

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LANA FLÁVIA MASSUQUETTO

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE CARBONO DE
Araucaria angustifolia AO LONGO DE UM INVENTÁRIO CONTÍNUO EM
FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

CURITIBA

2018

LANA FLÁVIA MASSUQUETTO

**ESTIMATIVA DE BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE CARBONO DE
Araucaria angustifolia AO LONGO DE UM INVENTÁRIO CONTÍNUO EM
FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção da graduação no curso de Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Behling

CURITIBA

2018

DADOS DO ACADÊMICO

Nome do aluno: Lana Flávia Massuquetto

GRR: 20137092

E-mail: lana.massu@gmail.com

Orientador: Professor Doutor Alexandre Behling

RESUMO

Florestas nativas são consideradas significativos sumidouros de carbono, em que a quantificação de estoques de biomassa e carbono nessas florestas apresenta um importante papel para o manejo sustentável, com o intuito de minimizar e combater as mudanças climáticas e gerar políticas de conservação dos recursos naturais. O objetivo principal deste trabalho foi estimar e avaliar os estoques de biomassa aérea e teor de carbono em indivíduos de *Araucaria angustifolia* ao longo de inventário contínuo em um fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista (FOM), no Campus III Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em Curitiba, Paraná. Foi realizado um inventário contínuo em 70 parcelas de 50 m x 50 m medindo todas as árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) acima de 10 cm. Ajustou-se 18 modelos para estimar a biomassa (W) das Araucárias, nos quais se utilizaram como variáveis independentes o DAP, a altura total das árvores (H) ou a combinação dessas. A partir dos valores individuais de teor de carbono nos compartimentos aéreos, calculou-se as médias desses por árvore e entre indivíduos, obtendo-se o valor de 0,434 como teor médio. O estoque de carbono foi estimado a partir da multiplicação das estimativas de biomassa pela média de teor de carbono e, assim, extrapolando para o inventário contínuo realizado nos anos de 2007, 2010, 2013 e 2016. Posteriormente, calculou-se valores de média e coeficiente de variação, avaliando a evolução temporal dos estoques de biomassa aérea e teores de carbono na Araucária, bem como do carbono equivalente e créditos de carbono. O melhor ajuste foi da equação $W = 444,4587 - 46,0833.DAP + 1,6158.DAP^2 - 0,0065.DAP^3$, com coeficiente de determinação ajustado de 0,991, erro padrão da estimativa de 18,46% e análise gráfica dos resíduos. Obteve-se entre 2007 e 2016 uma variação de 38,68 a 48,80 Mg/ha para as médias de biomassa e de 16,80 a 21,20 Mg/ha para o carbono. A variação das médias do coeficiente de variação, carbono equivalente e créditos de carbono foram, respectivamente, de 62,21 a 64,07%, 61,61 a 77,73 Mg/ha e de 1085,39 a 1369,47 US\$/Mg/ha. Os créditos de carbono obtidos apresentam potencial para a comercialização por meio de mercados de carbono como um instrumento alternativo para a mitigação do aquecimento global e das mudanças climáticas, bem como a inserção de projetos de carbono, como os de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD++).

Palavras-chave: Dinâmica; Teor de carbono; Créditos de carbono

ABSTRACT

Native forests are considered important carbon sinks. The quantification of biomass and carbon stocks in these forests presents an important work to sustainable management with intention to minimize and combat climate changes and produce conservation policies of natural resources. The objective of this paper was to estimate and to evaluate aerial biomass stocks and carbon content in specimens of *Araucaria angustifolia* over continuous inventory in an urban fragment of Mixed Ombrophilous Forest (FOM), in the Campus III Botanic Garden of the Federal University of Paraná (UFPR), in Curitiba, Paraná. A continuous inventory in 70 plots of 50 m x 50 m was done, measuring all trees diameter at breast height (DAP) above 10 cm. To estimate Araucarias' biomass (W) 18 models were adjusted, in which the DAP, total tree height (H) or a combination of these were used as independent variables. From individuals values of carbon content in the aerial compartment, it was calculated the average of carbon content for the sake of tree and between individuals. The result of this was the value 0,434 as content average. The carbon stock was estimated from the multiplication of the biomass estimates by the average of the carbon content and, than extrapolating to the continuous inventory carried out in the 2007, 2010, 2013 and 2016. After that, the average values and coefficient of variation were calculated, evaluating the temporal evolution of Araucaria's aerial biomass stocks and carbon contents, as well as carbon equivalent and credits of carbon. The best fit was from equation $W = 444,4587 - 46,0833.DAP + 1,6158.DAP^2 - 0,0065.DAP^3$ with adjusted coefficient of determination in 0,991, standard fault of the estimate in 18,46% and graphical analysis. Between 2007 and 2016 a variation of 38,68 to 48,80 Mg/ha for biomass average and of 16,80 to 21,20 Mg/ha for carbon was obtained. The variation of average variation coefficients, equivalent carbon and carbon credits were, respectively, of 62,21 to 64,07%, 61,61 to 77,73 Mg/ha and of 1085,39 to 1369,47 US\$/Mg/ha. The carbon credits got present potential for commercialization through carbon markets as an alternative instrument to mitigate global warming and climate changes, as well as the insertion of carbon projects as Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD++).

