema)	0,58	14,01	0,41	5,69	20,89
<i>Ilex microdonta</i> (caúna)	0,46	7,28	0,41	2,99	10,98
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> (mamica-de-cadela)	0,40	1,29	0,40	0,52	1,92
<i>Matayba elaeagnoides</i> (camboatá-branco)	0,50	4,71	0,41	1,95	7,16
<i>Myrsine coriacea</i> (capororoca)	0,51	1,34	0,40	0,54	1,98
<i>Xylosma sp.</i> (sucará)	0,59	1,14	0,42	0,48	1,76
Total	-	199,54	-	83,81	307,57

Sendo ME: Massa específica, BAS: Biomassa acima do solo, CO: Carbono orgânico, EC_{BAS}: Estoque de carbono na biomassa acima do solo e CO₂: Dióxido de carbono.

Fonte: Autor (2023)

Quanto a BAS, e EC_{BAS} obtidos nas parcelas de estudo, verificou-se valores médios de 199,54 t/ha e 83,81 t/ha, respectivamente (Tabela 8).

TABELA 8 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa acima do solo (BAS), estoque de carbono na biomassa acima do solo (EC_{BAS}) e do dióxido de carbono na biomassa acima (CO₂) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcelas	BAS (t/ha)	CO (%)	EC _{BAS} (t/ha)	CO ₂ (t/ha)
1	126,40	0,42	53,09	194,84
2	232,87	0,42	97,80	358,94
3	160,46	0,42	67,39	247,33
4	125,64	0,42	52,77	193,66
5	295,24	0,42	124,00	455,09
6	249,74	0,42	104,89	384,94
7	100,83	0,42	42,35	155,43
8	232,76	0,42	97,76	358,78
9	194,05	0,42	81,50	299,10
10	290,53	0,42	122,02	447,82
11	181,18	0,42	76,09	279,27
12	204,80	0,42	86,02	315,68
Média + DP	199,54 ± 63,71	-	83,81 ± 26,76	307,57 ± 98,20

Fonte: Autor (2023)

Estudos anteriores avaliaram a composição florística da FOM e estimaram as relações da biomassa estocada acima do solo e respectivo carbono estocado, sendo constatados resultados semelhantes ao do presente estudo. Mass (2015) estudando um fragmento de FOM observou uma média da biomassa estocada acima do solo de 241,90 t/ha, com respectivo EC de 101,06 t/ha. Watzlawick et al. (2012), em estudo realizado em um fragmento de FOM no município de General Carneiro, no Paraná, por meio de método destrutivo e utilizando apenas árvores acima de 10 cm de DAP, obtiveram 210,46 t/ha de BAS, sendo 89,48 t/ha de EC.

Ressalta-se que a biomassa estocada acima do solo observada no presente estudo, está dentro da faixa de valores proposta pelo IPCC (2006) para zona ecológica Subtropical Úmida (210 a 280 t/ha). Além disso, por considerar apenas as 20 espécies com maior IVI, o resultado também ficou dentro da variação descrita para as zonas ecológicas Subtropical Montanhosa Úmida ou Seca (60 a 230 t/ha).

Watzlawick et al. (2002), avaliando diferentes estágios sucessionais em FOM, encontraram valores médios de 69,37 t/ha, 168,84 t/ha e 397,79 t/ha de biomassa nos estágios inicial, médio e avançado, respectivamente. Com relação ao EC, esses autores obtiveram 28,84 t/ha, 70,23 t/ha e 165,02 t/ha, respectivamente para os três estágios sucessionais supracitados. Assim, em termos práticos, considerando a determinação do estágio sucessional com base nos teores de biomassa e carbono estimados, o fragmento de FOM analisado no presente estudo pode ser caracterizado como estágio médio de regeneração (Tabela 8).

4.3 ESTOQUE DE CARBONO NA NECROMASSA

Observou-se grande variação dentre as parcelas avaliadas para a necromassa lenhosa grossa (Tabela 9). O estoque de necromassa grossa correspondente a troncos e galhos de árvores mortas em processo de decomposição foi estimado em 32,41 t/ha, variando entre 10,20 t/ha a 72,23 t/ha. Por sua vez, o EC e dióxido de carbono registrados nesse compartimento foram de 13,96 t/ha e 51,25 t/ha, respectivamente.

TABELA 9 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes ao volume de necromassa grossa (VN), do estoque da necromassa grossa (W), do estoque de carbono na necromassa grossa (EC_{NG}) e do dióxido de carbono na necromassa grossa (CO₂) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcela	VN (m ³ /ha)	W (t/ha)	EC _{NG} (t/ha)	CO ₂ (t/ha)
1	101,63	25,58	10,88	39,93
2	24,58	10,20	4,45	16,33
3	85,99	30,10	12,93	47,46
4	36,46	16,77	7,34	26,95
5	53,14	18,60	7,99	29,33
6	209,45	71,29	30,60	112,32
7	186,33	72,23	31,27	114,75
8	93,17	36,12	15,63	57,38
9	44,81	10,76	4,57	16,76
Média + DP	92,84 ± 65,37	32,41 ± 23,88	13,96 ± 10,30	51,25 ± 37,79

Fonte: Autor (2023)

O volume médio de biomassa da necromassa lenhosa grossa obtido foi de 92,84 m³/ha, valor este considerado elevado ao comparado com outros estudos desenvolvidos na FOM. Oliveira (2017) obteve estoques de necromassa que variaram de 0 a 103,12 t/ha, com média geral de 6,72 t/ha em estudo realizado no Paraná em FOM. Cardoso et al. (2012) ao considerar apenas o material acima de 10 cm de diâmetro, no inventário da necromassa de remanescentes florestais de FOM em Santa Catarina obteve-se volume médio de 18,73 m³/ha de necromassa lenhosa grossa, valores muito inferiores ao obtido neste estudo.

A literatura também registra variações para as variáveis na necromassa grossa, para outros Biomas brasileiros, como a Amazônia. Cruz Filho e Silva (2009) estimaram volume médio de necromassa de 82,84 m³/ha a 204 m³/ha, nos estados do Pará e Mato Grosso. Destaca-se que os valores mais elevados observados nesse estudo podem estar diretamente relacionados a presença de secções com diâmetros elevados em algumas unidades amostrais.

