

## Estoques de biomassa e carbono na Amazônia brasileira: uma nova abordagem

### *Biomass and carbon stocks in the Brazilian Amazon: a new approach*

Luani Rosa de Oliveira Piva<sup>1</sup>, Carlos Roberto Sanquetta<sup>2</sup>, Jaime Wojciechowski<sup>3</sup>, Ana Paula Dalla Corte<sup>4</sup>

**RESUMO:** A floresta amazônica brasileira concentra um dos maiores estoques de biomassa viva e carbono no planeta. Dada sua importância como sumidouro de carbono, estudos de quantificação de biomassa nesta floresta tropical são imprescindíveis para se buscar um maior entendimento nas questões ligadas às mudanças climáticas. Entretanto, há de se destacar que dados relativos a inventários de biomassa e carbono no Brasil, atualmente, são escassos ou encontram-se de maneira dispersa em diversas bases de dados, muitas vezes com acesso restrito. Nesse sentido, iniciativas de dados abertos (*open data*) para inventários florestais na Amazônia brasileira são necessárias. No presente estudo, foi feita uma abordagem inédita com dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL - disponibilizados na plataforma BDIA - utilizando o método *bootstrap* de reamostragem, para estimativas de biomassa e carbono no bioma Amazônia. O Processo KDD (*Knowledge Discovery in Databases*) foi utilizado para extrair informações da base de dados brutos. Três equações para Floresta Ombrófila Densa e duas para Floresta Ombrófila Aberta foram utilizadas, para árvores de grande porte (DAP  $\geq$  30 cm). Os resultados indicaram que estimativas de biomassa a partir da equação de Chambers *et al.* (2001) apresentaram menores valores de erro padrão e viés, para dados de Floresta Ombrófila Densa. Para dados de Floresta Ombrófila Aberta, melhores resultados foram encontrados nas estimativas a partir da equação de Nogueira *et al.* (2008) [2]. Pode-se concluir que essas duas equações são as mais indicadas nas estimativas de biomassa e carbono para os dados analisados. Além disso, a análise, limitada a árvores de grande porte, indicou que estas são representativas na composição total dos estoques de biomassa e carbono no bioma Amazônia (~163 Mg.ha<sup>-1</sup>, para Floresta Densa, comparado a valores da literatura, de 250-350 Mg.ha<sup>-1</sup>).

**Palavras-chave:** Dados abertos. Floresta amazônica. Método *bootstrap*. Plataforma BDIA. Processo KDD.

**ABSTRACT:** The Brazilian Amazon rainforest concentrates one of the largest stocks of biomass and carbon on the planet. Given its importance as a carbon sink, studies on the quantification of biomass in this tropical forest are essential to seek greater understanding of issues related to climate change. However, data relating to biomass and carbon inventories in Brazil are currently scarce or found in a dispersed manner in several databases, often with restricted access. In the present study, an unprecedented approach was made with forest inventory data from the RADAMBRASIL Project - available on the BDIA platform - using the resampling bootstrap method, for biomass and carbon estimates in the Amazon Biome. The KDD Process was used to extract information from the raw database. Three equations for Ombrophilous Dense Forest and two for Open Ombrophilous Forest were used, for large trees (DBH  $\geq$  30 cm). The results showed that biomass estimates from Chambers *et al.* (2001) equation

<sup>1</sup> Discente de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

<sup>2</sup> Docente Titular do Departamento de Ciências Florestais (DECIF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

<sup>3</sup> Docente Titular do Setor de Educação Profissional e Tecnológica (SEPT) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

<sup>4</sup> Docente do Departamento de Ciências Florestais (DECIF), nível Associado I, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba (PR), Brasil.

presented lower values of standard error and bias, for Ombrophilous Dense Forest data. Better results were found in the estimates from the equation of Nogueira *et al.* (2008) [2], for Open Ombrophilous Forest data. It can be concluded that these two equations are the most indicated in the estimates of biomass and carbon for the analyzed data. In addition, the analysis indicated that larger trees are representative of the total composition of the biomass and carbon stocks in the Amazon Biome (~163 Mg.ha<sup>-1</sup>, for Dense Forest, compared to literature values, of 250-350 Mg.ha<sup>-1</sup>).

**KEYWORDS:** Amazon rainforest. BDIA plataforma. Bootstrapp method. KDD process. Open data.

**Autor correspondente:**

Luani Rosa de Oliveira Piva: [luanipiva@yahoo.com.br](mailto:luanipiva@yahoo.com.br)

Recebido em: 08/06/2020

Aceito em: 05/12/2020

2

## INTRODUÇÃO

A partir de registros climáticos de 1880-2012, constatou-se um aumento da temperatura média global de 0,85 °C (IPCC, 2014), sendo que 2019 foi registrado como o ano com segunda maior temperatura dos últimos 140 anos, atrás apenas de 2016 (NOAA, 2019). Esse período foi marcado por sucessões de eventos climáticos extremos - como inundações, ondas de calor, secas e ciclones tropicais - cuja ocorrência (em frequência e magnitude) tem-se acentuado ano após ano.

O aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEEs) de origem antropogênica (i.e., processos industriais e combustíveis fósseis) desde a era pré-industrial - tais como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) - tem sido o principal fator agravante das mudanças no clima do planeta (IPCC, 2014). Portanto, estratégias globais de mitigação são necessárias para reduzir a concentração de GEEs na atmosfera, com ênfase no CO<sub>2</sub>, a fim de diminuir a frequência e impactos negativos de eventos climáticos extremos. Dentre essas estratégias, destacam-se a redução das emissões por queima de combustíveis fósseis, a redução da queima de material vegetal e o sequestro do carbono pelas florestas naturais e plantações florestais (SILVEIRA *et al.*, 2008).

Visando atingir as metas estabelecidas por tais acordos e tratados do clima, a obtenção de estimativas confiáveis da quantidade de biomassa estocada nas florestas é imprescindível, uma vez que, por meio do processo de fotossíntese, as plantas atuam como verdadeiros sumidouros de carbono e, dessa forma, contribuem para a redução das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera (PHILLIPS *et al.*, 1998; NOBRE, 2001). A partir dos valores de biomassa florestal é possível estimar os estoques de carbono, que, por sua vez, são utilizados para estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida ou sequestrada da atmosfera, no tempo e no espaço (HIGUCHI *et al.*, 1998; HIGUCHI *et al.*, 2004).

Cabe destacar que, nas estimativas de biomassa em florestas tropicais, há um alto grau de incerteza associada, inerente às medições em áreas territoriais extensas, como também aos

diferentes tipos de vegetação encontrados nesses ecossistemas (NOGUEIRA *et al.*, 2008; LONGO *et al.*, 2016). Com o intuito de reduzir esse grau de incerteza nas estimativas de biomassa, a elaboração de mapas pantropicais de biomassa e carbono - baseados em observações de imagens de satélite utilizando dados LiDAR -, tem sido recomendada por muitos autores (SAATCHI *et al.*, 2011; OMETTO *et al.*, 2014; AVITABILE *et al.*, 2016; LONGO *et al.*, 2016). Porém, em ambientes tropicais, a condução de inventários florestais para obtenção de estimativas de biomassa e carbono é uma prática recorrente. Para tanto, utiliza-se de métodos diretos (obtenção da biomassa em laboratório) e indiretos (equações alométricas) (BROWN *et al.*, 1989).

