



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL E EXTENSÃO  
***CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PROJETOS SUSTENTÁVEIS,  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GESTÃO CORPORATIVA DE CARBONO***

**PECCA**

CLARISSA MARCOLINO SCIARRA

ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE ESTOQUE DE CARBONO EM  
MODELOS DE RESTAURAÇÃO NA FLORESTA ESTACIONAL

CURITIBA, 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL E EXTENSÃO  
***CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PROJETOS SUSTENTÁVEIS,  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E GESTÃO CORPORATIVA DE CARBONO***

**PECCA**

CLARISSA MARCOLINO SCIARRA

## ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE ESTOQUE DE CARBONO EM MODELOS DE RESTAURAÇÃO NA FLORESTA ESTACIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Paraná como parte dos requisitos para a obtenção do título de especialista em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono.

Orientadora: Prof. Dra. Fátima C. M. Piña-Rodrigues

CURITIBA, 2015

## RESUMO

Projetos de restauração devem ser mais apoiados e incentivados, uma vez que as florestas, além de fazerem parte de ciclos essenciais para o planeta, também promovem o resgate de CO<sub>2</sub> da atmosfera. O objetivo deste trabalho foi estimar o potencial de estoque de carbono fixado em dois modelos de restauração de áreas degradadas no bioma Mata Atlântica, com diferentes densidades de plantio, sendo um adensado (DDF) e outro de diversidade e preenchimento (D&P). Aos quatro anos, o estoque de carbono estimado foi 34,99 t.ha<sup>-1</sup> (DDF) e 48,11 t.ha<sup>-1</sup> (D&P). Os modelos diferiram entre si apenas no estoque por indivíduo (D&P= 0,0340 t.C/planta; DDF= 0,003 t.C/planta). Apesar da maior densidade de plantas do DDF, a dominância de não pioneiras pode ter contribuído para a similaridade no potencial de estoque de carbono com o D&P onde predominaram pioneiras. Devido às características do DDF, equações específicas devem ser desenvolvidas. Os modelos analisados têm potencial sumidouro e seria possível comercializar cerca de 128,41 tCO<sub>2-eq</sub>.ha<sup>-1</sup> (DDF) e de 176,6 tCO<sub>2-eq</sub>.ha<sup>-1</sup> (D&P) em créditos de carbono no mercado para cada tipo de plantio.

Palavras chaves: plantio adensado, biomassa florestal, Mata Atlântica.

## ABSTRACT

Restoration projects should be supported and encouraged, since the forests, as well as being part of essential cycles for the planet are also able to promote the atmosphere of CO<sub>2</sub> rescue. The objective of this study was to estimate the potential carbon stock at two restoration methods of degraded areas in the Atlantic Forest, with different planting densities, one with a high density (DDF) and other so called diversity and fill (D&P). At four years, the estimated carbon stock was 34.99 t ha<sup>-1</sup> (DDF) and 48.11 t ha<sup>-1</sup> (D&P). The models differ from each other only in stock per individual (DDF = 0,003 tC / plant; D & P = 0.0340 tC / plant). Despite the higher density of DDF, the dominance of non-pioneers may have contributed to the similarity in the carbon stock potential with D&P which one was dominated by pioneers. Due to the characteristics of DDF model, specific equations should be developed. The models analyzed have potential as carbon sink and it would be possible to establish approximately 128.41 tCO<sub>2</sub>-eq.ha<sup>-1</sup> (DDF) and 176.6 tCO<sub>2</sub>-eq.ha<sup>-1</sup> (D&P) in carbon credits in the market for each restoration model.

Keywords: dense plantation, biomass, Atlantic Forest

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>6</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>9</b>
2.1 Áreas de estudo.....	9
2.2 Coleta de dados.....	10
2.3 Seleção da equação alométrica .....	10
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>13</b>
3.1 Estatística descritiva.....	13
3.2 Estimativa de biomassa e carbono .....	13
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>18</b>
<b>5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>19</b>

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Equações alométricas ajustadas para o modelo denso-diverso-funcional (DDF), em plantio de restauração de áreas degradadas em Floresta Estacional Decidual, em Sorocaba, São Paulo, ano 2012. .... 11
- Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis independentes empregadas na equação alométrica para estimativa de biomassa e carbono em dois modelos de restauração no estado de São Paulo, aos quatro anos de idade. D&P= modelo diversidade e preenchimento; DDF= modelo denso-diverso-funcional. DAP= diâmetro a altura do peito; DAS= diâmetro à altura do solo. .... 13
- Tabela 3. Estimativa e desvio padrão de biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por indivíduo de todas as parcelas amostradas do plantio de restauração no modelo denso-diverso-funcional (DDF), em Sorocaba, São Paulo, aos quatro anos de idade. .... 14
- Tabela 4. Estimativa e desvio padrão de biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por indivíduo de todas as parcelas amostradas do plantio de restauração no modelo diversidade e preenchimento, em Iperó, São Paulo, aos quatro anos de idade. .... 14
- Tabela 5. Estimativas médias e desvios padrões da biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por hectare das parcelas amostradas nos plantios de restauração no modelo denso-diverso-funcional (DDF) e diversidade e preenchimento (D&P), em Sorocaba, São Paulo, aos quatro anos de idade..... 15