Os estoques de carbono na necromassa, conseqüentemente, também apresentaram grande variação, assim como verificado por diversos autores. Em estudo realizado no Bioma Amazônia, Freitas et al. (2019) verificaram EC na necromassa grossa variando de 19,79 t/ha a 33,17 t/ha. As diferenças verificadas entre os diferentes estudos podem ocorrer devido ao tamanho do remanescente florestal, localização das parcelas amostrais em relação à borda ou a ocorrência de eventos climáticos extremos, como temporais, que ocasionam a queda e mortalidade das árvores, atuando sob a dinâmica no interior da floresta, contribuindo para as maiores médias de necromassa lenhosa grossa, e superestimando os valores encontrados no bioma. Destaca-se que não há estimativas regionais atualmente disponíveis de EC em necromassa lenhosa grossa descritas, motivo pelo qual o IPCC (2006) não apresenta valores *default* para esse compartimento.

Assim como observado para necromassa lenhosa grossa, verificou-se grandes variações nos valores das parcelas para a necromassa lenhosa fina, variando conforme a diversidade de espécies nas parcelas. Para a referida classe, verificou-se valores médios de 4,39 t/ha de biomassa seca, 1,97 t/ha de EC e 7,23 t/ha de CO₂ (Tabela 10).

TABELA 10 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa seca da amostra na necromassa fina (BSA_{NF}), estoque de carbono na necromassa fina (EC_{NF}) e do dióxido de carbono na necromassa fina (CO_2) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcela	BSA_{NF} (t/ha)	EC_{NF} (t/ha)	CO_2 (t/ha)
1	2,65	1,19	4,36
2	1,85	0,83	3,04
3	1,83	0,82	3,01
4	10,55	4,74	17,38
5	3,07	1,38	5,06
6	3,09	1,39	5,10
7	6,93	3,11	11,42
8	5,58	2,50	9,19
9	3,93	1,77	6,48
Média + DP	$4,39 \pm 2,86$	$1,97 \pm 1,28$	$7,23 \pm 4,71$

Fonte: Autor (2023)

Os valores médios de estoque de biomassa na necromassa lenhosa observados no presente estudo corroboram com outros estudos realizados em remanescentes de FOM. Tal fato, pode ser observado, mesmo considerando métodos diferentes de avaliação, como na amostragem do Inventário Florestal do estado de Santa Catarina, onde observou-se 4,3 t/ha de necromassa lenhosa fina em material de 1 a 10 cm de diâmetro, utilizando o método de linha de interceptação (CARDOSO et al., 2012). Maas (2015) determinaram 3,53 t/ha de estoque de biomassa na necromassa lenhosa fina em um fragmento de FOM no município de São João do Triunfo, no sudeste do Paraná.

Por outro lado, Sanquetta et al. (2014) estimaram um estoque de apenas 0,65 t/ha de necromassa lenhosa fina em FOM em transição com Floresta Estacional Semidecidual no Parque Nacional do Iguaçu, PR, valor inferior ao deste estudo. Ressalta-se que um fator importante que pode ser considerado é a possibilidade de influência da sazonalidade na deposição e estoque de necromassa lenhosa fina em regiões subtropicais. No trabalho de Sanquetta et al. (2014) as coletas foram realizadas entre os meses de agosto e setembro correspondente ao final da estação do inverno, coincidindo com o período deste estudo (setembro).

Para o EC quantificado na necromassa lenhosa fina, resultados do Inventário Florestal de Santa Catarina, considerando o somatório dos materiais de 1 a 10 cm, e a multiplicação pelo TC adotado na publicação (475 g/kg) demonstram valores de 2,04 t/ha (CARDOSO et al., 2012). Na mesma região de estudo, Mass (2015) obteve 1,50 t/ha para esta variável. A aplicação de TC da literatura obtidos para biomassa viva pode influenciar no resultado do EC

da necromassa. Para material morto em estágio de decomposição mais avançado, sugere-se a coleta de amostras para determinação do TC em laboratório, caso não tenha estudos realizados no mesmo bioma. Esse procedimento pode contribuir para redução de superestimativas do EC. Além disso, outro fator que pode ter influência ao comparar a quantidade de necromassa lenhosa estocada em floresta preservada é o efeito de borda (FONSÊCA, 2017).

4.4 ESTOQUE DE CARBONO NA SERRAPILHEIRA ACUMULADA

No que se refere ao estoque de biomassa seca na serrapilheira acumulada, obteve-se média de 14,06 t/ha. Os valores de estoque e dióxido de carbono foram estimados em 6,42 t/ha e 23,55 t/ha, respectivamente (Tabela 11).

TABELA 11 - Valores médios e desvio padrão (DP) referentes a biomassa seca da amostra na serrapilheira acumulada (BSA_{SA}), do estoque de carbono na serrapilheira acumulada (EC_{SA}) e da estimativa de dióxido de carbono (CO_2) em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcela	BSA_{SA} (t/ha)	EC_{SA} (t/ha)	CO_2 (t/ha)
1	22,38	10,21	37,47
2	10,76	4,91	18,01
3	14,78	6,74	24,75
4	12,47	5,69	20,88
5	13,49	6,15	22,59
6	20,06	9,15	33,59
7	9,68	4,42	16,20
8	12,36	5,64	20,70
9	10,59	4,83	17,74
Média + DP	14,06 ± 4,38	6,42 ± 2,00	23,55 ± 7,34

Fonte: Autor (2023)

Backes et al. (2005), encontraram média de 14,20 t/ha na serrapilheira acumulada em um fragmento de FOM em São Francisco de Paula, RS. Em outro estudo, Balbinot et al. (2003) obtiveram 17,4 t/ha, correspondendo a um total de 7,7 t/ha de CO, valor elevado devido aos resíduos da poda realizada próxima a coleta, relatam os autores. Sanquetta et al. (2014) obtiveram estoque de serrapilheira de 11,6 t/ha, com respectivo EC de 4,49 t/ha em uma área de transição de FOM com Floresta Estacional Semidecidual no Parque Nacional do Iguaçu, PR.

A quantidade de serrapilheira acumulada pode variar em função de fatores como condições climáticas e sazonalidade, diversidade de espécies, estrutura da vegetação, densidade

de indivíduos e distúrbios naturais e antrópicos (GIWETA, 2020). A coleta também pode ter influenciado no resultado obtido, tendo sido realizada de maneira pontual e não em diferentes momentos ao longo do ano, onde na mesma tipologia florestal pode ser observado valores bastante distintos de serrapilheira acumulada, o que em alguns casos poderá refletir no EC (Tabela 11). A serrapilheira é a principal fonte de CO para os solos em florestas. O acúmulo e o EC na serrapilheira variam com o nível de conservação das áreas (WANG et al., 2022). Por meio do processo de decomposição dos resíduos vegetais da serrapilheira, conduzido pelos microrganismos e fauna edáfica, o CO é incorporado ao solo (WEI et al., 2021). Os resultados de EC deste estudo demonstram que a serrapilheira se mostrou como um importante compartimento que armazena carbono, demonstrando a importância de ser considerada em cálculos de sequestro e créditos de carbono.

