**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na
Mata Atlântica**

Anani Morilha Zanini

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2018**

Anani Morilha Zanini
Engenheira Florestal

Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica

Orientador:
Prof. Dr. **RICARDO RIBEIRO RODRIGUES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Zanini, Anani Morilha

Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica / Anani Morilha Zanini. - - Piracicaba, 2018.

88 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Carbono 2. Mudanças climáticas 3. Restauração florestal 4. Serviço ecossistêmico 5. Biomassa 6. Solo I. Título

Dedico esse trabalho aquela que é a base da minha vida,
minha velinha, **vó Cila**.

AGRADECIMENTOS

O mestrado foi uma etapa de muito crescimento tanto pessoal quanto profissional, com muito trabalho e dedicação. Porém tenho certeza que sem ajuda de muitas pessoas, eu não teria conseguido realizar todo o projeto. Por isso gostaria de agradecer:

Primeiramente aos meu pais, Pedro e Viviane, por serem minhas inspirações de vida, dedico tudo o que eu sou a vocês, obrigada por todo carinho e dedicação, até em Itu tive a oportunidade de ter vocês por me perto, mil vezes obrigada. A minha irmã Jade, sempre fui sua referência e admiração, mas hoje em dia posso dizer que você é a minha, obrigada por sempre ser essa companheira e amiga. Essa conquista mais uma vez é nossa!

Aos meus quatro avôs, Dona Cila, Carlão, Dona Célia e Marcelão, obrigada por sempre estarem ao meu lado, e me apoiarem em tudo, seja para buscar no metrô, fazer uma comidinha, ou tomar uma cerveja! Que honra poder ser neta de vocês. As minhas tias, tios e primos, por entenderem minha ausência, por sorrirem com minhas conquistas e desejarem o meu melhor. A minha sogra, Bela, meu sogro Milho e meus cunhados Nina e Caique, por me receberem na família Behr de braços abertos.

Ao Thomas, por todo companheirismo, amizade, carinho e apoio. Sem você esse mestrado não aconteceria, obrigada pelas ajudas em todas as formas possíveis, seja em campo, com coletas, preparo de amostras, conversas e abraços. Obrigada também por me apresentar a escalada e a Serra da Bocaina, e me mostrar todos os dias que sou capaz!

A Carla, por ser a melhor “flatmate” da vida, obrigada por todo apoio, amizade e companheirismo nesses anos de mestrado. A Paola, Dani e Marcela, pelos momentos divididos em nossa casinha.

Aos melhores estagiários do Mundo, que depois de muito trabalho pesado, viraram minha segunda família em Pira: Bruna, Bruno, Fernando, Marcela, Reinaldo, Tobias e Pedro (que não foi pra Itu, mas tá na conta pela Jinx), não existem palavras que descreva meus agradecimentos a vocês, sem vocês a etapa principalmente de campo, não seria concluída com sucesso, quero dizer que “Friends de buenas em Itu” para sempre, contem comigo para tudo.

A todos amigos que fiz em Piracicaba, principalmente aos LERFianos, em especial ao Sergio, Kiss, Allan, Raissa, Debora, Cris, Tati, Marininha e as Thais, obrigada por estarem sempre abertos a discussão, aprendizado, brincadeiras e conversas. A Giovana por todo auxilio, dedicação e amizade. E ao pessoal do climb, pelas horas semanais de diversão e treino.

As amigas, Anna Carol, Luana, Flávia, Carol, Mariana, Samanta, Rafazóide e Marina (in memorian), que mesmo de longe estão sempre presentes em minha vida.

Um obrigada especial para Cris, a Rafazóide (lá do Canadá), a Debora e ao Fer, pela leitura e considerações ao texto, e ao Gustavo e a Rafa com ajudas nas análises e no R.

A todo laboratório de ecologia isotópica do CENA/USP, pelas ajudas e apoio com minhas amostras, principalmente ao Plínio, ao Zebu, a Fá e a Isadora. Obrigada pela realização das análises de teor de carbono,

Aos mestres, por todos ensinamentos nas disciplinas, e em conversas. Em especial ao professor Ricardinho, ao professor Ado e ao professor Sergius, pelas considerações levantadas em minha qualificação. Ao professor Plínio, pela realização das minhas análises e discussão da minha dissertação.

Meu eterno agradecimento ao professor Ricardo, pela orientação nesse projeto, obrigada professor por me abrir as portas ao mundo da restauração florestal, por todo apoio e ensinamentos.

Agradecimento especial a professora Simone, por toda disponibilidade, orientação e carinho, em todas as etapas do projeto.

Agradeço também a CAPES pela bolsa no início do mestrado, e a FAPESP através do projeto temático 2013/50718-5, e pelo financiamento do projeto pelo processo 2016/21721-6.

A Fazenda Capoava, meus eternos agradecimentos pela disponibilidade das áreas de estudo, pela hospedagem e receptividade em todos os campos e pela iniciativa de restaurar sua área!

Por fim, gostaria de agradecer a Deus, por me iluminar nessa trajetória, a Nossa Senhora Aparecida, minha guia espiritual e meu ponto de luz nos momentos difíceis, e também a Nhá Chica, uma guerreira que conheci na última fase do mestrado e me trouxe muita força.

A todos, meu eterno agradecimento.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS	11
2. MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA VIVA ACIMA DO SOLO DE ÁREAS EM RESTAURAÇÃO FLORESTAL.....	13
RESUMO	13
ABSTRACT	13
2.1. INTRODUÇÃO	14
2.2. METODOLOGIA	16
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
2.4. CONCLUSÃO	32
REFERÊNCIAS	33
3. EFEITO DAS METODOLOGIAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NO ESTOQUE DE CARBONO.....	37
RESUMO	37
ABSTRACT	38
3.1. INTRODUÇÃO	38
3.2. METODOLOGIA	41
3.3. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	56
3.4. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
ANEXOS	87

RESUMO

Estoque de carbono em restaurações florestais com 5 anos de idade na Mata Atlântica

A mudança no uso do solo, principalmente o desmatamento nas regiões tropicais, é a terceira maior fonte de emissões de gases do efeito estufa. A restauração florestal é uma importante ferramenta de mitigação das mudanças climáticas, pois o sequestro do carbono decorre do crescimento das árvores e consequente acúmulo de biomassa. Assim, torna-se necessário estudos que quantifiquem esses serviços em diferentes situações ambientais e metodologias de restauração ecológicas. Com isso, o presente estudo buscou compreender os processos de estocagem de carbono em áreas de restauração florestal com 5 anos de idade, avaliando as diferenças no estoque de carbono pelos compartimentos (biomassa viva, biomassa morta e solo), em diferentes metodologias de restauração ecológica (restauração ativa, assistida e passiva), contribuindo assim, para uma quantificação mais precisa dessas estimativas. Na primeira parte do estudo, foi quantificado o estoque de carbono na biomassa viva acima do solo de áreas em processo de restauração florestal, através de métodos diretos, encontrando valores de incremento médio adequados para a idade, e recomendando um modelo alométrico de ajuste para estimativas de biomassa de áreas em restauração florestal. Na segunda parte do trabalho, foram quantificados os valores do estoque de carbono entre todos os compartimentos (arbóreo, herbáceo, regenerantes, serapilheira, madeira morta, raiz e no solo), nos tratamentos (diferentes metodologias de restauração florestal com 5 anos), comparando ainda com um fragmento remanescente e um pasto limpo em uso. E os resultados, foram que todos os compartimentos têm efetiva contribuição no estoque de carbono total dos ecossistemas em processo de restauração florestal e que essas áreas em restauração ecológica, principalmente a metodologia de restauração ativa, estão desempenhando sua função mitigadora sobre o aquecimento global. Assim concluímos que o presente estudo evidência a importância das áreas em processo de restauração florestal para mitigação das mudanças climáticas, e que há relevância na quantificação de todos os estratos florestais. Recomendamos ainda que o monitoramento dessas áreas seja mantido, para prever em quantos anos essas novas florestas estarão cumprindo seu papel de sequestro de carbono, na mesma eficiência que os fragmentos de floresta nativa remanescentes.

Palavras-chave: Sequestro de carbono; Restauração florestal; Mudanças climáticas; Serviços ecossistêmicos

ABSTRACT

Carbon stock on 5-year-old Atlantic Forest areas under restoration

Changing soil use classes, mainly for deforestation in tropical areas is the third main source of greenhouse gases. Forest restoration is an important tool to mitigate global warming, since carbon sequestration comes from tree growing and biomass accumulation in ecosystems. This way, it is necessary to quantify carbon sequestration in different environmental conditions and implementation methodologies towards more efficient procedures. The goal of this study is to understand carbon stocks mechanisms in 5-year-old forest restoration areas by assessing carbon stock on the following pools: alive and dead biomass and soil, varying the treatments (active restoration, passive restoration and assistive restoration). This study was divided into 2 parts: for the first part, carbon stock in alive biomass above ground was quantified on forest restoration areas by in situ measurements and the average increment found was considered adequate for that age. An allometric model was recommended to estimate biomass for areas under restoration. On the second part of this study carbon stock was quantified on all pools (trees, herbaceous, litter, dead wood, roots and soil) on the different treatments and values were compared to a remaining area established into a pasture. The results show that all pools give significant contributions on the carbon stock for the area and that the restored areas, mainly the treatment active restoration are in process of establishment and performing a great environmental service, which is mitigate global warming. One concludes that this study shows the importance of restored areas on mitigating global warming and that all pools are significant on carbon stocking. It is recommended that carbon stock assessment should be made from time to time, so it is possible to know the carbon sequestration dynamic for that particular area.

Keywords: Carbon stock; Forest restoration; Climate change; Ecosystemic services

1. INTRODUÇÃO GERAL

O Planeta Terra é envolto pela atmosfera, uma camada de gases formada principalmente por nitrogênio e oxigênio, além dos chamados gases do efeito estufa (GEE), que são o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso (IPCC, 2018). A energia solar que ultrapassa a atmosfera, atinge a superfície terrestre, sendo então refletida de volta com um comprimento de onda longo (radiação infravermelha), que é absorvido pelo vapor de água e pelos GEE presentes na atmosfera, impedindo que o calor se dissipe para o espaço, consequentemente aumentando a temperatura do planeta (Carvalho et al., 2010). Esse fenômeno natural conhecido como efeito estufa é essencial, pois mantém a temperatura terrestre em níveis adequados para a manutenção da vida na Terra.

No entanto, a partir do século XVII, com o aumento significativo nas concentrações dos GEE na atmosfera, e consequente aumento da capacidade de retenção da radiação infravermelha, a temperatura média da Terra está aumentando, ocasionando o aquecimento global (IPCC, 2018). O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), órgão pertencente às Nações Unidas, autoridade mundial na temática das mudanças climáticas, publicou um estudo relatando os prováveis cenários climáticos baseados nas futuras emissões dos GEE. Contudo, a predição desses novos cenários com os novos padrões climáticos depende de uma diversidade de fatores, que geram muitas incertezas.

As emissões de gases de origem antrópicas têm como principais fontes a queima de combustível fóssil, as atividades industriais, a agropecuária, os depósitos de resíduos sólidos, e as mudanças do uso do solo (IPCC, 2007). Segundo o Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases do Efeito Estufa do Brasil (MCTIC, 2017), a mudança do uso do solo é a terceira maior fonte de emissões de GEE no Brasil, sendo que as mudanças mais abruptas decorrem do desmatamento e degradação de florestas, que por sua vez tem maior ocorrência nas regiões tropicais (Harris, et al. 2012).

A partir dessas evidências, o aquecimento global, aliado aos esforços para redução dos desmatamentos, para a conservação dos remanescentes florestais e consequente aumento dos estoques florestais de carbono, tornou-se uma preocupação mundial, tanto para cientistas, como para tomadores de decisão (Brantley et al., 2018). A partir da 21ª Conferência das Partes (COP-21) em Paris, surgiram novos acordos e compromissos mundiais, com o objetivo de reduzir os níveis de GEE emitidos e fortalecer a resposta à ameaça das mudanças

climáticas, além da criação de programas de incentivo à restauração florestal, promovendo assim, a diminuição do estoque de carbono na atmosfera.

O ciclo do carbono, é um ciclo natural do planeta, que envolve processos de fotossíntese, respiração e decomposição (Aduan et al., 2003). De maneira simplificada, o sequestro de carbono ocorre quando organismos autotróficos, (e.g. plantas terrestres e plânctons oceânicos), absorvem o carbono da atmosfera e o transformam em biomassa por meio da fotossíntese (Aduan et al., 2004). Já as emissões para a atmosfera, ocorrem pela decomposição dos resíduos orgânicos, pela respiração de organismos e pelo sistema radicular das plantas (Carvalho, 2010). Assim, uma parte importante desse ciclo ocorre nos ecossistemas terrestres, onde as florestas representam um dos maiores sumidouros de carbono atmosférico (Dixon et al. 1994; Silveira et al., 2008), graças à estocagem que ocorre entre os diferentes compartimentos, como a biomassa viva acima e abaixo do solo, a biomassa morta e na matéria orgânica do solo (Birdsey et al., 2000).

Reflorestamentos são importantes no processo de mitigação do clima, pois o sequestro do carbono e o consequente acúmulo de biomassa decorrem do crescimento das árvores (Brown, 1997). Nesse contexto, podemos destacar as restaurações florestais como sumidouros de gás carbônico (CO_2) da atmosfera, o que representa um importante serviço ambiental provido por florestas (Sanqueta e Balbinot, 2004). Desta forma, tornam-se necessários estudos que quantifiquem esses serviços em diferentes metodologias de implantação e situações ambientais dos reflorestamentos (Durigan e Melo, 2006).

A quantificação de carbono em ecossistemas florestais, pode ser realizada através do método direto, com mensuração por amostragem destrutiva e com geração de modelos alométricos específicos da área, ou a partir do método indireto, em que as estimativas são geradas a partir de equações já existentes, ou por meio de sensoriamento remoto (Bombelli et al., 2009). Existem na literatura poucos trabalhos envolvendo modelagem da biomassa florestal (Ferez et al. 2015) e estoque total levando em consideração todos os compartimentos envolvidos no ciclo do carbono, em ecossistemas restaurados.

Diante dessas evidências, o presente estudo buscou compreender os processos de estocagem de carbono de áreas em processo de restauração florestal, com 5 anos de idade, onde foram usadas diferentes metodologias de restauração, avaliando as diferenças no sequestro de carbono nos diversos compartimentos da floresta em restauração, contribuindo assim para uma quantificação mais precisa dessas estimativas de carbono em áreas em restauração.

A fim de responder este objetivo, esta dissertação está estruturada em dois capítulos.

O primeiro capítulo abordou as metodologias existentes para se obter as estimativas de estoque de biomassa e carbono nas áreas em restauração, apresentando o desenvolvimento de um modelo matemático para a determinação desses valores, a partir da amostragem destrutiva das árvores na área em processo de restauração florestal, com 5 anos de idade. O segundo capítulo, apresentou as diferenças na quantificação da estocagem de carbono entre as diferentes metodologias de restauração (restauração ativa, restauração assistida, restauração passiva), e entre os diferentes compartimentos florestais (parte arbórea, herbáceas, arbustos, regenerantes, serapilheira, madeira morta, raiz e solo) de cada metodologia. Os resultados das áreas em restauração foram ainda comparados com os valores obtidos para um fragmento florestal e uma pastagem limpa em uso na mesma localidade, avaliando assim a efetividade do sequestro de carbono por as áreas em processo de restaurações florestais com 5 anos de idade. Na terceira parte apresentamos as considerações finais sobre o estudo, com uma síntese sobre as implicações dos resultados e ainda fizemos recomendações para estudos futuros, para potencializar o acúmulo de conhecimento de carbono em áreas em processo de restauração florestal.

REFERÊNCIAS

- Aduan, R.E.; Vilela, M. de F.; Klink, C.A. 2003. **Ciclagem de Carbono em Ecossistema Terrestre – O caso do Cerrado brasileiro**. EMBRAPA. Planaltina, Distrito Federal.
- Aduan, R.E.; Vilela, M. de F.; Klink, C.A. 2004. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do Planeta**. EMBRAPA. Planaltina, Distrito Federal.
- Birdsey, R.; Cannell, M.; Galinski, W.; Gintings, A.; Hamburgs, S.; Jallow, B.; Kirschbaum, M.; Krug, T.; Kurz, W.; Prisley, S.; Schulze, D.; Singh, K.D.; Singh, T.P.; Solomon, A.M.; Villers, L.; Yamagata, Y. 2000. **Afforestation, reforestation, and deforestation (ARD) Activities**. In: Watson, R.; Noble, I.; Verdado, D. (Ed). Land use, land-use change, and forestry: special report the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. chap. 3 p. 283-338.
- Bombelli, A.; Avitabile, V.; Balzter, H. 2009. **Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables**. Biomassa. Global Terrestrial Observing System, Rome.

- Brantley, S.T.; Vose, J.M.; Wear, D.N.; Band, L. 2018. **Planning for an uncertain future: Restoration to mitigate water scarcity and sustain carbon sequestration.** In: Kirkman, L. Katherine; Jack, Steven B., eds. Ecological restoration and management of longleaf pine forests. Boca Raton, FL: CRC Press: 291-309. 18. p.
- Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação – MCTIC. 2014. **Relatório das Estimativas Anuais de Emissões de Gases do Efeito Estufa.** Brasil, 190p.
- Brown, S. 1997. **Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer.** Rome: FAO, United Nations, (Forestry Paper-134).
- Carvalho, J.L.N.; Avanzi, J.C.; Silva, M.L.N.; DE Mello, C.R.; Cerri, C.E.P. 2010. **Potencial de Sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil.** Revista Brasileira de Ciência e Solo. v. 43. p. 277-289.
- Dixon, R.K.; Brown, S.; Houghton, R.A.; Solomon, A.M.; Trexler, M.C.; Wisniewski, J. 1994. **Carbon pools and flux of global forest ecosystem.** Science, Washington, v.263, p. 185-190.
- Durigan, G.; Melo, A.C.G. 2006. **Fixação de carbono em reflorestamentos de mata ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil.** Scientia Forestalis, Piracicaba, c. 17, p. 149-154.
- Ferez, A.P.C.; Campoe, O.C.; Mendes, J.C.; Stape, J.L. 2015. **Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic Forests in Brazil.** Forest Ecology and Management. v.350, p. 40-45.
- Harris, N.L.; Brown, S.; Hagen, S.C.; Saatchi, S.S.; Petrova, S.; Salas, W.; Hansen, M.C.; Potapov, P.V.; Lotsch, A. 2014. **Baseline map of Carbon Emission from deforestation in Tropical regions.** Science, v. 336, p. 1573-1576.
- Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC. 2007. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; Hanson, C.E.; Cambridge, 73p.
- Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC. 2018. **Global Warming of 1.4° C.** Incheon, Republic of Korea.
- Sanqueta, C.R.; Balbinot, R. 2004. **Metodologias para determinação de biomassa florestal.** In: Sanqueta, C.R.; Balbinot, R.; Ziliotto, M.A.B. (Eds.). Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: UFPR/Ecoplan, p. 77-93.
- Silveira, P.; Koehler, H.S.; Sanqueta, C.R.; Arce, J.E. 2008. **O estado da arte na estimativa da biomassa e carbono em formações florestais.** Floresta, Curitiba, v.28, n.1

2. MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA VIVA ACIMA DO SOLO DE ÁREAS EM RESTAURAÇÃO FLORESTAL

RESUMO

A quantificação do estoque de carbono em áreas de restauração florestal é de interesse global, uma vez que estas áreas realizam um importante serviço de mitigação das mudanças climáticas. Sendo assim, é fundamental o desenvolvimento de maior número possível de trabalhos, onde se desenvolva novos modelos alométricos de predição de biomassa e estoque de carbono dessas áreas em restauração florestal. Diante disso, o objetivo do presente capítulo foi quantificar a biomassa florestal e determinar o teor de carbono de áreas de restauração florestal, com 5 anos de idade, por meio de amostragem destrutiva de árvores, gerando informações precisas sobre os estoques, e, com isso, a seleção e recomendação de um modelo alométrico mais adequado para áreas em restauração florestal. O presente estudo foi realizado no município de Itu/SP em três áreas em processo de restauração florestal, todas com 5 anos pós implantação, a partir da restauração ativa utilizando plantio total escalonado. Em cada área foram alocadas três parcelas de 30x30 metros (900 m²), e realizado o inventário florestal mensurando as variáveis altura total e CAP (1,3m do solo). Para o ajuste dos modelos foi realizada a amostragem destrutiva em todos indivíduos presentes em sub-parcelas de 5x5 m (25m²) alocadas dentro das parcelas. As árvores cubadas foram separadas em diferentes compartimentos (folha, galho e tronco) e pesadas, para a determinação da biomassa, e teor de carbono. Foram testados diferentes modelos matemáticos por regressão linear, sendo selecionado o melhor modelo ajustado, através do coeficiente de determinação ajustado (R²), erro padrão da estimativa (S_{xy}) e análise gráfica dos resíduos, as análises foram realizadas no software R. De posse do modelo selecionado e dos teores de carbono, foi possível quantificar o estoque de carbono nas áreas em restauração florestal com 5 anos de idade, a partir dos dados do inventário florestal. A média do estoque de carbono na área foi de 9,73 Mg C ha⁻¹, com teor médio de carbono em 45,3%. Assim concluímos nesse capítulo que a área em processo de restauração florestal, com 5 anos de idade, apresenta incrementos de biomassa e estoque de carbono adequados para essa idade, quando comparado com outros estudos, e que o modelo ajustado é recomendado para outras áreas.