Entretanto, dados brutos de inventários florestais no Brasil ainda são escassos ou encontram-se de maneira dispersa em diversas bases de dados, muitas vezes com acesso restrito, limitando a realização de estudos interdisciplinares. Na floresta amazônica brasileira essa limitação é ainda maior, primeiro por conta da incipiência de trabalhos recentes conduzidos por órgãos ou instituições públicos - datados dos últimos 10 anos. Além disso, o uso dos dados existentes restringe-se a determinados órgãos governamentais ou institutos. Levando em conta que no bioma Amazônia encontra-se um dos maiores estoques de biomassa e carbono do planeta (PHILLIPS *et al.*, 2009; PAN *et al.*, 2011; FELDPAUSCH *et al.*, 2012), torna-se fundamental a implementação de iniciativas para disponibilidade integral de dados de vegetação.

Nesse ponto, deve-se destacar a importância de iniciativas de dados abertos (*open data*) e políticas de acesso livre por parte de governos e órgãos públicos, como ocorrem em países da Europa e da América do Norte. Pode-se citar o Programa de Dados Abertos dos Estados Unidos (U.S. GOVERNMENT, 2019), o Portal de Dados Abertos do Reino Unido (U.K. GOVERNMENT, 2019) e o Programa Joinup da União Europeia (EUROPE UNION, 2019). No Brasil, destaque para a plataforma Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (IBGE, 2019a), coordenada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

Na área ambiental, algumas bases de dados abertos podem ser citadas, como é o caso das plataformas BDIA (Banco de Dados de Informações Ambientais), Terrabrasilis (desenvolvido pelo INPE), e SIGMA (desenvolvido pelo INPE/CPTEC). A plataforma BDIA - da qual os dados do presente artigo foram extraídos - disponibiliza, *on-line* e gratuitamente, dados obtidos pelo Projeto RADAMBRASIL, que teve duração de 15 anos (1970-1985) no âmbito do Ministério de Minas e Energia do Brasil.

O Projeto RADAMBRASIL realizou o mapeamento do território brasileiro, em todos os biomas, por meio de imagens de radar, em escala 1:1.000.000, configurando-se como o maior projeto mundial de cobertura radargramétrica efetuada com radar aerotransportado (IBGE, 2019b). Além disso, realizou-se o levantamento minucioso dos recursos naturais brasileiros para as seguintes áreas temáticas: Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Vegetação.

Diante do exposto, o objetivo do presente artigo foi realizar uma nova abordagem para os dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL (Estados do bioma Amazônia) -

por meio da aplicação do método *bootstrap* de reamostragem -, para estimar estoques de biomassa e carbono por parcela no bioma Amazônia, comparando o efeito da aplicação de equações alométricas específicas para as tipologias Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta. A hipótese de estudo é que árvores de grande porte ( $DAP \geq 30$  cm) são representativas na composição dos estoques de biomassa e carbono - valores totais e por hectare - em florestas tropicais.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 BASE DE DADOS

A base de dados utilizada para as estimativas de biomassa e carbono no presente artigo é oriunda de atividades de inventário florestal desenvolvidas ao longo do Projeto RADAMBRASIL, com informações disponíveis para *download* na plataforma digital BDIA - de acesso livre e disponível em <https://bdiaweb.ibge.gov.br/> - desenvolvida pelo IBGE. Os dados brutos de inventário florestal (denominados de “Pontos de Amostragem”) extraídos da plataforma BDIA contêm as seguintes informações: ID da parcela; família; autor que descreveu a família; classe comercial; aspecto do fuste; volume da madeira; circunferência à altura do peito de cada árvore (CAP), para indivíduos de porte grande, com  $CAP \geq 95$  cm (ou  $DAP \geq 30$  cm). Ademais, contêm informações da tipologia florestal, localização, descrição das áreas, entre outras, para cada parcela (exemplo de planilha pode ser acessado no Material Suplementar, Arquivo S1).

Foram selecionados dados para as duas tipologias florestais predominantes no Bioma Amazônia: Floresta Ombrófila Aberta e Floresta Ombrófila Densa (FOA e FOD, respectivamente). Portanto, a base de dados final contém as seguintes informações, de interesse para as análises propostas nesse estudo: local da parcela (Estado); ID da parcela; latitude ( $^{\circ}$  ' " ); longitude ( $^{\circ}$  ' " ); família; espécie; e DAP (em cm), após a divisão dos valores de CAP por  $\pi$ . A base de dados resultante é composta por 114.231 árvores, distribuídas em 2.012 parcelas (1 hectare cada), em 9 Estados brasileiros abrangidos pelo bioma Amazônia (Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Descrição dos dados utilizados

Tipologia	Nº árvores	Nº parcelas
Floresta Ombrófila Densa (FOD)	70.371	1.158
Floresta Ombrófila Aberta (FOA)	43.860	854
<b>Total</b>	<b>114.231</b>	<b>2.012</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Dados vetoriais de todos os pontos de amostragem de inventário do Projeto RADAMBRASIL também foram extraídos da plataforma BDIA (Material Suplementar, Arquivo S2). Dessa forma, foram feitos os *downloads* dos *shapefiles*, para cada Estado do bioma Amazônia, dos quais foram extraídas as informações das coordenadas UTM (*Easting and Northing*) de cada parcela de inventário florestal. As coordenadas UTM foram convertidas para coordenadas geográficas para fins de integração com outras plataformas (como o *Software JCarbon*©, detalhado a seguir), que aceitam, exclusivamente, a inserção de coordenadas no formato de graus e decimal de graus.

## 2.2 PROCESSO KDD

O Processo KDD (*Knowledge Discovery in Databases*) foi utilizado para extrair informações da base de dados brutos (*raw data*), obtidas na plataforma BDIA. Trata-se de um processo de extração de informações úteis em uma base de dados, de forma automática ou semiautomática, usualmente aplicada a largas bases de dados, com o intuito de tornar os dados viáveis à aplicação de análises qualitativas e quantitativas. As principais etapas do Processo de KDD consistem na seleção de dados, pré-processamento e limpeza, transformação, mineração de dados (etapa principal onde a extração de informações úteis é efetivamente realizada por meio de diversas técnicas, principalmente as técnicas de Inteligência Artificial), interpretação e avaliação e, por fim, obtenção do conhecimento. O passo a passo de todas as etapas KDD utilizadas no presente artigo encontra-se, de maneira mais detalhada, descrito no material suplementar (Material Suplementar, Figuras S1-S3).