4.5 ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA RADICULAR

Na avaliação da BSR foi encontrada uma estimativa média de 52,46 t/ha, o EC nas raízes teve uma variação entre 11,89 t/ha a 27,89 t/ha e obteve-se média de 75,26 t/ha de CO₂ (Tabela 12).

TABELA 12 - Valores médios e desvio padrão (DP) de biomassa seca radicular (BSR), carbono orgânico (CO), estoque de carbono na biomassa seca radicular (EC_{BSR}) e do dióxido de carbono (CO₂), em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcelas	BSR (t/ha)	CO (%)	EC _{BSR} (t/ha)	CO ₂ (t/ha)
1	58,53	0,39	22,88	83,97
2	56,42	0,39	22,05	80,94
3	65,43	0,39	25,58	93,87
4	33,57	0,39	13,12	48,17
5	67,65	0,39	26,44	97,05
6	40,34	0,39	15,77	57,87
7	65,17	0,39	25,47	93,49
8	45,64	0,39	17,84	65,47
9	30,42	0,39	11,89	43,64
10	71,35	0,39	27,89	102,36
11	48,10	0,39	18,80	69,00
12	46,87	0,39	18,32	67,24
Média + DP	52,46 ± 13,67	-	20,51 ± 5,34	75,26 ± 19,61

Fonte: Autor (2023)

Nesse estudo em relação à biomassa de raízes, obteve-se uma média de 52,46 t/ha, com EC de 20,51 t/ha. Watzlawick et al. (2002) em fragmento de FOM obtiveram estoque de CO médio nas raízes de 14,84 t/ha, 15,76 t/ha e 13,61 t/ha respectivamente para floresta em estágio inicial, médio e avançado de regeneração. Watzlawick et al. (2012) em FOMM encontraram 40,44 t/ha de biomassa e 14,69 t/ha de EC no componente raiz.

O IPCC, em seu Guia para Inventários Nacionais de GEE, apresenta uma tabela com valores de razão (raiz:parte aérea), de acordo com o domínio climático e a zona ecológica. Considerando a floresta estudada na zona ecológica Subtropical Úmida (de acordo com a Classificação da FAO de 2001 disponível no guia do IPCC), o valor sugerido para florestas com biomassa acima do solo superior a 125 t/ha é de 0,24, podendo variar de 0,22 a 0,33 (IPCC, 2006). Nesse estudo foi observado um valor de 0,26, que está dentro da variação estabelecida pelo IPCC.

4.6 ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

Para as variáveis no solo são observados os valores médios e os desvios padrão para o CO, ECs e CO₂. Obteve-se uma média para o CO de 66,38 g/kg. Em relação ao EC no solo, foi possível verificar elevada variação entre as parcelas de estudo, com valores entre 98,34 t/ha a 273,80 t/ha, com um estoque de CO₂ médio de 599,32 t/ha (Tabela 13).

TABELA 13 - Valores médios e desvio padrão (DP) de carbono orgânico (CO) no solo, estoque de carbono no solo (ECs) e do dióxido de carbono (CO₂), em diferentes parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Parcela	CO (g/kg)	ECs (t/ha)	CO₂ (t/ha)
1	74,18	182,49	669,73
2	58,57	144,07	528,74
3	52,35	128,79	472,67
4	54,22	133,39	489,53
5	39,97	98,34	360,89
6	111,30	273,80	1004,85
7	52,33	128,72	472,42
8	95,06	233,86	858,26
9	59,46	146,26	536,77
Média + DP	66,38 ± 23,05	163,30 ± 56,70	599,32 ± 208,09

Fonte: Autor (2023)

Os resultados encontrados no presente estudo para os teores e estoques de carbono no solo, foram superiores ao verificado em outros estudos. Balbinot (2009) encontrou teores de carbono de 35,8 g/kg em Floresta Ombrófila Densa Submontana na camada de 0 a 5 cm. Maas (2015) avaliando em fragmento de FOM no município de São João do Triunfo, no sudeste do Paraná, obteve 128 t/ha de estoque total de carbono até a profundidade de 40 cm. Santos (2014) analisando fragmento de FOM com solo predominantemente Nitossolo Bruno obteve para a mesma profundidade um estoque de 121 t/ha.

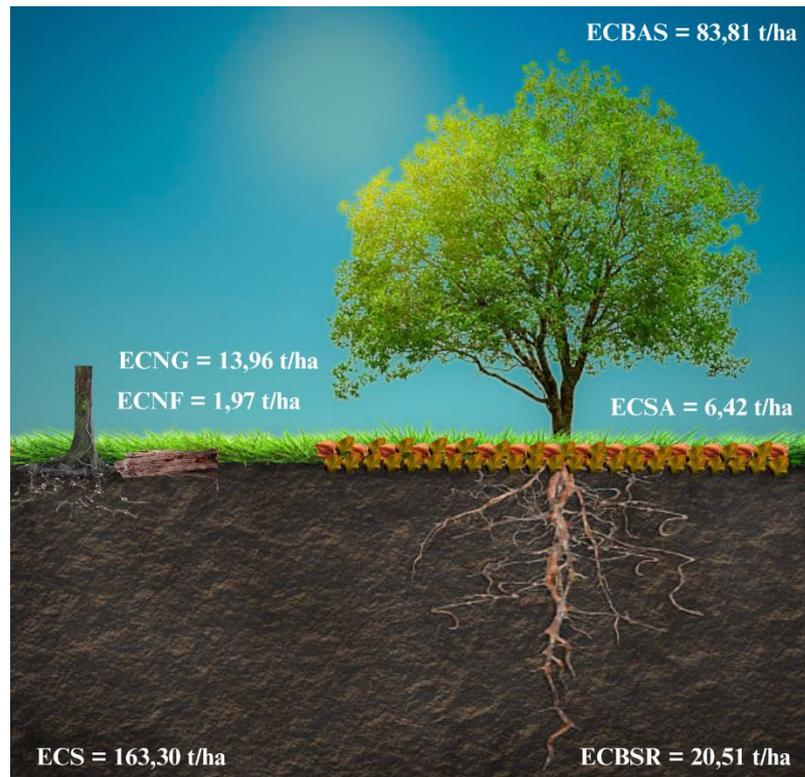
No Brasil, aproximadamente 50% do carbono estocado no solo até um metro está na camada de 0-30 cm (GOMES et al., 2019). Neste estudo, a camada de 0-30 cm apresentou um EC de 163,30 t/ha. O EC do solo depende do balanço entre entradas (material vegetal morto e exsudados da raiz) e saídas de carbono (mineralização e erosão) e das condições ambientais (GOMES et al., 2019) e, portanto, pode existir elevada variabilidade nos valores encontrados, o que pode explicar o valor acima dos valores encontrados na literatura.