Palavras-chave: Restauração florestal; Mata Atlântica; Biomassa; Estoque de carbono; Modelo alométrico

ABSTRACT

Quantify carbon stock on forest restoration areas is a global interest, since this area provide the important environmental service of mitigating climate change. It is crucial have more studies on allometry to help on predicting biomass

and carbon stocking for those areas. This, the goal of this study was to quantify forest biomass and determine carbon content of forest restoration areas, by destructive sampling, to yield precise values for stocks and select the best model to describe it. This study was conducted in Itu/SP on three 5-year-old restoration areas, since its implementation (active restoration). On each area, three 30x30 meter plots (900m^2) were established, and a forest inventory was conducted. The variables evaluated were total height and CAP (1.3 meters above ground). Data to fit the models was collected by cutting and then scaling all individuals in 5x5 meters subplots (25m^2) inside the plots. Each tree was split into pools (leaves, branches and stem) and its weight was determined, so biomass and carbon content could be assessed. Different models were fit, using the software R and the best model was selected observing residual graph, the value of R^2 and S_{xy} . Knowing carbon content and using it as an input variable on the best model previously selected, carbon stock was determined for 5-year-old forest. The average carbon stock was $9.73 \text{ Mg C ha}^{-1}$ and average carbon content was 45.3%. The conclusion is that the restored area presents biomass increments and carbon stock appropriate to its age and that the best model from this study can be used for other areas.

Keywords: Forest restoration; Atlantic forest; Alive biomass; Carbon stock; Allometric model

2.1. INTRODUÇÃO

Estudos apontam que aproximadamente 50% da biomassa vegetal é formada por carbono (Mackdicken, 1997). Assim, a predição desses estoques é de interesse global (Moore, 2010). A determinação da biomassa de uma floresta é uma atividade realizada desde meados dos anos 60, porém nos últimos anos essa estimativa tornou-se mais importante devido às suas contribuições nos estudos de mudança climática e sequestro de carbono (Silveira, 2010; Brown, 1997)

Nesse contexto, as áreas em processo de restauração florestal estão cada vez mais em evidência pois o sequestro de carbono ocorre principalmente no início da sucessão florestal, quando a floresta está crescendo (Preiskorn, 2011). Segundo Shimamoto et al. (2014), o aumento da biomassa nos primeiros 60 anos de idade de restaurações florestais acontece em escala exponencial, ou seja, existe um grande acúmulo de biomassa, e consequentemente de carbono.

Assim são necessários métodos precisos que quantifiquem a biomassa florestal dessas novas áreas, afim de se discutir a efetividade das áreas em restauração na mitigação das mudanças climáticas (Durigan e Melo, 2006). Os procedimentos mais utilizados nessas determinações são, os métodos direto e indireto. No método direto, se realiza a amostragem destrutiva das árvores e a pesagem dos seus compartimentos (tronco, galho, folha, raiz), sendo que estes valores são relacionados por regressão às dimensões das árvores (Baskerville,

1972), gerando modelos alométricos de predição (Silveira et al. 2008), para a área ou região em questão. Assim, a biomassa é inferida por meio de variáveis biométricas de fácil obtenção como o diâmetro altura do peito, a altura, ou densidade da madeira e suas relações alométricas com a biomassa (Brown, 1997; Chave et al., 2005; Vieira et al., 2008). Porém a realização de amostragem destrutiva é uma atividade onerosa e trabalhosa (Vieira et al., 2008), sendo indicada apenas quando necessário.

Já no método indireto, utiliza-se os modelos alométricos já existentes (Brown, 1997; Cairns et al., 1997; Tiepolo et al. 2002; Chave et al., 2005; Durigan e Melo, 2006; Vieira et al., 2008; Amaro, 2010). Em regiões tropicais o modelo pan-tropical desenvolvido por Chave et al. (2005) e recomendado por Vieira et al. (2008) é comumente utilizado para estimativas na Mata Atlântica, porém por tratar as florestas tropicais como similares é considerado um modelo preditivo muito generalizado. Especificamente para a Floresta Atlântica existem os modelos desenvolvidos por Tiepolo et al. (2002) e Burger (2005). Sendo assim, a falta de modelos matemáticos padronizados para estimativas de biomassa é um dos principais problemas quanto as predições de estoque de carbono, nas regiões tropicais (Chave et al., 2005).

Em áreas em processo de restauração florestal com espécies nativas, existem poucos trabalhos que desenvolveram equações alométricas para estimativa de biomassa, podendo ser citado os trabalhos realizados por Miranda et al. (2011) e Ferez, et al. (2015). No entanto, nesses trabalhos em áreas de restauração são comuns problemas de baixa densidade amostral, alto custo de realização e baixa potencial de generalização das equações para outros locais, ou mesmo a verificação dessas equações para diferentes regiões a partir de outros trabalhos, comprometendo sua efetividade.

Considerando a problemática exposta, e o atual cenário de incentivo a restauração florestal e consequente aumento da cobertura florestal em regiões tropicais, torna-se fundamental o desenvolvimento de maior número possível de trabalhos que desenvolvam novos modelos de predição do estoque de carbono em áreas jovens de restauração florestal, visto o importante papel que a restauração florestal pode exercer nas questões climáticas globais. Diante disso, o objetivo do presente capítulo foi quantificar a biomassa florestal e determinar o teor de carbono de áreas em processo de restauração florestal, com 5 anos de idade, por meio de amostragem destrutiva de árvores, gerando informações precisas sobre os estoques de carbono, com consequente a seleção e recomendação de um modelo alométrico adequado para essas situações.

2.2. METODOLOGIA

2.2.1. Local de estudo

O presente trabalho foi realizado nas fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho localizadas no município de Itu (23°15'51"S, 47°17'57"W), região centro-oeste do estado de São Paulo. As áreas de estudos estão inseridas nos limites da Serra do Japi e dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) de Cabreúva, e possuem um total de 490 hectares (Figura 1).

Figura 1. Localização geográfica das áreas de estudo no estado de São Paulo, Brasil e o destaque para o limite das fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho no município de Itu, São Paulo, Brasil.

Segundo a classificação de Köppen (1948) o clima da região de estudo é do tipo Cwa, tropical de altitude com chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média anual é de 21,3°C com precipitação anual de 1299.6 mm (CAP, 2017).

A região está inserida na bacia do Rio Tietê, que possui quatro diferentes tipos de solo: Argissolos vermelho-amarelos distróficos com textura média/argilosa; Argissolos vermelho-amarelos distróficos com textura média cascalhenta/argilosa fase pedregosa e rochosa; Argissolos vermelho-amarelos distróficos e eutróficos, com textura argilosa cascalhenta não rochosa e rochosa; e Latossolos vermelhos distróficos com textura argilosa (Machado & Santos, 2003). A área experimental está inserida no domínio do bioma Mata Atlântica, em uma Floresta Estacional Semidecidual (Velosos et al., 1991).

Em 2012, com a necessidade de cumprir a legislação ambiental brasileira, as fazendas adotaram o programa de adequação ambiental e restauração da vegetação da área em Reserva Legal. Esse projeto foi elaborado e conduzido pela BIOFLORA Tecnologia da

Restauração, com supervisão científica do Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal (LERF) e do Laboratório de Silvicultura Tropical (LASTROP) da ESALQ/USP.

As áreas estudadas têm um histórico semelhante, em que originalmente existiam formações florestais, que no início dos anos 1900 foram substituídas por cultivo do café e de outras culturas de subsistência (Young, 2001). Mais tarde, estas áreas tiveram seu uso alterado para pecuária extensiva, com muito baixa cobertura florestal, permanecendo assim até recentemente, quando se iniciou o processo de restauração florestal em 2012 (Figura 2).

Figura 2. Fazenda Jequitibá, Ingazinho e Capoava, no município de Itu, São Paulo, Brasil que passaram pelo programa de adequação ambiental e restauração da vegetação, em diferentes anos (2006, 2012, 2015, 2018), a partir da imagem de satélite (Google Earth).

2.2.2. Delineamento experimental

O estudo foi realizado em três áreas em processo de restauração florestal com 5 anos de idade (Figura 3). As áreas foram implantadas usando a metodologia de restauração ativa, que consiste no plantio total escalonado de mudas de acordo com o método utilizado por Rodrigues et al. (2009). Utilizando 80 espécies para compor a restauração ecológica com a intensão de exploração econômica. O primeiro grupo de espécies foram as de recobrimento que tem como função ecológica ocupar rapidamente a área em processo de restauração, reduzindo as atividades de manutenção e criando condições adequadas para as outras espécies, elas possuem um rápido crescimento, boa cobertura do solo e ciclo de vida curto

(Anexo A). Nessas áreas também foi utilizado a adubação verde nas entrelinhas de plantio de mudas nativas, visando o controle mais efetivo das gramíneas da área, além do aporte de nutriente (Anexo B). O segundo grupo, de diversidade e enriquecimento funcional, foi implantado 1,5 anos depois do primeiro grupo, este apresenta a função de restaurar a dinâmica da floresta madura, além de incluir as espécies arbóreas que serão exploradas futuramente (Anexo C). Em cada área foram alocadas três parcelas de 30 x 30 metros (900 m²), dispostas de formas sistemáticas na área, cuja distância das bordas era de 30 metros e de 100 metros entre parcelas.

Figura 3. Perfil de uma área em processo de restauração florestal, com 5 anos de idade, a partir de restauração ativa, na Fazenda Jequitibá, no município de Itu, São Paulo, Brasil

2.2.3. Inventário Florestal

Nas 9 parcelas demarcadas foi realizado o inventário florestal, as variáveis dendrométricas mensuradas em campo foram:

- Altura total (Ht) medida com uma vara graduada;
- Circunferência altura do peito (CAP), a 1,3m do solo, com uso de fita métrica de todos os indivíduos acima de 9,3cm de CAP;

O CAP de cada indivíduo foi convertido em diâmetro altura do peito (DAP), utilizando a seguinte relação:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

Em que:

CAP: Circunferência altura do peito (cm)

DAP: Diâmetro altura do peito (cm)

O material botânico de cada morfoespécie foi coletado e identificado, e foram utilizados os valores de densidade básica (DB) propostos por Chave et al. (2006), que contém os dados para 2456 espécies de árvores neotropicais.

2.2.4. Amostragem da biomassa

Para a realização da amostragem destrutiva, foram sorteadas dentro das parcelas, sub-parcelas de 5x5 metros (25m²) (Figura 4), e todos os indivíduos presentes foram cubados, sendo realizado a medição do volume das árvores. Este corte das árvores foi realizado com auxílio de um motosserra, e após a derrubada foram mensurados os valores de CAP e Ht das árvores no chão, seguido do processo de separação e pesagem dos compartimentos de cada árvore (Figura 5).

Figura 4. Delineamento das parcelas inventariadas (900m²) e das subparcelas que tiveram suas árvores cubadas (25m²) nas em restauração florestal em Itu, São Paulo.

As árvores foram separadas nos seguintes compartimentos:

- I. Tronco: o material localizado entre o colo e o ponto de inversão morfológica (transição fuste/galho).
- II. Galhos: o material lenhoso acima do ponto de inversão morfológica com até 10mm de diâmetro.
- III. Folhas: todas as folhas com ramos finos abaixo de 10mm de diâmetro.

Não foi realizado a separação do compartimento raiz, pois sua coleta ocasionaria grande destruição dos sítios em processo de restauração. Sendo calculado apenas a biomassa da parte área neste trabalho.

Figura 5. Avaliação destrutiva das árvores da área em restauração florestal, no município de Itu, São Paulo, Brasil. a) Mensuração da altura da árvore derrubada b) Separação do compartimento folha c) Pesagem do compartimento galho d) Amostra do compartimento tronco

Para a pesagem do material relativo à massa úmida dos compartimentos separados, foi utilizado uma balança com capacidade de até 50kg e precisão de 50g, ainda em campo. Após pesagem total dos compartimentos, as folhas foram misturadas e homogeneizadas para obtenção de uma amostra de aproximadamente 300g, e foram seccionados e pesados discos de galho e do tronco (Figura 5). Em laboratório, a massa seca das amostras dos compartimentos

foi obtida através da pesagem das amostras que foram secas em estufa de circulação forçada de ar, a temperatura de 40°C.

A determinação da biomassa total dos diferentes compartimentos das árvores, é calculada por meio da porcentagem de massa seca, obtida pela equação:

$$Ms \% = (Ms / Mu) \times 100$$

Em que:

Ms %: Teor de matéria seca (%);

Ms: Massa seca da amostra (g);

Mu: Massa úmida da amostra (g);

A biomassa viva seca de cada árvore amostrada foi obtida por meio do somatório da biomassa seca de todos os compartimentos da árvore (folhas, galhos e tronco).

2.2.5. Determinação do teor de carbono

Para se obter o teor de carbono (%) dos diferentes componentes arbóreos por espécie, primeiramente, as amostras de folhagem foram trituradas em um moinho de facas e peneiradas até atingir a granulometria de 0.250 mm. Para as amostras de galhos e troncos, a coleta de serragem foi realizada utilizando uma furadeira (Figura 6).

Figura 6. Preparo das amostras para determinação do teor de C no Laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP, Piracicaba, São Paulo, Brasil. a) Moinho de facas triturando as folhas b) Furadeira produzindo serragem.

As determinações de teor de carbono foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP), por meio do analisador elementar Carlo Erba model 1110 e do espectro de massa IRMS Delta Plus. A metodologia utilizada pelo equipamento é a de combustão, em que 100mg de cada uma das amostras é submetida a uma temperatura de 1000°C por cerca de 1 minuto.

Com base no teor de carbono e da porcentagem de alocação de biomassa por compartimento foi obtido por média ponderada, o teor de carbono médio da biomassa viva acima do solo da área, que será utilizado para estimar o estoque de carbono em Mg C ha^{-1} .

2.2.6. Equações alométricas

Realizado as determinações de biomassa viva acima do solo, foram testados diferentes modelos matemáticos por regressão linear simples e múltiplas. Os modelos utilizados (Tabela 1), são modelos tradicionais, normalmente utilizados para estimativa de volume e biomassa florestal, e foram testados por Miranda et al. (2011) em um estudo de quantificação de biomassa e carbono de áreas em restauração florestal com diferentes idades. Além desses, também foram testados os modelos pan-tropicais de Chave et al. (2005), que são indicados para a estimativa de biomassa na Mata Atlântica (Vieira et al., 2008). O modelo de Ferez et al. (2015), não foi utilizado nesse estudo, pois não foi realizada a medição do diâmetro a 30cm do solo, requerida em sua equação.

Para a seleção do melhor modelo ajustado para fins de quantificação de biomassa para áreas em restauração florestal jovens, foram utilizados três critérios de verificação da qualidade de ajustes: coeficiente de determinação ajustado (R^2), erro padrão da estimativa (S_{xy}) e análise gráfica dos resíduos.

O coeficiente de determinação ajustado (R^2), indica quanto da variação da variável dependente é explicada pela independente, podendo variar entre $0 \leq R^2 \leq 1$, sendo uma correlação ideal valores próximos a 1. Erro padrão da estimativa (S_{xy}) mede a dispersão entre os valores estimados e os observados pela regressão, em comparações entre modelos. Quanto menor o valor, mais precisa é a equação (Schneider, 1998). Já a análise gráfica de resíduos é utilizada na avaliação da qualidade dos modelos ajustados, sendo possível observar tendências de super ou sub-estimativas. Espera-se que os resíduos sejam independentes, com média igual a zero e variância constante (Draper & Smith, 1980).

Tabela 1. Modelos testados para estimativa de biomassa seca total, para áreas em restauração florestal com 5 anos de idade. Em que b: biomassa seca total, db: densidade básica, dap: diâmetro altura do peito, Ht: altura total, β : coeficiente

Número	Referencial	Forma algébrica
1	Chave et al. (2005a)	$\ln(b) = db \exp(\beta_0 + \ln(db \text{ dap}^2 \text{ Ht}) + \varepsilon$
2	Chave et al. (2005b)	$b = db \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln(\text{dap}) + \beta_2 (\ln(\text{dap}))^2 - \beta_3 (\ln(\text{dap}))^3 + \varepsilon$
3	Schumacher e Hall (1933)	$\ln(b) = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{dap}) + \beta_2 \ln(\text{Ht}) + \varepsilon$
4	Spurr (1952)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
5	Meyer (1941)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \beta_3 \text{dap} \text{Ht} + \beta_4 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
6	Stoate (1945)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 + \beta_2 \text{Ht}^2 + \beta_3 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
7	Higuchi & Carvalho Jr (1994)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
8	Higuchi & Carvalho Jr (1994)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap} + \beta_2 \text{dap}^2 + \beta_3 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
9	Sanquetta et al. (2001)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 + \beta_2 \text{dap}^2 \text{Ht} + \varepsilon$
10	Naslund (1940) citado por Spurr (1952)	$b = \beta_0 + \beta_1 \text{dap}^2 + \beta_2 \text{dap}^2 \text{Ht} + \beta_3 \text{dap} \text{Ht}^2 + \beta_4 \text{Ht}^2 + \varepsilon$

Os ajustes e as análises necessárias para escolha do melhor modelo foram realizadas no software R (R Development Core Team, 2018)

Com base nos dados do inventário florestal realizado na área, a partir modelo alométrico selecionado, foi possível estimar a biomassa viva acima do solo por parcela, na unidade Mg ha⁻¹.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Biomassa e Teores de Carbono

A partir da amostragem destrutivas das sub-parcelas alocadas nas áreas, foram cubadas 36 árvores no total, e a tabela 2 apresenta os valores de biomassa, o diâmetro altura

do peito, a altura total e o peso de cada um dos compartimentos avaliados (folha, galho e tronco) para cada árvore. Os valores de diâmetro altura do peito encontrados entre as árvores cubadas foi de 3 a 47 cm, e de altura foi de 1,4 a 44 m.