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico ao longo dos anos, sem a prática de manejo ambiental adequado, vem provocando modificações na paisagem e, mais recentemente, na atmosfera (PINHO, 2008; CARVALHO, 2010). Houve aumento significativo nas concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), vapor d'água (H<sub>2</sub>O), clorofluorcarbonos (CFC's) entre outros, conhecidos como gases de efeito estufa (GEEs) (SCARPINELLA, 2002; CENAMO, 2004). Considerando que o equilíbrio da temperatura do planeta é fundamental para a sobrevivência dos seres vivos, a concentração dos GEEs acima dos limites toleráveis, desencadeia severas mudanças climáticas, devido ao aumento do efeito estufa (PINHO, 2008). Segundo dados do IPCC (2007), a mudança no uso da terra só perde para o uso de combustíveis fósseis em relação às taxas de emissão mundial de GEEs. Já no Brasil, a grande maioria das emissões está relacionada com o uso do solo (CERRI et al., 2007).

O dióxido de carbono faz parte de processos físico-químicos importantes relacionados à fotossíntese, no qual esse gás é retirado da atmosfera e incorporado na biomassa florestal, liberando oxigênio ao final do processo (SCARPINELLA, 2002). A fixação do carbono durante o ciclo de vida dos vegetais varia de acordo com a espécie e a parte da planta, sua fase de desenvolvimento, suas características edafoclimáticas e seu estado nutricional (SOUZA & VIEIRA, 2011).

O reflorestamento vem sendo adotado como prática para diminuir as concentrações de dióxido de carbono da atmosfera (GARCIA et al., 2012). Esse mecanismo prevê benefícios para a sociedade, ecossistema e biodiversidade por meio da redução das emissões e do aumento dos estoques de carbono em ecossistemas florestais (GARCIA et al., 2012).

A Floresta Atlântica é uma das regiões do Brasil com maior déficit de áreas a serem recuperadas (SOARES-FILHO et al., 2014), em especial, a partir da promulgação do Código Florestal Brasileiro estabelecido pela Lei 12.651 de 25 de maio de 2012 (BRASIL, 2012). Dentre as metodologias existentes para sua restauração, vários modelos foram descritos no Pacto da Mata Atlântica (RODRIGUES et al., 2009) baseados no processo de sucessão (KAGEYAMA et al., 2008; MARTINS, 2012; BARBOSA et al., 2012). Dentre estes, o modelo

“diversidade e preenchimento” emprega maior proporção de pioneiras, misturando espécies com finalidade de promover sombra e proteção para as demais com outras que promovem a diversidade botânica (BRANCALION et al., 2009). Por sua vez, o modelo denso-diverso-funcional (DDF) também se baseia na sucessão vegetal, mas agrega a formação de florestas multi-estratificadas com o uso de alta densidade de plantas, de diversidade funcional e de espécies arbóreas e arbustivas, com predomínio de não-pioneiras (PIÑA-RODRIGUES et al., 1997; MIYAWAKI, 1999; MIYAWAKI, 2004).

No modelo DDF, a maior diversidade proporciona a incorporação de espécies que exercem diferentes funções no sistema, promovendo o retorno das funções ecológicas da restauração (MIYAWAKI, 2004). Por outro lado, o adensamento acelera o crescimento da floresta em relação à altura, mesmo que algumas espécies sejam inibidas por conta do sombreamento (MIYAWAKI & GOLLEY, 1993; MIYAWAKI, 1998, MIYAWAKI, 2004). Nessas condições, a competição favorece o rápido crescimento dos indivíduos (MIYAWAKI, 1999), protegendo e cobrindo o solo, características que também podem contribuir para o rápido acúmulo de carbono pela vegetação.

É de suma importância que a variável biomassa seja determinada e estimada de maneira confiável, para que a quantificação do carbono fixado nos ecossistemas florestais seja coerente (SANQUETTA, 2002). O peso de uma floresta pode ser estimado direta ou indiretamente, considerando diferentes partes das árvores e/ou compartimentos da floresta, como solo, serapilheira, húmus e árvores mortas (SILVEIRA et al., 2008). Segundo Brown (1997), entre os métodos indiretos, um dos mais vantajosos é a utilização de equações de regressão que estimam a biomassa diretamente, não sendo necessário o cálculo da variável volume. No bioma Mata Atlântica, Tiepolo et al. (2002) e Moreira-Burger (2005) desenvolveram modelos alométricos com base em medições diretas de biomassa. Contudo, para áreas de restauração no mesmo bioma, modelos matemáticos com essa finalidade ainda precisam ser desenvolvidos (MIRANDA et al., 2011). Modelos específicos para cada área devem ser desenvolvidos e a escolha de uma equação deve levar em consideração a questão do que se deseja investigar (VIEIRA et al., 2008).