O IPCC (2006) possui valores *default* de EC em solos até a camada de 30 cm de profundidade. O EC obtido foi de 163,30 t/ha, valor superior aos defaults do IPCC para domínio climático Subtropical e região climática temperada quente e úmida em solos com argila de baixa atividade (63 t/ha), e de alta atividade (88 t/ha).

4.7 ESTOQUE DE CARBONO TOTAL

Os resultados encontrados no EC, foi em relação aos compartimentos biomassa (acima do solo e radicular), necromassa (grossa e fina), serrapilheira acumulada e solo. A biomassa média estocada pela floresta foi 302,86 t/ha, sendo deste 289,97 t/ha de EC. Nossos resultados corroboram ao observado em outro estudo realizado em FOM, onde o somatório dos estoques de carbono de todos os compartimentos analisados foi de 256,39 t/ha (MAAS, 2015). Do total do EC em avaliação em FOM determinado neste estudo, 56,32% se encontram no compartimento do solo, 35,98% na biomassa florestal (acima do solo e radicular), 5,49% na necromassa (grossa e fina) e a serrapilheira acumulada corresponde a 2,21% (Figura 12).

FIGURA 12 - Compartimentação do estoque de carbono total em fragmento de Floresta Ombrófila Mista



Sendo ECBAS: Estoque de carbono na biomassa acima do solo, ECNG: Estoque de carbono na necromassa grossa, ECNF: Estoque de carbono na necromassa fina, ECSA: Estoque de carbono na serrapilheira acumulada, ECBSR: Estoque de carbono na biomassa seca radicular e ECS: Estoque de carbono no solo.

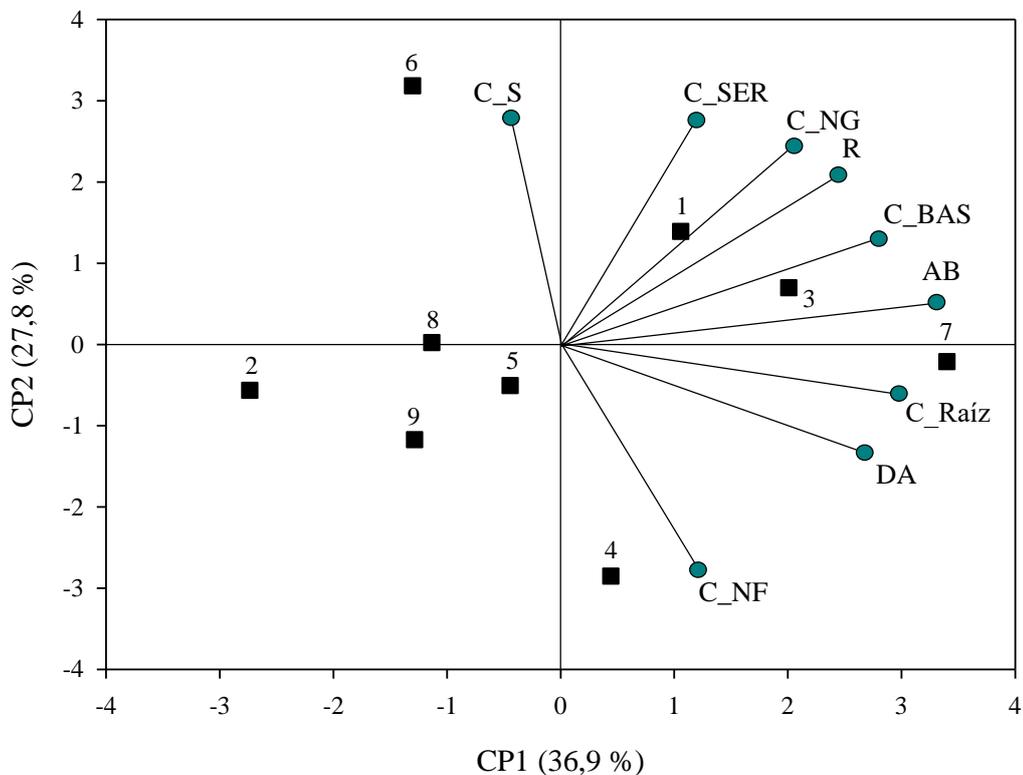
Fonte: Autor (2023)

O EC no solo até a profundidade de 30 cm obtido neste estudo (163,30 t/ha) é semelhante ao encontrado em Floresta Ombrófila Densa Montana que podem chegar a mais de 170 t/ha (VIEIRA et al., 2011), mas o expressivo reservatório no estoque de CO no solo em remanescentes de FOM encontrado se fundamenta na constante e diversificada deposição de materiais orgânicos, caracterizados por distintos estágios de decomposição, resultado da ampla variedade de espécies presentes no local. A pesquisa conduzida por Barros et al. (2013) fundamenta essa conclusão e ressalta que o valor significativo desse EC está intrinsecamente vinculado à preservação da floresta nativa. A análise dos efeitos provocados por diferentes coberturas e práticas de uso e manejo do solo em comparação com os solos de fragmentos nativos revelou uma diminuição nas concentrações e nos estoques de carbono do solo à medida que se transita da condição de floresta para outras formas de intervenção no ambiente. Isso ressalta a importância da conservação de ambientes naturais como meio indispensável para a manutenção dos níveis de carbono no solo.

A ACP demonstrou que a soma da variabilidade dos dois primeiros componentes extraídos explicou 64,7% do total dos resultados obtidos (Figura 13). Deste total, 36,9% da

variação foi explicada pelo componente 1 (CP1) e 27,8% pelo componente principal 2 (CP2). Houve diferença evidente entre as parcelas do estudo. Os resultados na ACP indicaram que maiores valores de área basal e densidade de indivíduos correlacionam-se positivamente com o EC presente nas raízes. A biomassa acima do solo apresentou forte relação com a área basal. Por outro lado, verificou-se elevada correlação entre a riqueza de espécies e os estoques de carbono na camada de serrapilheira acumulada e necromassa grossa. Adicionalmente, o carbono no solo correlacionou-se com a biomassa e TC na serrapilheira, indicando o papel importante da matéria orgânica superficial na reposição dos estoques de carbono no solo (Figura 13).