Keywords: Dynamics; Carbon content; Carbon credit

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MODELOS SELECIONADOS PARA AJUSTE DE EQUAÇÕES DE BIOMASSA EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA	16
TABELA 2 - FÓRMULAS UTILIZADAS NOS AJUSTES DE EQUAÇÕES DE BIOMASSA EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA	17
TABELA 3 - RESUMO DOS AJUSTES DE EQUAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DE BIOMASSA DOS INDIVÍDUOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA.....	20
TABELA 4 - VALORES MÉDIOS DE BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO, COEFICIENTES DE VARIÇÃO, CARBONO EQUIVALENTE E CRÉDITOS DE CARBONO EM INDIVÍDUOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM UM FRAGMENTO URBANO DE FOM	22

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DE INDIVÍDUOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA	15
FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS DOIS MELHORES MODELOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE INDIVÍDUOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA.....	21
FIGURA 3 - VALORES MÉDIOS DE BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE CARBONO E CRÉDITOS DE CARBONO EM INDIVÍDUOS DE <i>Araucaria angustifolia</i> EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBROFILA MISTA	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 MENSURAÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTAS.....	13
3.2 MODELAGEM DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTAS	13
3.3 CRÉDITOS DE CARBONO	14
4. MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1 ÁREA DE ESTUDO	15
4.2 COLETA DE DADOS.....	16
4.3 MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA	16
4.4 ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA AÉREA E CRÉDITOS DE CARBONO	18
4.5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
6. CONCLUSÕES	25
REFERÊNCIAS	26

1. INTRODUÇÃO

Criado em 1990, o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) tem como objetivo divulgar conhecimento à população sobre o aquecimento global. Dois anos após a sua criação, na Eco 92 decidiu-se que os países seriam responsáveis pela conservação do clima de sua nação, independentemente do tamanho da mesma (OLIVEIRA, 2010).

O aumento da quantidade de emissões de carbono na atmosfera, relacionado com o papel dos ecossistemas terrestres, coloca em foco o aprofundamento de temas sobre as mudanças climáticas, visto que, o aquecimento recente da atmosfera está afetando os sistemas biológicos e ocasionando mudanças nas estruturas e funções dos ecossistemas (IPCC, 2007). Segundo Goers *et al.* (2012), as florestas apresentam a capacidade de absorção contínua de dióxido de carbono da atmosfera, como também, segundo Penne *et al.* (2010), são fundamentais para minimizar os efeitos da mudança climática global, devido a contribuição como grandes depósitos de carbono.

De acordo com Machado (2005), os ecossistemas terrestres que compreendem a vegetação e o solo são considerados sumidouros de carbono, ou seja, sequestram o carbono durante o seu desenvolvimento. Assim, as florestas desempenham um importante papel no ciclo de carbono, armazenando e trocando altas quantidades desse elemento com a atmosfera por meio da fotossíntese e da respiração. Quando perturbadas por razões antrópicas ou naturais, a vegetação se torna fonte de carbono pelo processo de decomposição e, durante a recuperação de áreas degradadas se convertem em sumidouros. Portanto, podem ser manejadas para que assumam seu papel no ciclo global do carbono (BRONW, 1997).

Kyrklund (1990) e Bronw (1997) também afirmam que áreas improdutivas e degradadas, como terrenos agrícolas e pastagens abandonados, tornam-se sumidouros quando regeneradas de forma natural ou transformadas em plantações. Assim, diversos trabalhos foram e continuam sendo desenvolvidos em busca de melhor precisão dos resultados das estimativas.

Essas estimativas podem ser realizadas por métodos diretos, pesando a biomassa geralmente por meio de processo destrutivo, e/ou indiretos, adotando modelagens de biomassa e carbono (SANQUETTA *et al.*, 2014). Com base na afirmação de Silveira (2010), os métodos indiretos atuais de estimativas

possuem como base os dados de inventários florestais, onde equações e fatores transformam os valores de diâmetro e altura nessas estimativas, ou seja, utilizam apenas a correlação da variável pretendida com as variáveis de fácil obtenção, evitando a destruição das árvores.

Silveira (2010) efetivou um estudo em um fragmento de Floresta Ombrófila Densa no estado de Santa Catarina, o qual realizou estimativas de biomassa aérea e quantidade de carbono por meio do método da derivação do volume comercial, por um modelo matemático previamente selecionado e pelo valor *default* do IPCC de 0,5.

Silva (2007) desenvolveu um trabalho na Amazônia Central com o objetivo principal de avaliar a dinâmica de diferentes tipos florestais em relação à biomassa florestal, desenvolvendo também equações de biomassa para os dois tipos abordados: floresta madura e floresta em estágio de sucessão secundária (capoeira). Na mesma região, foi realizado outro estudo por Suwa *et al.* (2013), onde analisaram o crescimento e a relação da altura e do diâmetro das espécies, desenvolvendo então uma equação para a estimativa da biomassa das árvores envolvendo os dois parâmetros.

Pode-se citar também, dentre diversos, alguns dos trabalhos realizados no Estado do Paraná, como o de Urbano *et al.* (2008) que desenvolveram equações para estimar massa seca da biomassa por componente de povoamentos nativos da Região Metropolitana de Curitiba, onde obtiveram resultados satisfatórios. Outro caso, são os testes de modelos matemáticos realizado por Barbeiro *et al.* (2009), a fim de gerar, a partir de variáveis de fácil mensuração, estimativas do peso seco dos compartimentos de biomassa de Canela-Amarela (*Nectandra grandiflora* Nees & Mart. ex Nees). Sanquetta *et al.* (2014) publicaram sobre estimativa de carbono individual para Araucárias (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) na região Sul do Paraná, comparando dois procedimentos, os quais não apresentaram diferença entre eles, proporcionando estimativas estatisticamente aceitáveis.

Os estudos da quantificação dos estoques de biomassa e carbono nas florestas, principalmente as nativas, são importantes na criação de políticas públicas para ajudar no controle e no monitoramento das emissões e sequestro de gases de efeito estufa, os quais influenciam nas mudanças climáticas. Contribuem também, de forma decisiva, para subsidiar programas de

restauração de áreas degradadas, como a criação de projetos de conservação e manejo de remanescentes florestais, portanto, os trabalhos de quantificações desses elementos em florestas nativas e áreas de restauração são bastante relevantes (SILVA, 2014).

Diante disso, o presente trabalho objetivou estimar e avaliar os estoques de biomassa aérea e carbono de indivíduos de Araucária em um fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista no município de Curitiba, Paraná.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar e avaliar os estoques de biomassa aérea e carbono em indivíduos de *Araucaria angustifolia* ao longo de inventário contínuo em um fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar e selecionar modelos para estimar a biomassa aérea de indivíduos de Araucária;
- Estimar a biomassa aérea das Araucárias em um fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista;
- Estimar o carbono do fragmento de Araucária; e
- Estimar créditos de carbono.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MENSURAÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTAS

A quantificação da biomassa e do carbono presente em uma árvore, seja na parte aérea ou sistema radicular, pode ser obtida por meio dos métodos direto ou indireto (SANQUETTA, 2002). A escolha para adotar um desses métodos depende da formação vegetal e da disponibilidade de recursos (SCARPINELLA, 2002).