Baseado no fato de que o aumento do aquecimento global é preocupante, por afetar a vitalidade do planeta, e que as florestas têm potencial para mitigá-lo

por meio do sequestro de carbono da atmosfera, mas que sua eficiência e potencial podem variar em função da composição, estrutura e idade da vegetação, o presente trabalho teve como objetivo comparar o potencial de estoque de carbono fixado em diferentes modelos de restauração de áreas degradadas localizados no bioma Mata Atlântica. Espera-se, com esse resultado, colaborar para a adoção e ajustes de modelos de restauração que contribuam para o resgate de carbono na região de Floresta Estacional.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 ÁREAS DE ESTUDO

A área de estudo está localizada a 23°30'06''S e 47°27'29''O, na região metropolitana de Sorocaba (SP), dentro do domínio fisionômico da Floresta Atlântica Semidecidual. O clima é do tipo Cwa (Köppen), com verões quentes e chuvosos e invernos moderadamente frios e secos, precipitação máxima local de 237 mm e mínima local de 33 mm respectivamente, e a temperatura média anual é superior a 22°C em dias quentes (CEPAGRI, 2013). Os solos predominantes são classificados como Argissolos e Latossolos (SILVA et al., 2009).

Para os estudos, foram realizadas coletas de dados em duas áreas, adotando diferentes modelos de restauração. São elas: (a) modelo denso-diverso-funcional (DDF) situado em Sorocaba, São Paulo, e (b) modelo diversidade e preenchimento (D&P) - localizado no entorno da Floresta Nacional de Ipanema, em Iperó, São Paulo, há cerca de 30 km da outra área, na mesma formação florestal.

No modelo DDF, o solo da área foi escavado até 1 m de profundidade e preenchido com *topsoil* até nivelar a superfície. Em seguida, sucessivas camadas de *topsoil* foram adicionadas sobre o material até a parte central do bloco atingir 1 m de altura, criando-se uma parte central mais alta e um declive das laterais ao nível do solo. A seguir, o solo foi descompactado e o *pH* corrigido para 5,5 com aplicação de calcário dolomítico (2 t/ha). A adubação de base foi feita utilizando N-P-K (4:14:8).

Em outubro de 2011, foram plantadas 81.594 mudas distribuídas em cinco blocos de tamanhos variáveis (20 m x 100 m a 20 x 400 m), na densidade média de 3 plantas/m<sup>2</sup>, numa proporção de 50% de pioneiras e 50% de não-pioneiras. No total foram utilizadas 145 espécies, incluindo árvores, arvoretas e arbustos. A seleção das espécies baseou-se na flora regional, sendo empregados, como critérios, as síndromes de polinização (zoófilas) e de dispersão (zoocóricas), e também sua função ecológica (interação com micorrizas, plantas adubadoras, entre outras). As mudas de espécies arbustivas foram distribuídas na parte mais externa de cada bloco e as demais alocadas nas partes centrais aleatoriamente.

A área de restauração no modelo “diversidade e preenchimento” (RODRIGUES et al., 2009) situa-se em zona de preservação permanente, com cerca de 1,5 ha, sendo coberta por pastagem de *Brachiaria* sp. Após a capina mecanizada, o plantio foi realizado em 2005 no espaçamento 3 m x 2 m, com cerca de 60 espécies florestais da região, sendo a maioria de pioneiras (> 60%). A área foi preparada com calagem e adubação de cobertura. A manutenção foi realizada com capina manual e mecanizada até o segundo ano pós-plantio.

## 2.2 COLETA DE DADOS

Aos quatro anos pós-plantio, no modelo DDF foram lançadas quatro parcelas de 250 m<sup>2</sup>, e uma de 500 m<sup>2</sup>, sendo medidas todas as árvores presentes, totalizando 3250 indivíduos. Na área da modelo D&P, as medições foram realizadas aos quatro anos em cinco parcelas circulares de 5 m de raio, distribuídas ao acaso. Os dados da vegetação obtidos foram: identificação da espécie, altura total (H) e diâmetro à altura do colo (DAC). A partir dos dados de altura e diâmetro foi calculado o incremento médio anual, a estimativa da biomassa e carbono por hectare e por indivíduo em ambos os modelos de restauração. O método empregado para quantificar a biomassa estocada acima do solo foi o indireto e/ou não destrutivo (CHAVE et al. 2005; VIEIRA et al. 2008).

## 2.3 SELEÇÃO DA EQUAÇÃO ALOMÉTRICA

A seleção da equação se baseou nos trabalhos prévios realizados por Nogueira (2014) na área do modelo DDF, em outubro de 2012, aos 12 meses após o plantio. No total foram amostradas 225 plantas de três espécies por grupo sucessional (pioneiras, secundárias e clímax), sendo analisados 25 indivíduos por espécie. A escolha das plantas foi sistemática para cada espécie, amostrando-se indivíduos a cada vinte metros de distância do ponto de coleta de um exemplar da mesma espécie. A análise de biomassa foi efetuada pelo método direto, abatendo-se cada indivíduo para amostragem da biomassa acima do solo. Cada planta foi mensurada (altura, diâmetro à altura do solo, diâmetro à altura do peito) e, posteriormente, efetuada a separação das folhas, galhos e fustes e obtida a

massa seca em estufa a 65°C até peso constante. A biomassa de cada componente e o diâmetro a altura do solo (DAS) e do peito (DAP) foram empregados para a aplicação nas equações para cada componente e para a biomassa total da parte aérea.