FIGURA 13 - Estrutura de correlação e o grau de associação das diferentes variáveis analisadas nas nove parcelas em fragmento de Floresta Ombrófila Mista



Fonte: Autor (2023)

Em relação a uma pequena área conservada da empresa ADAMI S/A (113,4 ha), foram determinadas estimativas para os estoques de biomassa, carbono e sequestro de CO₂, sendo 34.344,32 toneladas, 32.882,60 toneladas e 120.678,01 toneladas, respectivamente. Estas estimativas demonstram a importância da conservação dessas áreas, visto sua importância no EC e sequestro de CO₂ (Tabela 14).

TABELA 14 - Determinação dos estoques de biomassa, carbono e sequestro de dióxido de carbono, através do somatório das médias de todos os componentes analisados em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista

Componente	Estoques de Biomassa		Proporção (%)
	t/ha	t em 113,4 ha	
Biomassa acima do solo	199,54	22.627,84	65,89
Necromassa grossa	32,41	3.675,29	10,70
Necromassa fina	4,39	497,83	1,45
Serrapilheira acumulada	14,06	1.594,40	4,64
Biomassa radicular	52,46	5.948,96	17,32
Solo	-	-	-
Total	302,86	34.344,32	100

Componente	Estoques de Carbono		Proporção (%)
	t/ha	t em 113,4 ha	
Biomassa acima do solo	83,81	9.504,05	28,90
Necromassa grossa	13,96	1.583,06	4,81
Necromassa fina	1,97	223,40	0,68
Serrapilheira acumulada	6,42	728,03	2,21
Biomassa radicular	20,51	2.325,83	7,07
Solo	163,3	18.518,22	56,32
Total	289,97	32.882,60	100

Componente	Sequestro de Dióxido de Carbono		Proporção (%)
	t/ha	t em 113,4 ha	
Biomassa acima do solo	307,57	34.878,44	28,90
Necromassa grossa	51,25	5.811,75	4,82
Necromassa fina	7,23	819,88	0,68
Serrapilheira acumulada	23,55	2.670,57	2,21
Biomassa radicular	75,26	8.534,48	7,07
Solo	599,32	67.962,89	56,32
Total	1064,18	120.678,01	100

Fonte: Autor (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Em relação a dinâmica do carbono na FOM, nesse estudo o solo foi o compartimento mais expressivo no estoque total de carbono do fragmento, seguido da biomassa acima do solo, biomassa radicular, necromassa lenhosa grossa, serrapilheira acumulada e necromassa fina;
- Com relação ao EC na biomassa acima do solo, as espécies que mais contribuíram foram *Ocotea porosa*, *Araucaria angustifolia* e *Eugenia uruguayensis*, sendo que a primeira se mostrou como a espécie mais representativa;
- O valor de Diversidade de Shannon (H') obtido para o presente estudo foi de 3,43 e para o índice de Pielou (J) foi obtido 0,85, confirmando a alta diversidade e baixa dominância de uma ou poucas espécies presentes na área de estudo, entretanto, foi verificado nas parcelas que a composição e os tipos de espécies afetam nas estimativas do EC;
- Em relação a necromassa e a serrapilheira no EC, foi encontrado resultados acima dos estudos encontrados na literatura, esses compartimentos podem ter contribuído por meio da decomposição o retorno do carbono da biomassa para o solo, compartimento esse que representou o maior EC no fragmento;
- O estudo possibilitou identificar o potencial de contribuição de remanescentes conservados de FOM na mitigação das mudanças climática, por meio do EC em diferentes compartimentos florestais. Por outro lado, verifica-se a necessidade de realização de novas pesquisas com o intuito de estabelecer parâmetros universais para mensuração e quantificação do EC nos compartimentos;
- Os resultados deste estudo irão ajudar a preencher a lacuna de conhecimento relacionada a distribuição do EC entre seus compartimentos em FOM, podendo auxiliar na melhoria das estimativas do EC, se tornar material base para o mercado de créditos de carbono nessa tipologia florestal, além de diminuir a incerteza nos inventários de emissões de gases de efeito estufa relacionados ao uso da terra e às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ACHARD, F. et al. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. **Global change biology**, v. 20, n. 8, p. 2540-2554, 2014.
- AHOLOUKPÈ, H. et al. Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equations for estimating frond biomass. 2013. **Forest Ecology and Management**, 292: 122-129. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.11.027.
- APG III. 2009.** An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society* 161: 105–121.
- APG IV. 2016.** An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* 181: 1-20.
- ARCGIS, 2009.** ArcGIS. An overview of the geodatabase. Abril de 2009. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?TopicName=Creating%20a%20map%20using%20Simple%20Kriging>>.
- ARYAL, D. R.; JONG, B. H. J. DE; OCHOA-GAONA, S.; ESPARZA-OLGUIN, L.; MENDOZA-VEGA, J. Carbon stocks and changes in tropical secondary forests of southern Mexico. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 195, p. 220–230, 2014.
- ASNER, G. P. et al. A contemporary assessment of change in humid tropical forests. **Conservation Biology**, v. 23, n. 6, p. 1386-1395, 2009.
- BACKES, A.; PRATES, F. L.; VIOLA, M. G. Produção de serrapilheira em Floresta Ombrófila Mista, em São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 1, p. 155–160, 2005.
- BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWCIK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Ciências Exatas e Naturais**, Garapuava, v. 5, n. 1, p. 59-68, 2003.
- BALBINOT, R. **Carbono, nitrogênio e razões isotópicas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo e vegetação de estágios sucessionais de Floresta Ombrófila Densa Submontana**. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- BARBIERI, J. C. **Gestão Ambiental Empresarial: Conceitos, Modelos e Instrumentos**. Saraiva, 4^o Ed. São Paulo-SP, 2016.
- BARROS, JD de S. et al. Estoque de carbono e nitrogênio em sistemas de manejo do solo, nos tabuleiros costeiros paraibanos. **Revista Caatinga, Mossoró**, v. 1, pág. 35-42, 2013.
- BERNOUX, M. et al. Brazil's Soil Carbon Stocks. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 888–896, 2002.