## 2.3 EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS

Os valores de biomassa seca acima do solo foram quantificados a partir de equações alométricas (método indireto) ajustadas para o bioma Amazônia já consolidadas na literatura. Para conversão da biomassa fresca para biomassa seca, os valores obtidos pelas equações de Higuchi *et al.* (1998) e Silva (2007) foram multiplicados por um fator de 0,57 - tal qual proposto no trabalho de Silva (2007, Quadro 5.8c). Ao total, 5 equações foram selecionadas para as tipologias Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta (Tabela 2):

**Tabela 2.** Equações alométricas utilizadas nas estimativas de biomassa, para Floresta Densa e Floresta Aberta (Amazônia brasileira), a partir de dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL

Equação	Autor	Tipologia
$w = \exp(-0,151 + 2,17 * \ln(DAP)) * 0,57$	Higuchi <i>et al.</i> (1998)	FOD
$w = \exp(-0,37 + 0,333 * \ln(DAP) + 0,933 * \ln(DAP)^2 - 0,22 * \ln(DAP)^3)$	Chambers <i>et al.</i> (2001)	FOD
$w = (2,2737 * DAP^{1,9156}) * 0,57$	Silva (2007)	FOD
$w = -1,716 + 2,413 * \ln(DAP)$	Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	FOA
$w = -1,929 + 2,335 * \ln(DAP)$	Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]	FOA

Onde:  $w$  = biomassa seca, acima do solo, em Mg ha<sup>-1</sup>;  $DAP$  = diâmetro à altura do peito, em cm.

Nota: Parâmetros estatísticos para as equações alométricas: 1. Higuchi *et al.* (1998):  $R^2 = 0,90$ ; 2. Chambers *et al.* (2001):  $R^2 = 0,973$ ;  $MSE = 0,297$ ; 3. Silva (2007):  $R^2 = 0,94$ ;  $S_{yx} = 3,9\%$ ; 4. Nogueira *et al.* (2008) [1]:  $R^2 = 0,964$ ;  $SEE^* = 0,306$ ; 5. Nogueira *et al.* (2008) [2]:  $R^2 = 0,949$ ;  $SEE = 0,359$ .;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa, em porcentagem;  $MSE$  = erro quadrático;  $SEE$  = erro padrão da estimativa =  $\sqrt{\text{quadrado médio residual}}$ .

Fonte: Os autores (2020)

Foram escolhidas apenas equações alométricas que utilizam o DAP como variável independente, uma variável de fácil obtenção em inventários florestais no bioma Amazônia. Equações que utilizam a altura total como variável independente foram evitadas, uma vez que é uma variável considerada de difícil obtenção, devido à alta densidade de árvores (nº de indivíduos por unidade de área) na Floresta Amazônica, o que ocasiona medidas imprecisas dessa variável. Outras equações alométricas encontradas na literatura, que utilizam como variável independente a densidade da madeira, também foram evitadas, uma vez que seu valor varia muito entre as espécies arbóreas tropicais (NOGUEIRA *et al.*, 2008). Os valores obtidos por meio das equações, em quilogramas, foram divididos por mil, de tal forma a se obter os valores em Megagramas (Mg).

O cálculo do carbono estocado, em megagramas (Mg), foi realizado a partir dos valores de biomassa, de acordo com equação recomendada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006):

$$C = w * TC = w * 0,48 \quad (1)$$

Em que:  $C$  = carbono, em megagramas;  $w$  = biomassa, em megagramas;  $TC$  = teor de carbono. A concentração de carbono na vegetação amazônica está em torno de 48% (Higuchi; Carvalho Jr, 1994), valor este que está dentro dos limites de concentrações em florestas tropicais (entre 46 e 52%). Portanto, o teor de carbono aplicado na fórmula foi de 48% .

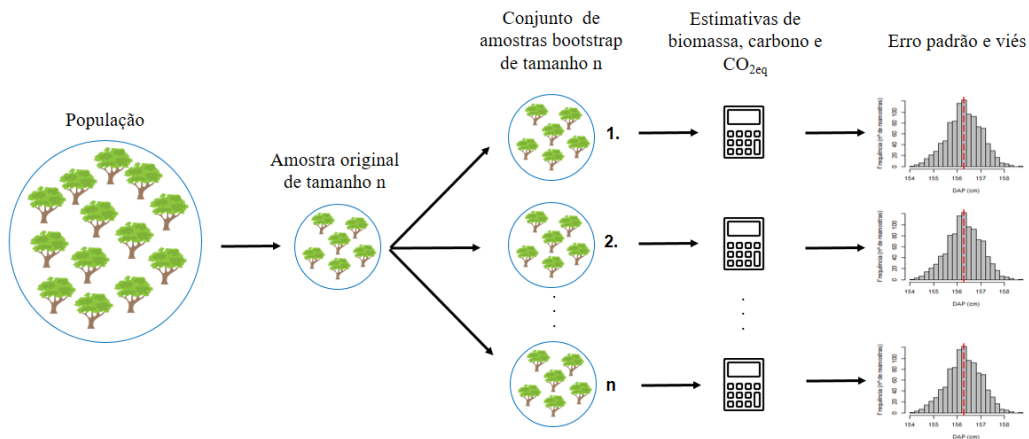
O teor de carbono equivalente ( $CO_{2eq}$ , em %), ou seja, o teor obtido após a conversão de carbono em  $CO_2$ , foi calculado a partir de uma taxa de conversão de 44/12 multiplicada pelo estoque de carbono, que corresponde à massa molecular do  $CO_2$  ( $\approx 44$  g/mol) dividida pela massa atômica do carbono ( $\approx 12$  g.mol<sup>-1</sup>) (IPCC, 2006).

$$CO_{2eq} = C * \frac{44}{12} \tag{2}$$

Em que:  $CO_{2eq}$  = teor de carbono equivalente, em megagramas; C = carbono, em megagramas.

#### 2.4 AMOSTRAGEM *BOOTSTRAP*

A técnica estatística de *bootstrapping* é um tipo de reamostragem na qual um grande número de amostras do mesmo tamanho é extraído, repetidamente e com reposição, de uma única amostra original (EFRON, 1979). Nesse estudo 1.000 amostras *bootstrap* ( $B = 1.000$ ) foram extraídas de uma amostra original (Figura 2). Para cada reamostra, foram calculados os estoques de biomassa ( $w$ ), carbono (C) e carbono equivalente ( $CO_{2eq}$ ) para cada equação.



**Figura 1.** Procedimento de reamostragem *bootstrap*, aplicada aos dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL, nos Estados do bioma Amazônia.