As seguintes variáveis preditoras (x) do estoque de carbono acima do solo (y) foram escolhidas: diâmetro (d), altura (h),  $d \cdot h$ ,  $d^2 \cdot h$ , volume do cone  $(\pi \cdot (d/2)^2 \cdot h)/3$ , volume do cilindro  $(\pi \cdot (d/2)^2 \cdot h)$  e a densidade da madeira adotada para os modelos de regressão múltipla. A partir dos dados obtidos, foram ajustadas as equações propostas por Brown (1997) e Moreira-Burger & Delitti (2008) (Tabela 1). Para tanto, Nogueira (2014) empregou a análise dos resíduos padronizados e a relação quantil–quantil, tendo como base o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) – excluindo os modelos com explicação abaixo de 90% – e empregando o Critério de Informação de Akaike- CIA (AKAIKE, 1974). Como resultado, o autor constatou que a equação de Moreira-Burger & Delitti (2008) foi a que mais se ajustou ao modelo de restauração DDF, independente da utilização dos dados de diâmetro à altura do solo (DAS) ou a altura do peito (DAP).

Tabela 1. Equações alométricas ajustadas para o modelo denso-diverso-funcional (DDF), em plantio de restauração de áreas degradadas em Floresta Estacional Decidual, em Sorocaba, São Paulo, ano 2012.

Onde: ln (Bt) = biomassa seca total da parte aérea: tronco + galhada (Kg); ln (Ct) = carbono total da parte aérea: tronco + galhada (Kg); d = diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m)

Equação Alométrica	Referências	$R^2$	syx%	Nº de dados
$\ln(Bt) = -1,996 + 2,32 \cdot \ln(d)$	Brown (1997)	0,89	-	28
$\ln(Ct) = -3,676 + 0,951 \cdot \ln(d^2 \cdot h)$	Moreira-Burger & Delitti (2008)	0,94	0,56	82

Com base nos resultados prévios obtidos por Nogueira (2014), a equação proposta por Moreira-Burger & Delitti (2008) foi empregada para quantificar o estoque de carbono em ambos os modelos por ter apresentado melhor ajuste ao modelo DDF e por ser uma equação amplamente utilizada (MOREIRA-BURGER & DELITTI, 2010). É importante considerar as peculiaridades do modelo de restauração DDF e a alta densidade utilizada, gerando competição precoce entre plantas (MIYAWAKI, 1998).

As estimativas de biomassa obtidas ( $\text{kg} \cdot \text{arvore}^{-1}$ ) foram convertidas em toneladas e, em seguida foi dividida pelo tamanho da parcela amostrada ( $\text{m}^2$ ),

para se obter o valor em tC/m<sup>2</sup>, sendo esse valor convertido em tC/ha. Para o cálculo do carbono equivalente, foi efetuada a multiplicação do valor de carbono estimado pela razão entre o peso molecular do dióxido de carbono (44) e do carbono (12). O resultado expressa o valor de créditos comercializáveis no mercado de carbono (t.CO<sub>2</sub>-eq).

Considerando que no modelo DDF as espécies foram distribuídas ao acaso, o que pode afetar a sua composição e estrutura, foi analisada a diferença significativa entre as parcelas para as variáveis, número de plantas, carbono estocado por hectare e carbono por indivíduo no modelo adensado. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi empregado para avaliar a significância dos dados entre parcelas do modelo DDF e entre os modelos de restauração determinado no programa livre Past 3.0 (HAMMER, 2001).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Para a estatística descritiva, observou-se que os indivíduos apresentam diâmetro médio de 9,70 cm (D&P) e 3,85 cm (DDF), variando de 1,59 até 50,29 em D&P e 0,15 até 43,40 cm em DDF. Houve ampla variação entre a medida mínima e a máxima em ambos os modelos, porém em DDF o diâmetro utilizado foi o da altura do solo e não do peito como em D&P. Quanto aos valores de altura total, estes apresentaram média de 5,91 cm (D&P) e 2,29 cm (DDF), variando de 2 até 13 cm no D&P e 0,03 até 7,3 cm no DDF (Tabela 2).

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis independentes empregadas na equação alométrica para estimativa de biomassa e carbono em dois modelos de restauração no estado de São Paulo, aos quatro anos de idade. D&P= modelo diversidade e preenchimento; DDF= modelo dendo-diverso-funcional. DAP= diâmetro a altura do peito; DAS= diâmetro à altura do solo.

Estatística descritiva	D&P		DDF	
	DAP (cm)	Ht (m)	DAS (cm)	Ht (m)
Média	9,7039	5,9143	3,8505	2,2985
Mínimo	1,5915	2,0000	0,1500	0,0352
Máximo	50,2930	13,0000	43,4000	7,3000

#### 3.2 ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO

A biomassa aérea por indivíduo ( $0,068 \text{ t.árvore}^{-1}$ ) e, conseqüentemente a estimativa média de carbono por planta ( $0,034 \text{ t.árvore}^{-1}$ ) foi significativamente maior ( $t = -2,161$ ;  $p = 0,025$ ) para o modelo D&P do que para o DDF ( $0,003 \text{ t.árvore}^{-1}$  e  $0,002 \text{ t.árvore}^{-1}$ , respectivamente) (Tabela 4).