BERTOLINI, I. C. et al. Propriedades físicas de solo em Floresta Ombrófila Mista sob processo de restauração passiva. **Scientia Forestalis**, v.47, n.124, p.696-707, 2019.

BORGES LINS E SILVA. 2017. 83 p. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais) Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

Brasil (2020). Síntese das análises e resultados do Projeto PMR Brasil. Ministério da Economia. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/ptbr/assuntos/competitividade-industrial/pmr/relatorio-sintese-pmr.pdf>.

BRIGADÃO C. Dicionário de ecologia. Rio de Janeiro: Toop Books Editora; 1992.

BRUCE, S.; SIMS, J.; WALCOTT, J.; WHITE, S. **Soil Carbon Management and Carbon Trading**. Department of agriculture, fisheries and forestry. Australian Government. Bureau of Rural Sciences, 2010. 12 p.

CALDEIRA, M. V. W.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; BALBINOT, R.; SANQUETTA, C. R. Carbono orgânico em solos florestais. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILIO, M. A.; GOMES, F. S. (Ed.). **As Florestas e o Carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. p.191–213.

CARDOSO, D. J.; VIBRANS, A. C.; LINGNER, D. VANESSA. Inventário da necromassa florestal caída no chão nos remanescentes florestais de Santa Catarina. In: VIBRANS, A. C.; SEVEGNANI, L.; GASPER, A. L. de; LINGNER, D. V. (Ed.). **Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina**. Blumenau: FURB, 2012. p.217– 227.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELO, C.R. & CERRI, C.E.P. **Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil**. R. Bras. Ci. Solo, 34:277-290, 2010.

CHAVE J, et. al, (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biol* 20:3177–3190

COLATTO, Valdir. O tamanho e a importância de florestas nativas e plantadas. **Revista Opiniões**, São Paulo, nº 59, p. 6-7, 2020.

COSTA, C. C. A.; CAMACHO, R. G. V.; MACEDO, I. D.; SILVA, P. C. M. Análise comparativa da produção de serrapilheira em fragmentos arbóreos e arbustivos em área de caatinga na FLONA de Açú-RN. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 259-265, 2010.

CRUZ FILHO, D.; SILVA, J. N. M. Avaliação da quantidade de resíduos lenhosos em floresta não explorada e explorada com técnicas de redução de impactos, utilizando amostragem por linha interceptadora, no Médio Moju, Amazônia Oriental, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 3, p. 527 – 532, 2009.

DALLA LANA, M. **Dinâmica e prognose do crescimento em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná**. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DAVIDSON, E.; JANSSENS, I. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, n. 7081, p. 165-173, MAR 9 2006.

DINCA, L. C.; SPÂRCHEZ, G.; DINCA, M.; BLUJDEA, V. N. B. Organic carbon concentrations and stocks in Romanian mineral forest soils. **Annals of Forest Science**, v. 55, n. 2, p. 229–241, 2012.

DRESNER, S.; EKINS, P.; MCGEEVOR, K.; TOMEI, J. Forest and climate change: global understandings and possible responses. In: FREER-SMITH, P. H.; BROADMEADOW, M. S. J.; LYNCH, J. M. (Ed.); **Forestry & Climate Change**. Trowbridge: CAB International, 2007. p.38–48.

DUARTE, L.P.S.S., MARCHETTO, M. (2014). Compensação de CO2 em eventos, Estudo de caso: feira do empreendedor – MT, Edição 2011. **Engineering and Science**, 1(1): 1-12.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FONSÊCA, N. C. **Estimativa de biomassa e necromassa lenhosa acima do solo em floresta tropical úmida**. Orientadora: Ana Carolina

FONSECA, W.; REY BENAYAS, J. M.; ALICE, F. E. Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 8, p. 1400–1408, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Global Forest Resources Assessment 2010**. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations. Forestry Department, 2010. 163 p. Relatório.

FREITAS, F. C.; AZEVEDO, C. P.; SOUZA, C. R. Estoque de necromassa em floresta não manejada e floresta manejada na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 121, p. 13- 23, 2019.

GIWETA, M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: A review. **Journal of Ecology and Environment**, v. 44, n. 1, p. 11, 2020.

GODINHO, T. DE O.; CALDEIRA, M. V. W.; ROCHA, J. H. T.; CALIMAN, J. P.; TRAZZI, P. A. Quantificação de biomassa e nutrientes na serrapilheira acumulada em trecho de Floresta Estacional Semidecidual Submontana, ES. **Cerne**, v. 20, n. 1, p. 11–20, 2014.

GOMES, L. C. et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337–350, 2019.

GREFF, L. T. B. **Estrutura e relações ambientais de grupos florísticos em fragmento da floresta ombrófila mista, rio grande do Sul, Brasil.** 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN, M. B. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1: guidance on the application of the revised structure. Nottingham: Fabis Consulting, 2017.

HARMON, M. E.; SEXTON, J. **Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems.** University of Washington, College of Forest Resources, Seattle, 1996. 73 p.

HARPER, K. A. et al. Edge influence on forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation Biology*, v. 19, n. 3, p. 768-782, Jun 2005.

HOUGHTON, R. A. The emissions of carbon from deforestation and degradation in the tropics: past trends and future potential. *Carbon Management*, v. 4, n. 5, p. 539- 546, 2013.

HUANG, Y. et al. Positive effects of tree species diversity on litterfall quantity and quality along a secondary successional chronosequence in a subtropical forest. **Journal of Plant Ecology**, v. 10, n. 1, p. 28–35, 2017.

INSTITUTO DE FLORESTAS E CONSERVAÇÃO DA NATUREZA DO ESTADO (IFFSC). (2013). Manual de Restauração Ecológica de Áreas degradadas pela Mineração. Santa Catarina.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). PENMAN, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; et al. (Ed.); **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.** v. 177, 2003. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. EGGELSTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.); **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** v. 4, 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

KENTON, W. (2014). "Crédito de carbono." Investopedia, <<https://www.investopedia.com>>.

LAGANIERE, J.; ANGERS, D.; PARE, D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, v. 16, n. 1, p. 439-453, JAN 2010.

LARCHER W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: Rima; 2001.

LAURANCE, W. F. et al. The fate of Amazonian Forest fragments: A 32-year investigation. *Biological Conservation*, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011.

LUO, Y.; ZHOU, X. **Soil respiration and the environment**. Burlington e San Diego: Elsevier, 2006. 307 p.