As estimativas *bootstrap* para média e erro padrão foram calculadas a partir das seguintes fórmulas (EFRON, 1979; STĘPIEŃ, 2016):

$$\bar{\theta}_B = \frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \hat{\theta}_b \tag{3}$$



$$\hat{s}_B = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^B (\bar{\theta}_B - \hat{\theta}_b)^2}{B-1}} \quad (4)$$

Além disso, a estimativa *bootstrap* do viés (bias) também foi calculada, com base no valor B de reamostras (nesse estudo, B = 1.000):

$$\hat{b}_B = \bar{\theta}_B - \hat{\theta} \quad (5)$$

Todos os cálculos foram realizados no *software* R (R CORE TEAM, 2013), utilizando os pacotes *ggplot2* (WICKHAM, 2016) e *ggpubr* (KASSAMBARA, 2020) na elaboração dos gráficos. Os *scripts* elaborados pelos autores podem ser acessados no Material Suplementar (Arquivo S3).

## 2.5 INTEGRAÇÃO COM O SOFTWARE JCARBON©

Os resultados do presente estudo (estimativas de biomassa e carbono; coordenadas geográficas de cada parcela) serão integrados ao *software* JCarbon©, desenvolvido e criado por Wojciechowski (2015). O *software* JCarbon©, programado em linguagem Java, é um sistema para auxiliar nas estimativas de volume, biomassa e carbono em diversas tipologias florestais (WOJCIECHOWSKI, 2015). Os dados disponibilizados no JCarbon© podem ser acessados, livre e gratuitamente, no sítio <http://www.jcarbon.ufpr.br:28080/jcarbon/Home>.

Esse *software* possui um banco de dados capaz de armazenar informações de locais cadastrados, os quais podem ser visualizados espacialmente com o *Google Maps*©. Tais informações compreendem, além dos dados básicos dos locais como localização, dimensões das árvores, equações e modelos utilizados para os cálculos, os valores totais de biomassa e carbono calculados automaticamente. Além disso, baseando-se nas premissas de *open data*, a integração com o *software* JCarbon© permitirá que qualquer usuário do Brasil e do mundo possa acessar e compartilhar as informações de estoques de biomassa e carbono relatadas no presente estudo.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

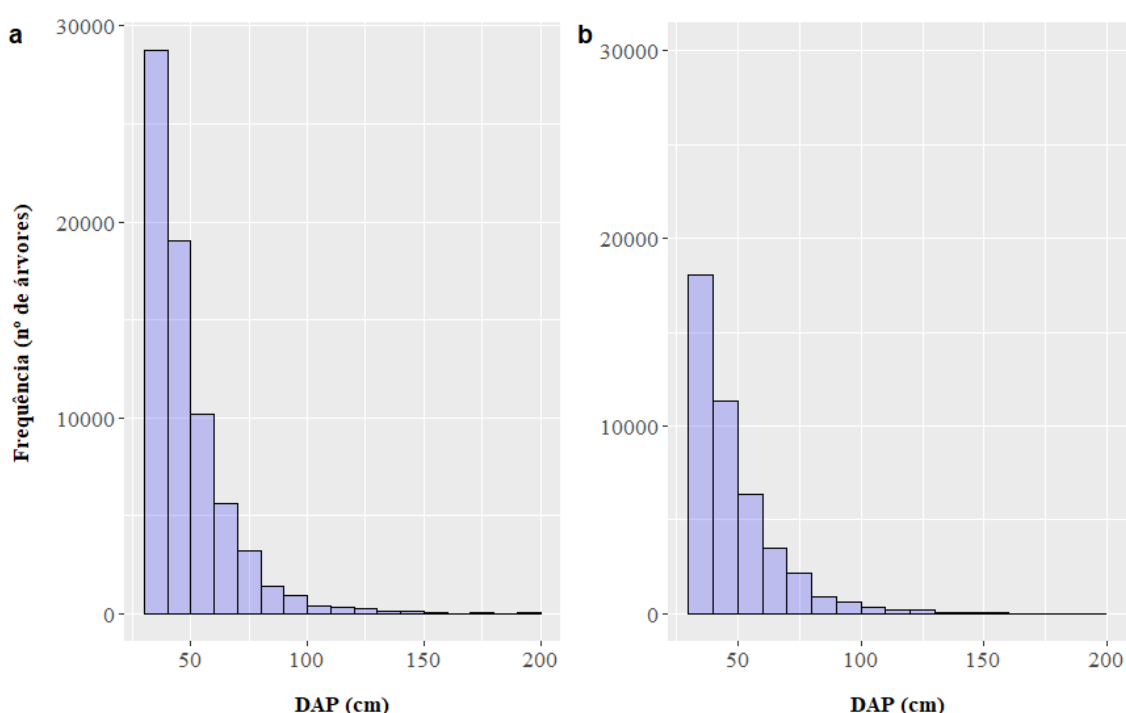
### 3.1 DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA

A distribuição diamétrica dos indivíduos arbóreos para Floresta Densa segue o padrão decrescente, em forma de “J invertido”, característico de florestas tropicais. O maior número



de indivíduos está na classe 30-40 cm (28.737), seguida pelas classes 40-50 cm (19.010) e 50-60 cm (10.172). Essas três classes diamétricas contemplam 84% dos indivíduos de Floresta Densa (Figura 3.a).

Para dados de Floresta Aberta, o mesmo padrão de distribuição “J invertido” pode ser observado (Figura 3.b). Nota-se, no entanto, um menor número total de indivíduos arbóreos quando comparada à Floresta Densa, o que reflete a composição dessa tipologia, uma vez que a Floresta Aberta é caracterizada por uma menor densidade de indivíduos por unidade de área. O maior número de indivíduos encontra-se, tal qual na Floresta Densa, nas classes 30-40 cm (18.054 indivíduos), 40-50 cm (11.132) e 50-60 cm (6.371). Essas classes contemplam 82% dos indivíduos arbóreos para a tipologia Floresta Aberta.



**Figura 2.** Distribuição diamétrica dos indivíduos no bioma Amazônia, para as tipologias Floresta Ombrófila Densa - 1.158 parcelas - (a) e Floresta Ombrófila Aberta - 854 parcelas - (b), a partir dos dados de Inventário Florestal do Projeto RADAMBRASIL.

A análise de distribuição diamétrica - para árvores com  $DAP \geq 30$  cm - denota a importância das tipologias Floresta Densa e Floresta Aberta na composição arbórea do bioma Amazônia, assim como sua relevante importância na diversidade de espécies, conservação e biodiversidade desse bioma (RIBEIRO *et al.*, 1999; HOPKINS, 2007). Ademais, resultados obtidos a partir dessa distribuição possibilitam a realização de outras análises, tais como estimativas de biomassa, carbono e  $CO_{2eq}$  para as tipologias florestais aqui estudadas. Somente na abordagem conduzida no presente estudo (que não compõe a totalidade de dados disponibilizados pelo BDIA para o Bioma Amazônia), cerca de 114.000 indivíduos arbóreos

foram analisados, denotando o grande esforço amostral nas atividades de inventário florestal conduzidos pelo Projeto RADAMBRASIL.