Tabela 3. Estimativa e desvio padrão de biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por indivíduo de todas as parcelas amostradas do plantio de restauração no modelo denso-diverso-funcional (DDF), em Sorocaba, São Paulo, aos quatro anos de idade.

Parcela	Nº de indivíduos	Biomassa (t/indivíduo)	Carbono (t/indivíduo)	IMA Carbono (t/ano/indivíduo)
1	619	0,0032	0,0016	0,0004
2	514	0,0031	0,0015	0,0004
3	712	0,0036	0,0018	0,0005
4	526	0,0024	0,0012	0,0003
5	879	0,0031	0,0015	0,0004
<b>Média</b>	<b>650</b>	<b>0,0031±0,0003</b>	<b>0,0015±0,0001</b>	<b>0,0004±0,00003</b>

Tabela 4. Estimativa e desvio padrão de biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por indivíduo de todas as parcelas amostradas do plantio de restauração no modelo diversidade e preenchimento, em Iperó, São Paulo, aos quatro anos de idade.

Parcela	Nº de indivíduos	Biomassa (t/indivíduo)	Carbono (t/indivíduo)	IMA Carbono (t/ano/indivíduo)
1	16	0,0430	0,0215	0,0054
2	9	0,0332	0,0166	0,0042
3	10	0,1280	0,0640	0,0160
<b>Média</b>	<b>12</b>	<b>0,0681±0,0399</b>	<b>0,0340±0,0200</b>	<b>0,0085±0,0050</b>

A diferença entre as áreas para o acúmulo de carbono por planta pode ser explicada pela utilização de maior número de indivíduos por área no modelo DDF, o que reduz a estimativa por planta. O modelo DDF apresenta alta densidade e diversidade de espécies e funções, sendo esperado o crescimento rápido em altura nos primeiros anos, devido à competição por recursos, como luz, além da formação precoce de uma estrutura vertical proporcionado pela presença dos componentes arbustivos e arbóreos (MIYAWAKI, 1999). Contudo, pelos resultados do presente trabalho, essa estratificação precoce não se refletiu no acúmulo de biomassa e de carbono por indivíduo.

No plantio de restauração adensada (DDF), houve diferença significativa ( $H= 17,86$ ;  $p > 0,01$ ) no número de indivíduos entre as parcelas afetando, consequentemente, as variáveis derivadas do número de plantas (biomassa, carbono e IMA individual) de cada parcela (Tabela 3). Apesar disto, no modelo DDF, a estimativa média de biomassa acima do solo foi de  $69,99 \text{ t.ha}^{-1}$  (Tabela 5), não sendo estatisticamente diferente da obtida no modelo diversidade e preenchimento, com  $96,22 \text{ t.ha}^{-1}$  ( $H= 0,2$ ;  $p= 0,6547$ ). Em consequência, o mesmo

foi observado para a estimativa média de carbono no DDF (34,99 t.ha<sup>-1</sup>) e no modelo diversidade e preenchimento com 48,11 t.ha<sup>-1</sup>. Embora a densidade de plantas seja distinta entre as áreas, o incremento periódico anual do modelo DDF (8,75 t.ha<sup>-1</sup>/ano) não diferiu estatisticamente ( $H= 0,2$ ;  $p= 0,6547$ ) do modelo diversidade e preenchimento, com 12,03 t.ha<sup>-1</sup>/ano (Tabela 5).

As variações observadas entre os modelos podem ser atribuídas às diferenças na composição das espécies e na sua densidade. Espécies pioneiras e de crescimento rápido acumulam mais biomassa durante período mais curto e o oposto acontece com as não pioneiras e de crescimento lento, que foram dominantes no modelo DDF. Além disto, o acúmulo de biomassa e, por conseguinte, de carbono, variam com a idade e o grupo ecológico de cada indivíduo (SHIMAMOTO et al., 2014).

Tabela 5. Estimativas médias e desvios padrões da biomassa, carbono e incremento médio anual de carbono por hectare das parcelas amostradas nos plantios de restauração no modelo denso-diverso-funcional (DDF) e diversidade e preenchimento (D&P), em Sorocaba, São Paulo, aos quatro anos de idade

Parcela	Biomassa (t.ha <sup>-1</sup> )	Carbono (t.ha <sup>-1</sup> )	IMA Carbono (t.ha <sup>-1</sup> /ano)
<b>Modelo DDF</b>			
1	79,35	39,67	9,92
2	63,32	31,66	7,92
3	103,15	51,57	12,89
4	50,14	25,07	6,27
5	53,98	26,99	6,75
<b>Média</b>	<b>69,99±17,01</b>	<b>34,99±8,5</b>	<b>8,75±2,12</b>
<b>Modelo D&amp;P</b>			
1	87,64	43,82	10,9550
2	38,08	19,04	4,7600
3	162,92	81,46	20,3650
<b>Média</b>	<b>96,22±44,47</b>	<b>48,11±22,24</b>	<b>12,03±5,56</b>