MAAS, G. C. B. **Compartimentação do estoque de carbono em Floresta Ombrófila Mista**. 172 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

MARANDOLA, J. R. E. 2009. Tangenciando a vulnerabilidade. In: *População e mudança climática: dimensões humanas das mudanças ambientais globais*. Daniel Joseph Hogan; Eduardo Marandola Júnior (Orgs.). Campinas: Núcleo de Estudos de População - Nepo/Unicamp; Brasília: UNFPA.

MARENGO, O. J. A. 2006. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 212 p.

MARTINELLI LA, MOREIRA MZ, BROWN IF, VICTORIA RL. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia. In: *Anais do Seminário de Emissão x Sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil; 1994; Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: CVRD; 1994. p. 221.

MARTELLI, A; CARDOSO, M. M. Favorecimento da Arborização Urbana com a Implantação do Projeto Espaço Árvore nos Passeios Públicos do Município de Itapira-SP. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, p. 184-197, 2018.

MARTINS, P. J. **Biomassa vegetal, estoque de carbono e dinâmica em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana**, 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste.

MARTINS, S. C. **Caracterização dos solos e serrapilheira ao longo do gradiente altitudinal da Mata Atlântica, Estado de São Paulo**. 155 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MENDONCA, E. S.; MATOS, E. S. *Matéria Orgânica do Solo: Métodos de Análises*. 1. ed. Ponte Nova - MG: D&M Gráfica e Editora Ltda, 2005. v. 1. 107p.

MICHAELOWA, AXEL, IGOR SHISHLOV E DARIO BRESCIA. 2019. *Evolução dos mercados internacionais de carbono: Lições para o Acordo de Paris*. Revisões Interdisciplinares Wiley: *Mudança Climática* 10: e613

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington, DC: Island Press, 2003. Disponível em: http://pdf.wri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf.

MILNER, M. 2007. “Mercado Global de Comércio de Carbono triplica para £15 bilhões”: ExecReview. Disponível online: <http://www.execreview.com/2007/05/mercado-de-negociação-de-carbono-global-triplica-para-15-bilhões>.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NOGUEIRA JUNIOR, L. R.; ENGEL, V. L.; PARROTTA, J. A.; MELO, A. C. G.; RÉ, D. S. Allometric equations for estimating tree biomass in restored mixed-species Atlantic. **Biota Neotropica**, v. 14, n. 2, p. 1–9, 2014.

OJIMA, R.; MARANDOLA JR, E. Mudanças climáticas e as cidades: novos e antigos debates na busca da sustentabilidade urbana e social. Coleção População e Sustentabilidade. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2013. E-book.

O’KEEFE, T. C.; NAIMAN, R. J. The influence of forest structure on riparian litterfall in a Pacific Coastal rain forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, n. 11, p. 2852–2863, 2006.

OLIVEIRA, K. A. **Necromassa lenhosa e carbono em florestas no centro-sul, sudeste e centro ocidental paranaense**. 2017. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de PósGraduação em Engenharia Florestal. Curitiba, 2017.

OLIVEIRA, E. **Indicadores ecológicos para áreas em processo de restauração na Floresta Ombrófila Mista e Densa como proposta para o Estado de Santa Catarina**. 2020. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, SC, 2020.

OLIVEIRA, M. V. N. DE; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, L. C.; et al. Aboveground biomass estimation in Amazonian tropical forests: A comparison of aircraft-and gatereye UAV-borne LIDAR data in the Chico Mendes extractive reserve in Acre, Brazil. *Remote Sensing*, v. 12, n. 11, 2020.

OHSE, S., DERNER, R.B., OZÓRIO, R.A., CUNHA, P.C.R., LAMARCA, C.P., SANTOS, M.E., MENDES, L.B.B. (2007). Revisão: sequestro de carbono realizado por microalgas e florestas e a capacidade de produção de lipídios pelas microalgas. *Insula*, 36(1): 39-74.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H.J.; SILVA JÚNIOR, V.P.; MASSIGNAN, A.M.; PEREIRA, E.S.; THOMÉ, V.M.R.; VALCI, F.V. Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM.

PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, [s. l.], v. 37, p. 637–669, 2006.

PBMC, 2016: Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PEARSE, R., E BÖHM, S. (2014). "Dez razões pelas quais os mercados de carbono não trarão redução radical de emissões." *Carbon Management*, 5(4), 325-337.

PORTER, J. R.; XIE, L.; CHALLINOR, A. J.; COCHRANE, K.; HOWDEN, S. M.; IQBAL, N. M.; LOBELL, D. B.; TRAVASSO, M. I. Food security and food production systems. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge: University Press, 2014. p. 485-533. 2014. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report.

PROLO, C. D., PENIDO, G., SANTOS, I. T., LA HOZ THEUER, S. (2021). Explicando os mercados de carbono na era do Acordo de Paris. Rio de Janeiro: Instituto Clima e Sociedade. Disponível em: <https://laclima.org/files/explicando-mercados-rev.pdf>.

PÜTZ, S. et al. Fragmentation drives tropical forest fragments to early successional states: a modelling study for Brazilian Atlantic forests. *Ecological Modelling*, v. 222, n. 12, p. 1986-1997, 2011.

PUTZ, S. et al. Long-term carbon loss in fragmented Neotropical forests. *Nat Commun*, v. 5, p. 5037, 2014.

RAMÍREZ, O.; GÓMEZ, M.; SHULTZ, S. **Valuing the contribution of plantation forestry to the national accounts of Costa Rica from the ecological economics perspective**. Beijer Research Seminar. Costa Rica, 1997. 28 p.

RAMSTEIN, C., DOMINIONI, G., ETTEHAD, S., LAM, L. E QUANT, M. (2019). "Estado e tendências da precificação de carbono 2019." Banco Mundial, <<https://elibrary.worldbank.org>>.

R CORE TEAM (2018). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

REICHSTEIN, M. Impacts of climate change on forest soil carbon: principle, factors, models, uncertainties. In: FREER-SMITH, P. H.; BROADMEADOW, M. S. J.; LYNCH, J. M. (Eds.); **Forestry & Climate Change**. p.127–135, 2007. Trowbridge: CAB International.

REITZ, R., KLEIN, R., & REIS, A. (1979). Composição florística de florestas estacionais decíduas e mistas na encosta atlântica em Santa Catarina. *Boletim Técnico IFS*, 37, 1-49.

REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. Projeto Madeira de Santa Catarina. Florianópolis. 1979. 320 p.

REZENDE, C. L.; SCARANO, F. R.; ASSAD, E. D.; et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

RIES, L. et al. Ecological Responses to Habitat Edges: Mechanisms, Models, and Variability Explained. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 35, n. 1, p. 491-522, 2004.