Entretanto, desde a execução do Projeto RADAM - portanto, desde meados das décadas de 1970 e 1980 -, poucas iniciativas de inventário florestal, de grande abrangência territorial, foram conduzidas no bioma Amazônia, devido à complexidade logística e vasta extensão dos Estados que compõem esse bioma. Nesse ponto, vale destacar a iniciativa do Serviço Florestal Brasileiro na implementação do Inventário Florestal Nacional (IFN), a partir de 2007, com atividades conduzidas em cada Estado da Federação (CTN-IFN/BR, 2007). Contudo, as atividades do IFN nos Estados que compõem o bioma Amazônia ainda não têm data prevista para serem concluídas. Porém, assim que os resultados forem publicados e disponibilizados, análises podem ser abordadas, tais quais as conduzidas no presente estudo, para fins de comparação dos resultados do IFN com os resultados do Projeto RADAMBRASIL.

### 3.2 ESTOQUES DE BIOMASSA E CARBONO

Valores de biomassa, carbono e remoções de CO<sub>2eq</sub> foram calculados, a partir de cada equação de Floresta Ombrófila Densa e Florestas Ombrófila Aberta, para cada uma das 2.012 parcelas analisadas, em megagramas (Mg) e megagramas por hectare (Mg.ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Para dados de Floresta Densa, valores estimados a partir da equação de Higuchi *et al.* (1998) foram inferiores aos valores estimados por meio das outras equações, de Chambers *et al.* (2001) e Silva (2007), para biomassa, carbono e CO<sub>2eq</sub>. Os totais de biomassa seca acima do solo para as 3 equações foram 180.982,8 (equação de Higuchi *et al.*, 1998), 181.529,7 (equação de Chambers *et al.*, 2001) e 203.150,2 Mg (equação de SILVA, 2007). Os valores de biomassa, após a conversão para Mg de carbono, resultaram nas magnitudes de 86.871,74 Mg, 87.134,25 e 97.752,10 Mg, para as equações de Higuchi *et al.* (1998), Chambers *et al.* (2001) e Silva (2007), respectivamente. Os teores de carbono equivalente (CO<sub>2eq</sub>), ou seja, o teor obtido após a conversão de carbono em Mg de CO<sub>2</sub>, foram de 318.529,7; 319.492,3; e 358.424,4 Mg, para as 3 equações avaliadas (Tabela 3). Essas estimativas correspondem aos valores totais de GEEs que deixaram de ser emitidos (floresta em pé), durante o período em que os levantamentos florestais foram realizados, no total de parcelas de Floresta Densa avaliadas, ou seja, em 1.158 hectares dessa tipologia.

A similaridade nos valores obtidos por meio das equações de Higuchi *et al.* (1998) e Chambers *et al.* (2001) pode ser justificada pelo fato de que ambos os estudos foram conduzidos em Floresta Densa de Terra Firme, localizadas na Amazônia Central. A diferença entre as modelagens realizadas por esses autores se dá pelo fato de que Chambers *et al.* (2001) utilizaram um modelo cúbico (Tabela 2), com intensidade amostral de n = 315, e baixo valor de erro quadrático médio (MSE = 0,297). Em contrapartida, Higuchi *et al.* (1998) testaram somente modelos lineares, três ao total, utilizando o DAP como variável dependente, sendo que

a equação utilizada no presente estudo é indicada para valores de DAP  $\geq 20$  cm. Portanto, pode-se explicar diferenças nas estimativas entre as duas equações. Silva (2007) testou um modelo em potência ( $n = 494$ ), o qual resultou boas métricas estatísticas:  $R^2 = 0,94$ ;  $s_{yx} = 3,9\%$ . Tal qual no presente estudo, os valores de biomassa estimados pela equação de Silva (2007) também resultaram superestimativas, quando comparados às estimativas por meio de outras equações (NOGUEIRA *et al.*, 2008; MELLO; SALES; ROSA, 2016).

Nas estimativas de biomassa por hectare, tal qual nas estimativas totais, observou-se subestimativas dos valores calculados a partir da equação de Higuchi *et al.* (1998) - 156,29  $\text{Mg.ha}^{-1}$ ; superestimativas dos valores a partir da equação de Silva (2007) - 175,86  $\text{Mg.ha}^{-1}$ ; e valores intermediários para a equação de Chambers *et al.* (2001) - 156,76  $\text{Mg.ha}^{-1}$ . Para os estoques de carbono, os valores de 75,02  $\text{Mg.ha}^{-1}$ , 75,25  $\text{Mg.ha}^{-1}$  e 84,15  $\text{Mg.ha}^{-1}$  foram estimados, para Higuchi *et al.* (1998), Chambers *et al.* (2001) e Silva (2007), respectivamente. Em estudos cujas estimativas de biomassa foram obtidas pelo método indireto (i.e., por meio de equações alométricas), em Floresta Densa na Amazônia brasileira, os valores de biomassa viva acima do solo variaram consideravelmente, de 142,3  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (FEARNSIDE; LEAL; FERNANDES, 1993) a 268  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (BROWN; LUGO, 1992). De acordo com Higuchi *et al.* (1998), há discrepâncias nas estimativas de biomassa com o passar do tempo, no ajuste de novas equações, mesmo que estas sejam desenvolvidas pelos mesmos autores e utilizando-se o mesmo banco de dados, o que pode ser justificado pelo uso de diferentes métodos (diretos e indiretos) e pelo uso de diferentes variáveis de entrada nos modelos (DAP; DAP e altura; DAP, altura e densidade).

Mello, Sales e Rosa (2016), ao aplicarem equações alométricas para estimar a biomassa em mais de 16.000 árvores no Estado do Pará, encontraram variações de 196  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (por meio da equação de BROWN *et al.*, 1989) a 255  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (por meio da equação de Higuchi *et al.*, 1998). Esses valores, no entanto, encontram-se abaixo da média de biomassa/ha estimada para Floresta Densa na Amazônia (BROWN; LUGO, 1992; FEARNSIDE; LEAL; FERNANDES, 1993; MAIA ARAÚJO; HIGUCHI; DE CARVALHO, 1999). Os autores argumentam que os valores mais baixos de biomassa/ha encontrados podem ser atribuídos ao fato de que os dados das diferentes tipologias florestais analisados na pesquisa (Floresta em Degradação, Floresta Densa e Floresta em Regeneração) não foram estratificados antes de serem estimados os valores de biomassa a partir de equações alométricas testadas.

No presente estudo, as estimativas de biomassa em Floresta Densa (156-175  $\text{Mg.ha}^{-1}$ ) e carbono (75-84  $\text{Mg.ha}^{-1}$ ) denotam a importância de árvores de grande porte (nesse caso, DAP  $\geq 30$  cm) nos estoques de biomassa e carbono na floresta amazônica, corroborando estudos que indicam a influência do tamanho das árvores na quantidade de carbono estocado (FAUSET *et al.*, 2015), corroborando a hipótese de pesquisa do presente estudo. Além disso, quando comparados aos valores médios de biomassa para a floresta amazônica encontrados na literatura, de 250-350  $\text{Mg.ha}^{-1}$  (SAATCHI *et al.*, 2011; AVITABILE *et al.*, 2016), considerando

árvores de todas as classes diamétricas, os resultados do presente artigo têm importante significado para o entendimento do ciclo global do carbono nesse bioma tropical. Ademais, estudos relacionados ao total de biomassa e carbono para avaliação dos valores estimados a partir de equações alométricas (HIGUCHI *et al.*, 1998; NOGUEIRA *et al.*, 2008), realizando a estratificação dos dados para as tipologias Floresta Densa e Floresta Aberta, são de suma relevância, uma vez que essas tipologias representam cerca de 60% da composição florestal do bioma Amazônia (MMA, 2006).