Segundo Higuchi e Carvalho Júnior (1994), o método direto implica na derrubada e pesagem de todas as árvores de uma parcela, extrapolando esses valores para a área total de interesse. Para Bombelli *et al.* (2009), o método direto é o mais preciso para a quantificação de biomassa dentro de uma pequena área de unidade, sendo inviável em larga escala pelo consumo de tempo e recursos necessários.

A estimativa pelo método indireto envolve a utilização de equações alométricas ou imagens de satélites, não requerendo a destruição de árvores. É comum uma maior utilização das equações, as quais apresentam como variáveis independentes os dados dendrométricos, como diâmetro, altura e volume, e como variável dependente a biomassa ou quantidade de carbono. Porém, o uso desse método pode gerar erros significativos nos cálculos, subestimando ou superestimando os resultados, devendo também cuidar com a seleção da equação que será utilizada, a qual deve ser apropriada para o estudo (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011).

3.2 MODELAGEM DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTAS

Quando deseja-se conhecer o potencial das florestas quanto ao estoque de biomassa e carbono, bem como sua viabilidade econômica, a quantificação por meio de metodologias de amostragem e modelagem é de grande importância, tornando-se base para tomadas de decisão (MAESTRI *et al.*, 2004).

De acordo com Ferreira (2013), as equações ou modelos de regressão apresentam um papel importante em diversas áreas, onde, para melhor compreensão e análise da relação entre as variáveis, os pesquisadores buscam modelar seus dados por meio de uma equação. A partir das relações entre

biomassa e estoque de carbono e algumas variáveis dendrométricas, são desenvolvidos os modelos lineares ou não-lineares (CHAVE *et al.*, 2004).

Para escolher um modelo que gere resultados confiáveis e que possa ser aplicado em um determinado ecossistema florestal quantificando a biomassa e o carbono, Clark (2002) sugere que essa escolha seja feita com base no comportamento dos dados em questão.

3.3 CRÉDITOS DE CARBONO

Introduzido pelo Protocolo de Kyoto (2018), em 1997, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) desenvolveu o mercado financeiro ambiental, criando e transformando os créditos de carbono na principal *commodity* desse mercado (SILVA, 2010). De acordo com Borges (2011), o MDL limita-se a projetos de florestamentos e reflorestamentos, não incluindo as florestas nativas.

A partir disso, foi implementado em 2007 pela COP-13 o mecanismo de Redução de Emissões por Desmatamento (RED), o qual foi expandido para REDD, considerando também a degradação das florestas. Posteriormente acrescentou-se o manejo sustentável, conservação florestal e aumento de estoque de carbono em florestas de países em desenvolvimento, passando para REDD+ (REDD *plus*). Hoje, encontra-se em REDD++, no qual foi inserido as áreas de agricultura, recuperação de pastagens e demais estratégias ao não desmatamento e aumento dos estoques de carbono (SANTANA, 2016).

Apesar de recente, o mercado de créditos de carbono, tem mostrado crescimento e inovações que podem valorizar e incentivar projetos de manejo florestal sustentável (ASSIS, 2012). Porém, de acordo com a Amata (2008), as incertezas sobre as metodologias de quantificação de estoques de carbono e os riscos da permanência desse estoque ainda são presentes.

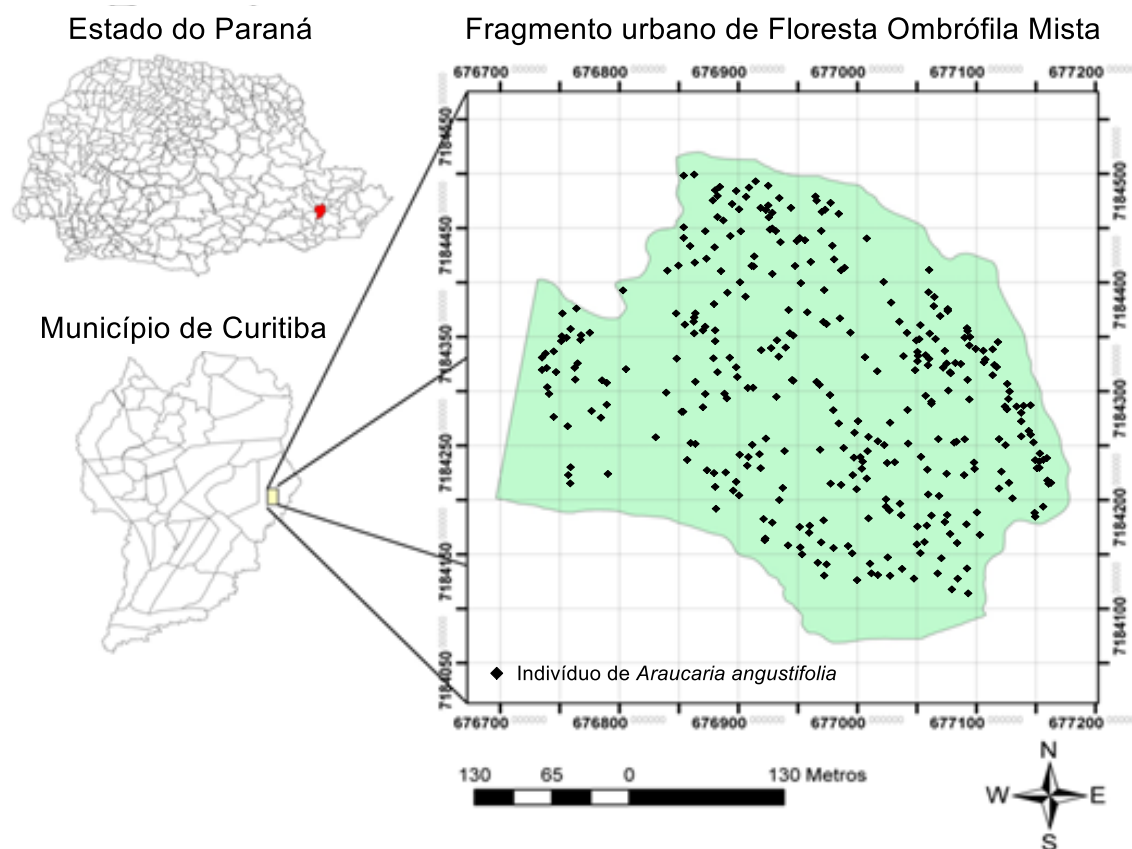
A retirada de carbono da atmosfera por meio de plantios e/ou demais recursos é recompensada pela remuneração da venda dos créditos de carbono (ASSIS, 2012). Para a comercialização desses créditos faz-se necessário a conversão (fator igual a 3,67) do carbono orgânico estocado na biomassa vegetal para o valor de dióxido de carbono sequestrado, em toneladas de carbono equivalente (ZHANG; BARAL; BAKSHI, 2010).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área onde o estudo foi realizado encontra-se no Campus III Jardim Botânico da Universidade Federal do Paraná (UFPR), entre as coordenadas 25°26'50" e 25°27'33" S e, 49°14'16" e 49°14'33" W, no município de Curitiba, a qual compreende um fragmento de Floresta Ombrófila Mista (FOM) com área total de 15,24 ha. Nessa área, 12,96 ha são compostos por FOM e, nos demais 2,28 ha prevalecem capoeiras e capoeirões, com presença marcante de taquarais (MACHADO *et al.*, 2009). A área de estudo está representada na Figura 1.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DE INDIVÍDUOS DE *Araucaria angustifolia* EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA



FONTE: Adaptado de Czelusniak (2014).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é classificado como Cfb, ou seja, temperado úmido mesotérmico, com verões frescos, invernos com geadas frequentes e sem estação seca. Segundo o SIMEPAR (2018), as

temperaturas médias anuais nos meses quentes e frios são inferiores a 22 °C e 18 °C, respectivamente, sendo 17 °C a temperatura média anual. Quanto ao solo, foi verificada a existência de Gleissolos próximos aos canais de drenagem e, de Cambissolos e Argissolos nas regiões mais drenadas (RONDON NETO, 2002).

4.2 COLETA DE DADOS

Por meio de inventário contínuo, realizado a partir de 2007 até 2016 com intervalo de três anos, obtiveram-se os dados utilizados no presente trabalho para as estimativas de biomassa. Nesse fragmento foi realizado um censo, dividindo-se em 70 parcelas de 50 m x 50 m, onde foram medidas todas as árvores com DAP acima de 10 cm, sendo essas identificadas, plaqueteadas e georeferenciadas. Os indivíduos de *Araucaria angustifolia* totalizaram 338 árvores, sendo localizadas em 56 parcelas.

4.3 MODELAGEM DA BIOMASSA AÉREA

Os dados utilizados para os ajustes são provenientes de povoamentos puros implantados com Araucárias no sul do Estado do Paraná, nos municípios de General Carneiro e Quedas do Iguaçu (SANQUETTA *et al.*, 2014). Foram utilizados 45 indivíduos. Na estimativa da biomassa, selecionou-se 18 modelos matemáticos, descritos na Tabela 1, sendo esses ajustados via regressão linear, com os coeficientes de regressão avaliados ao nível de 95% de significância pelo teste *t* de *Student*. O melhor modelo foi selecionado de acordo com os critérios de menor erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%), maior coeficiente de determinação ajustado (R²aj) e melhor distribuição gráfica dos resíduos.

TABELA 1 - MODELOS SELECIONADOS PARA AJUSTE DE EQUAÇÕES DE BIOMASSA EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

(continua)

Referência		Modelo
ZANETTE (2017)	1	$Ln W = b_0 + b_1 \cdot Ln DAP$
	2	$W = b_0 + b_1 \cdot DAP + b_2 \cdot DAP^2$
	3	$W = b_0 e^{DAP^{b_1}}$
RATUCHNE (2010)	4	$W = b_0 + DAP^{b_1}$
	5	$W = b_0 + b_1 \cdot DAP + b_2 \cdot DAP^2 \cdot H$
	6	$W = b_0 + b_1 \cdot DAP + b_2 \cdot DAP^2 + b_3 \cdot DAP^2 \cdot H$
	7	$W = b_0 + b_1 \cdot DAP^2 + b_2 \cdot DAP^2 \cdot H$

TABELA 1 - MODELOS SELECIONADOS PARA AJUSTE DE EQUAÇÕES DE BIOMASSA EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

Referência	Modelo
	8 $W = b_0 + b_1.DAP + b_2.H$
	9 $W = b_0 + b_1.DAP$
	10 $W = b_0 + b_1.DAP^2$
	11 $W = b_0 + b_1.DAP^3$
	12 $W = b_0 + b_1.DAP^2.H$
RATUCHNE (2010)	13 $Ln W = b_0 + b_1.Ln DAP^2$
	14 $Ln W = b_0 + b_1.Ln DAP^3$
	15 $Ln W = b_0 + b_1.Ln (DAP^2.H)$
	16 $W = b_0 + b_1.DAP + b_2.DAP^2 + b_3.DAP^3$
	17 $Ln W = b_0 + b_1.Ln H$
	18 $W = b_0 + b_1.DAP^2 + b_2.H^2 + b_3.DAP^2.H$

Em que: W = biomassa (kg); b0, b1, b2, b3, b4 = coeficientes de regressão; DAP = diâmetro da árvore à altura do peito (cm); Ln = logaritmo natural; e H = altura total (m).

Utilizou-se o *software* Microsoft Excel 2013, onde, para os ajustes, foram criadas planilhas individualmente para cada modelo e uma de resumo final. Os dados foram processados por meio da ferramenta de Regressão da Análise de Dados para a obtenção dos coeficientes, e assim, realizar os devidos cálculos e gerar os resultados finais de Syx% e R²aj. As principais fórmulas empregadas estão descritas na Tabela 2.