De maneira geral, entre os modelos analisados, não houve diferença estatística entre eles para o acúmulo de carbono, embora o modelo D&P tenha apresentado valores numéricos 37,5% superiores aos obtidos para DDF. Este comportamento pode estar ligado à maiores variações obtidas entre as parcelas devido ao número de indivíduos do que entre os modelos. Além disto, o modelo DDF apresentou maior proporção de espécies e de indivíduos arbóreos e arbustivos de crescimento mais lento, como as não-pioneiras e que tendem a estocar menos carbono. Segundo Miranda et al. (2011), a estratificação das

espécies por ritmo de crescimento poderia melhorar o desempenho das equações alométricas utilizadas e corroborar com a utilização de outras que considerassem a densidade da madeira como variável. Por outro lado, estudos prévios realizados por Nogueira (2014) na área do modelo DDF, mostraram que não houve diferença significativa para nove espécies estudadas, em relação às equações adotadas para os diferentes grupos ecológicos de pioneiras, secundárias e clímax. Contudo, segundo esse autor, os fatores mais importantes para a quantificação do carbono foram a densidade da madeira e a arquitetura dos indivíduos.

Em ambos os modelos, os valores de carbono foram inferiores aos observados por Ferez (2010), com  $138 \text{ t.ha}^{-1}$  em plantio de restauração de 6 anos, o que equivaleu a média de  $23 \text{ t.ha}^{-1}/\text{ano}$ . Também em estudos de florestas naturais realizados em Floresta Estacional Semidecidual, Amaro et al. (2013) estimaram em  $86,93 \text{ t.ha}^{-1}$  o carbono estocado nos galhos e fuste de árvores vivas em Viçosa (MG), enquanto Boina (2008), também em Minas Gerais (Vale do Rio Doce), obteve  $112,87 \text{ t.ha}^{-1}$  de carbono estocado acima do solo. Dados de Britez et al. (2006), no mesmo bioma, constataram  $108,6 \text{ t.ha}^{-1}\text{C}$  acima do solo e de  $48,78 \text{ t.ha}^{-1}\text{C}$  em áreas de florestas maduras (SNIF, 2014).

Ainda são necessários estudos sobre o estoque de carbono em florestas tropicais de diferentes biomas e, em especial, em florestas de restauração. De maneira geral, a estimativa do estoque de carbono não considera o potencial de todo o ecossistema, e somente as espécies arbóreas e as plantadas têm sido incluídas nos cálculos. Segundo Nutto et al. (2002), cada árvore isolada corresponde à apenas 47% do carbono total armazenado e o restante encontra-se no sub-bosque, na serapilheira e no húmus. Além disso, Vieira et al. (2008) também recomendam a quantificação das lianas, dos bambus, das palmeiras, das plântulas e epífitas, pois esses são componentes importantes do sistema florestal.

Em função disso, o IPCC (2006), por exemplo, estima valores entre 60 e  $400 \text{ t.ha}^{-1}$  de biomassa, o que corresponde a estimativa média de carbono de 30 e  $300 \text{ t.ha}^{-1}$  para Florestas Tropicais nas Américas.

No Brasil, em reflorestamentos de matas ciliares, pesquisas realizadas por Souza et al. (2011) para quantificar o carbono indicaram estoque de  $21,33 \text{ t.ha}^{-1}$ , resultando em incremento anual de  $2,66 \text{ t.ha}^{-1}$ , valores que foram inferiores aos obtidos no presente trabalho para os modelos DDF e diversidade e preenchimento. Por outro lado, em plantios de restauração com idade de 8 anos

foi observado  $44,6 \text{ t.ha}^{-1}$  com incremento anual de  $5,6 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$  de C, enquanto em reflorestamentos com nativas de 10 anos localizadas em matas ciliares, os valores encontrados variaram de foram  $33,09$  a  $60,5 \text{ t.ha}^{-1}$  (MIRANDA, 2008).

Para Chave et al. (2005), as variáveis principais, em ordem crescente de importância utilizadas para determinar a biomassa, são: tipos de vegetação, altura total, densidade da madeira e diâmetro (DAP). Portanto, é necessário conhecer a estrutura da floresta e sua organização espacial em relação às diferentes fitofisionomias e manchas estruturais (clareiras, por exemplo) presentes na vegetação, as quais são influenciadas pelo uso anterior do solo, estágio de sucessão, tipo de solo, e nutrientes disponíveis, entre outros (CLARK & CLARK, 2000; SILVEIRA et al., 2008).

No caso do modelo DDF, é importante destacar a variação entre as parcelas no número de plantas, ocasionando diferenças no estoque de biomassa e carbono. Ademais, até a idade estudada, somente indivíduos de rápido crescimento, como as pioneiras, apresentaram condições de medição do DAP, com a grande maioria das plantas (não pioneiras e arbustivas) sendo avaliadas apenas por DAS. Esse é um dos fatores que pode gerar distorções no modelo ao longo do tempo e, deve ser monitorado. Conforme Crow & Schlaegel (1988) afirmam, não é recomendável a generalização do uso das equações alométricas em outros locais diferentes daqueles onde foram desenvolvidas. Contudo, a seleção de uma equação mais ajustada para o modelo DDF, como empregado no presente trabalho, é uma opção, principalmente devido às suas características peculiares em relação aos outros modelos.