A mesma análise foi realizada para dados de Floresta Aberta, com estimativas dos valores totais de biomassa, carbono e CO<sub>2eq</sub>, a partir das 2 equações de Floresta Aberta, para cada uma das 854 parcelas. Para todas as variáveis, estimativas obtidas a partir da equação de Nogueira *et al.* (2008) [2] foram inferiores aos valores obtidos a partir da equação Nogueira *et al.* (2008) [1], para valores totais e por hectare. Os valores de biomassa total, carbono total e CO<sub>2eq</sub> total pela equação de Nogueira *et al.* (2008) [1] foram: 115.524,4; 55.451,7; e 203.322,9 Mg, respectivamente. Já ao se utilizar a equação Nogueira *et al.* (2008) [2], os valores encontrados foram: 67.482,8 Mg de biomassa total, 32.391,8 Mg de carbono total e 118.769,8 t de CO<sub>2eq</sub>; portanto, os valores obtidos pela equação [2] corresponderam a, aproximadamente, metade dos valores obtidos pela equação [1]. Essa variação nos valores estimados pode ser justificada pelo fato de que a equação [1] foi ajustada para a obtenção do peso seco de biomassa (em kg) da “Árvore inteira” (fuste, copa e galhos) (NOGUEIRA *et al.*, 2008, Tabela 2); já a equação [2], para o mesmo conjunto de dados (n = 262), foi ajustada para a obtenção apenas do peso seco (em kg) do “Fuste”, resultando, portanto, menores valores de biomassa, carbono e CO<sub>2eq</sub> estimados. Ademais, para a equação [2] de Nogueira *et al.* (2008), menores valores de viés e erro padrão foram encontrados (Material Suplementar, Tabela S2). Esses resultados denotam que, mesmo para um mesmo conjunto de dados, as estimativas de biomassa e carbono podem variar consideravelmente, de acordo com os diferentes compartimentos das árvores para os quais deseja-se obter estimativas.

Nogueira *et al.* (2008) também compararam estimativas de biomassa em seu conjunto de dados (Florestas Abertas no Sul da Amazônia), utilizando as mesmas equações aplicadas nesse artigo (para Florestas Densas). Foi constatado que a equação de Silva (2007) apresentou maiores divergências, em porcentagem, de biomassa estimada, além de superestimativa dos valores de biomassa a partir da equação de Chambers *et al.* (2001), corroborando os resultados obtidos para Floresta Densa, descritos acima.

Os resultados obtidos para dados de Floresta Aberta, por hectare, também refletem as diferenças nas equações de Nogueira *et al.* (2008) [1] e [2], para “Árvore inteira” e “Fuste”, respectivamente. Os valores foram de 135,3 Mg.ha<sup>-1</sup> de biomassa, 64,93 Mg.ha<sup>-1</sup> de carbono e 238,01 Mg.ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2eq</sub>, para a equação [1]; 79,02 Mg.ha<sup>-1</sup> de biomassa, 37,93 Mg.ha<sup>-1</sup> de carbono e 139,07 Mg.ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2eq</sub>, para a equação [2]. A formação Floresta Aberta é definida como um tipo de transição da Floresta Densa, caracterizada pela presença de cipós e palmeiras,

onde observa-se menor densidade de indivíduos arbóreos por unidade de área. Apesar das Florestas Abertas corresponderem a cerca de 21% da cobertura florestal no bioma Amazônia (MMA, 2006), há uma incipiência de estudos com enfoque nessa tipologia florestal, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de equações alométricas e estimativas dos estoques de biomassa na Amazônia brasileira (NOGUEIRA *et al.*, 2008). Os resultados aqui obtidos denotam a importância das Florestas Abertas, tais quais as Florestas Densas, como importantes estocadoras de biomassa e sumidouros de carbono, na floresta amazônica brasileira.

Análises das estimativas de CO<sub>2eq</sub>, tal qual procedidas no presente estudo, além de serem inéditas para dados de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL, são também relevantes para análises comparativas entre os valores de GEEs que deixaram de ser emitidos na época desses levantamentos e valores de GEEs armazenados atualmente por indivíduos de Floresta Densa na floresta amazônica. Nesse estudo, os estoques de CO<sub>2eq</sub> em parcelas de Floresta Densa variaram de 275-309 Mg.ha<sup>-1</sup>. Ademais, os resultados das estimativas de CO<sub>2eq</sub>, em Mg.ha<sup>-1</sup>, denotam a importância de árvores com DAP ≥ 30 nos estoques de carbono no bioma Amazônia - denotando seu papel como sumidouros de GEEs -, em remanescentes florestais das décadas de 70 e 80, época em que os levantamentos do Projeto RADAMBRASIL foram realizados.

**Tabela 3.** Valores de Biomassa, Carbono e CO<sub>2eq</sub> totais (Mg), calculados por meio de cada equação, bem como os valores de Biomassa, Carbono e CO<sub>2eq</sub> por hectare (Mg.ha<sup>-1</sup>), para as tipologias Floresta Densa (1.158 parcelas) e Floresta Aberta (854 parcelas), a partir dos dados de Inventário Florestal do Projeto RADAMBRASIL no bioma Amazônia, em inventários florestais realizados nos anos de 1970-1985

Mg									
Tipologia	Biomassa: Higuchi <i>et al.</i> (1998)	Biomassa: Chambers <i>et al.</i> (2001)	Biomassa: Silva (2007)	Carbono: Higuchi <i>et al.</i> (1998)	Carbono: Chambers <i>et al.</i> (2001)	Carbono: Silva (2007)	CO <sub>2eq</sub> : Higuchi <i>et al.</i> (1998)	CO <sub>2eq</sub> : Chambers <i>et al.</i> (2001)	CO <sub>2eq</sub> : Silva (2007)
Floresta Densa	180.982,8	181.529,7	203.650,2	86.871,74	87.134,25	97.752,10	318.529,7	319.492,3	358.424,4
Mg.ha <sup>-1</sup>									
Tipologia	Biomassa: Higuchi <i>et al.</i> (1998)	Biomassa: Chambers <i>et al.</i> (2001)	Biomassa: Silva (2007)	Carbono: Higuchi <i>et al.</i> (1998)	Carbono: Chambers <i>et al.</i> (2001)	Carbono: Silva (2007)	CO <sub>2eq</sub> : Higuchi <i>et al.</i> (1998)	CO <sub>2eq</sub> : Chambers <i>et al.</i> (2001)	CO <sub>2eq</sub> : Silva (2007)
Floresta Densa	156,289	156,761	175,864	75,019	75,245	84,415	275,069	275,900	309,520
Mg									
Tipologia	Biomassa: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	Biomassa: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]	Carbono: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	Carbono: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]	CO <sub>2eq</sub> : Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	CO <sub>2eq</sub> : Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]			
Floresta Aberta	115.524,4	67.482,83	55.451,71	32.391,76	203.322,9	118.769,8			
Mg.ha <sup>-1</sup>									
Tipologia	Biomassa: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	Biomassa: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]	Carbono: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	Carbono: Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]	CO <sub>2eq</sub> : Nogueira <i>et al.</i> (2008) [1]	CO <sub>2eq</sub> : Nogueira <i>et al.</i> (2008) [2]			
Floresta Aberta	135,275	79,020	64,932	37,929	238,083	139,074			