Foram cubadas 36 árvores no total, representando tanto espécies pioneiras (n=9) indicadas na tabela por *, quanto não pioneiras (n=5), a partir da classificação da resolução SMA – 8 (2008). Nesse estudo, as espécies classificadas como pioneiras, são as espécies utilizadas na fase de recobrimento, lembrando que segundo a classificação por grupo de plantio, nem todas as espécies pioneiras possuem as características de rápido crescimento e cobertura de copa (Brancalion, et al. 2015). Nota-se que há grande variação de biomassa entre os indivíduos com valores entre 1kg (*Hymenaea courbaril* L.) e 113 kg (*Senna multijuga* (Rich.) H.S.Irwin & Barneby) por árvore. As espécies de recobrimento apresentam biomassa média 5 vezes maior do que as outras, com média de 36 kg por árvore. Isto pode ser atribuído ao fato de que as espécies de recobrimento são implantadas 1,5 anos antes e que nos primeiros anos de implantação, apresentam maior crescimento vegetativo e dominância da área. Porém com o passar dos anos, essas espécies tendem à senescência, deixando espaço para as mais tardias se estabelecerem (Luken, 1990). Ferez et al. (2015), no estudo em áreas de restauração florestal com 6 anos de idade, testando diferentes formas de manejo, encontrou valores similares para os diferentes grupos de espécies, sendo a biomassa média das espécies pioneiras 6 vezes maior que das espécies não pioneiras.

No que se refere a proporção da biomassa entre os compartimentos, a distribuição média seguiu a seguinte ordem: tronco (45%) > galho (41%) > folha (14%). Essa é normalmente a distribuição encontrada para biomassa acima do solo segundo Watzlawick (2003). Nota-se, também que a quantidade de galhos somado a de folhas, é superior a proporção de tronco, evidenciando a importância desses compartimentos na quantificação de biomassa total, como sugerido por Ferez et al. (2015).

Avaliando o DAP em relação a biomassa total, podemos dizer que existe uma tendência de que quanto maior o diâmetro, maior a biomassa total encontrada, evidenciando a importância dessa variável dendrométricas nas estimativas de biomassa.

Tabela 2. Informações coletadas a partir da cubagem das 36 árvores, na área restaurada com 5 anos em Itu/SP. DAP: diâmetro altura do peito (cm); Ht: altura total (m). Espécies pioneiras indicadas por (*)

Ind	Espécie	DAP (cm)	Ht (m)	Peso folha (kg)	Peso galho (kg)	Peso tronco (kg)	Biomassa total (kg)
1	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan	7,3	4,2	0,60	0,65	1,00	2,25
2	<i>Bastardiopsis densiflora</i> (Hook. & Arn.) Hassl.*	18,0	5,1	0,56	3,54	1,60	5,70
3	<i>Bastardiopsis densiflora</i> (Hook. & Arn.) Hassl.*	39,0	5,7	0,43	5,37	3,14	8,95
4	<i>Croton floribundus</i> Spreng.*	42,8	11,3	3,77	23,11	31,23	58,11
5	<i>Croton floribundus</i> Spreng.*	42,5	10,0	9,73	47,17	40,34	97,24
6	<i>Croton floribundus</i> Spreng.*	31,5	8,1	6,89	41,36	51,42	99,68
7	<i>Croton floribundus</i> Spreng.*	32,2	8,5	4,28	28,68	10,62	43,59
8	<i>Croton urucurana</i> Baill.*	22,5	5,3	1,01	6,50	9,51	17,01
9	<i>Croton urucurana</i> Baill.*	44,0	7,9	1,82	20,70	6,22	28,74
10	<i>Croton urucurana</i> Baill.*	44,0	7,1	2,38	27,89	5,88	36,15
11	<i>Croton urucurana</i> Baill.*	29,7	6,7	1,75	11,24	6,38	19,36
12	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong*	10,5	4,0	0,37	1,15	1,50	3,02
13	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.*	26,3	7,3	1,89	9,31	16,55	27,76
14	<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth*	42,1	6,6	2,19	23,28	9,89	35,37
15	<i>Heliocarpus popayanensis</i> Kunth*	24,1	7,1	2,98	14,85	16,02	33,85
16	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	9,0	1,8	0,12	0,57	0,19	0,88
17	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	12,0	4,5	0,98	1,82	2,72	5,52
18	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	6,6	1,8	0,12	0,21	0,56	0,89
19	<i>Inga vera</i> Willd*	7,0	3,5	0,28	0,44	0,82	1,54
20	<i>Inga vera</i> Willd*	25,0	8,6	9,69	15,09	11,70	36,48
21	<i>Inga vera</i> Willd*	24,0	7,0	2,89	10,94	9,45	23,27
22	<i>Inga vera</i> Willd*	14,6	4,1	1,52	2,93	1,36	5,81
23	<i>Inga vera</i> Willd*	15,0	4,7	1,54	2,00	2,08	5,62
24	<i>Inga vera</i> Willd*	12,0	5,6	1,74	2,46	3,14	7,34
25	<i>Inga vera</i> Willd*	22,0	8,0	3,25	17,72	16,18	37,15
26	<i>Luehea divaricata</i> Mart. & Zucc.	3,0	1,4	4,38	2,55	8,88	15,81
27	<i>Luehea divaricata</i> Mart. & Zucc.	4,7	1,7	7,51	20,63	8,44	36,58
28	<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	4,0	1,8	0,11	0,22	0,95	1,28
29	<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	10,5	3,1	0,56	0,42	1,13	2,12
30	<i>Pterocarpus rohrii</i> Vahl	8,0	3,6	0,38	1,22	0,95	2,55
31	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby*	47,0	10,0	55,56	28,29	29,40	113,25
32	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby*	43,3	9,8	7,38	74,96	17,70	100,03
33	<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H.S.Irwin & Barneby*	37,0	8,2	4,02	22,73	7,83	34,59
34	<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal*	4,0	1,4	1,94	5,09	43,04	50,07
35	<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal*	8,0	2,0	3,16	8,85	3,81	15,82
36	<i>Solanum granulosoleprosum</i> Dunal*	3,5	17,8	0,57	4,43	2,28	7,28

A densidade básica da madeira proposta por Chave et al. (2006) e os teores de carbono encontrados nos diferentes compartimentos para cada espécie estão apresentados na Tabela 3. Nota-se grande variabilidade nos valores entre as espécies, fato que evidencia a importância da quantificação exata dessa variável no cálculo de estimativa da estocagem de carbono.

Tabela 3. Número de árvores cubadas por espécie com respectivas médias da densidade básica da madeira (Chave et al., 2006), e teores de carbono para os diferentes compartimentos amostrado (folha, galho e tronco). As espécies com (*) representam as pioneiras.

N	Espécie	Densidade básica (g cm ⁻¹)	Teores de carbono (%)		
			Folha	Galho	Tronco
1	<i>Anadenanthera colubrina</i>	0,88	46,10	44,76	48,71
2	<i>Bastardiopsis densiflora</i> *	0,65	43,68	39,42	44,01
4	<i>Croton floribundus</i> *	0,60	46,67	46,51	45,49
4	<i>Croton urucurana</i> *	0,53	43,93	45,61	44,29
1	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> *	0,40	46,42	41,61	47,16
1	<i>Guazuma ulmifolia</i> *	0,53	43,63	44,46	46,93
2	<i>Heliocarpus popayanensis</i> *	0,64	46,33	45,56	47,19
3	<i>Hymenaea courbaril</i>	0,77	47,60	44,90	49,20
7	<i>Inga vera</i> *	0,58	46,21	46,18	47,58
2	<i>Luehea divaricata</i>	0,56	38,04	44,58	45,12
2	<i>Nectandra megapotamica</i>	0,64	44,83	42,20	38,36
1	<i>Pterocarpus rohrii</i>	0,46	45,25	46,87	46,16
3	<i>Senna multijuga</i> *	0,58	44,31	45,57	46,57
3	<i>Solanum granulosoleprosum</i> *	0,40	44,33	45,50	44,85

Analisando os teores de carbono, não foram encontradas diferenças entre as espécies e os compartimentos (Tabela 3), sendo a média do teor de carbono nas folhas de 44,8%, no galho de 44,5% e no tronco de 45,8%. Valores semelhantes foram encontrados por Ferez (2011) e Miranda et al. (2011), evidenciando que o ritmo de crescimento das espécies não influencia diretamente na estocagem de carbono, e sim na densidade básica da madeira e na biomassa.

A partir da média ponderada entre o teor de carbono e o peso do compartimento para todas as espécies cubadas, foi possível determinar o valor do teor de carbono médio da área em 45,30%. Podemos observar que o valor encontrado em nosso estudo, em concordância com o registrado em outros trabalhos, está abaixo dos valores sugeridos pelo IPCC (2007). Indicando que o valor normalmente utilizado em estimativas globais deve estar superestimando a estocagem de carbono.

2.3.2. Ajuste de modelos

Para as estimativas de biomassa total, foram testados 10 modelos comumente utilizados para este fim na literatura. O modelo foi selecionado de acordo com o coeficiente de determinação ajustado (R^2), erro padrão da estimativa em percentagem (S_{xy}) e gráficos de resíduos.

Os modelos ajustados para estimativa de biomassa total para áreas de restauração florestal com 5 anos de implantação apresentam bons índices de ajustes (R^2 e $S_{xy}\%$) estão apresentados na Tabela 4, e podem ser comparados a outros trabalhos sobre as mesmas estimativas. O melhor modelo ajustado, foi o modelo 5 (Modelo de Meyer), apresentando valores de $R^2= 89,72$ e $S_{xy}= 18,10$. Assim a partir dos coeficientes ajustados, o modelo ideal para a área restaurada com 5 anos de idade na Mata Atlântica é:

$$B = 29,126 - 4,519 \text{ DAP} + 0,054 \text{ DAP}^2 + 0,569 \text{ DAP Ht} - 0,005 \text{ DAP}^2 \text{ Ht}$$

Em que:

B: Biomassa viva acima do solo, em kg.

DAP: Diâmetro à altura do peito, em cm,

Ht: Altura total, em m.

Tabela 4. Coeficientes ajustados para estimativa de biomassa total e suas respectivas estatísticas de ajuste. O modelo com (*) foi o selecionado.

Modelo	R^2	$S_{xy} (\%)$	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
1	81.46	20.10	18.0993	-	-	-	-
2	48.36	28.36	0.399	-0.139	-0.146	-0.272	-
3	57.01	1.13	-0.4413	1.3322	0.4212	-	-
4	80.82	19.66	8.9857	0.0035	-	-	-
5*	89.72	18.10	29.126	-4.519	0.054	0.569	-0.005
6	87.37	18.50	15.410	-1.171	0.416	0.004	-
7	83.46	19.28	18.90	-0.939	0.005	-	-
8	87.00	18.60	8.687	0.613	-0.057	0.008	-
9	83.46	19.28	18.900	-0.939	0.005	-	-
10	87.37	18.79	15.483	-1.203	0.004	-0.001	0.441

Miranda et al. (2011), ajustaram os mesmos modelos em um estudo, em áreas de restauração com diferentes idades, e chegaram a ajustes com R^2 mais altos. Fato que pode ser atribuído à estratificação dos dados pelos autores, por ritmo de crescimento das espécies, o que melhora o ajuste, diminuindo o erro-padrão e aumentando o coeficiente de determinação. Outros autores como Higuchi et al. (2004), também estratificaram seus dados em duas classes de diâmetro em seu estudo de estimativa de biomassa em formações ripárias na Amazônia, também melhorando os índices. Porém nesse estudo a estratificação não aumentou a qualidade dos indicadores estatísticos, pois o número de árvores amostradas pode ter sido insuficiente para diminuir o erro e aumentar a precisão do modelo, já Miranda et al. (2011) usou 107 árvores.

Além dos parâmetros estatísticos, foram analisados os gráficos de resíduos para estimativa de estoque de biomassa (Figura 7), que corroboraram para a escolha do modelo 5 na seleção dos modelos, pois apresentou menor tendências de super-estimativa e sub-estimativa dos valores, com valores próximos da média.

Modelo 3 **Modelo 4** **Modelo 5** **Modelo 6**

Figura 7. Distribuição gráfica dos resíduos em relação a biomassa total estimada pelos modelos 1 a 10.

2.3.3. Estimativas finais

A partir da melhor equação ajustada para área em restauração florestal com 5 anos de idade na Mata Atlântica e das informações adquiridas no inventário florestal realizado nas parcelas, foi estimada a biomassa total da área em restauração, sendo seu valor médio de $21,49 \pm 0,146 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 8). O teor de carbono determinado para área foi de 45,3%, sendo assim a estimada do estoque de carbono médio da área foi de $9,73 \pm 0,06 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Figura 8).

O valor médio de produtividade encontrado no estudo foi de $1,94 \pm 0,62 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Durigan e Melo (2006), que estudaram a fixação de carbono em restaurações de mata ciliares no Vale do Paranapanema com diferentes idades, encontraram valores similares de produtividade para a mesma idade. No estudo de Ferez et al. (2015), que comparou a estocagem de carbono de áreas em restauração florestal com 6 anos de idade, comparando manejo usual com manejo intensivo, foram encontrados valores médios de produtividade de $1,85 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para manejo usual e $6,46 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o intensivo.

Figura 8. Biomassa (Mg ha^{-1}) e estoque de carbono (Mg C ha^{-1}) nas diferentes áreas em processo de restauração florestal com 5 anos de idade, no município de Itu, São Paulo, Brasil.

Os valores médios de produtividade encontrados no nosso estudo estão dentro do que é considerado normal, conforme encontrado em outros trabalhos para áreas com idades equivalente (Amaral, 2017; Ferez, et al. 2015; Durigan e Melo, 2006). Isso pode ser explicado pelo manejo realizado com replantio de mudas, combate de formigas e correção adequada da fertilidade do solo no momento do plantio, que fez com que as áreas tivessem um bom desempenho em sua fase inicial, além do adensamento de espécies e uso de espécies de

adubação verde nas entrelinhas do plantio inicial, que segundo César et al. (2012), podem melhorar a qualidade do solo, além de controlar as gramíneas e criar ambiente adequado para o desenvolvimento das mudas. Destacamos que as parcelas com menores valores coincidem com as áreas com maiores problemas de mortalidade e competição com gramíneas. Amaral (2017) também encontrou baixos valores de biomassa em áreas com grande mortalidade por formiga, mato competição ou alagamento das áreas.

Estudando a influência dos grupos ecológicos e idades na estocagem de carbono de plantios de restauração florestal, Shimamoto et al. (2014), concluiu que espécies de rápido crescimento e vida curta contribuem mais para o acúmulo de carbono nos primeiros 37 anos após plantio, enquanto as espécies de crescimento lento contribuem nos estágios tardios de sucessão e continuidade da floresta. Este mesmo estudo, sugere que os serviços ecológicos providos pelas restaurações florestais têm crescimento exponencial nos primeiros 60 anos de implantação.

Em nosso estudo observamos que espécies de recobrimento estão estocando mais biomassa e conseqüentemente mais carbono, porém as espécies tardias estão presentes na área e é esperado que se desenvolvam na comunidade florestal ao longo do tempo. Vale ressaltar que as espécies de diversidade foram implantadas 1,5 anos após o recobrimento, assim elas têm seu crescimento em um ambiente com meia luz, e menor competição com gramíneas, o que pode favorecer seu desempenho.

2.4. CONCLUSÃO

O modelo ajustado a partir da cubagem rigorosa apresenta boa qualidade de estimativa de biomassa para a área processo de restauração florestal, com 5 anos de idade, porém pode ser melhorado com a estratificação dos dados de acordo com o grupo de espécies, ou por classe de diâmetro. Assim recomenda-se a continuidade o do estudo amostrando idades maiores, e também o aumento do número de indivíduos cubados, afim de encontrar um R^2 maior.

Um resultado importante desse capítulo foi que o teor de carbono da biomassa viva acima do solo da área foi de 45,3%, reforçando que estudos que avaliem essa porcentagem devem ser incrementados, visando diminuir o erro de estimativas de estoque de carbono total normalmente indicado com um fator de 50%.

Podemos concluir nesse capítulo que a área em processo de restauração florestal através da metodologia de restauração ativa com plantio total escalonado de espécies com 5 anos de idade apresenta incrementos médios de biomassa e de estoque de carbono adequados

para a idade, comparando com outros estudos, apontando um elevado potencial dessa floresta para o sequestro de carbono na região. Além disso, o modelo ajustado para estimativa da biomassa viva acima do solo e o teor de carbono encontrado na área, podem ser utilizados em outros estudos.

REFERÊNCIAS

- Amaral, L.G.C. 2017. **Incremento de carbono estocado na parte aérea de plantios de restauração em corredores integrando unidades de conservação e fragmentos ripários**. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba.
- Amaro, M.A.; Soares, C.P.B.; Souza, A.L.; Leite, H.G.; Silva, G.F. 2013. **Estoque volumétrico de biomassa e carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, Minas Gerais**. Revista Árvore, Viçosa, v.37, n.5, p. 849-857.
- Baskerville, G.L. 1972. **Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass**. Canadian Forestry Service, v.2, n.1, p. 49-53.
- Bioflora. 2015. **Manual da restauração ecológica: técnicos e produtores rurais do extremo Sul da Bahia**.
- Brancalion, P.H.S.; Rodrigues, R.R.; Gandolfi, S. 2015. **Restauração florestal**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 432 p.
- Brown, S. 1997. **Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: a Primer**. Rome: FAO, United Nations, (Forestry Paper-134).
- Burger, D. 2005. **Modelos alométricos para a estimativa da fitomassa de Mata Atlântica na Serra do Mar, SP**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cairns, M.A.; Brown, S. Helmer, E.H.; Baumgardner, G.A. 1997. **Root biomass allocation in the world's upland forests**. Oecologia, v. 111, p. 1-11.
- César, R.G.; Brancalion, P.H.S.; Rodrigues, R.R.; Oliveria, A.M.S.; Alves, M.C. 2012. **Does crotalaria (*Crotalaria breviflora*) or pumpkin (*Cucurbita moschata*) inter-row cultivation in restoration plantings control invasive grasses?** Scientia Agricola. v.70, n.4, p.268-273.
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown S.; Cairns M.; Chambers J.C.; Eamus D.; Folster H.; Fromard F.; Higuchi N.; Kira T.; Lescure J.; Nelso B.W.; Ogawa H.; Puig H.; Riéra B.; Yamakura T. 2005. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. Oecologia, v. 145, p. 87–99

- Chave, J.; Muller-Landau, H.C.; Baker, T.R.; Easdale, T.A.; Ter Steege, H.; Webb, C.O.; 2006. **Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species.** *Ecol. Appl.*, v. 16, p. 2356–2367.
- Draper, N.R.; Smith, H. 1980. **Applied regression Analysis.** 2nd ed. New York: J. Wiley & Sons, 709 p.
- Durigan, G.; Melo, A.C.G. 2006. **Fixação de carbono em reflorestamentos de mata ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil.** *Scientia Forestalis*, Piracicaba, c. 17, p. 149-154.
- Ferez, A.P.C. 2011. **Efeito de práticas silviculturais sobre taxas iniciais de sequestro de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba.
- Ferez, A.P.C.; Campoe, O.C.; Mendes, J.C.; Stape, J.L. 2015. **Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic Forests in Brazil.** *Forest Ecology and Management*. v.350, p. 40-45.
- Higuchi, N.; Carvalho JR, J. A. 1994. **Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia.** In: Emissão × Seqüestro de CO₂ - Uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. Rio de Janeiro, 1994. p.125-153.
- Higuchi, N.; Chambers, J.; Santos, J.; Ribeiro, R.J.; Pinto, A.C.M.; Silva, R.P.; Rocha, R.M.; Tribuzy, E.S. 2004. **Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia Central.** *Floresta*, v.34 p.295-304.
- Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC. 2007. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; Hanson, C.E.; Cambridge, 73p.
- Luken, J.O. 1990. **Directing ecological succession.** New York, Chapman and Hall.
- Machado, L.A.; Santos dos, M.T.N. 2003. **Estudo de impacto ambiental EIA/RIMA: loteamento fechado Parque Terras de Santa Cecília** v. 01, Município de Itu, SP.
- Mackdicken, K.G. 1997. **A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects.** Forest Carbon Monitoring Program, Institute for Agricultural Development. Arlington: Winrock International.
- Meyer, H.A. 1941. **A correction for a systematic error occurring in the application of the logarithmic volume equations.** S.I.: Pennsylvania Forest School Research. 3p, (Paper 7).