TABELA 2 - FÓRMULAS UTILIZADAS NOS AJUSTES DE EQUAÇÕES DE BIOMASSA EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

	Fórmulas
1	$Erro = Wa - We$
2	$Erro\% = \frac{erro}{Wa} \cdot 100$
3	${}^1FMC = e^{Syx^2 \cdot 0,5}$
4	$SQD = (Wa - We)^2$
5	$Syx = \sqrt{\frac{\sum SQD}{\sum n - p}}$
6	$Syx\% = \frac{Syx}{med} \cdot 100$
7	$SQt = (Wa - med)^2$
8	$R^2 = \frac{\sum SQD}{\sum SQt}$
9	$R^2_{aj} = 1 - (n - 1/n - p) \cdot (\frac{\sum SQD}{\sum SQt})$

Em que: Wa=biomassa aérea (kg); We=biomassa estimada (kg); FMC=fator médio de correção; Syx=erro padrão; SQD=soma dos quadrados; Syx=erro padrão da estimativa; n=número de unidades amostrais; p=número de coeficientes de regressão, Syx%=erro padrão da estimativa em porcentagem; med=média; SQt=soma de quadrados total; R²=coeficiente de determinação; e R²aj=coeficiente de determinação ajustado.

¹ Fórmula utilizada apenas para modelos logarítmicos, para correção da biomassa estimada.

Na estimativa de biomassa, foram criadas planilhas para cada parcela, com seu respectivo número de indivíduos de Araucária presentes. Os cálculos foram realizados com base no melhor modelo selecionado a partir dos ajustes. Para cada parcela, estimou-se a biomassa por árvore e por ano de medição (2007, 2010, 2013 e 2016), obtendo-se a soma da massa por ano e por parcela, convertendo esses valores para Mg/ha.

4.4 ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO NA BIOMASSA AÉREA E CRÉDITOS DE CARBONO

Posteriormente, a partir dos valores individuais de teor de carbono nos compartimentos folhas, galhos e fuste na parte aérea, calculou-se as médias desses por árvore e entre indivíduos, obtendo-se o valor de 0,434. O teor de carbono médio foi multiplicado pelas estimativas de biomassa, resultando no estoque de carbono (Mg/ha).

Para a obtenção do Crédito de Carbono (CC), foi calculado o Carbono Equivalente (CO_{2eq}), cuja fórmula está descrita abaixo, multiplicando ele pela cotação do crédito de carbono (17,62 US\$/Mg) do dia 18 de maio de 2018, disponível no portal eletrônico Investing (2018).

$$CO_{2eq} = EC \cdot \left(\frac{44}{12}\right)$$

Em que: CO_{2eq} = carbono equivalente (Mg/ha); e EC = estoque de carbono.

4.5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Realizando o censo, obteve-se os valores médios de biomassa (Mg/ha), estoque de carbono (Mg/ha), carbono equivalente (CO_{2eq}) e créditos de carbono (US\$/Mg/ha) para os indivíduos de Araucária do fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista (FOM). A partir desses resultados, efetuou-se a análise temporal dessas variáveis.

Adicionalmente calculou-se o coeficiente de variação em porcentagem (CV%) por ano para a biomassa. O cálculo de CV% foi feito por meio da fórmula a seguir:

$$CV\% = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100$$

Em que: CV% = coeficiente de variação em porcentagem; s = desvio padrão; e \bar{x} = média aritmética.

Os resultados foram comparados com a literatura, buscando analisar os valores de estoque de biomassa e carbono neste fragmento de FOM com outras tipologias florestais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os ajustes realizados (Tabela 3), obteve-se como o melhor e pior modelo a partir da análise dos valores de R^2_{aj} e $Syx\%$, respectivamente, a equação de número '16', a qual apresentou o menor erro padrão da estimativa ($Syx\%$), e a equação '8', com o maior $Syx\%$.

TABELA 3 - RESUMO DOS AJUSTES DE EQUAÇÕES PARA A ESTIMATIVA DE BIOMASSA DOS INDIVÍDUOS DE ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

	Equação	R^2_{aj}	$Syx\%$
1	$Ln W = - 2,4864 + 2,4428.Ln DAP$	0,923	54,26
2	$W = - 116,3652 + 0,2623.DAP + 0,5428.DAP^2$	0,973	31,92
3	$W = 138,3472.e^{DAP^{0,0357}}$	0,933	50,32
4	$W = 0,2419.DAP^{2,1710}$	0,984	24,77
5	$W = - 390,0515 + 19,9467.DAP + 0,0126.DAP^2.H$	0,979	27,70
6	$W = 94,7494 - 16,1141.DAP + 1,0522.DAP^2 - 0,0125.DAP^2.H$	0,978	29,04
7	$W = - 142,8339 + 0,6458.DAP^2 - 0,0034.DAP^2.H$	0,945	45,48
8	$W = - 819,1334 + 64,1627.DAP - 33,8639.H$	0,476	141,08
9	$W = - 1225,7120 + 58,2501.DAP$	0,901	61,26
10	$W = - 111,1221 + 0,5451.DAP^2$	0,987	22,02
11	$W = 194,1875 + 0,0051.DAP^3$	0,946	45,25
12	$W = 69,2123 + 0,0181.DAP^2.H$	0,962	37,81
13	$Ln W = - 2,4864 + 1,2214.Ln DAP^2$	0,922	54,26
14	$Ln W = - 2,4864 + 0,8143.Ln DAP^3$	0,922	54,26
15	$Ln W = - 4,0129 + 1,0170.Ln (DAP^2.H)$	0,891	64,29
16	$W = 444,4587 - 46,0833.DAP + 1,6158.DAP^2 - 0,0065.DAP^3$	0,991	18,46
17	$Ln W = - 6,9831 + 4,4393.Ln H$	0,759	95,74
18	$W = - 124,0624 + 0,6501.DAP^2 - 0,0787.H^2 - 0,0034.DAP^2.H$	0,888	64,52

FONTE: A autora (2017).