No tocante ao potencial de comercialização de créditos de carbono, a estimativa encontrada do modelo DDF foi de  $128,41 \text{ tCO}_{2\text{-eq}}.\text{ha}^{-1}$  e de  $176,6 \text{ tCO}_{2\text{-eq}}.\text{ha}^{-1}$  no modelo de diversidade e preenchimento. Estas estimativas representam a quantidade de créditos que seria possível comercializar no mercado, utilizando cada tipo de plantio. Como o modelo DDF difere dos convencionais quanto a sua estrutura, além do crescimento do reflorestamento não ser linear, para resultados mais exatos seria necessário o monitoramento do reflorestamento até a estagnação do crescimento obtendo-se assim a estimativa da curva de crescimento, e o incremento de cada espécie. O mesmo acompanhamento se faz necessário no outro modelo estudado, para a obtenção de uma curva de crescimento.

## 4 CONCLUSÕES

A comparação entre as áreas de restauração no mesmo bioma mostrou que o modelo diversidade e preenchimento somente diferiu do modelo DDF em relação ao potencial por indivíduo de acúmulo de biomassa e estoque de carbono.

A presença de alta densidade de indivíduos e espécies não pioneiras no DDF, em contraponto à dominância de pioneiras no diversidade e preenchimento, pode ter equilibrado o potencial de resgate de carbono de ambos os modelos.

Devido às características do modelo DDF, sugere-se a necessidade de desenvolvimento de uma equação própria, ajustada às suas condições de estrutura e composição.

Para futuros estudos de quantificação de carbono por meio de equações alométricas, recomenda-se a estratificação por ritmo de crescimento ou grupo ecológico e o desenvolvimento de equações incluindo outras variáveis, como a densidade, além de altura e diâmetro.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control., Boston, v.19, n.6, p.716-723,1974.

AMARO, Marco Antonio et al . Estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma floresta estacional semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.5, p.849-857, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622013000500007&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622013000500007&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 25/07/2015.

BARBOSA, L; BARBOSA, T. C.; BARBOSA, K. C.; PARAJARA, F. C. Práticas públicas para restauração ecológica a partir de reflorestamentos com alta diversidade de espécies regionais. In: MARTINS, S. V. (Ed.). *Restauração Ecológica de Ecossistemas Degradados*. Viçosa: Brasil, 2012. c. 8, p. 240-261.

BOINA, A. **Quantificação de estoques de biomassa e de carbono em Floresta Estacional Semidecidual, Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2008. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

BRANCALION, P. H. S. et al. Plantio de árvores nativas brasileiras fundamentado na sucessão florestal. In: RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. (Orgs.) **Pacto para a restauração ecológica da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: Instituto BioAtlântica, 2009. p.14-23.

BRASIL, Lei nº12.651 de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, n. 102, 28 mai. 2012.Seção I, p. 1

BRITZ, R. M. et al. **Estoque e incremento de carbono em florestas e povoamentos de espécies arbóreas com ênfase na Floresta Atlântica do Sul do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 165p.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a Primer**. Rome: FAO, 1997. 55 p.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C.R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.34, p.277-290, 2010.

CENAMO, M. C. Mudanças Climáticas, o protocolo de Quioto e o Mercado de Carbono. 2004. Disponível em: <[http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo\\_quioto.pdf](http://www.cepea.esalq.usp.br/pdf/protocolo_quioto.pdf)> Acesso em 20/06/2015.

CEPAGRI. 2013. Disponível em [http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_584.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_584.html)

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M. & CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Sci. Agric.**, v.64, p.83-99, 2007.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, Berlin, v.145, p.87-99, 2005.

CLARK, D. B.; CLARK, D. A. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.137, n.1-3, p.185-198, 2000.

CROW, T. R.; SCHLAEGEL, B. E. A guide to using regression equations for estimating tree biomass. **Northern Journal of Applied Forestry**, United States, v.5, n.1, 1988.

FEREZ, A. P. C. **Efeito de práticas silviculturais sobre as taxas iniciais de seqüestros de carbono em plantios de restauração da Mata Atlântica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-08022011-140851/>>. Acesso em: 20/06/2015.

GARCIA, D. M.; BODENS, F.; CAMPOS, L.; BARROS, L. C. Mudanças Climáticas e Mecanismo de REDD como isso afeta você! Cartilha Mudanças Climáticas. Observatório do REDD, 2012.

HAMMER, O.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. 2001. Past: Paleontological Statistics Software Pack-age for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica** 4: 1-9

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of WGII to IPCCAR4. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. v.4.

KAGEYAMA, P. Y.; OLIVEIRA, R. E. DE; MORAES, L. F. D. DE; ENGEL, V. L.; GANDARA, F. B. (Eds.). **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. 1ª revisada ed. Botucatu: LERF - Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal, 2008. p. 1-26.

MARTINS, S. V. **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. Viçosa-MG: Ed. UFV, 2012.

MIRANDA, D. L. C.; MELO, A. C. G.; SANQUETTA, C. B. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.679-689, 2011.

MIYAWAKI, A. Restoration of living environment based on vegetation ecology: theory and practice. **Ecological Research**, v.19, p.83-90, 2004.