- Miranda, D.L.C.; Melo, A.C.G.; Sanquetta, C.R. 2011. **Equações alométricas para a estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamento de restauração.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.35, n.3, p.679-689.
- Moore, J. 2010. **Allometric equations to predict the total above-ground biomass of radiata pine trees.** Annals of Forest Science, Les Ulis, v.67, n.8, p. 806p1 – 806p11.
- Näslund, M. 1940. **Funktioner och tabeller för kubering av stående träd. Tall, gran och björk i norra Sverige.** Medd. Statens Skogsförsöksanst., 32(4): 87–142. (In Swedish with English summary).
- Preiskorn, G.M. 2011. **Composição florística, estrutura e quantificação do estoque de carbono em florestas restauradas com idades diferentes.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba.
- 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/>.
- Rodrigues, R.R.; Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I. 2009. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal.** 259 p. Instituto BioAtlântica, São Paulo.
- Sanquetta C. R.; Watzlawock, L.F.; Schumacher, M.V.; Mello, A.A. 2011. **Relações individuais de biomassa e conteúdo carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil.** In: Simpósio Latino Americano sobre manejo florestal, 2. Santa Maria, Brasil. Anais: Santa Maria, UFSM/PPGEF. P. 415-427.
- São Paulo, Resolução SMA 08 de 2008. **Fixa orientações para reflorestamentos heterogêneos de áreas degradadas e dá providências correlatas.** Diário Oficial do Estado de São Paulo.
- Shimamoto, C.Y.; Botosso, P.C.; Marques, M.C.M. 2014. **How much carbono sequestered during the restoration of tropical forest? Estimates from tree species in the Brazilian Atlantic forest.** Forest Ecology and Management, v.329, p. 1-9.
- Schneider, P.R. 1998. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal.** 2. ed. Santa Maria: UFSM, CEPEF. 236p.
- Schumacher, F.; Hall, F.X. 1933. **Logarithmic expression of timber-tree volume.** Journal of Agricultural Research, v.47, p.719-734.
- Silveira, P. 2010. **Estimativa da biomassa e carbono acima do solo em um fragmento de floresta ombrófila densa utilizando o método da derivação do volume comercial.** Floresta, Curitiba, PR, v.40, n.4, p. 789-800.

- Silveira, P.; Koehler, H.S.; Sanquetta, C.R.; Arce, J.E. 2008. **O estado da arte na estimativa da biomassa e carbono em formações florestais**. Floresta, Curitiba, PR, v.38, n.1.
- Spurr, S. 1952. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press, 476p
- Stoate, I.N. 1945. **The use of a volume equation in pine stands**. Australian Forestry, 9:48-52.
- Tiepolo, G.; Calmon, M. 2002. **Measuring and Monitoring Carbon Stock at the Guaraqueçaba Climate**. Action Project, Paraná, Brazil, v.153, n. 153.
- Veloso, H. P.; Rangel Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A.; 1991. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. 123 p. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro.
- Vieira, S.A.; Alves, L.F.; Aidar, M.; Araújo, L.S.; Bakes, T.; Batista, J.L.F.; Campos, M.C.; Camargo, P.B.; Chaves, J.; Delitti, W.B.C.; Honório, E.; Joly, C.A.; Keller, M.; Martinelli, L.A.; Mattos, E.A.; Metzker, T.; Phillips, O.; Santos, A.M.; Shimabukuro, M.T.; Silveira, M.; Trumbore, S.E. 2008. **Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest**. Biota Neotropica, v.8, p. 21–29.
- Young, C.F. 2001. **Aspectos sociais e econômicos do desmatamento em áreas de Mata Atlântica**. In: Aliança para Preservação da Mata Atlântica. Projeto Hotspots.
- 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**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

3. EFEITO DAS METODOLOGIAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL NO ESTOQUE DE CARBONO

RESUMO

Restaurações florestais representam uma grande oportunidade de mitigação das mudanças climáticas. Cada situação de degradação, dependendo de suas características históricas, do tipo e intensidade de uso do solo, da paisagem regional, resiliência e etc, demandam diferentes metodologias de restauração. Sendo então necessário o conhecimento do efeito das diferentes metodologias de restauração florestal no estoque de carbono, e como este processo ocorre entre os reservatórios existentes nos ecossistemas. Assim o objetivo do presente capítulo foi avaliar a quantificação do estoque de carbono em diferentes metodologias de restauração florestal, com 5 anos de idade, de forma a analisar como ocorre a espacialização do carbono nos diferentes compartimentos. O presente estudo foi realizado no município de Itu/SP, onde foram implantadas parcelas de 30x30 m (900 m²) distribuídas de forma sistemáticas nas áreas em processo de restauração. Os tratamentos utilizados foram as diferentes metodologias de restauração florestal nas diferentes situações de degradação, sendo elas: restauração passiva (apenas isolamento da área dos fatores de perturbação), restauração assistida (condução da regeneração natural, adensamento e enriquecimento de espécies) e restauração ativa (plantio total escalonado); pasto limpo em uso e fragmento nativo remanescente de floresta estacional semidecidual. E os compartimentos avaliados foram: biomassa viva, biomassa morta e solo. Em cada uma das parcelas foi realizado o inventário florestal das árvores, e foram utilizados para estimativa dessa biomassa modelos alométricos definidos previamente, também foi feita a coleta do estrato regenerante, dos herbáceos, da serapilheira, da madeira morta, das raízes e do solo, utilizados na quantificação da biomassa e no teor de carbono. As análises do estoque de carbono nos compartimentos e tratamentos foi realizada no software R através de ANOVA e do teste de Tukey. Os resultados mostraram que entre os compartimentos, a maior estocagem de carbono foi no solo, seguido da biomassa viva e da biomassa morta. Entre os tratamentos, levando em consideração todos os compartimentos, o fragmento remanescente apresentou a maior estocagem seguido do pasto limpo em uso, da restauração ativa, da restauração passiva e da assistida. Concluímos que todos os compartimentos são importantes na quantificação de carbono em ecossistemas florestais remanescentes e em restauração, e que as áreas em processo de restauração florestal, com destaque para a restauração ativa, desempenham função mitigadora sobre o aquecimento global.

Palavras-chave: Restauração florestal; Compartimentos; Sequestro de carbono; Isótopos no solo; Mudanças climáticas

ABSTRACT

Forest restoration has a great potential for climate change mitigation. So, it is necessary to know the effect of methods for implementing a restoration project on the carbon stock pools (alive and dead biomass and soil). This study aims to quantify carbon stock on the different forest implementation methods for the different pools. Data was collected in Itu/SP. Plots (30x30 meters, 900 m²) were systematically distributed on the area. The treatments were the different forest implementation methods: active restoration, assistive restoration and passive restoration, and the comparison between a native fragment and an abandoned pasture in use. An inventory was conducted on the plots to determine carbon stock by assessing trees and ingrowth, herbaceous component, litter, dead wood, roots and biomass was determined using the model fitted on the previous chapter. Analysis of variance and Tukey test were made on carbon stocking on the pools on the treatments was made on the software R. The greatest carbon stock in on the soil pool, followed by alive biomass, followed by dead biomass. The native fragment was the treatment with higher stocking considering all pools, followed by the pasture on use, active restoration and abandoned pasture with natural regeneration and last, the natural area where regeneration was conducted. The conclusion is that all pools are important for carbon sequestration in forest ecosystems and that areas restored by planting seedling on the whole area are establishing and sequestrated great amount of carbon.

Keywords: Forest restauration; Biomass pools; Carbon sequestration; Soil isotopes; Climate changes

3.1. INTRODUÇÃO

Segundo Dixon, et al. (1994) e Silveira et al. (2008), a área coberta por florestas em todo o mundo representa um dos maiores sumidouros de carbono atmosférico. Porém, nos últimos vinte anos, aproximadamente 100 milhões de hectares dessas florestas foram destruídas (FAO, 2012), sendo o desmatamento uma das principais causas das mudanças climáticas (IPCC, 2007).

Da mesma forma que a mudança no uso do solo tem seu impacto negativo, o manejo adequado das áreas agrícolas e a restauração de áreas protegidas na legislação ambiental, promovendo a reconstrução de um cenário ambiental mais efetivo, tem um impacto positivo na diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera. Assim, o crescimento da vegetação transforma o carbono sequestrado da atmosfera, em biomassa vegetal, garantindo ainda sua transferência para o solo (Pearson, Walker e Brown, 2005).

Neste sentido, as restaurações florestais são consideradas potenciais reservatórios de carbono (Durigan e Melo, 2006). Por causa do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

(MDL), com a comercialização em mercado internacional (UNFCCC, 2011), e pela demanda por regularização à legislação ambiental das propriedades rurais no Brasil (Brancalion et al., 2012), áreas em processo de restauração estão em expansão. Assim, surge a necessidade de aprimoramento das quantificações desses sumidouros de carbono, para obter estimativas confiáveis desses estoques de áreas em processo de restauração, principalmente considerando diferentes metodologias de restauração florestal e sob condições ambientais adversas (Durigan e Melo, 2006).

Segundo a *Society for Ecological Restoration Internacional* (SER, 2004), a restauração ecológica é o "processo de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído", ou seja, que a nova comunidade consiga manter seus processos ecológicos ao longo do tempo, em condições próximas da original (Engel e Parrota, 2008; Rodrigues et al., 2009). Para iniciar uma restauração florestal, devem se estabelecer as metas e o objetivo do projeto, levando em consideração a situação ambiental de cada área a ser restaurada, afim de se definir as metodologias mais adequadas de restauração para cada situação de degradação (Rodrigues et al., 2009).

Alguns ecossistemas perturbados, que mantiveram uma resiliência, são capazes de retornar às condições originais naturalmente, o que é chamado de restauração passiva, que se restringe à expressão da regeneração natural espontânea, mediante apenas da remoção de fatores perturbadores e isolamento da área (Wadt, 2003). Para áreas que necessitam intervenções humanas, existem modelos que evoluíram com a ecologia das florestas, a fim de acelerar e influenciar a sucessão da área (Trentin et al., 2018). Assim, há metodologias mais intermediárias, chamadas de restauração assistida, com uso de técnicas de condução das espécies de interesse, controle das indesejadas, seguida de métodos de adensamento, com suprimimento das falhas existentes, e enriquecimento, introduzindo espécies nativas regionais dos estágios finais de sucessão, que tem dificuldade de chegar naturalmente na área em restauração (Rodrigues et al., 2009; Brancalion et al., 2015) ou metodologias mais intervencionistas, onde tem pouca ou nenhuma possibilidade de regeneração natural, chamadas de restauração ativa, com plantios de espécies nativas regionais combinadas em grupos ecológicos e/ou funcionais (Kageyama e Gandara, 2004; Nave e Rodrigues, 2007; Rodrigues et al., 2009).

Estimativas da biomassa são de extrema importância para os estudos de mudanças climáticas (Brown, 1997), uma vez que existem diversas formas de acúmulo de biomassa e reservatório de carbono, sendo preciso avaliar como elas ocorrem em diferentes compartimentos dos ecossistemas (Martins, 2004). Segundo Birdsey et al. (2000), existem

cinco reservatórios que devem ser considerados: a) Biomassa acima do solo: parte aérea da árvore (tronco, galhos e folhas), regenerantes, herbáceas; b) Biomassa abaixo do solo: raízes; c) Serapilheira: camada de resíduos orgânicos depositado no solo da floresta; d) Biomassa morta: árvores e arbustos mortos; e) Carbono no solo (Figura 1).

Normalmente projetos de avaliação de carbono levam em consideração apenas a estocagem na parte arbórea, que representa a maior porcentagem da biomassa total (Lugo e Brown, 1992), e é a menos onerosa de se quantificar. Entretanto, o sequestro de carbono ocorre tanto na biomassa acima quanto a baixo do solo, bem como na biomassa morta (Post et al., 2009). O solo é considerado o maior reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres (Post et al., 1982), porém essa concentração é altamente variável no espaço e lentamente variável no tempo (Smith, 2004), o que faz com que a metodologia de quantificação desse compartimento não seja levada em consideração em projetos de avaliação de carbono. Assim realizar uma quantificação correta, levando em conta todos os compartimentos, é de extrema importância.

Figura 1. Ilustração dos diferentes compartimentos que podem existir em um ecossistema terrestre e estocar carbono. Sendo biomassa viva acima do solo: a parte aérea das árvores, os regenerantes, herbáceas, arbustos; a biomassa viva abaixo do solo: as raízes (finas e grossas); a biomassa morta acima do solo: a madeira morta (MM) e a serapilheira; e no solo.

A mudança no uso do solo afeta o balanço de carbono no ecossistema, tanto para mais com as restaurações ou conversão de áreas de cultivo agrícola para pastagem, quanto para menos com a substituição de florestas para terras de cultivo ou pastagem (Don et al.,

2011). A composição isotópica de carbono estável ($\delta^{13}\text{C}$) é uma ferramenta útil nos estudos dessas alterações (Bernoux et al., 1998), pois os diferentes tipos de plantas (C_3 , C_4 e CAM), possuem diferentes ciclos fotossintético, obtendo valores diferenciados de $\delta^{13}\text{C}$ no solo, e estes níveis podem ser utilizados na determinação da contribuição de cada uma das plantas na composição do estoque de carbono da área (Martinelli et al., 2009), podendo inferir assim qual o tipo de planta que esteve presente na área.

Restaurações florestais representam uma grande oportunidade para o sequestro de carbono e a mitigação das mudanças climáticas (Chazdon et al. 2016; Poorter et al. 2016), assim torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias que possibilitem estimar com precisão a quantidade de carbono total existentes entre as diferentes metodologias de restauração florestal de áreas degradadas. O objetivo do presente capítulo foi avaliar a quantificação do estoque de carbono em diferentes metodologias de restauração florestal com 5 anos de idade (restauração passiva assistida, ativa), comparando esse estoque de áreas em restauração com o estoque de fragmentos florestais nativos e áreas de pastagem limpa em uso, como ocorre a espacialização do carbono nos diferentes compartimentos existentes nesses ecossistemas.

As hipóteses testadas foram:

- (i) O estoque de carbono irá seguir a seguinte ordem em termos de quantidade: fragmento nativo > restauração ativa > restauração assistida > restauração passiva > pasto limpo em uso.
- (ii) Os modelos de restauração florestal com 5 anos de idade, contém aproximadamente 20% da biomassa acumulada do fragmento florestal nativo.

A estocagem de carbono entre os compartimentos de todos os tratamentos seguirá a ordem: solo > biomassa viva > biomassa morta.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Local de estudo

O presente trabalho foi realizado nas fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho localizadas no município de Itu ($23^{\circ}15'51''\text{S}$, $47^{\circ}17'57''\text{W}$), região centro-oeste do estado de

São Paulo. As áreas de estudos estão inseridas nos limites da Serra do Japi e dentro da Área de Proteção Ambiental (APA) de Cabreúva, e possuem um total de 490 hectares (Figura 2).

Figura 2. Localização geográfica das áreas de estudo destacadas no estado de São Paulo, Brasil e o destaque para o limite das fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho no município de Itu, São Paulo.

Segundo a classificação de Köppen (1948) o clima da região de estudo é do tipo Cwa, tropical de altitude com chuvas no verão e seca no inverno. A temperatura média anual é de 21,3°C com precipitação anual de 1299.6 mm (CAP, 2017).

A região está inserida na bacia do Rio Tietê, e segundo Machado & Santos (2003), possui quatro diferentes tipos de solo: Argissolos vermelho-amarelos distróficos com textura média/argilosa; Argissolos vermelho-amarelos distróficos com textura média cascalhenta/argilosa fase pedregosa e rochosa; Argissolos vermelho-amarelos distróficos e eutróficos, com textura argilosa cascalhenta não rochosa e rochosa; e Latossolos vermelhos distróficos com textura argilosa. A área experimental está inserida no domínio do bioma Mata Atlântica, de uma Floresta Estacional Semidecidual (Velosos et al., 1991).

Em 2012, com a necessidade de cumprir a legislação ambiental brasileira, as fazendas adotaram o programa de adequação ambiental e restauração da vegetação em área de Reserva Legal (Figura 3). Esse projeto foi elaborado e conduzido pela BIOFLORA Tecnologia da Restauração, com supervisão científica do Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal (LERF) e do Laboratório de Silvicultura Tropical (LASTROP) da ESALQ/USP.

As áreas estudadas têm um histórico semelhante, em que originalmente nessa região dominavam formações florestais, do tipo Floresta Estacional Semidecidual (FES) e no início dos anos 1900, as florestas nativas foram exploradas para extração de madeira de lei substituídas pelo cultivo do café e de outras culturas de subsistência (Young, 2001). Mais

tarde, com início da tecnificação da agricultura, ocorreu a substituição dessas culturas por pastagem, e as propriedades citadas permaneceram por muitos anos sem cobertura florestal, até que se iniciasse os reflorestamentos em 2012. Dentro do mosaico dos projetos de restauração florestal existem diferentes metodologias de implantação que foram utilizadas, dependendo de cada situação de degradação da área, a partir de suas características históricas, de tipo e intensidade de uso, de paisagem regional, resiliência e etc. dentre elas a restauração passiva, a restauração assistida e a restauração ativa.

Figura 3. Fazenda Jequitibá, Ingazinho e Capoava, no município de Itu, São Paulo, Brasil que passaram pelo programa de adequação ambiental e restauração da vegetação, em diferentes anos (2006, 2012, 2015, 2018), a partir da imagem de satélite (Google Earth).