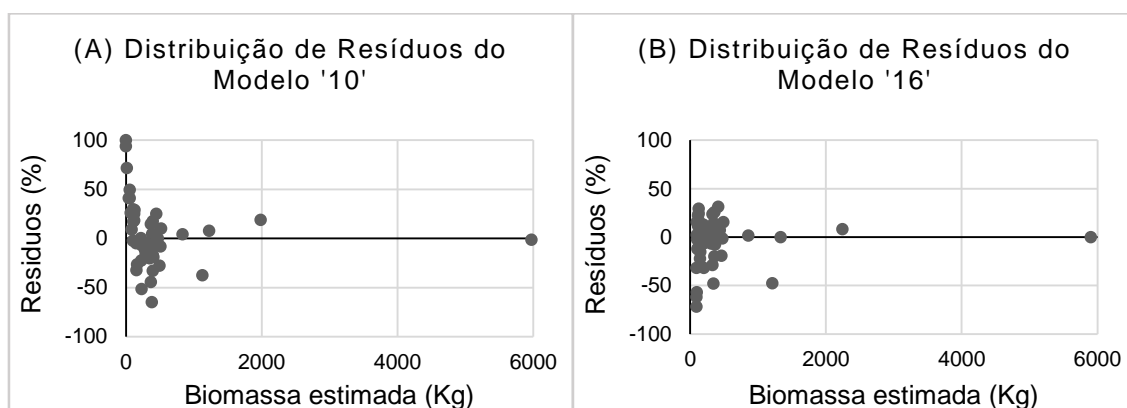
Interpretando os valores, as altas taxas de $Syx\%$ indicam a baixa precisão das equações, ao passo que para os coeficientes de determinação ajustados, quanto mais próximo de 1 mais a variável dependente é influenciada pelas variáveis independentes na equação ajustada e, melhor será o modelo (SCOLFORO, 2005).

Os resultados gerados neste trabalho foram relativamente melhores quando comparados com os que foram obtidos pelo autor das equações. No estudo realizado por Zanette (2017), o melhor modelo selecionado para a estimativa de biomassa no estado do Paraná foi o denominado como Equação 2, o qual apresentou um $Syx\%$ de 85,83% e R^2_{aj} igual a 0,928. Por outro lado, no trabalho desenvolvido por Ratuchne (2010), a equação que mais se destacou para a

estimativa de biomassa aérea total apresentou R^2_{aj} igual a 0,955 e Sy_x de 45,47%.

Representando graficamente a dispersão residual (Figura 2), é possível observar a distribuição de resíduos dos dois melhores modelos, concluindo que na Figura 2B há uma menor dispersão, ou seja, uma melhor distribuição, a qual refere-se à equação selecionada para as estimativas.

FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DE RESÍDUOS DOS DOIS MELHORES MODELOS PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA DE INDIVÍDUOS DE *Araucaria angustifolia* EM UM FRAGMENTO DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA



FONTE: A autora (2018).

Comparando esses resíduos com os gráficos dos melhores modelos selecionados por Zanette (2017) e Ratuchne (2010), foi observado uma melhor distribuição dos resíduos e menor subestimativa de biomassa para indivíduos de maior DAP, considerando, assim, um melhor resultado que o obtido pelos autores citados.

Com base no melhor modelo selecionado, foram estimadas as biomassas por parcela. Analisando essas estimativas observou-se que, em algumas parcelas, houve redução dos valores ao decorrer dos anos. Isso ocorreu devido à mortalidade de alguns indivíduos. O mesmo ocorreu na estimativa de estoque de carbono.

Por fim, tem-se o censo das estimativas realizadas (Tabela 4), contendo as médias, o coeficiente de variação (CV%), carbono equivalente (CO_{2eq}) e crédito de carbono (CC) para cada ano de medição. Os coeficientes de variação

resultantes das variáveis são considerados altos, acima de 30%, de acordo com os parâmetros propostos por Gomes² (1976 *apud* AMARAL *et al.*, 2010).

TABELA 4 - VALORES MÉDIOS DE BIOMASSA E ESTOQUE DE CARBONO, COEFICIENTES DE VARIÇÃO, CARBONO EQUIVALENTE E CRÉDITOS DE CARBONO EM INDIVÍDUOS DE *Araucaria angustifolia* EM UM FRAGMENTO URBANO DE FOM

	Biomassa (Mg/ha)	CV (%)	Carbono (Mg/ha)	CO_{2eq} (Mg/ha)	CC (US\$/Mg/ha)
2007	38,6807	63,93	16,80233	61,61	1085,39
2010	42,3067	64,07	18,37738	67,38	1187,13
2013	46,7411	62,21	20,30362	74,45	1311,57
2016	48,8048	63,85	21,20005	77,73	1369,47

FONTE: A autora (2018).

Nota-se, quando comparados com resultados de trabalhos desenvolvidos para povoamentos de espécies exóticas, um baixo estoque de biomassa e carbono desses indivíduos. Um exemplo é o de Balbinot *et al.* (2008), que analisaram o estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes classes de idade no Sul do Estado do Paraná, obtendo para as árvores acima de 15 anos um total de 228,41 Mg/ha de biomassa e 102,70 Mg/ha de carbono.