MIYAWAKI, A. Creative Ecology: Restoration of Native Forests by Native Trees. **Plant Biotechnology**, v.16, n.1, p.15-25, 1999.

MIYAWAKI, A. Restoration of urban green environments based on the theories of vegetation ecology. **Ecological Engineering**, v.11, p.157-165, 1998.

MIYAWAKI A.; GOLLEY F. B. Forest reconstruction as ecological engineering. **Ecological Engineering**, v 2, p.333-345, 1993.

MOREIRA-BURGER, D.; DELITTI, W. B. C. **Modelos preditores da fitomassa aérea da Floresta Baixa de Restinga**. *Rev. bras. Bot.* [online]. 2010, vol.33, n.1, pp. 142-153. ISSN 0100-8404.

MOREIRA-BURGER, D.; DELITTI, W. B. C. 2008. Allometric models for estimating the phytomass of a secondary Atlantic Forest area of Southeastern Brazil. **Biota Neotropica**, v.8, p.131-136.

MOREIRA-BURGER, R. D. **Modelos alométricos para a estimativa da fitomassa de Mata Atlântica na Serra do Mar, SP**. 2005.112f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NOGUEIRA, L. E. G. D. **Grupos funcionais, arquitetura e alocação da biomassa acima do solo em jovens de espécies arbóreas da Floresta Tropical Atlântica**. 2014. 37 f. Tese (Mestrado em Diversidade Biológica e Conservação) – Universidade Federal de São Carlos, *Campus Sorocaba*, Sorocaba, 2014.

NUTTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; GRAMMEL, R.; FENNER, P. T. O mercado internacional de CO<sub>2</sub>: o impacto das florestas naturais e das plantações. In: SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; BALBINOT, R.; ZILLOTTO, M. A. B.; GOMES, F. S. (Ed.). *As florestas e o carbono*. Curitiba: Brasil, 2002. cap.4, p. 89-108.

PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; REIS, L. L.; MARQUES, S. S. Sistema de plantio adensado para a revegetação de áreas degradadas da mata atlântica: bases ecológicas e comparações de custo/benefício com o sistema tradicional. **Floresta e Ambiente**, v.4, p.30-41, 1997.

PINHO, M. V. M. **Mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável: o mercado de carbono**. 2008. Monografia (Especialização). Universidade de Brasília, 2008.

RODRIGUES, R. R; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de**

**restauração florestal.** São Paulo: LERF/ESALQ-Instituto BioAtlântica, 2009. 264p.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. *et al.* (Eds.). **As florestas e o carbono.** Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Kyoto.** 2002. 182 p. Dissertação (Mestrado em Energia). Universidade de São Paulo, SP, 2002.

SHIMAMOTO, C. Y.; BOTOSSO, P. C.; MARQUES, M. C. M. How much carbon is sequestered during the restoration of tropical forests? Estimates from tree species in the Brazilian Atlantic forest, **Forest Ecology and Management**, v.329, p.1-9, 2014.

SILVA, A. M. et al. Análise espaço-temporal da cobertura do solo em faixas de áreas de preservação permanente (APPs) no município de Sorocaba, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água: An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.4, n.2, p.147-155, 2009.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v.38, n.1, p.185-206, 2008.

SNIF. Sistema Nacional de Informações Florestais. Recursos Florestais - Estoques das Florestas. 2014. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/estoque-das-florestas>>. Acesso em: 02/08/2015.

SOARES-FILHO, B.; RAJÃO, R.; MACEDO, M.; CARNEIRO, A.; COSTA, W.; COE, M.; RODRIGUES, H.; ALENCAR, A. Cracking Brazil's Forest Code. **Science**, v.344, p.363-364, 2014.

SOUZA, A. M. S; VIEIRA, A. S. Quantificação de Carbono Estocado em Reflorestamento Heterogêneo de Mata Ciliar aos 8 anos de idade em domínio de Mata Atlântica no Estado de São Paulo. Artigo Técnico. Instituto Pró-Terra, 2011.

TIEPOLO, G.; CALMON, M.; FERETTI, A. R. Measuring and monitoring carbon stocks at the Guaraqueçaba climate action project, Paraná, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST CARBON SEQUESTRATION AND MONITORING, 2002, Taipei, Taiwan. **Anais...** Taipei: Taiwan Forestry Research Institute, 2002. p.98-115.

VIEIRA, S. A.; ALVES, L. F.; AIDAR, M. P. M.; ARAÚJO, L. S.; BAKER, T.; BATISTA, J. L. F.; CAMPOS, M. C. R.; CAMARGO, P. B.; CHAVE, J.; DELITTI, W. B.; HIGUCHI, N.; HONÓRIO, E.; JOLY, C. A.; KELLER, M.; MARTINELLI, L. A.; DE MATTOS, E. A.; METZKER, T.; PHILLIPS, O.; SANTOS, F. A. M.; SHIMABUKURO, M. T.; SILVEIRA, M.; TRUMBORE, S. E. Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. **Biota Neotropica**, Campinas, v.8, n.2, p.21-29, 2008. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1676-06032008000200001&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1676-06032008000200001&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 29/07/2015.