3.2.2. Delineamento experimental

Para o estudo, foram implantadas parcelas de 30 x 30 metros (900 m²) distribuídas nas diferentes áreas de formas sistemáticas, com bordas de 30 metros, cuja distância entre si era de 100 metros (Figura 4). Porém, o número de parcelas possui limitação devido à dificuldade em encontrar no mosaico áreas com semelhança de solo, idade e topografia.

Os tratamentos (Figura 5) utilizados no experimento foram:

Restauração Ativa (RA): Devido ao histórico de uso de solo das áreas, não ocorreu regeneração natural de espécies nativas, foi recomendado o plantio total escalonado de mudas de acordo com o método utilizado por Rodrigues et al. (2009). Utilizando 80 espécies para

compor a restauração ecológica com a intensão de exploração econômica. O primeiro grupo de espécies foram as de recobrimento que tem como função ecológica ocupar rapidamente a área em processo de restauração, reduzindo as atividades de manutenção e criando condições adequadas para as outras espécies, elas possuem um rápido crescimento, boa cobertura do solo e ciclo de vida curto (Anexo A). Nessas áreas também foi utilizado a adubação verde nas entrelinhas de plantio de mudas nativas, visando o controle mais efetivo das gramíneas da área, além do aporte de nutriente (Anexo B). O segundo grupo, de diversidade e enriquecimento funcional, foi implantado 1,5 anos depois do primeiro grupo, este apresenta a função de restaurar a dinâmica da floresta madura, além de incluir as espécies arbóreas que serão exploradas futuramente (Anexo C).

Restauração Assistida (RAs): Nessas áreas a regeneração natural conseguiu se expressar, logo foram realizadas as ações de condução da regeneração natural, eliminando gramíneas no entorno dos indivíduos regenerantes, adicionalmente ao plantio de espécies do grupo de recobrimento para preencher espaços vazios não ocupado por regenerantes, além do plantio com espécies de enriquecimento e diversidade, que não estavam regenerando naturalmente na área, um ano após a adoção das ações de restauração. Foram implantadas nessa área um total de 72 espécies (Anexo D).

Restauração Passiva (RP): área de pasto abandonado, sem nenhuma intervenção humana de restauração, a não ser o isolamento da área dos fatores de degradação (presença de gado e fogo).

Fragmento remanescente de Floresta Estacional Semidecidual (FES): nenhuma intervenção foi realizada nesse tratamento, apenas a avaliação do desenvolvimento da área.

Área Agrícola – pasto limpo em uso (PU): pastagem plantada com gramíneas africanas, utilizada para criação extensiva.

Figura 4. Situação geográfica das parcelas nas fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho no município de Itu em São Paulo, Brasil. Em que, FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; PU: Pasto limpo em uso; RA: Restauração ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva.

a1) RA em 2012

a2) RA em 2018

b1) RAs em 2012

b2) RAs em 2018

c1) RP em 2012

c2) RP em 2018

d) FES

e) PU

Figura 5. Representação das diferentes áreas nas fazendas Jequitibá, Capoava e Ingazinho no município de Itu em São Paulo, Brasil. a) Restauração Ativa b) Restauração Assistida c) Restauração Passiva d) Fragmento nativo remanescente de Floresta Estacional Semidecidual e) Pasto limpo em uso. Fonte: Bioflora (2012), Autora (2018).

3.2.3. Amostragem

Para realização das coletas dos dados nas parcelas, foram sorteadas as localizações dos pontos amostrais seguindo uma ordem de distância na horizontal (largura) e vertical (comprimento). Os pontos selecionados representam as coletas de solo, serapilheira, herbáceas, e raízes finas e as linhas foram utilizadas para a quantificação da madeira morta caída (Figura 6).

Figura 6. Delineamento dos pontos amostrais sorteados nas parcelas e das linhas de quantificação de madeira morta caída em Itu, Brasil.

3.2.3.1. Inventário Florestal

Nas parcelas demarcadas foi realizado o inventário florestal estrato arbóreo. As variáveis dendrométricas mensuradas em campo foram:

- Altura total (Ht) medida com uma vara graduada;
- Circunferência altura do peito (CAP), a 1,3m do solo, com uso de fita métrica de todos os indivíduos acima de 9,3cm de CAP;

O CAP de cada indivíduo foi convertido em diâmetro altura do peito (DAP), utilizando a seguinte relação:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi}$$

Em que:

CAP: Circunferência altura do peito (cm)

DAP: Diâmetro altura do peito (cm)

O material botânico de cada morfoespécie foi coletado e identificado, e foram utilizados os valores de densidade básica (DB) propostos por Chave et al. (2006), que contém os dados para 2456 espécies de árvores neotropicais.

Para a quantificação da biomassa viva acima do solo das árvores, para as áreas em restauração florestal foi utilizado o modelo ajustado no capítulo 1 deste trabalho, e para o fragmento nativo de Floresta Estacional Semidecidual foi utilizado o modelo de Chave et al. (2005) para florestas secas. Já o estoque de carbono, foi quantificado através do valor encontrado também no capítulo 1 de 45,3%. Com bases nesses atributos e na área útil da parcela, foi possível expandir os valores para Mg ha^{-1} e Mg C ha^{-1} .

Tabela 1. Modelos ajustados para estimativa de biomassa da parte arbórea. Em que B: estoque de biomassa, DB: densidade básica, DAP: diâmetro altura do peito, Ht: altura total.

Referencial	
Capítulo 1	$B = 29,126 - 4,519 \text{ DAP} + 0,054 \text{ DAP}^2 + 0,569 \text{ DAP Ht} - 0,005 \text{ DAP}^2 \text{ Ht}$
Zanini (2018)	Ht
Chave et al. (2005)	$B = \exp(-2,235 + \ln(\text{DB DAP}^2 \text{ Ht}))$

3.2.3.2. Inventário da biomassa viva acima do solo não arbórea

O estrato da biomassa viva acima do solo (BVAS) não arbórea foi definido e adaptado de Richards (1996), e consiste na separação em diferentes formas de vida, não levando em consideração as árvores. Foram divididos em ervas (plantas não lenhosas e terrestres, como as gramíneas), em subarbustos (planta de base lenhosa e ápice herbáceo), em trepadeiras (plantas de hábito escandente de forma ampla), em arbustos (planta lenhosa ramificada desde a base) e em regenerantes arbóreos. Não foi realizado o inventário desse estrato em FES.

Nas parcelas demarcadas foi realizado o inventário florestal de subarbustos, trepadeiras e arbustos, as variáveis dendrométricas mensuradas em campo foram:

- Altura total (Ht) medida com uma vara graduada;
- Circunferência altura do peito (CAP), a 1,3m do solo, com uso de fita métrica de todos os indivíduos. O CAP de cada indivíduo foi convertido em DAP.

A coleta das gramíneas e dos regenerantes arbóreos foi realizada utilizando molduras de madeira, com dimensões de 25 x 25 cm. As coletas foram realizadas em cinco pontos sorteados em cada parcela, utilizando uma tesoura de poda para a coleta.

Os materiais amostrados foram secos em estufa de circulação forçada de ar em temperatura de 40°C até atingir peso constante. A biomassa seca (g) de cada amostra foi

quantificada, utilizando uma balança de precisão. Em seguida, as amostras foram trituradas em um moinho de facas e peneiradas até atingir a granulometria de 0.250 mm, e uma sub-amostra de 100 mg foi enviada para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP), para determinação do teor de C por meio de um analisador elementar Carlo Erba model 1110 e do espectro de massa IRMS Delta Plus.

Após a quantificação do teor de carbono, alinhados a somatório das biomassas dos diferentes estratos herbáceo, foi possível calcular o estoque de carbono em Mg C ha^{-1} .

3.2.3.3. Serapilheira

A coleta de serapilheira foi realizada utilizando molduras de madeira com dimensões de 25 x 25cm (Figura 7). As coletas foram realizadas em cinco pontos sorteados em cada parcela. Considerou-se serapilheira como todo o material morto tanto de gramíneas quanto arbóreo, disponível na superfície.

Figura 7. Moldura de madeira, com dimensão de 25 x 25 cm, utilizado na coleta de serapilheira em Itu, Brasil.

Os materiais amostrados foram secos em estufa de circulação forçada de ar em temperatura de 60°C até atingir peso constante. A biomassa seca (g) de cada amostra foi quantificada, utilizando uma balança de precisão. Em seguida, as amostras foram trituradas em um moinho de facas e peneiradas até atingir a granulometria de 0.250 mm, e uma sub-amostra de 100 mg foi enviada para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP), para determinação do

teor de carbono por meio de um analisador elementar Carlo Erba model 1110 e do espectro de massa IRMS Delta Plus.

Após a quantificação do teor de carbono, alinhados a estimativa da biomassa seca por hectare, foi possível calcular o estoque de carbono da serapilheira em Mg C ha^{-1} .

3.2.3.4. Madeira morta (MM)

A madeira morta foi dividida em duas categorias: em pé (árvores mortas com diâmetro $\geq 4,8$ cm) e caída (galhos e troncos caídos com diâmetro ≥ 2 cm), Guzmán (2014).

Para a quantificação da biomassa morta em pé foi utilizado o método de parcelas (Harmon & Sexton, 1996), em que foram consideradas árvores mortas em pé, com DAP $\geq 4,8$ cm, a partir do inventário florestal realizado. As variáveis dendrométricas mensuradas foram a altura total (Ht), utilizando uma vara graduada, e o CAP (Circunferência altura do peito), com uso de fita métrica. Não foi realizada a identificação das espécies.

As árvores foram classificadas em quatro graus de decomposição (GD) estabelecidos de acordo com suas características físicas, conforme Harmon & Sexton, (1996).

GD1: Processo de decomposição ainda não teve início

GD2: Processo de decomposição iniciado, mas mantém sua estrutura

GD3: Processo de decomposição já se encontra em estágio avançado

GD4: Fase final de decomposição, tecidos se esboroam ao simples toque

Segundo Vieira et al. (2011), os diferentes estágios de decomposição refletem diferentes densidades de madeira (Tabela 1) e com essa informação é possível estimar a massa a partir do volume de cada árvore morta em pé.

O volume da biomassa morta em pé será estimado utilizando a função proposta por Chambers, et al. (2000) e Palace (2006), de acordo com o seguinte modelo:

$$V = (\pi (0,795^2) ((\text{DAP}/2) / 100)^2 \text{Ht}^{0,818}) / 0,818$$

Em que:

V: Volume da árvore morta em pé, em m^3

DAP: Diâmetro altura do peito, em cm

Ht: Altura total, em m

Para quantificação da madeira morta caída foi utilizado o método da linha interceptadora, desenvolvido por Van Wagner (1968). A madeira morta caída foi classificada

segundo critérios de tamanho. Foi considerada madeira morta caída fina aquela com diâmetro entre 2 e 10 cm, e madeira morta caída grossa, aquelas com diâmetro maior que 10 cm.

Foram utilizadas as categorias de decomposição conforme Keller et al. (2004).

GD1: Madeira sólida com folhas ou pequenos galhos presos

GD2: Madeira sólida com casca intacta, mas sem folhas ou galhos

GD3: Madeira sólida, com a casca se desfazendo

GD4: Madeira podre, frágil e que pode ser quebrada se chutada

GD5: Madeira podre e frágil. Pode ser facilmente quebrada

O método consiste em dispor uma linha (Figura 8) de comprimento conhecido (100 m) no piso florestal e medir o diâmetro de cada peça de material lenhoso que cruzar a linha (Van Wagner, 1968). As peças de madeira morta caída grossa foram medidas em toda a extensão da linha, enquanto as finas foram registradas em secções equivalentes a 20% da linha (duas secções de 10 m) sorteadas em cada linha de interceptação e extrapoladas para o comprimento total da linha (100 m).

A partir dessa informação, será estimado o volume da biomassa morta caída, pela formula do método de linha de interceptação (Van Wagner, 1968):

$$V = (\pi^2 \sum (dn)^2) / 8 L$$

Em que:

V: Volume, em m³ ha⁻¹

dn: Diâmetro em cm da peça n no ponto de interceptação

L: Comprimento da linha, em m

A fórmula do método de interceptação baseia-se na probabilidade de uma madeira morta seja amostrada pela linha. Essa probabilidade é proporcional ao comprimento da linha e da peça, e é inversamente proporcional ao tamanho da área amostrada, e também se considera que as peças amostradas sejam cilíndricas (Marshall et al., 2000).

Figura 8. Método da linha de interceptação utilizado na amostragem de madeira morta caída em Itu, Brasil.

Para obter a estimativa da biomassa de madeira morta em pé e da caída, o volume de cada árvore foi multiplicado pela densidade básica da madeira correspondente ao seu grau de decomposição, conforme proposto por Vieira et al. (2011). Para as amostras de madeira morta caída fina, não se considera o grau de decomposição (Tabela 2).

Tabela 2. Densidade da madeira morta caída (MM caída) e em pé (MM em pé) em cada grau de decomposição e de cada categoria diamétrica da madeira morta caída fina. Fonte: Vieira, et al. (2011)

Grau de Decomposição	MM em pé (g cm⁻³)	MM caída (g cm⁻³)	Teor de C (%)
1	0,51	0,40	46,95
2	0,42	0,30	46,08
3	0,36	0,22	46,12
4	0,30	0,19	45,05
5	0,28	0,14	45,05
MM caída 5-10 cm	-	0,28	46,05
MM caída 2-5 cm	-	0,21	46,05

Para validação do método de linha de interceptação Van Wagner (1982) o esforço mínimo amostral admissível para avaliar a estocagem de madeira morta caída é de 90 m de linha para cada 20 hectares monitorados, portanto o esforço amostral utilizado de 100 m de linha para cada parcela de 900 m² é suficiente. Já na validação dos valores propostos por

Vieira et al., (2011), algumas peças foram amostradas para a realização da análise da densidade básica da madeira por balança hidrostática. Este método, consiste na pesagem do liquido deslocado pelo material saturado seguido da pesagem do material seco em estufa a ($105 \pm 2^{\circ}\text{C}$). Assim a quantificação da biomassa de madeira morta e do teor de carbono das áreas, foi por meio de modelos e valores pré-definidos na literatura.

3.2.3.5. Raízes

As raízes foram divididas em duas categorias: raiz fina (menor que 2 mm) e raiz grossa (maior que 2 mm).

Para quantificar o estoque de raízes finas, foram utilizados 2 pontos sorteados por parcela. Em cada ponto, foram retiradas porções de solo correspondentes às profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, totalizando um volume de 14 cm² para 30 cm de profundidade. A quantificação das raízes finas foi adaptada de um método utilizado por Silva (2015), e proposto por Metcalfe et al. (2007), chamado de ponto-a-ponto, que consiste em remover concomitantemente das três profundidades de solo, todas as raízes com diâmetro igual ou menor a 2mm em 4 intervalos de tempo de 2 minutos (Figura 9). As raízes finas removidas são pesadas, a fim de ser ajustado uma curva com tendência logarítmica para cada uma das camadas do solo. A partir da equação de cada curva, foi estimada a biomassa seca de raiz fina em Mg ha⁻¹, caso a coleta tivesse continuado por 120 minutos, como proposto por Metcalfe et al. (2007).

Figura 9. Coleta e separação da raiz fina a partir da metodologia ponto-a-ponto em Itu, Brasil.

Após a pesagem, os materiais removidos foram secos em estufa de circulação forçada de ar em temperatura de 40°C até atingir peso constante. A biomassa seca (g) de cada amostra foi quantificada, utilizando uma balança de precisão. Em seguida, as amostras foram trituradas em um moinho de facas e peneiradas até atingir a granulometria de 0.250 mm, e uma sub-amostra de 100 mg foi enviada para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP), para determinação do teor de C por meio de um analisador elementar Carlo Erba model 1110 e do espectro de massa IRMS Delta Plus.

Após a quantificação do teor de C, alinhados a estimativa da biomassa seca pelo método Metcalfe et al. (2007), foi possível calcular o estoque de carbono em Mg C ha⁻¹, das raízes finas por profundidade.

Para a quantificação da biomassa das raízes grossas, não será realizado o método destrutivo, pois sua coleta ocasionaria grande destruição dos sítios em processo de restauração. Assim a biomassa das raízes grossas será estimada a partir dos conhecimentos da biomassa da parte aérea, a partir do modelo alométrico desenvolvido por Cairns et al. (1997):

$$BRG = \exp (-1,085 + 0,9256 \ln (B))$$

Em que:

BRG: Biomassa da raiz grossa, em kg

B: Biomassa da parte aérea, em kg

3.2.3.6. Solo

Para a amostragem do estoque de carbono no solo, foram coletadas amostras de solo nos 5 pontos sorteados dentro de cada uma das parcelas, nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Para cada profundidade foram retiradas 3 amostras simples, formando uma amostra composta por ponto (Figura 10). As amostras foram secas ao ar, quarteadas, maceradas em gral de porcelanas com uso de pistilo, e peneiradas até atingir granulometria de 0,250 mm. Após essa etapa, uma sub-amostra de 100 mg foi enviada para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP), para determinação do teor de carbono e da razão isotópica natural entre ¹³C/¹²C, por meio do analisador elementar Carlo Erba model 1110 e do espectro de massa IRMS Delta Plus.

Também foram coletadas amostras de densidade do solo, em 1 ponto por parcela, utilizando um anel volumétrico de metal de 82,644 cm³ de volume (Figura 10). Os anéis após

coleta, serão secos a temperatura de 105°C por 72 horas e pesados em balança de 0.01 g de precisão. Com o valor peso seco determinado e o volume conhecido de cada amostra (82,644 cm³), foi obtido a densidade (g/cm³).

Figura 10. Coleta de amostra de solo com trado e de densidade do solo utilizando anel volumétrico, em Itu, Brasil.

O estoque de carbono em Mg C ha⁻¹ no solo para as diferentes profundidades foi obtido por meio da equação proposta por Veldkamp (1994):

$$Cs = (CO * Ds * e)$$

Em que:

Cs: Estoque de C no solo, em Mg ha⁻¹

CO: Teor de C orgânico total na profundidade amostras, em %

Ds: Densidade do solo, em g cm⁻³

e: espessura da camada considera, em cm

Já a razão isotópica estável entre ¹³C/¹²C, foi obtida pela seguinte equação:

$$\delta^{13}C = (R \text{ amostra} / R \text{ padrão} - 1) \times 1000$$

Em que:

$\delta^{13}C$: Composição isotópica de C no solo, em ‰

R: Razão molar entre ¹³C e ¹²C das amostras e do padrão

A partir da quantidade de carbono em cada perfil, e dos dados isotópicos, foi possível calcular a massa de carbono proveniente de plantas C₃ e C₄, a partir da equação:

$$C_4 (\%) = \frac{\delta^{13}C_{\text{solo}} - \delta^{13}C_{\text{planta } C_3}}{\delta^{13}C_{\text{planta } C_4} - \delta^{13}C_{\text{planta } C_3}} \times 100$$

Em que:

C₄: Proporção de plantas C₄, em porcentagem

δ¹³C_{solo}: Composição isotópica de C no solo, em ‰

δ¹³C_{planta C₃}: Composição isotópica de C₃ (-27,2 ‰), (Martinelli et al., 1996)

δ¹³C_{planta C₄}: Composição isotópica de C₄ (-12 ‰), (Smith & Epstein, 1971; Assad, et al., 2013)

3.2.4. Análise dos dados

As análises estatísticas do estoque de biomassa e carbono entre os diferentes compartimentos, nas diferentes estratégias de restauração, foram realizadas no software R (R Development Core Team, 2018). Para a validação das pressuposições da análise de variância (ANOVA), foram aplicados os testes de homogeneidade de variâncias de Levene's e de normalidade dos erros de Shapiro – Wilk. Quando todos os pressupostos foram aceitos, as variáveis foram submetidas a ANOVA com nível de significância de 5%. Quando houve diferenças significativas entre os tratamentos, as médias das variáveis foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

3.3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.3.1. Biomassa total acumulada

Com base nos dados e informações coletadas em campo, foram calculados os valores de biomassa em Mg ha⁻¹, e estoque de carbono em Mg C ha⁻¹, para todos os tratamentos e compartimentos estudados. O acúmulo médio de biomassa total, para todos os compartimentos, e diferentes tratamentos está apresentado na Tabela 3. O fragmento nativo (FES) apresenta os maiores valores de biomassa total (128,03 Mg ha⁻¹). Entretanto as restaurações, mesmo jovens, apresentaram valores relativamente altos de acúmulo de biomassa para a idade. O valor médio de biomassa na restauração ativa (RA) foi de 45,3 Mg ha⁻¹, seguida por assistida (RAs) com 44,76 Mg ha⁻¹ e passiva (RP) com 39,18 Mg ha⁻¹. Já o pasto em uso (PA), possui a menor média de biomassa total (25,9 Mg ha⁻¹).