### 3.3 COMPARAÇÃO DAS EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS

Para todas as variáveis estimadas para Floresta Densa (biomassa, carbono e CO<sub>2eq</sub>, total e por hectare), estimativas pela equação de Chambers *et al.* (2001) resultaram nos menores valores de erro padrão e viés (Material Suplementar, Tabelas S1-S2). Portanto, para os dados de floresta densa avaliados no presente estudo, essa equação apresentou melhor desempenho nas estimativas das variáveis de interesse, sendo, então, considerada a mais indicada para as estimativas a partir do conjunto de dados. As estimativas pela equação de Higuchi *et al.* (1998) resultaram nos valores mais elevados de erro padrão e viés; já as estimativas pela equação de Silva (2007) indicaram valores intermediários de erro padrão e viés.

Para as equações de Floresta Aberta, a de Nogueira *et al.* (2008) [2] apresentou valores de erro padrão e viés significativamente inferiores aos valores da equação [1], dos mesmos autores, para todas as variáveis estimadas. A equação [2], desenvolvida para o compartimento “Fuste”, foi considerada a mais indicada para estimar os estoques de carbono e biomassa, para as parcelas de inventário florestal do Projeto RADAMBRASIL analisadas no presente artigo.

Ademais, histogramas da distribuição dos valores de biomassa/ha, estimados para todas as amostras *bootstrap* - para cada equação e tipologia florestal - indicam a distribuição normal dos dados, corroborando a descrição teórica do método *bootstrap*, na qual comprova-se que, quanto maior o número de amostras *bootstrap*, maior é a tendência à distribuição normal dos dados (Figuras S4.a; S4.b; S4.c) (EFRON, 1979; STEPIEŇ, 2016). Os histogramas também incluem uma linha vertical pontilhada, na cor vermelha, que indica a localização das médias de biomassa/ha. A distribuição das amostras *bootstrap* para a equação de Chambers *et al.* (2001), além de ter apresentado menores valores de erro padrão e viés, foi a que se mostrou mais próxima à distribuição normal (Figura S4.b)

Para dados de Floresta Aberta, a equação de Nogueira *et al.* (2008) [2] apresentou uma distribuição amostral mais semelhante à normal, quando comparada à equação [1] (Figuras S5.a e S5.b). Ademais, gráficos Quantil-Quantil (Q-Q) foram também gerados, comparando os quantis das amostras, isto é, valores de biomassa/ha gerados para cada equação (eixo y), aos quantis teóricos, calculados a partir das estimativas dos parâmetros (média e desvio padrão) da distribuição normal padrão (eixo x) (Figuras S4.d; S4.e; S4.f; Figuras S5.c e S5.d). A linearidade dos pontos sugere que os dados são normalmente distribuídos, para todas as equações avaliadas.



#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- As equações de Chambers *et al.* (2001) e Nogueira *et al.* (2008) [2] foram consideradas as mais indicadas para estimar valores de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta, respectivamente, para dados do Projeto RADAMBRASIL, devido aos menores valores de erro padrão (0,4142 e 0,5141, respectivamente) e viés (0,01965 e -0,003687, respectivamente) encontrados para estimativas de biomassa;
- Árvores de grande porte (DAP  $\geq$  30 cm) são representativas no montante total de biomassa e carbono estocados no bioma Amazônia, após o comparativo entre o valor médio encontrado neste estudo, para Floresta Densa ( $\sim$ 163 Mg.ha<sup>-1</sup>), com valores encontrados na literatura (250-350 Mg.ha<sup>-1</sup>), para biomassa viva acima do solo (contemplando todas as classes diamétricas);

#### 5 MATERIAL SUPLEMENTAR

No Material Suplementar do artigo constam três arquivos armazenados em repositório digital (*Dropbox*), sendo esses: 1. Exemplo de tabela de dados brutos extraída da plataforma BDiA; 2. Exemplo de dados vetoriais extraídos da plataforma BDiA; 3. Script R, elaborado para obtenção dos resultados e criação dos gráficos. *Link* de acesso: <https://www.dropbox.com/sh/258nd7o2a87zatg/AAAINnLkPYC8p9dOIpU8zaHJa?dl=0>. Ademais, consta no Material Suplementar uma descrição mais detalhada das etapas do Processo KDD, além de duas Figuras e duas Tabelas suplementares.

#### 6 AGRADECIMENTOS

Ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), junto à plataforma BDiA (Banco de Dados de Informações Ambientais), pelo fornecimento dos dados. Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão das bolsas de estudos que deram suporte à realização do presente artigo.

#### REFERÊNCIAS

AVITABILE, V.; HEROLD, M.; HEUVELINK, G. B. M.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; ASNER, G. P.; ARMSTON, J.; ASHTON, P. S.; BANIN, L.; BAYOL, N.; *et al.* An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. **Global Change Biology**, v. 22, n. 4, p. 1406-1420, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13139>

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. **Forest Science**, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/forestscience/35.4.881>

BROWN, S.; LUGO, A. E. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the brazilian amazon. **Interciencia**, v. 17, n. 1, 8-18, 1992. Disponível em: [http://philip.inpa.gov.br/publ\\_livres/Other%20side-outro%20lado/Brown%20&%20Lugo%20biomass/Brown%20and%20Lugo%201992-Aboveground%20biomass%20estimates.pdf](http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Other%20side-outro%20lado/Brown%20&%20Lugo%20biomass/Brown%20and%20Lugo%201992-Aboveground%20biomass%20estimates.pdf). Acesso em: 12 mar. 2020.

17

CHAMBERS, J. Q.; DOS SANTOS, J.; RIBEIRO, R.; HIGUCHI, N. Tree damage, allometric relationships, and aboveground net primary production in a tropical forest. **Forest Ecology and Management**, v. 152, p. 73-84, 2001. Disponível em: [https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/1401/Chambers\\_Santos\\_Ribeiro\\_and\\_Higuchi.pdf](https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/1401/Chambers_Santos_Ribeiro_and_Higuchi.pdf). Acesso em: 17 fev. 2020.