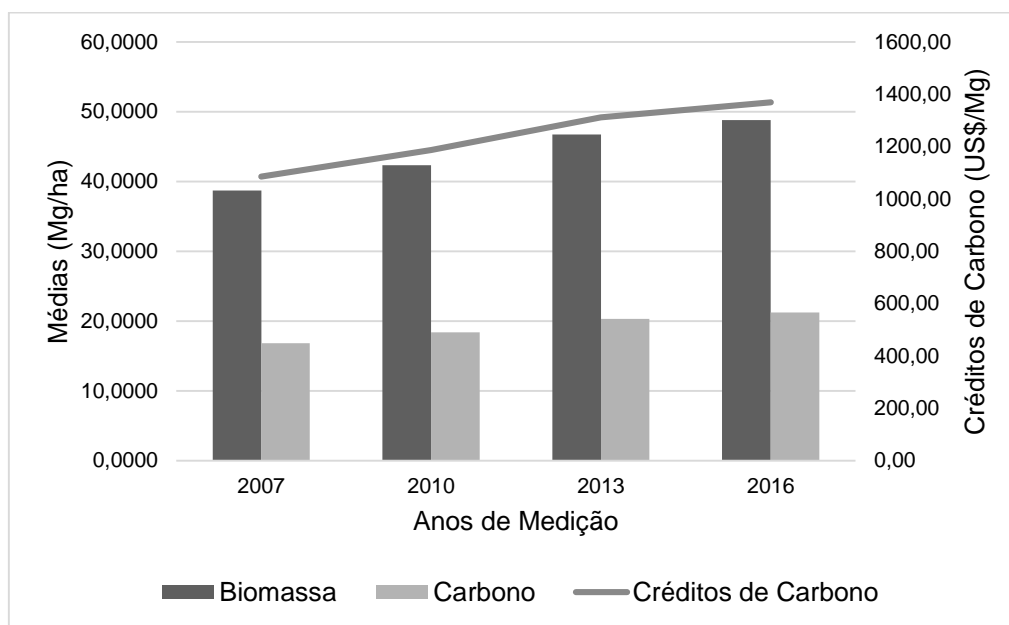
Ribeiro (2011) avaliou o estoque de biomassa e carbono em plantio comercial de *Eucalyptus* spp. no Estado de Minas Gerais, encontrando um estoque de carbono de 73,38 Mg/ha. A partir da estimativa do estoque de carbono em plantações de *Acacia mearnsii* De Wild com 4 anos de idade no Rio Grande do Sul, estudo realizado por Saidelles *et al.* (2009), foi obtido um total de 29,79 Mg/ha de carbono.

É possível observar um estoque inferior em relação aos dois estudos citados anteriormente, desse modo, pode-se dizer que florestas nativas tendem a ter um estoque reduzido quando comparadas com florestas de espécies exóticas. Esse fator é considerado como uma das razões pelas quais as florestas nativas não se enquadram em projetos de carbono do tipo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Com isso, para a implantação de projetos de florestamento e reflorestamento que tenham como objetivo gerar créditos de carbono nos moldes do MDL, uma área com redução de estoque de carbono será considerada menos atrativa (BALBINOT *et al.*, 2008).

² GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba, Editora CALQ/ESALQ, 1976.

Outra maneira de observar os dados está representada na Figura 3, onde contém a evolução das médias de biomassa e carbono com a quantidade de créditos de carbono.

FIGURA 3 - VALORES MÉDIOS DE BIOMASSA AÉREA E ESTOQUE DE CARBONO E CRÉDITOS DE CARBONO EM INDIVÍDUOS DE *Araucaria angustifolia* EM UM FRAGMENTO URBANO DE FLORESTA OMBROFILA MISTA



FONTE: A autora (2018).

Analisando o aumento dos valores ao longo do tempo, tem-se uma média anual de 1,12 Mg/ha para a biomassa, 0,49 Mg/ha para o carbono e 31,56 US\$/Mg/ha para os créditos de carbono.

Relacionando os estoques de biomassa e carbono com a sucessão ecológica tem-se que, à medida que o estágio de sucessão evolui, maior é o estoque de biomassa e carbono. Segundo Watzlawick *et al.* (2002), também é possível verificar que os diversos compartimentos de uma árvore apresentam diferentes participações, como, por exemplo, em estágio inicial o maior percentual encontra-se nas raízes e posteriormente na madeira, enquanto no estágio médio o percentual é mais elevado na madeira e, em seguida, nos galhos vivos.

Quanto aos créditos de carbono, empresas com altos níveis de emissão podem adquirir esses créditos como forma de compensação. São considerados como a moeda do mercado de carbono, onde um crédito representa uma tonelada de carbono que deixou de ser emitido para a atmosfera, contribuindo

para a diminuição do efeito estufa. Para a compra deles, deve-se ter o conhecimento da quantidade de CO₂ que será compensada, podendo ser calculada por meio de ferramentas de Inventário de Emissões (SUSTAINABLE CARBON, 2018).

6. CONCLUSÕES

Em função das variáveis dendrométricas, os ajustes de equações para estimar a biomassa aérea de indivíduos de Araucária geraram, nas condições apresentadas, resultados discrepantes quanto a qualidade dos ajustes, tendo uma variação do Syx% de 141,08% a 18,46% e um R²aj de 0,476 a 0,991. O melhor modelo selecionado foi $W = 444,4587 - 46,0833 \cdot DAP + 1,6158 \cdot DAP^2 - 0,0065 \cdot DAP^3$, o qual apresentou Syx% igual a 18,46% e R²aj de 0,991.

As estimativas de biomassa aérea foram satisfatórias em comparação com demais trabalhos desenvolvidos para a mesma área, ocorrendo um aumento significativo ao longo dos anos de medições. O mesmo ocorreu para as estimativas de estoque de carbono e carbono equivalente.

Estimando os créditos de carbono, observou-se uma quantia significativa para uma possível comercialização por meio dos mercados de carbono, como um instrumento alternativo para a mitigação do aquecimento global e das mudanças climáticas. É interessante nesse caso a inserção de projetos como o de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD++), por exemplo, visando manter a qualidade dos recursos ambientais e sociais e reduzindo as emissões, sendo recompensados de forma financeira por meio dos créditos de carbono.

Para melhores resultados e maior precisão nas estimativas para esse fragmento urbano de Floresta Ombrófila Mista, sugere-se novos estudos para o desenvolvimento de modelos matemáticos específicos para o local.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. P. et al. Análise da distribuição espacial de biomassa e carbono arbóreo acima do solo em floresta ombrófila mista. **Ambiência**. Edição especial, Guarapuava, v.6, p. 103-114, 2010.

AMATA. **Serviços ambientais: carbono**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.amatabrasil.com.br/pt/>>. Acesso em: 31 maio 2018.

ASSIS, M. R. **Modelagem da biomassa seca e estoque de carbono total em *Eucalyptus* considerando diferentes estágios iniciais de crescimento**. 197 p. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

BALBINOT, R. et al. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do Estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 317-324, 2008.

BARBEIRO, L. S. S. et al. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness. (Canela-amarela). **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 4, p. 833-843, 2009.