Tabela 3. Valores médios de biomassa total (Mg ha^{-1}) dos compartimentos nos diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso; BVAS: Biomassa Viva Acima do Solo. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Compartimento	Biomassa média (Mg ha^{-1})				
	Tratamento				
	FES	RA	RAs	RP	PU
BVAS arbórea	58,66 a	21,49 b	17,47 b	0,19 c	0,00 c
BVAS não arbórea	-	1,31 a	8,68 a	11,04 a	5,07 a
Serapilheira	31,21 a	11,00 c	8,41 c	18,10 b	8,73 b
MM em pé	2,14 a	0,06 b	0,04 b	0,00 b	0,00 b
MM caída	5,11 a	0,28 b	0,47 b	0,00 b	0,00 b
Raiz grossa	23,46 a	8,02 b	6,51 b	0,26 c	0,00 c
Raiz fina	7,45 a	3,14 b	3,00 b	9,59 a	12,1 a
Total	128,03 a	45,3 b	44,76 b	39,18 b	25,9 b

A tabela 3 mostra o efeito das diferentes metodologias de restauração florestal aos 5 anos de idade, sobre o crescimento das árvores e das outras formas de vida. Assim, analisando comparativamente os resultados temos que o tratamento RA, obteve valores de biomassa arbórea maior, e de biomassa de principalmente de herbáceas menor, comparado principalmente com RP. Fato que pode ser justificado por haver maior acúmulo de biomassa (e.g. de desenvolvimento das espécies arbóreas plantadas) quanto maior o manejo, e RA se caracteriza pelo tratamento com maior número de intervenções humanas, pois foi implantado a partir do plantio total escalonado. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Ferez et al. (2015), que comparou o manejo intensivo com o usual em áreas de restauração florestal.

Podemos observar que os valores de biomassa total acumulada nas áreas em processo de restauração florestal equivalem em média a 33% da biomassa de FES, valor acima do indicado por Durigan e Melo (2006) para a idade ($\approx 20\%$). Segundo os mesmos autores, áreas em processo de restauração levam em média 30 anos para superar os valores de estoque dos fragmentos nativos. O alto acúmulo das áreas estudadas nesse projeto, podem estar relacionados aos manejos adotados no momento do plantio (restauração ativa e passiva).

A diferença existente no acúmulo de biomassa total entre PU e RP se deve principalmente ao menor controle do crescimento de gramíneas e arbusto na área abandonada, já que o pasto limpo é caracterizado pelo maior manejo das áreas pelos agropecuários, unido a presença de gados, que resulta na ausência de indivíduos arbóreos ou regenerantes.

A partir dos valores de biomassa acumulada, e de posse do teor de carbono (%) encontrado nas amostragens, foi possível estimar a estocagem de carbono em Mg C ha^{-1} para cada um dos compartimentos avaliados. Nos seguintes tópicos iremos discutir essas estocagens, analisando como este processo ocorreu em cada um dos reservatórios e comparando os valores entre os tratamentos.

3.3.2. Estocagem de carbono por compartimento

3.3.2.1. Estrato arbóreo

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de algumas características da área. Podemos observar que os valores de densidade de indivíduos por hectare em RA são maiores que das outras metodologias de restauração (RAs e RP). Esse resultado pode ser explicado pela metodologia de plantio total escalonado, utilizada na área, além das ações de manejo e monitoramento da área e consequente baixa mortalidade. Resultados semelhantes são encontrados em Souza & Batista (2004) em áreas em restauração florestal com mesma idade de plantio (densidade = 1426 ind ha^{-1}). Valores de RAs são semelhantes aos de Preinskon (2011) que encontrou valores de densidade de 796 indivíduos por hectare para área restaurada com 8 anos de idade, fato que pode ser explicado pelo maior número de clareiras existentes na área, e à mato competição. O tratamento RP possui um número muito inferior de indivíduos já que a área ainda é dominada por gramíneas, e as espécies arbóreas tem dificuldade de se estabelecer sozinhas. Em PU não foram encontradas árvores.

Tabela 4. Características gerais dos diferentes tratamentos, realizados a partir dos dados de inventário florestal. Em que: TRA: Tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso.

	Área amostral (ha)	DAP médio (cm)	Ht médio (m)	Densidade (ind ha^{-1})	Área basal média ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	Riqueza de espécie	Biomassa (Mg ha^{-1})
TRA							
FES	0,187	13,01	7,93	785	22,56	96	58,66
RA	0,562	6,07	4,94	996	7,01	47	21,49
RAs	0,375	7,08	3,80	358	4,67	24	17,47
RP	0,562	7,05	3,26	8	0,11	3	0,08
PU	0,187	0	0	0	0	0	0

A riqueza de espécies nas áreas em restauração florestal está ligada principalmente às espécies utilizadas no plantio. Segundo Rodrigues et al. (2010), que encontraram em seu

monitoramento uma riqueza de 45 espécies, a baixa riqueza de alguns plantios pode estar relacionada à baixa disponibilidade de mudas nos viveiros, e a mortalidade nos primeiros anos de vida. A diferença entre os tratamentos RA e RAs provavelmente é decorrência do número de espécies utilizadas no momento do plantio, enquanto o baixo valor em RP ocorre porque a área ainda é dominada por gramíneas. Ressaltando ainda que as espécies que estão dominando as áreas, principalmente de RA, são as espécies de recobrimento. Trentin et al. (2018), comparando as mesmas metodologias de restauração florestal, encontraram valores similares de riqueza em seu estudo.

Analisando o incremento de biomassa das áreas verifica-se claramente as diferenças. FES possui a maior biomassa viva acima do solo das árvores, porém seu valor está abaixo da média encontrada por outros autores em áreas de Floresta Estacional Semidecidual (Ferez, et al. 2015, Melo e Durigan, 2006, Brites et al., 2006). Já D'Albertas et al. (2018), avaliando o estoque de carbono em fragmentos na Mata Atlântica encontraram valores médio semelhantes em seu estudo, inferindo que remanescentes degradados podem estocar menos biomassa viva. O fragmento remanescente estudado, apresenta grande quantidade de lianas invasoras, que podem estar influenciando a sucessão e o desenvolvimento da área (Viani, et al., 2015).

Com o teor do estoque de carbono de 45,3% encontrado nas espécies cubadas da área e os dados de biomassa cálculo da estocagem de carbono na biomassa viva acima do solo das árvores, revelou uma diferença significativa entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$) (Figura 11). Podemos observar que FES é diferente e superior aos demais tratamentos (26,7 Mg C ha⁻¹) já a comparação entre as metodologias de restauração revela que o estoque em RA o estoque de carbono é 9,73 Mg C ha⁻¹, e em RAs é 7,29 Mg C ha⁻¹, diferente de RP que é quase zero e em PU o estoque é nulo, pois não tem registro de árvores nas parcelas.

Figura 11. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da biomassa viva acima do solo em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

A comparação da biomassa e do estoque de carbono com outros trabalhos deve ser cautelosa, pois as diferentes equações de estimativa dos valores podem variar entre os mesmos dados, subestimando ou superestimando os resultados (Vieira et al., 2008). Em seu estudo Ditt et al. (2010), comparando diferentes equações alométricas para a mesma área, encontraram diferenças de até 2,5 vezes nos valores. Assim, como neste trabalho foram utilizados modelos ajustados para a própria área de estudo, as comparações se restringem a poucos trabalhos. Como o estoque de carbono tem alta relação com acúmulo de biomassa, as diferenças nos valores encontrados estão diretamente relacionadas às metodologias utilizadas na implantação, ao manejo e ao monitoramento realizado nas áreas, assim os valores de estoque encontrados no estudo de Amaral (2017), Ferez et al. (2015), e Melo e Durigan (2006) são semelhantes. Quanto aos valores médios encontrados, as áreas em restauração florestal pela metodologia de restauração ativa com 5 anos de idade se mostram eficazes em sua função ecossistêmica de sequestro de carbono, apesar dos valores serem inferiores aos do fragmento nativo remanescente.

3.3.2.2. Biomassa viva acima do solo não arbórea

O teor de carbono encontrado nas amostras coletadas nesse estrato foi de 41,7%, e a partir da estimativa de biomassa, foram gerados os valores de estocagem de carbono. Podemos observar que não houve diferença significativa entre os diferentes tratamentos quanto à estocagem de carbono pela biomassa viva acima do solo (BVAS) não arbórea total (Figura 12).

Estratificando os valores totais entre as diferentes formas de vida, podemos observar a diferença entre os tratamentos. Os tratamentos PU e RP possuem maior quantidade de ervas e gramíneas do que os demais tratamentos. Segundo Pedreira & Primavesi (2008) essas espécies também são importantes na contribuição da redução das emissões dos gases do efeito estufa. Porém a conversão de florestas em pastagens, segundo os mesmos autores não podem ser admitidas. Em comparação com outros estudos, Tiepolo et al. (2002) quantificaram um teor de carbono médio entre 0,7 a 3,5 Mg C ha⁻¹ em pastagens no Paraná, valor similar a deste trabalho. As áreas de RP também são dominadas pelo arbusto *Baccharis microdonta*, popularmente conhecido como alecrim de vassoura, que auxilia com que o valor do estrato herbáceo para este tratamento seja superior aos demais, e compete com as gramíneas invasoras na área.

Figura 12. Estoque de carbono médio da biomassa viva acima do solo (BVAS) não arbórea em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Nas áreas de RAs, observamos uma grande quantidade do arbusto *Baccharis microdonta*, espécie que existia na área antes da implantação das metodologias de restauração. Em RA e RAs o estoque de carbono por gramíneas e ervas é menor, já que as espécies arbóreas implantadas na área possuem um dossel denso, que impede a entrada de luz e dificultam seu estabelecimento, além de que em RA foi utilizado adubação verde para controle biológico das mesmas. Ferez et al. (2015), encontraram valores similares ao deste trabalho, comparando diferentes manejos para plantios de restauração florestal com 6 anos de idade, cujo estoque médio de carbono para o manejo usual de manejo foi de $1,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

3.3.2.3. Serapilheira

Podemos observar que houve diferença significativa de biomassa e estoque de carbono entre os tratamentos avaliados (Figura 13). O teor de carbono encontrado nas amostras de serapilheira foi de 33,7%, este valor é muito abaixo do indicado por van Wesemael (1993), que diz em que o teor de carbono na serapilheira é de 50% do peso da biomassa seca. A biomassa contida em FES foi em média de $31,21 \text{ Mg ha}^{-1}$, e o teor de carbono foi em média de $12,08 \text{ Mg C ha}^{-1}$, valores superiores à de outros trabalhos. Viera et al. (2010), estudando o mesmo tipo florestal, encontrou valores inferiores de biomassa de serapilheira depositada sobre o solo ($19,93 \text{ Mg ha}^{-1}$). Já Machado et al. (2008), estudando uma floresta secundária, encontrou o valor de $10,17 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Em RP e PU, como a biomassa arbórea é baixa ou nula, o acúmulo de serapilheira dessas áreas é oriundo apenas de gramíneas, e relativamente equivalente a quantidade de biomassa viva. Em RP o valor de biomassa foi de $18,06 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto em PU foi de $8,73 \text{ Mg ha}^{-1}$. Essa diferença é observada pois PU é um pasto manejado com presença de gados, já RP é uma área abandonada em que apenas houve o isolamento dos fatores de degradação. A decomposição dessa biomassa é muito importante para reciclagem de nutrientes e melhoria dos solos dessas áreas que normalmente não são manejados adequadamente (Boddey et al., 2002). Trabalhos que avaliaram a produção de serapilheira de gramíneas em pastos (Rezende et al., 1999), encontraram valores médios de 15 Mg ha^{-1} em pastagens na Mata Atlântica.

Figura 13. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da serapilheira em Mg C ha^{-1} entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Observamos que não houve diferença significativa entre RA e RAs na estocagem de carbono pela serapilheira. Villa et al. (2016), comparando o estoque de serapilheira entre diferentes espaçamentos de plantio de restauração com 2 anos de idade, relataram que não houve diferença entre os espaçamentos, sendo o aporte médio de $6,22 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor inferior aos deste trabalho. Azevedo et al. (2018), avaliando o estoque de áreas em restauração florestal com diferentes idades, encontraram valores inferiores de aporte e Machado et al. (2008), para área de plantio encontrou valores de $8,98 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Assim as diferenças nos estoques de serapilheira nos tratamentos é resultado de diversos fatores influentes principalmente na decomposição, como a presença ou não de espécies arbóreas, o manejo adotado nas áreas, tanto de plantio quanto reciclagem dos pastos, além do o ritmo de crescimento das plantas, que são influenciados pela densidade e riqueza de espécies (Machado et al., 2008), a deciduidade (Vogt et al., 1968), a idade (Carpanezzi, 1997), os diversos fatores ambientais como precipitação, temperatura, luminosidade e estações do ano. Além disso, segundo Martins & Rodrigues (1999), o aporte de serapilheira pode depender do grau de perturbação da área. Porém é um compartimento significativo no que tange ao estoque de carbono.

3.3.2.4. Madeira morta (MM)

De acordo com as metodologias utilizadas podemos observar nas figuras 14 e 15, que houve diferença significativa entre FES e os outros tratamentos.

O estoque médio de carbono em madeira morta (MM) em pé em FES foi de 1,57 Mg ha⁻¹ enquanto dos outros tratamentos foi próximo de zero, pois em RA foram encontradas 3 árvores mortas em pé nas parcelas, e em RAs apenas 1. Esses valores eram esperados já que as áreas estão em processo inicial de restauração florestal. Já no fragmento foram encontradas 200 árvores por hectare, ou seja, as árvores em FES morrem e continuam em pé, diferente do que costuma acontecer em áreas que possuem distúrbios climáticos de chuva e vento (Guzmán, 2014). O estoque médio de carbono em MM caída, que compreende os galhos mortos no solo, foi de 2,35 Mg ha⁻¹ em FES, 0,21 Mg ha⁻¹ em RAs e 0,13 Mg ha⁻¹ em RA, enquanto nos outros tratamentos (PU e RP), não foram encontradas.

Figura 14. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da MM em pé em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Figura 15. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da MM caída em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O estoque de carbono total em MM, considerando MM caída e em pé, foi de 3,88 Mg ha⁻¹ em FES, valor inferior ao encontrado por Guzmán (2014), em áreas de Floresta Ombrófila Densa na Mata Atlântica, e por Fonseca et al. (2011), em florestas secundárias da Costa Rica. Porém superior ao encontrado por Luccas (2011) em Ombrófilas densas. Segundo Palace et al. (2012), a variação entre os estoques de MM nas florestas tropicais é grande, e florestas perturbadas apresentam os valores mais elevados de MM.

A MM, é um compartimento das florestas de ciclo lento que representa um dos principais estoques de carbono, e conforme ocorre sua decomposição parte desse elemento retorna para a atmosfera, ou fica armazenado como matéria orgânica solos (Trumbore, 1996). O estoque desse estrato nas florestas tropicais é importante no ciclo do carbono global (Araujo et al., 2011), pois representa mais que o total emitido por atividades antrópicas mundiais em um ano (Lé Quéré et al., 2009).

3.3.2.5. Raízes

A estimativa da biomassa das raízes grossas, teve relação com a biomassa arborea encontra nas parcelas, seguindo o modelo alométrico desenvolvido por Cairns et al. (1997). Observou-se diferença significativa entre os tratamentos (Figura 16), sendo a estimativa do

estoque de carbono em FES de $11,02 \text{ Mg C ha}^{-1}$ diferente dos outros tratamentos. O valor encontrado nesse fragmento tem estocagem de carbono inferior ao encontrado por Ferez et al. (2015), em sua floresta em estágio maduro de sucessão.

O teor de carbono utilizado para estimativa da raiz grossa, foi o mesmo encontrado para a parte arbórea de 43,5%. Os valores médios dos estoques de carbono em RA ($3,76 \text{ Mg C ha}^{-1}$) são diferentes dos de RP ($2,71 \text{ Mg C ha}^{-1}$), porém os valores de RAs são similares aos encontrados por Ferez et al. (2015), em sua área de manejo usual para restauração florestal com 6 anos de idade ($1,7 \pm 0,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Porém como para biomassa viva acima do solo, as comparações entre essas estimativas são críticas por não usarem as mesmas equações.

Figura 16. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da raiz grossa em Mg C ha^{-1} entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de floresta Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O teor de carbono médio encontrado nas amostras de raiz fina foi de 32,2%. Avaliando os estoques de carbono total na raiz fina (Figura 17), temos que em RA a estocagem média de $1,01 \text{ Mg C ha}^{-1}$ e em RAs com $0,80 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Já entre os tratamentos (PU, FES, RP) a estocagem foi similar e maior, $4,32$, $3,03$ e $2,88 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente. Podemos observar que além de FES, os tratamentos que apresentaram o maior aporte de raízes finas foram PU e RP, essas áreas possuem grande quantidade de gramíneas invasoras ou plantadas. As gramíneas são espécie que normalmente apresenta alta produção de raízes, indicando que essas são importantes para conservação e aumento de matéria orgânica no solo (Cunha et al., 2010).

Figura 17. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) da raiz fina em Mg C ha^{-1} entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Observando os valores por profundidade (Figura 17), a maior parte do carbono estocado, cerca de 58%, foi estocado na primeira camada (0–10 cm). Mesmo fato foi observado por Silva (2015), em seu estudo utilizando a mesma metodologia de coleta. Entretanto o valor para a Floresta Estacional Semidecidual deste trabalho foi menor do que o encontrado para Floresta Ombrófila Densa Atlântica, podendo relacionar aos fatores de clima, como temperatura e umidade. Segundo Sayer et al. (2006), essa maior eficiência das camadas superficiais está relacionada aos nutrientes da serapilheira, ou ao fato de ter maior quantidade de gramíneas na área (Cunha et al., 2010).