COMISSÃO TÉCNICA NACIONAL DO INVENTÁRIO FLORESTAL NACIONAL (CTN-IFN/BR). Projeto Inventário Florestal Nacional, 2007. Brasília: SFB/MMA. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/inventario-florestal-nacional>. Acesso em: mar. 2020.

EFRON, B. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. **Annals of Statistics**, v. 7, n. 1, p. 1-26, 1979. Disponível em: <https://projecteuclid.org/euclid.aos/1176344552>

EUROPE UNION. **Joinup**, 2019. Disponível em: <https://joinup.ec.europa.eu/>. Acesso em: 17 mar. 2020.

FAUSET, S.; JOHNSON, M. O.; GLOOR, M.; BAKER, T. R.; MONTEAGUDO, M. A.; BRIENEN, R. J. W.; FELDPAUSCH, T. R.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; MALHI, Y.; TER STEEGE, H.; *et al.* Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. **Nature Communications**, v. 6, p. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7857>

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. **AI Magazine**, v. 17, n. 3, p. 37-54, 1996. Disponível em: <https://www.aaai.org/ojs/index.php/aimagazine/article/view/1230>. Acesso em: 12 fev. 2020.

FEARNSIDE, P. M.; LEAL, N.; FERNANDES, F. M. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D9, 1993. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/93jd01140>

FELDPAUSCH, T. R.; LLOYD, J.; LEWIS, S. L.; BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, M.; MONTEAGUDO MENDOZA, A.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; BANIN, L.; ABU SALIM, K.; AFFUM-BAFFOE, K.; *et al.* Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 3381-3403, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>

HIGUCHI, N.; SANTOS, J. DOS; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da amazônia

brasileira. **Acta Amazonica**, v. 28 (2), p. 153-166, 1998. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aa/v28n2/1809-4392-aa-28-2-0153.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2020.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; DOS SANTOS, J.; RIBEIRO, R. J.; PINTO, A. C. M.; DA SILVA, R. P.; ROCHA, R. D. M.; TRIBUZY, E. S. Dinâmica E Balanço Do Carbono Da Vegetação Primária Da Amazônia Central. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 295-304, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rr.v34i3.2417>

18

HIGUCHI, N.; CARVALHO JR, J. In: **Emissão x Seqüestro de CO<sub>2</sub> - Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil**. Rio de Janeiro: CVRD, 1995. p. 125-153.

HOPKINS, M. J. G. Modelling the known and unknown plant biodiversity of the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 34, n. 8, p. 1400-1411, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01737.x>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais**. 2019a. Disponível em: <https://inde.gov.br/>. Acesso em: 12 fev. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados de Informações Ambientais**. 2019b. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 02 fev. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 04 mar. 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Acesso em: 02 mar. 2020.

KASSAMBARA, A. **Ggpubr: “ggplot2” Based Publication Ready Plots**. R package version 0.2.5. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ggpubr>. Acesso em: 05 abr. 2020.

LONGO, M.; KELLER, M.; DOS-SANTOS, M. N.; LEITOLD, V.; PINAGÉ, E. R.; BACCINI, A.; SAATCHI, S.; NOGUEIRA, E. M.; BATISTELLA, M.; MORTON, D. C. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639-1660, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/2016GB005465>

MAIA ARAÚJO, T.; HIGUCHI, N.; DE CARVALHO, J. A. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Para, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 117, n. 117, p. 43-52, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00470-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00470-8)

MELLO, L. N. DO C.; SALES, M. H. R.; ROSA, L. P. Analysis of results of biomass forest inventory in northeastern amazon for development of REDD+ carbon project.

**Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, n. 1, p. 55-64, 2016. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620140646>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Uso e Cobertura da Terra na Floresta Amazônica**. p. 154, 2006. Disponível em:  
[http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/amazonia/documentos/relatorio\\_final.pdf](http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/amazonia/documentos/relatorio_final.pdf). Acesso em: 04 mar. 2020.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). Disponível em: <https://climate.nasa.gov/news/2945/nasa-noaa-analyses-reveal-2019-second-warmest-year-on-record/>. Acesso em: 11 fev. 2020.

NOBRE, C. A. Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono? *In*: MMA. **Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia**. São José dos Campos, p. 197-224, 2001.  
NOGUEIRA, E. M.; FEARNside, P. M.; NELSON, B. W.; BARBOSA, R. I.; KEIZER, E. W. H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 11, p. 1853-1867, 2008. DOI:  
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.022>

OMETTO, J. P.; AGUIAR, A. P.; ASSIS, T.; SOLER, L.; VALLE, P.; TEJADA, G.; LAPOLA, D. M.; MEIR, P. Amazon forest biomass density maps: Tackling the uncertainty in carbon emission estimates. **Climatic Change**, v. 124, n. 3, p. 545-560, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-014-1058-7>

PAN, Y.; RICHARD, A.; PEKKA, E.; WERNER, A.; OLIVER, L.; SIMON, L.; JOSEP, G.; ROBERT, B.; STEPHEN, W.; DAVID, A. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, p. 988-993, 2011. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1201609>

PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; HIGUCHI, N.; LAURANCE, W. F.; NÚÑEZ, P. V.; VÁSQUEZ, R. M.; LAURANCE, S. G.; FERREIRA, L. V.; STERN, M.; BROWN, S.; *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. **Science**, v. 282, n. 5388, p. 439-442, 1998. DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.282.5388.439>

PHILLIPS, O. L.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LEWIS, S. L.; FISHER, J. B.; LLOYD, J.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, G.; MALHI, Y.; MONTEAGUDO, A.; PEACOCK, J.; QUESADA, C. A. *et al.* Drought sensitivity of the amazon rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344-1347, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1164033>

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing, version 3.0.2. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

RIBEIRO, J. E. L. S.; HOPKINS, M. J. G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C. A.; COSTA, M. D. S.; BRITO, J. D.; *et al.* **Flora da Reserva Ducke**: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra firme na Amazônia Central. Manaus: DFID/INPA, 1999. ISBN: 85-211-0011-6.

SAATCHI, S. S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E. T. A.;

SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 24, p. 9899-9904, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1019576108>

SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM)**, 2007. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) - Universidade Federal do Amazonas/Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 2007.

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**, v. 38, n. 1, p. 185-206, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v38i1.11038>

STĚPIEŇ, B. Bootstrap confidence intervals for noise indicators. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 102, n. 2, p. 389-397, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3813/AAA.918955>

U.K. GOVERNMENT. Disponível em: <https://data.gov.uk/support>. Acesso em: 12 fev. 2020.

U.S. GOVERNMENT. Disponível em: <https://www.data.gov/>. Acesso em: 12 fev. 2020.

WICKHAM, H. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. New York: Springer, 2016.

WOJCIECHOWSKI, J. **Jcarbon - Software na Web com data mining para estimativas de volume, biomassa e carbono em florestas**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2015.