RODRIGUES, T. O., CALDEIRA-PIRES, A., LUZ, S., FRATE, C. A. 2014. GHG balance of crude palm oil for biodiesel production in the northern region of Brazil. *Renewable Energy* 62: 516-521. DOI: 10.1016 / j. renene.

ROGELJ, J., et al. (2018). Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5°C*.

SANQUETTA C, R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: Sanquetta CR, Watzlawick LF, Balbinot R, editors. *As florestas e o carbono*. Curitiba: Imprensa Universitária da UFPR; 2002.

SANQUETTA, C. R.; MOGNON F.; CORTE, A. P. D.; DALLAGNOL, F. S.; MAAS, G. C. B. **Pagamento por serviços ambientais em Floresta Ombrófila Mista**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ECOECO, 9, 2011, Brasília. Anais... Brasília, 2011. p.1-3.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MOGNON, F. (Ed.). **Floresta com Araucária: Pesquisas Ecológicas de Longa Duração**. Curitiba: Multi-Graphic, 2014a. p.296.

SANTOS, K. F. DOS. **Determinação de atributos físicos e do carbono orgânico do solo em diferentes tipos de uso da terra no planalto Sul catarinense**. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

SCHUMACHER, M. V. et al. Produção de serrapilheira em uma floresta de Araucária angustifolia (Bertol) Kuntze no município de Pinhal Grande - RS. *Revista Árvore*, v.8, n.1, p. 29-37, 2004.

SEI e GGHMI. (2011). "Mercados de compensação obrigatórios e voluntários." Stockholm Environment Institute e GHG Management Institute, <https://www.co2offsetresearch.org>.

SHARKEY, T. D. Understanding carbon partitioning and its role in determining plant growth. *Plant, Cell and Environment*, v. 38, n. 10, p. 1963–1964, 2015.

SHOW, KY E LEE, DJ (2008). "Crédito de carbono e comércio de emissões: águas residuais anaeróbicas tratamentos." *J. Instituto Chinês de Engenheiros Químicos.*, 39(6), 557-562.

SILVA, B.B. **Estimativa de sequestro de carbono por sensoriamento remoto**. In: GALVÍNCIO, J.D. (Ed.). *Mudanças climáticas e modelo ambientais: caracterização e aplicações*. Recife, BRA: Editora Universitária da UFPE, 2012. p. 51-70.

SILVA, B.B.; GALVÍNIO, J.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MACHADO, C.C.M.; OLIVEIRA, L.M.M. et al Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado São Gonçalo - PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 28, n. 1, p. 57-64, 2013

SOUZA, C. R. de; AZEVEDO, C. P. de; FREITAS, F. C. de. **Metodologia para avaliação de necromassa em florestas tropicais**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2017. 6 p. (Embrapa Amazônia Ocidental. Comunicado técnico, 130).

STOKLAND, J. N.; SIITONEN, J.; JONSSON, B. G. **Biodiversity in Dead Wood** New York: Cambridge University Press, 2012. 509 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal - Taiz & Zeiger - 3a edição*.pdf, 2006.

TEDESCO J. M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEM, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TSVCM. **Taskforce on scaling voluntary carbon markets**. [s. l.], 2021. Disponível em: [https:// https://www. iif.com/TSVCM](https://www.iif.com/TSVCM).

UNIÃO EUROPEIA (UE). 2009. Decisões aprovadas conjuntamente pelo parlamento europeu e pelo conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 136-148.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Forest inventory and analysis national core field guide: field data collection procedures for phase 3 plots, version 5.1**. Washington: Department of Agriculture, Forest Service, 2011. 34 p.

VAN WAGNER, C. E. The Line Intersect Method in Forest Fuel Sampling. **Forest Science**, v. 14, n. 1, p. 20-26, 1968.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO; A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

VIEIRA, S. A.; ALVES, L. F.; DUARTE-NETO, P. J.; MARTINS, S. C.; VEIGA, L. G.; Scaranello, M. A.; PICOLLO, M. C.; CAMARGO, P. B.; CARMO, J. B. DO; NETO, E. S.; SANTOS, F. A. M., JOLY, C. A.; MARTINELLI, L. A. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. **Ecology and Evolution**, v. 1, n. 3, p. 421– 34, 2011.

VIEIRA, J. A. **Estimativa do estoque de carbono presente na biomassa vegetal arbórea do Parque Municipal Américo Renné Giannetti - Belo Horizonte/MG**. Mestrado Profissional em Sustentabilidade em Tecnologia Ambiental, p. 72-72, 2019.

VITOUSEK, P. Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest. **The American Naturalist**, v. 119, p. 553–572, 1982.

VOGEL, H.L.M.; SCHUMACHER, M.V.; TRÜBY, P. Quantificação da biomassa em uma Floresta Estacional Decidual em Itaara, RS, BRASIL. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.16, n.4, p.419-425, 2006.

WANG, S. et al. Litter Inputs Control the Pattern of Soil Aggregate-Associated Organic Carbon and Enzyme Activities in Three Typical Subtropical Forests. **Forests**, v. 13, n. 8, 2022.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. A.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A.; GOMES, F. S. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002, p. 153-173.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do Satélite Ikonos II**, 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

WATZLAWICK, L.F.; BALBINOT R.; SANQUETTA, C.R.;; CALDEIRA, M.V.W. **Teores de carbono em espécies da floresta ombrófila mista**. In: Sanquetta CR, Balbinot R, Ziliotto MAB. Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: AM Impressos; 2004.

WATZLAWICK, L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; GODINHO, T. DE O.; BALBINOT, R. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 353–362, 2012.

WOODALL, C. W.; LIKNES, G. C. Relationships between forest fine and coarse woody debris carbon stocks across latitudinal gradients in the United States as an indicator of climate change effects. **Ecological Indicators**, v. 8, n. 5, p. 686–690, 2008.

WORLD BANK. 2022. **State and Trends of Carbon Pricing 2022**. <http://hdl.handle.net/10986/37455> License: CC BY 3.0 IGO.

WORLD BANK. 2023. **State and Trends of Carbon Pricing 2023**. <http://hdl.handle.net/10986/39796> License: CC BY 3.0 IGO.

WEI, Y. et al. Transformation of litter carbon to stable soil organic matter is facilitated by ungulate trampling. **Geoderma**, v. 385, p. 114828, 2021.

ZHU, K; SONG, Y; QIN, C. Forest age improves understanding of the global carbon sink. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 10, p. 3962-3964, 2019.