3.3.2.6. Carbono no solo

O estoque de carbono médio entre 0-20 cm de profundidade para todos os tratamentos esta apresentado na Figura 19. A maior estocagem foi em FES, com um valor médio de $85,61 \text{ Mg C ha}^{-1}$, seguido por PU com $75,95 \text{ Mg C ha}^{-1}$, depois as metodologias de restauração ativa com $57,08 \text{ Mg C ha}^{-1}$, assistida com $55,61 \text{ Mg C ha}^{-1}$ e passiva com $59,33 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Houve diferença significativa entre os tratamentos, sendo a maior estocagem em FES, seguida por PU, e não foi observada diferença entre as metodologias de restauração florestal até o momento. Interações entre fatores geoquímicos e climáticos influenciam a estoquem de carbono no solo (Doetterl et al., 2015). A média da densidade do solo entre os

tratamentos foi estatisticamente diferente (Figura 18), e indica que as áreas de pasto e os tratamentos de restauração são mais compactados. Os valores são similares aos encontrados por Salemi et al. (2013), com média do fragmento nativo entre $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ e para o pasto em $1,40 \text{ g cm}^{-3}$.

Figura 18. Densidade do solo (médio $\pm$ erro padrão) em g cm^{-3} entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Figura 19. Estoque de carbono (médio $\pm$ erro padrão) no solo em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

O alto valor encontrado no tratamento PU pode ter relação com o fato de que as gramíneas mantem uma cobertura continua de vegetação, com ciclagem de nutrientes e baixa temperatura do solo (Brown e Lugo, 1990), aliados a pastagens bem manejadas, sem revolvimento do solo e queimadas (Segnini et al., 2005), que adicionam maiores quantidade de matéria orgânica ao solo. Szakács et al. (2011), obteve em seu estudo uma estocagem entre 32 até 54,4 Mg C ha⁻¹ até 50cm de profundidade, e Assad et al. (2013) que analisou mais de 100 solos de pastagem em diferentes biomas do Brasil, encontrou variações entre 20 a 100 Mg C ha⁻¹.

Guo e Gifford (2002), descreveram que há sempre um decréscimo no estoque de carbono no solo na conversão de pastagens para reflorestamentos, de floresta nativa para plantios florestais, ou ainda de pastagem ou florestas nativas para cultivos agrícolas, que podem ser explicados pelo preparo do solo na implantação dos novos usos, resultando em alta decomposição de matéria orgânica e perda de carbono. Mesma característica observada por Stefano e Jacobson (2017), em um estudo de conversões de diversos usos para sistemas agroflorestais.

Analisando os estoques entre as profundidades (Figura 20), podemos observar que para todos os tratamentos, a camada superficial de 0-10 cm foi a mais eficiente na estocagem

de carbono. Premrov et al. (2017), constatarem em seu trabalho que existe um decréscimo na média estocada de carbono ao longo do perfil do solo.

Figura 20. Estoque de carbono médio no solo em Mg C ha^{-1} entre os tratamentos nas diferentes profundidades do solo (0-20 cm FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa pelo teste Tukey $p < 0,05$.

As metodologias de restauração florestal possuem as menores taxas de estoque de carbono no solo, entre os tratamentos, e são similares, considerando o estoque médio até 20 cm de profundidade. Com esses resultados podemos considerar que com 5 anos de idade, os manejos utilizados nos tratamentos RA e RAs ainda não estocaram carbono ao solo, a fim de aumentar esse valor, e ambos estão similares ao RP, área em que não houve manejo. Assim, evidencia o que foi apresentado por Smith (2004) que em monitoramentos de restauração jovens não é necessário monitorar o estoque nesse compartimento, já que é um processo lentamente variável no tempo, e altamente variável no espaço. Cunningham et al. (2015), avaliaram a estocagem de carbono entre reflorestamentos com idade entre 5 e 45 anos encontraram que o aumento na matéria orgânica no solo levou décadas para ocorrer, e pode ser observado após 45 anos de implantação.

Porém a partir da análise isotópica foi possível avaliar os efeitos da mudança no uso do solo, na estocagem de carbono no solo. Assim analisando a média de $\delta^{13}\text{C}$ no solo encontrada entre os diferentes tratamentos (Figura 21), podemos observar que FES obteve valor inferior que nos demais tratamentos, isso é uma indicação que o carbono predominante nessa área seguiu a via fotossintética de plantas C_3 , já para os demais tratamentos, a

predominância de carbono foi a partir da via fotossintética de plantas C_4 (Martinelli et al., 1996). Porém, entre os tratamentos RA e RAs existe uma presença significativa de carbono originado de plantas C_3 , isso pode ser observado pela média de RAs ser -19‰ e RA ser -17‰, valores menores que a média para $\delta^{13}C$ de plantas C_4 que é -12‰ (Smith & Epstein, 1971). Logo, podemos dizer que as espécies arbóreas que existiam em RAs anteriormente, e as que foram implantadas nos projetos de restauração, tanto em RAs quanto em RA estão adicionando carbono, principalmente nas camadas superficiais. Porém a presença de gramíneas na área é responsável pelo maior estoque.

Figura 21. Média do $\delta^{13}C$ do solo entre os tratamentos nas diferentes profundidades do solo (0-20 cm). FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa (teste Tukey $p < 0,05$).

Figura 22. Média percentual de carbono C3 e C4 no solo para cada um dos tratamentos entre 0-20cm de profundidade. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso. Letras diferentes entre as áreas de estudo indicam diferença significativa (teste Tukey $p < 0,05$).

A figura 22 ilustra a quantidade de carbono proveniente de planta C₃ e C₄ para os diferentes ecossistemas, evidenciando as indicações anteriores, podemos observar que em FES a média de carbono C₃ estocado foi de 92%, já em RAs metade da estocagem atual é de plantas C₃, em RA esse número é inferior, pois a área foi dominada por gramíneas por muitos anos, e em RP e PU aproximadamente 80% do estoque é de plantas C₄. Assim sendo interessante notar que a composição vegetal reflete a composição isotópica das áreas (Martinelli et al., 2009), e que as árvores implantadas nas áreas em restauração florestal estejam adicionando carbono ao solo, com 5 anos de idade. Ou seja, por mais que na estocagem média de carbono total não exista diferença entre os tratamentos, há uma diferença no tipo de planta que está realizando essa função ecossistêmica, revelando assim a necessidade de se considerar esse compartimento nos monitoramentos de restauração florestal.

3.3.3. Estocagem de carbono total

A estocagem total de carbono entre todos os compartimentos, para todos os tratamentos está representada na Figura 23. Podemos observar a grande importância do compartimento solo, na eficiência de realizar essa função ecossistêmica. Porém todos os

compartimentos existentes, em proporção com sua biomassa, estão estocando carbono da atmosfera e consequentemente mitigando as mudanças climáticas. Após o solo, a biomassa viva é a segundo compartimento que mais estoca carbono, porém mesmo a biomassa morta, principalmente a serapilheira, foi o compartimento que esteve presente em todas as áreas. Evidenciando assim a importância de todos os compartimentos nas estimativas de estoque de carbono pelas diferentes áreas. Porém não existe na literatura trabalhos que levam em consideração todos esses compartimentos, ficando a realização do maior número de comparações apenas entre os compartimentos, e não sobre o valor total.

Figura 23. Estoque de carbono nos diferentes compartimentos em Mg C ha⁻¹ entre os diferentes tratamentos. FES: Fragmento nativo remanescente de florestal Estacional Semidecidual; RA: Restauração Ativa; RAs: Restauração Assistida; RP: Restauração Passiva; PU: Pasto limpo em uso; BVAS: Biomassa viva acima do solo.

Entre os tratamentos, podemos observar uma diferença na estocagem de carbono total, porém como citado anteriormente, o estoque de carbono no solo foi um grande influenciador, e principalmente em PU, em que levando em consideração apenas sua biomassa viva possuiria a menor estocagem, porém no compartimento solo possui a maior estocagem. Entre os tratamentos de restauração florestal, RA foi o mais eficiente, como já citado anteriormente, principalmente pelo manejo de plantio total escalonado de mudas adotado na área e uso de adubação verde, que melhorou seu desempenho, realizou um melhor controle de gramíneas invasoras, influenciando positivamente no desenvolvimento das espécies de diversidade implantadas na área 1,5 anos depois. A área de RAs possui menor

manejo que RA, e é caracterizada por já possuir indivíduos arbóreos na área anteriormente a restauração, porém está com níveis de estocagem um pouco inferior, fato que pode ser relacionado ao acúmulo de herbáceas e arbustos invasores na área ainda ser grande.

Já RP, possui uma estocagem similar, porém maior que RAs, entretanto a área é totalmente invadida por gramíneas, e arbustos, com a presença muito rara de indivíduos arbóreos, o que dificulta a instalação da regeneração natural. Nessa área o processo de restauração florestal será mais lento, sem a intervenção humana. Porém quanto a estocagem de carbono atual, a área está sendo eficiente, mas avaliando atributos principalmente de diversidade, proteção do solo e água, ainda existe fatores degradantes, como as gramíneas invasoras dominando a área. O fragmento remanescente da área está cumprindo sua função de estocagem, porém poderia apresentar valores superiores quando comparado com outras áreas de floresta estacional Semidecidual. Provavelmente este valor inferior está relacionado a presença de lianas na área, associado ao elevado valor de indivíduos mortos, baixo número de regenerantes e clareiras.

Comparando os valores encontrados no trabalho de Ferez et al. (2015), que avaliou o manejo de implantação em áreas de restauração florestal, porém não em todos os compartimentos avaliados nesse trabalho, podemos observar que as proporções em termos percentuais de ambos no estoque de carbono foram semelhantes, em relação ao manejo da área. Sendo o estoque de carbono no solo o mais eficiente, seguido pela biomassa viva, e pela morta, já entre os tratamentos quanto maior o manejo, maior o acúmulo de carbono na biomassa lenhosa arbórea e menor na herbácea.

Entre os tratamentos avaliados, a estocagem de carbono no pasto foi elevada, resultado que chama atenção, porém florestas sequestram mais carbono do que pastagens ou culturas agrícolas, principalmente pelo maior acúmulo de biomassa e ciclos de vida mais longos (Prigetzer & Euskirchen, 2004). Assim áreas em restauração florestal possuem maior potencial de estoque de carbono, além de realizar outras funções necessárias para os ecossistemas, como conservação de biodiversidade e água (Brancalion et al., 2015). Sendo indicado projeto de restauração florestal de ecossistemas terrestre, e principalmente os florestais para mitigação das mudanças climáticas.

3.4. CONCLUSÃO

As restaurações estudadas estão em processo de consolidação e estão desempenhando funções ecossistêmicas de mitigação do efeito estufa. Os valores encontrados para o estoque de carbono são indicadores proporcionais à idade dos mesmos, e todos os

compartimentos existentes no ecossistema são importantes na quantificação da estocagem de carbono.

Assim retornando as hipóteses testadas, temos que:

- (i) O estoque de carbono irá seguir a seguinte ordem em termos de quantidade: fragmento nativo > restauração ativa > restauração assistida > restauração passiva > pasto limpo em uso.

Diferentemente do que esperávamos, o estoque de carbono total seguiu a ordem: fragmento nativo > pasto limpo em uso > restauração ativa > restauração passiva $\geq$ restauração assistida.

- (ii) Os modelos de restauração florestal com 5 anos de idade, contém aproximadamente 20% da biomassa acumulada do fragmento florestal nativo.

Aceita.

- (iii) A estocagem de carbono entre os compartimentos de todos os tratamentos seguirá a ordem: solo > biomassa viva > biomassa morta.

Aceita.

REFERÊNCIAS

- Amaral, L.G.C. 2017. **Incremento de carbono estocado na parte aérea de plantios de restauração em corredores integrando unidades de conservação e fragmentos ripários.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba.
- Araujo-Marakami, A.; Parada, A.G.; Terán, J.J.; Baker, T.R.; Feldpausch, T.R.; Phillips, O.L.; Brien, J.W. 2011. **Necromass in forests of Madre de Dios, Peru: a comparison between “terra firme” and lowland forest.** Revista Peruana de Biología, 18(1), p. 113-118.
- Assad, E.D.; Pinto, H.S.; Martins, S.C.; Groppo, J.D.; Salgado, P.R.; Evangelista, B.; Vasconcellos, E.; Sano, E.E.; Pavão, E.; Luna, R.; Camargo, P.B.; Martinelli, L.A. 2013. **Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: Paired site comparisons and a regional pasture soil survey.** Biogeosciences, v. 10, p. 6141–6160.

- Azevedo, A.D.; Francelino, M.R.; Camara, R.; Pereira, M.G.; Leles, P.S.S.; 2018. **Estoque de Carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica**. Floresta, Curitiba/PR. v.48, n.2, p. 183-194.
- Baccarin, F.J.B.; Venturoli, F.; Oliveira, F.D.; Sanquetta, C.R.; Freitas, J.V. 2016. **Estimativa da biomassa da regeneração natural de uma floresta estacional semidecídua aluvial**. Rev. TREE DIMENSIONAL, ProFloresta - Goiânia, v.1 n.2; p. 39.
- Bernoux, M.; Arrouays, D.; Cerri, C.; Volkoff, B.; Jolivet, C. 1998. **Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties**. Soil Science Society of America Journal, v. 62, p.743–749.
- Bioflora. 2015. **Manual da restauração ecológica: técnicos e produtores rurais do extremo Sul da Bahia**.
- Bioflora. 2012. **Programa de adequação ambiental e restauração ecológica das Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho – Itu-São Paulo**.
- Birdsey, R.; Cannell, M.; Galinski, W.; Gintings, A.; Hamburgs, S.; Jallow, B.; Kirschbaum, M.; Krug, T.; Kurz, W.; Prisley, S.; Schulze, D.; Singh, K.D.; Singh, T.P.; Solomon, A.M.; Villers, L.; Yamagata, Y. 2000. **Afforestation, reforestation, and deforestation (ARD) Activities**. In: Watson, R.; Noble, I.; Verdado, D. (Ed). Land use, land-use change, and forestry: special report the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. chap. 3 p. 283-338.
- Boddey, R.M. 2002. **The effect of grazing intensity and the presence of a forage legume on nitrogen dynamics in *Brachiaria* pastures in the Atlantic Forest region of the south of Bahia, Brazil**. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v.64, p.257-271.
- Brancalion, P.H.S.; Rodrigues, R.R.; Gandolfi, S. 2015. **Restauração florestal**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 432 p.
- Brancalion, P.H.S.; Viani, R.A.G.; Rodrigues, R.R.; Gandolfi, S. 2012. **Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração**. In: Martins, S.V. (Org.). Restauração ecológica de ecossistemas degradados. 1ed. Viçosa: UFV, p. 262 – 293.
- Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I.; Gandolfi, S.; Rodrigues, R.R. 2009. **Plantio de árvores nativas brasileiras fundamentada na sucessão florestal**. In: Rodrigues, R.R.; Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I. (Ed.). Pacto pela restauração da Mata Atlântica: Referencial dos conceitos e ações de restauração florestal. São Paulo, Instituto de BioAtlântica, 255 p.

- Britez, R.M. de; Borgo, M.; Tiepolo, G.; Ferretti, A.; Calmon, M.; Higa, R. 2006. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas; Curitiba: Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem e Educação Ambiental, 165p.
- Brown, S. 1997. **Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: aPrimer**. Rome: FAO, United Nations, (Forestry Paper-134).
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1990. **Tropical Secondary Forest**. Journal of Tropical Ecology, Cambridge, v. 6, p. 1-32.
- Cairns, M.A., Brown, S., Helmer, E.H., Baumgardner, G.A., 1997. **Root biomass allocation in the world's upland forests**. Oecologia 111, 1–11.
- Carpanezzi, A.A. 1997. **Banco de sementes e deposição de folheto e seus nutrientes em povoamentos de Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth) na região metropolitana de Curitiba-PR**. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Chambers, J.Q.; Higuchi, N.; Schimel, J.; Ferreira, L.V.; Melack, J.M. 2000. **Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of central Amazon**. Oecologia 122:380–388
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown S.; Cairns M.; Chambers J.C.; Eamus D.; Folster H.; Fromard F.; Higuchi N.; Kira T.; Lescure J.; Nelso B.W.; Ogawa H.; Puig H.; Riéra B.; Yamakura T. 2005. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. Oecologia, v. 145, p. 87–99
- Chave, J.; Andalo, C.; Brown S.; Cairns M.; Chambers J.C.; Eamus D.; Folster H.; Fromard F.; Higuchi N.; Kira T.; Lescure J.; Nelso B.W.; Ogawa H.; Puig H.; Riéra B.; Yamakura T. 2005. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests**. Oecologia, v. 145, p. 87–99.

- Chazdon, R.L.; Broadbent, E.N.; Rozendaal, D.M.A.; Bongers, F.; Zambrano, A.M.A.; Aide, T.M.; Balvanera, P.; Becknell, J.M.; Boukili, V.; Brancalion, P.H.S.; Craven, D.; Almeida-Cortez, J.S.; Cabral, J.A.L.; de Jong, B.; Denslow, J.S.; Dent, D.H.; DeWalt, S.J.; Dupuy, J.M.; Durán, S.M.; Espírito-Santo, M.M.; Fandino, M.C.; César, R.G.; Hall, J.S.; Hernández-Stefanoni, J.S.; Jakovac, C.C.; Junqueira, A.B.; Kennard, D.; Letcher, S.G.; Lohbeck, M.; Martínez-Ramos, M.; Massoca, P.; Meave, J.A.; Mesquita, R.; Mora, F.; Muñoz, R.; Muscarella, R.; Nunes, Y.R.F.; Ochoa-Gaona, S.; Orihuela-Belmonte, E.; Peña-Claros, M.; Pérez-García, E.A.; Piotta, D.; Powers, J.S.; Rodríguez-Velazquez, J.; Romero-Pérez, I.E.; Ruíz, J.; Saldarriaga, J.G.; Sanchez-Azofeifa, A.; Schwartz, N.B.; Steininger, M.K.; Swenson, N.G.; Uriarte, M.; van Breuge, M.; van der Wal, H.; Veloso, M.D.M.; Vester, H.; Vieira, I.C.G.; Bentos, T.V.; Williamson, C.B.; Poorter, L. 2016. **Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics.** *Science Advances*, v.2, n.5.
- Cunha, F.F.; Ramos, M.M.; Alencar, C.A.B.; Martins, C.E.; Cóser, A.C.; Oliveira, R.A. 2010. **Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos.** *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v.32, p. 351-357.
- Cunningham, S. C.; Cavagnaro, T. R.; Mac Nally, R.; Nally, R.M.; Paul, K.I.; Baker, P.J.; Beringer, J.; Thomson, J.R.; Thompson, R.M. 2015. **Reforestation with native mixed-species plantings in a temperate continental climate effectively sequesters and stabilizes carbon within decades.** *Global Change Biology*, v. 21, p. 1552–1566.
- D'Albertas, F.; Costa, K.; Romitelli, I.; Barbosa, J.M.; Vieira, S.A.; Metzger, J.P. 2018. **Lack of evidence of edge age and additive edge effects on carbon stocks in a tropical forest.** *Forest Ecology and Management*, v. 407, p. 57-65, 2018.
- Ditt, E.H.; Mourato, S.; Ghazoul, J.; Knight, J. 2010. **Forest Conversion and Provision of Ecosystem Services in Brazilian Atlantic Forest.** *Land Degradation & Development*, v. 21, n. 6, p. 591-603.
- Dixon, R.K.; Brown, S.; Houghton, R.A.; Solomon, A.M.; Trexler, M.C.; Wisniewski, J. 1994. **Carbon pools and flux of global forest ecosystem.** *Science*, v.263, n. 5144, p. 185-189.
- Doetterl, S.; Stevens, A.; Six, J.; Merckx, R.; Oost, K.V.; Pinto, M.C.; Casanova-Katn, A.; Munoz, C.; Boudin, M.; Venegas, E.Z.; Boeckx, P. 2015. **Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate.** *Nature Geoscience*, v. 8, p. 780-783, 2015.