BOMBELLI, A. et al. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: biomass. **Global Terrestrial Observing System**. FAO. Rome, 18 p., 2009.

BORGES, L. C. R. **Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação – REDD: desafios e oportunidades para o Brasil no contexto das mudanças climáticas**. 198 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

BRONW, S. Los bosques y el cambio climático: el papel de terrenos forestales como sumidouro de carbono. Ankara, Turquia: **Congresso Florestal Mundial**, p. 107-121, 1997.

CHAVE, J. et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B**. London, v. 359, n. 1443, p. 409-420, 2004.

CLARK, D. A. Are tropical forests an important carbon sink?: Reanalysis of the long-term plot data. **Applied and Ecology**, Amsterdam, v. 12, n. 1, p. 3-7, 2002.

CZELUSNIAK, B. H. **Efeito da exclusão de faixas de borda na estrutura diamétrica de um fragmento urbano de floresta ombrófila mista em matrizes de transição**. 82 p. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERREIRA, D. F. **Recursos computacionais utilizando R**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 228 p., 2013.

GOERS, L. et al. Introdução. In: ASHTON, M. S.; TYRREL, M. L.; SPALDING, D.; GENTRY, B. (Ed.). **Managing Forest Carbon in a Changing Climate**. Heidelberg, London, New York: Springer Science & Business Media, p.1–6, 2012.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: **Seminário Emissão x Sequestro de CO₂ – Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CVRD. v. 67, p. 125-145, 1994.

INVESTING. **Crédito carbono futuro**. Disponível em: <<https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-streaming-chart>>. Acesso em: 19 maio 2018.

IPCC. Painel Intergovernamental Sobre Mudanças do Clima. **Mudança do Clima 2007: A Base das Ciências Físicas – Sumário para os formuladores de políticas**. 2007.

KYRKLUND, B. Como pueden contribuir los bosques y lãs industriais forestales a reducir el exceso de anhídrico em la atmosfera. **Unasyva**, v. 43, n 163, p. 12-14, 1990.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do Solo e a Mitigação da Mudança Climática Global. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MACHADO, S. A. et al. Funções de distribuição diamétrica em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.8, p. 2428-2434, 2009.

MAESTRI, R. et al. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando o sequestro de carbono. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 347-360, 2004.

OLIVEIRA, M. P. Congresso de Copenhague – COP 15 ou “La fábula del tiburón y las sardinas”. **Revista Fórum de Direito Urbano e Ambiental – FDU**. v. 9, n. 50, p. 75-82, 2010, Editora Fórum, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.portaldoeconomista.org.br/arquivos/>>. Acesso em: 21 maio 2018.

PENNE, C. et al. The impact of the canopy structure on the spatial variability in forest floor carbon stocks. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 282–297, 2010.

PROTOCOLO DE KYOTO. **Conferências sobre Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://protocolo-de-kyoto.info/conferencias-sobre-meio-ambiente.html>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

RATUCHNE, L. C. **Equações alométricas para a estimativa de biomassa, carbono e nutrientes em uma floresta ombrófila mista**. 111 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2010.

RIBEIRO, S. C. **Estoque de biomassa e carbono em cerrado e em plantio comercial de Eucalipto no Estado de Minas Gerais**. 71 p. Tese de Pós-Graduação – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RONDON NETO, R. M. et al. Caracterização florística e estrutural de um fragmento de floresta ombrófila mista. **Floresta**. Curitiba, v.32, n.1, p. 3-16, 2002.

SAIDELLES et al. Uso de equações para estimar carbono orgânico em plantações de *Acacia mearnsii* de Wild. No Rio Grande do Sul – Brasil. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 907-915, 2009.

SANQUETTA, C. R. et al. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 1-8, 2014.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba, p.119-140, 2002.

SANTANA, D. Reduções de Emissões por Desmatamento Florestal – REDD++. **Revista Vivo Verde**, 2016. Disponível em: <<http://vivoverde.com.br/o-que-e-redd-redd-e-redd-reducoes-de-emissoes-por-desmatamento-e-degradacao-florestal/>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

SCARPINELLA, G.A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto**. 182 p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: Parte I: modelos de regressão linear e não linear; Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 352 p., 2005.

SILVA, F. M. O desenvolvimento sustentável e os projetos de MDL no Brasil. **Revista Brasileira de Direito Constitucional**, v. 16. p. 51-67, 2010.

SILVA, H. F. **Biomassa e carbono no estrato arbóreo em área de restauração e em floresta semidecidual**. 64 p. Dissertação de Pós-Graduação – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus- AM**. 43 p. Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus, 2007.

SILVEIRA, P. 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, v. 40, n. 4, p. 789-800, 2010.

SIMEPAR. **Dados históricos da rede telemétrica hidrometeorológica do SIMEPAR**. Sistema Meteorológico do Paraná. Curitiba. Disponível em: <<http://www.simepar.br/>>. Acesso em: 06 mar. 2018.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. de; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Editora da UFV. Viçosa, 2011.

SUSTAINABLE CARBON. **Créditos de carbono**. Disponível em: <www.sustainablecarbon.com>. Acesso em: 21 maio 2018.

SUWA, R. et al. Significance of topographic gradient in stem diameter - height allometry for Precise Biomass Estimation of a Tropical Moist Forest in the Central Amazon. **Japan Agricultural Research Quarterly**, v. 47, p. 109-114, 2013.

URBANO, E. et al. Modelagem da biomassa aérea em bracatingais nativos da região metropolitana de Curitiba. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 361-372, 2008.

WATZLAWICK, L. F. et al. Fixação de carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETA, C. R. et al. **As florestas e o carbono**. Curitiba, parte 8, p. 153-173, 2002.

ZANETTE, V. H. **Equações alométricas de biomassa aérea para floresta ombrófila mista no paraná**. 85 p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ZHANG, Y.; BARAL, A.; BAKSHI, B. R. Accounting for ecosystem services. In: **Life cycle assessment: part II, toward an ecologically based LCA**. Environmental Science Technology, Easton, v. 44, n. 7, p. 2624-2631, 2010.