- Don, A.; Schumacher, J.; Freibauer, A. 2011. **Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis.** *Global Change Biology*, v. 17, p. 1658–1670, 2011.
- Durigan, G.; Melo, A.C.G. 2006. **Fixação de carbono em reflorestamentos de mata ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil.** *Scientia Forestalis*, Piracicaba, c. 17, p. 149-154.
- Engel, V.L.; Parrota, J.A. 2008. **Definindo a restauração ecológica: tendências e perspectivas mundiais.** In: Kageyama, P.Y.; Oliveira, R.E.; Moraes, L.F.D.; Engel, V.L.; Gandara, F.B. (orgs.) *Restauração ecológica de ecossistemas naturais*. FEPAF. Botucatu, SP, p. 01-26.
- FAO, 2012. **State of the World's Forests.** Rome, Italy.
- Ferez, A.P.C.; Campoe, O.C.; Mendes, J.C.; Stape, J.L. 2015. **Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic Forests in Brazil.** *Forest Ecology and Management*. v.350, p. 40-45.
- Fonseca, W.; Benayas, J.M.R.; Federico, E.A. 2011. **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, p. 1400-1408.
- Guo, L.B.; Gifford, R.M. 2002. **Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis.** *Glob Change Biol*, v. 8, p. 345–360.
- Guzman, L.C.Q. 2014 **Produção e estoque de madeira morta de uma floresta ombrófila densa de Mata Atlântica ao longo de um gradiente altitudinal.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Campinas, SP.
- Harmon, M. E.; Sexton, J. 1996. **Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems.** University of Washington, College of Forest Resources, Seattle.
- Intergovernmental panel on climate change (IPCC), 2007. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry, M.L.; Canziani, O.F.; Palutikof, J.P.; Van der Linden, P.J.; Hanson, C.E. Cambridge, 73p.
- Kageyama, P.Y.; Gandara, F.B. 2004. **Recuperação de áreas ciliares.** In: Rodrigues, R.R.; Leitão-Filho, H. *Mata Ciliares: Conservação e Recuperação*. São Paulo. Edusp, cap. 15.2, p. 249-269.
- Keller, M.; Palace, M.; Asner, G.; Pereira, R.; Silva, J.N. 2004. **Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon.** *Global Change Biology*, v, 10, p. 784-795.

- Le Quéré, C.; Raupach, M.R.; Canadell, J.G.; Marland, G.; Bopp, L.; Ciais, P.; Conway, T.J.; Doney, S.C.; Feely, R. A.; Foster, P.; Friedlingstein, P.; Gurney, K.; Houghton, R.A.; House, J.I.; Huntingford, C.; Levy, P.E.; Lomas, M.R.; Majkut, J.; Metzl, N.; Ometto, J.P.; Peters, G.P.; Prentice, I.C.; Randerson, J.T. 2009. **Trends in the sources and sinks of carbon dioxide**. *Nature Geoscience*, v.2, p. 831-836.
- Luccas, F. 2011. **Estoques de necromassa em um cerrado sensu stricto e uma Floresta Ombrófila Densa Montana**. Dissertação de mestrado – Programa de pós graduação em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente, Instituto de Botânica da Secretário de Meio Ambiente. São Paulo, Brasil.
- Lugo, A.E.; Brown, S. 1992. **Tropical forests as sinks of atmospheric carbon**. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 54, p. 239-255.
- Machado, L.A.; Santos dos, M.T.N. 2003. **Estudo de impacto ambiental EIA/RIMA: loteamento fechado Parque Terras de Santa Cecília** v. 01, Município de Itu, SP.
- Machado, M.R.; Pinã-Rodrigues, F.C.M.; Pereira, M.G. 2008. **Produção de serapilheira como bioindicador de recuperação em plantio adensado de revegetação**. *Revista Árvore*, v. 32, p. 143-151.
- Marshall, P.L.; Davis, G.; LeMay, V.M. 2000. **Using line intersect sampling for coarse woody debris**. British Columbia Forest Service, Forest Research Technical Report, Canada.
- Martinelli, L.A.; Ometto, J.P.H.B.; Ferraz, E.S.; Victoria, R.L.; Camargo, P.B.; Moreira, M.Z. 2009. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo: Oficina de Textos.
- Martinelli, L.A.; Pessenda, L.C.R.; Espinoza, E.; Camargo, P.B.; Telles, F.C.; Cerri, C.C.; Victoria, R.L.; Aravena, R.; Richey, J.; Trumbore, S. 1996. **Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate change during the Quaternary**. *Oecologia*, v. 106, p. 376–381.
- Martins, S.V. 2004. **Determinação do potencial de sequestro de carbono na recuperação de mata ciliar na região de São Carlos – SP**. Tese de doutorado – Programa de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- Martins, S. V.; Rodrigues, R. R. 1999. **Produção de serrapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP**. *Revista Brasileira de Botânica*, v.22, n.3, p.405-412.

- Nave, A.G.; Rodrigues, R.R. 2007. **Combination of species into filling and diversity groups as forest restoration methodology.** In: Rodrigues, R.R.; Martins, S.V.; Gandolfi, S. (Ed.) High diversity forest restoration in degraded áreas: methods and projects in Brazil. Nova Science Publishers, p. 103-126.
- Palace, M.; Keller, M.; Frohling, S.; Hurtt, H. 2012. **A review of above ground necromass in tropical forest.** In: Sudarshana P, Nageswara-Rao M, Soneji JR, eds. Tropical forests. Rijeka: InTech Open. 215-252
- Palace, M. 2006. **Tropical forest structure: Ground measurements of coarse necromass and satellite observations of crown geometry.** (Tese de doutorado). Doutorado em Natural Resources and Earth System Sciences, University of Hampshire, Estados Unidos.
- Pedreira, M.S.; Primavesi, O. 2008. **Atuações zootécnicas para a adequação ambiental na bovinocultura.** In: Congresso Brasileiro de Zootecnia, João Pessoa, 2008, p. 1-14.
- Preiskorn, G.M. 2011. **Composição florística, estrutura e quantificação do estoque de carbono em florestas restauradas com idades diferentes.** Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, SP.
- Person, T.; Walker, S.; Brown, S. 2005. **Sourcebook for Land use, Land-use change and forestry projects.** Development, v. 21, n. 3, p. 64.
- Premrov, A.; Cummins, T.; Byrne, K. A. 2017. Assessing **fixed depth carbon stocks in soils with varying horizon depths and thicknesses, sampled by horizon.** Catena, v. 150, p. 291–301.
- Poorter, L.; Bongers, F.; Aide, T.M.; Almeyda Zambrano, A.M.; Balvanera, P.; Becknell, J.M.; Boukili, V.; Brancalion, P.H.S.; Broadbent, E.N.; Chazdon, R.L.; Craven, D.; de Almeida-Cortez, J.S.; Cabral, G.A.L.; de Jong, B.H.J.; Denslow, J.S.; Dent, D.H.; DeWalt, S.J.; Dupuy, J.M.; Durán, S.M.; Espírito-Santo, M.M.; Fandino, M.C.; César, R.G.; Hall, J.S. 2016. **Biomass resilience of Neotropical secondary forests.** Nature, v.530, p. 211-214.
- Post, W.M.; Amonette, J.E.; Birdsey, R.; Garten Jr., C.T.; Graham, R.L.; Izaurrealde, R.C.; Jardine, P.M.; Jastrow, J.; Lal, R.; Marland, G.; McCarl, B.A.; Thomson, A.M.; West, T.O.; Wullschlegel, S.D.; Metting, F.B. 2009. **Terrestrial carbono sequestration – Science for enhancement and implementation.** In: McPherson, B.J.; Sundquist, E.T.(Ed.) Carbon sequestration and its role in the global carbon cycle. AGU Monograph Series, n. 183, p. 73-88.

- Post, W.M.; Emanuel, W.R.; Zinke, P. J.; Stangenberger, A.G. 1982. **Soil carbon pools and world life zones**. *Nature*, v. 298, p. 156–159.
- Pregitzer, K.S.; Euskirchen, E.S. 2004. **Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age**. *Global Change Biology*, 10, 2052– 2077.
- 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/>.
- Rezende, C. P.; Cantarutti, R.B.; Braga, J.M.; Gomide, J.A.; Pereira, J.M.; Ferreira, E.; Tarre, R.M.; Macedo, R.; Alves, B.J.R.; Urquiaga, S.; Cadisch, G.; Giller, K.E.; Boddey, R.M.; 1999. **Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic Forest region of the south of Bahia, Brazil**. *Nutrient Cycling in*
- Richards, P. W. **The tropical rain forest: an ecological study**. 1996 Cambridge: University Press, 587p.
- Rodrigues, R.R.; Brancalion, P.H.S.; Isernhagen, I. 2009. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo, Instituto de BioAtlântica, 255 p.
- Rodrigues, R. R.; Lima, R.A.F.; Gandolfi, S.; Nave, A.G. 2009 **On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest**. *Biological Conservation*, Boston, v. 142, n. 6, p. 1242-1251.
- Rodrigues, E.R., Monteiro, R., Cullen, JR, L. 2010. **Dinâmica inicial da composição florística de uma área restaurada na região do Pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil**. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 853-861.
- Salemi, L.F.; Groppo, J.D.; Trevisan, R.; Moraes, J.M.; Ferraz, S.F.B.; Villani, J.P.; Duarte-Neto, P.J.; Martinelli, L.A. 2013. **Land-use change in the Atlantic rainforest region: Consequences for the hydrology of small catchments**. *Journal of Hydrology*. v. 499 p. 100–109
- Sayer, E.J.; Tanner, E.V.J.; Cheesman, W. 2006. **Increased Litterfall Changes Fine Root Distribution in a Moist Tropical Forest**. *Plant and Soil*, 281(1-2):5–13
- Segnini, A.; Milori, D.M.B.P.; Silva, W. T. L.; Primavese, O.; Martin Neto, L. 2005. **Avaliação da Estabilidade e Sequestro de Carbono em Área de Pastagem de *Brachiaria decumbens***. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, Recife.
- SER: Society for Ecological Restoration, Science & Policy Working Group, 2004.

- Silva, C. A.; **Estoque e produção de raiz fina ao longo de um gradiente altitudinal de floresta Atlântica na Serra do Mar, São Paulo, Brasil.** Dissertação apresentada ao Instituto de Biologia da Universidade Estadual de Campinas como requisito para obtenção do título de mestra em Biologia Vegetal. Campinas, 2015.
- Silveira, M.; Trumbore, S.E. 2008. **Estimation on biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest.** Biota Netropica. v. 8, n. 2, p. 21-29.
- Smith, P. 2004. **How long before a change in soil organic can be detect?** Global Change Biology, Oxford, v. 10, p. 1878-1883.
- Smith, B.N.; Epstein, S. 1971. **Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants.** Plant Physiology, v. 47, p. 380-384.
- Souza, F.M., Batista, J.L.F. 2011. **Restoration os seasonal semideciduous forests in Brazil: influence of age and restoration design on forest structure.** Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 191, n. 1-3, p. 185-200.
- Stefano, A.; Jacobson, M.G. 2017. **Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis.** Agroforest Syst, v. 92, p. 285-299.
- Szakács, G.G.J.; Cerri, C.C.; Herpin, U.; Bernoux, M. 2011. **Assessing soil carbon stocks under pastures through orbital remote sensing.** Scientia Agricola, v. 68, n. 5, Piracicaba.
- Tiepolo, G.; Calmon, M.; Feretti, A. R.. 2002. **Measuring and Monitoring Carbon stocks at the Guaraquecaba climate action project, Parana, Brazil.** In: Proceedings of the International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring. p. 11-15.
- Trentin, B.E.; Estevan, D.A.; Rossetto, E.F.S.; Gorenstein, M.R.G.; Brizola, G.P.; Bechera, F.C. 2018. **Restauração Florestal na Mata Atlântica: Passiva, Nucleação e Plantio de alta diversidade.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 160-174.
- Trumbore, S.E.; Chadwick, O.A.; Amundon, R. 1996. **Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change.** Science, v. 272, p. 393-396.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2011. **Kyoto Protocol.**
- Van Wagner, C. E. 1968. **The Line Intersect Method in Forest Fuel Sampling.** Forest Science, v. 14, n. 1, p. 20-26.
- van Wesemael, B. 1993. **Litter decomposition and nutrient distribution in humus profiles in some Mediterranean forests in southern Tuscany.** Forest Ecology and Management, v. 57, p. 99 - 114.

- Veloso, H. P.; Rangel Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A.; 1991. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. 123 p. IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro.
- Viani, R.A.G.; Mello, F.N.A.; Chi, I.E.; Brancalion, P.H.S. 2015. **A new focus for ecological restoration: management of degraded forest remnants in fragmented landscapes**. 5 p. Newsletter of the Global Land Project, no. 12.
- Vieira, S.A.; Alves, L.F.; Duarte-Neto, P.J.; Martins, S.C.; Veiga, L.G.; Scaranello, M.; Picollo, M.C.; Camargo, P.B.; do Carmo, J.B.; Neto, E.S.; Santos, F.A.M.; Joly, C.A. & Martinelli, L.A. 2011. **Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range**. Ecology and Evolution, 1, 421-434.
- Vieira, S.A.; Alves, L.F.; Aidar, M.; Araújo, L.S.; Bakes, T.; Batista, J.L.F.; Campos, M.C.; Camargo, P.B.; Chaves, J.; Delitti, W.B.C.; Honório, E.; Joly, C.A.; Keller, M.; Martinelli, L.A.; Mattos, E.A.; Metzker, T.; Phillips, O.; Santos, A.M.; Shimabukuro, M.T.; Silveira, M.; Trumbore, S.E. 2008. **Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest**. Biota Neotrop. 8, 21–29.
- Viera, M.; Schumacher, V. 2010. **Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L. e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade**. Revista Árvore, v. 35, p. 85-94.
- Villa, E.B.; Pereira, M.G.; Alonso, J.M.; Beutler, S.J.; Leles, P.S.S. 2016. **Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio**. Floresta e Ambiente, v. 23, p. 90-99.
- Veldkamp, E. 1994. **Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation**. Soil Science society of American Journal, Madison, v. 58, 175-180.
- Vogt, K.A.; Grier, C.; Vogt, D.J. 1986. **Production turnover, and nutrient dynamic above and below ground detritus of world forests**. Advances in Ecological Research, v.15, p. 303-377.
- Wadt, P.G.S. 2003 **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Embrapa Acre.
- Young, C. F. 2001. **Aspectos sociais e econômicos do desmatamento em áreas de Mata Atlântica**. In: Aliança para Preservação da Mata Atlântica. Projeto Hotspots.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O efeito estufa, e o consequente aquecimento global são fatores que preocupam toda população mundial. Estudos apontam que a temperatura média da Terra sofrerá um aumento entre 0,8 a 2,6°C até 2050. Como consequência, este fenômeno pode influenciar o meio ambiente, e até a economia. Ocorrendo mudanças no clima, com aumento de chuvas, derretimento das calotas polares, inundação das áreas costeiras, aumento do período de seca e diminuição da produção agrícola (IPCC, 2007). Com isso, cresce a necessidade de alternativas para mitigar a concentração de gases do efeito estufa, sendo as florestas restauradas potenciais sumidouros de carbono, e responsáveis por essa contribuição.

Nesse estudo foram avaliadas diferentes metodologias de implantação de restauração florestal com 5 anos de idade (i.g. restauração ativa, passiva e assistida), na estocagem de carbono entre os diferentes compartimentos (ig. Biomassa viva, morta e no solo). Verificou-se que as diversas metodologias de restauração florestal estocam carbono e contribuem à mitigação das mudanças climáticas. No entanto, entre as diferentes abordagens, a restauração ativa através do plantio total escalonado, foi o que apresentou os melhores resultados considerando áreas com 5 anos de idade: valores elevados de estoque de biomassa na parte aérea e baixo acúmulo de gramíneas. O principal fator associado a este resultado está no uso de adubo verde e espécies de recobrimento no momento do plantio, seguido do plantio de diversidade apenas 1,5 anos depois. Diminuindo a competição das espécies florestais com as gramíneas, melhorando seu desempenho e consequente estoque de carbono. As demais metodologias necessitam de maior número de intervenção, principalmente para controlar a mata competição que impede, por exemplo, e o estabelecimento da regeneração natural.

Outro fato observado foi que todos os compartimentos existentes nos ecossistemas são importantes na quantificação da estocagem de carbono, sendo fundamentais para expressar o real valor do serviço realizado pelas florestas. Mais especificamente, além da quantificação da biomassa viva acima do solo, é indispensável quantificar a biomassa morta e a biomassa viva abaixo do solo, pois estes compartimentos representam grande parte do estoque. O carbono no solo de áreas em restauração florestal ainda é uma questão a ser avaliada, pois monitoramentos de MDL não levam este estrato em consideração, e com nosso estudo foi possível avaliar que a estocagem total de carbono no solo entre as profundidades não variou entre os tratamentos de restauração, porém a análise isotópica apresentou dados relevantes de que a mudança no uso do solo influencia o estoque, e que as espécies arbóreas

C3, inseridas nas áreas em restauração florestal, há 5 anos, estão estocando carbono. Logo, recomenda-se analisar este fato em outras localidades.

Por fim, os modelos alométricos gerados neste trabalho, foram adequados para a geração das estimativas deste estudo, porém a estratificação de dados e aumento de amostras, pode servir para melhorar o modelo e ampliar a sua aplicação em outras áreas, e com outras idades. Ressaltamos ainda que o teor de carbono encontrado em todos os compartimentos foi abaixo do normalmente indicado por outros trabalhos, evidenciando a importância dessa quantificação nos estudos de carbono.

Assim concluímos que o trabalho foi de grande importância para as questões de estocagem de carbono em áreas de restauração florestal, evidenciando sua eficiência e apresentando também a relevância da quantificação em todos os estratos, não apenas o arbóreo. Recomendamos que para se obter melhores resultados quanto à quantificação da estocagem de carbono entre as metodologias de restauração florestal, trabalhos futuros, devem levar em consideração o fator tempo, uma vez que estocagem de carbono é um processo lento e seu monitoramento é imprescindível para dizer em quanto anos essas áreas em processo de restaurações estarão cumprindo papel semelhantemente aos remanescentes de florestas nativas.

ANEXOS

ANEXO A. Ilustração da restauração ativa com implantação do grupo de recobrimento e adubo verde. Fonte: Bioflora (2015)

ANEXO B. Ilustração da área entre 12 a 30 meses após o plantio com sombreamento entre 50 a 70% pelas espécies de recobrimento e a senescência do adubo verde. Bioflora (2015).

ANEXO C. Ilustração da restauração ativa entre 12 a 30 meses de idade, com o plantio das espécies de diversidade. Fonte: Bioflora (2015).

ANEXO D. Ilustração da restauração assistida. Bioflora (2015).