



Universidade Federal do Amapá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais



JOSÉ DOUGLAS MONTEIRO DA COSTA

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA BIOMASSA FLORESTAL NO AMAPÁ

MACAPÁ - AP

2020

JOSÉ DOUGLAS MONTEIRO DA COSTA

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA BIOMASSA FLORESTAL NO AMAPÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. José Julio de Toledo

Coorientador: Dr. Paulo Eduardo Barni

MACAPÁ - AP

2020

JOSÉ DOUGLAS MONTEIRO DA COSTA

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA BIOMASSA FLORESTAL NO AMAPÁ

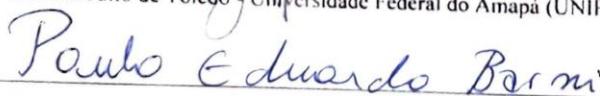
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2020.

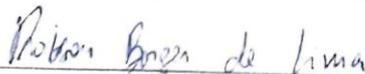
BANCA EXAMINADORA



Dr. José Julio de Toledo - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Dr. Paulo Eduardo Barni - Universidade Estadual de Roraima (UERR)



Dr. Robson Borges de Lima - Universidade do Estado do Amapá (UEAP)



Dr. Sávio Luis Carmona dos Santos - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Dra. Cinthia Pereira de Oliveira - Universidade do Estado do Amapá (UEAP)

RESUMO

COSTA, J. D. M. **Distribuição espacial da biomassa florestal no Amapá**. 46 f. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2020.

As florestas tropicais são essenciais para a mitigação das mudanças climáticas, pois armazenam grandes quantidades de carbono na biomassa e na matéria orgânica do solo. Há evidências de que as florestas do Escudo das Guianas estocam quantidades de biomassa mais elevadas, porém, incertezas sobre os estoques nessa região são grandes devido à escassez de dados de inventários e à falta de espacialização que leve em conta fatores determinantes da variação entre diferentes tipologias florestais. No entanto, redes padronizadas de inventários florestais fornecem uma alternativa para mitigar esse problema. O estudo teve como objetivo modelar a distribuição espacial do estoque total original de biomassa das florestas do Estado do Amapá, nordeste da Amazônia. Foram utilizados dados de inventários florestais em modelos de interpolação geostatística (krigagem), para gerar um mapa de distribuição espacial da biomassa florestal com alta resolução espacial. Os estoques de biomassa foram associados aos diferentes tipos florestais e usos da terra. O estoque total estimado foi de $5,66 \times 10^9$ Mg de biomassa em uma área de 107×10^3 km². A média de biomassa foi de $536 \pm 64,25$ Mg ha⁻¹ (mean \pm SD) e a média de estoque nas áreas protegidas ($535 \pm 64,69$ Mg ha⁻¹) foi maior do que nas áreas destinadas a uso em atividades agrosilvopastoris ($532 \pm 61,26$ Mg ha⁻¹), e estocaram cerca de 84% da biomassa florestal ressaltando a importância da manutenção das áreas protegidas para a manutenção dos estoques de carbono. O mapa produzido neste estudo é essencial para o balanço do carbono em diferentes escalas e traz evidências de que as florestas da região guardam os maiores estoques de carbono da Amazônia.

Palavras-chave: Estoque de carbono, Estoque de Biomassa, Desflorestamento, Áreas protegidas, REDD.

ABSTRACT

COSTA, J. D.M. **Spatial distribution of forest biomass in Amapá**. 46 p. Master Thesis – Department of Environment and Development, Federal University of Amapá, Macapá, 2020.

Tropical forests are essential for mitigating climate change, as they store large amounts of carbon in the biomass and organic matter in the soil. There is evidence that the Guiana Shield forests store higher quantities of biomass, however, uncertainties about stocks in this region are large due to the scarcity of inventory data and the lack of data spatialization that takes into account factors that determine the variation between different forest types. However, standardized networks of forest inventories provide an alternative to mitigate this problem. This study aimed to model the spatial distribution of the original total biomass stock of forests in the State of Amapá, northeastern of the Amazon. Data from forest inventories were used in geostatistical interpolation (kriging) models to generate a spatial distribution map of forest biomass with high spatial resolution. The stocks of biomass have been associated with different forest types and land uses. The total estimated stock was 5.66×10^9 Mg of biomass in an area of 107×10^3 km². The average biomass was 536 ± 64.25 Mg ha⁻¹ (mean \pm SD) and the average stock in protected areas (535 ± 64.69 Mg ha⁻¹) was higher than in areas allocated for agrosilvopastoral activities (532 ± 61.26 Mg ha⁻¹), storing about 84% of forest biomass, emphasizing the importance of maintaining protected areas for the conservation of forest carbon. The map produced in this study is essential for the carbon balance at different scales and brings evidence that the forests in the region hold the largest carbon stocks in the Amazon.

Keywords: Carbon stock, Biomass stock, Deforestation, Protected areas, REDD, GHG.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	8
2 REFERÊNCIAS	10
ARTIGO CIENTÍFICO	12
1. Introdução	14
2. Materiais e métodos	17
2.1. <i>Área de Estudo</i>	17
2.2. <i>Limites das fitofisionomias da floresta ombrófila densa</i>	20
2.3. <i>Estimativa da biomassa</i>	20
2.4. <i>Validação do modelo de interpolação</i>	23
2.5. <i>Critérios de validação</i>	23
2.6. <i>Modelagem e espacialização da biomassa</i>	23
2.7. <i>Mapas de biomassa por fitofisionomia</i>	27
2.8. <i>Biomassa nas Áreas Protegidas e nas áreas de uso agrossilvipastoril</i>	27
2.9. <i>Análise estatística</i>	28
3. Resultados	28
4. Discussão	37
5. Conclusão	41
Referências	42
Supplementary Material	46

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Amazônia brasileira é um dos grandes reservatórios de carbono principalmente na biomassa das árvores. A Floresta Amazônica é um importante componente do sistema terrestre, exercendo um papel indispensável no controle do clima e no balanço de carbono do mundo (Brown e Lugo, 1992; Fearnside, 1992; 1994; 1996; Fearnside et al., 2018). Porém, o processo de desflorestamento e degradação oculta (extração de madeira e fogo no sub-bosque) vem resultando na redução da capacidade da floresta de absorver e armazenar carbono.

No estado do Amapá o desflorestamento encontra-se quase na sua totalidade às proximidades das principais rodovias do estado e no ecótono entre savana e floresta. No biênio 2017-2018 a estimativa de desflorestamento em área de floresta foi de ordem de 82,15 km², que representou um decréscimo de 48,65% em relação ao biênio 2015-2016, que registou 160,01 km² (SEMA - AP, 2017; 2019). Mesmo com este decréscimo as Áreas Protegidas (Terras Indígenas e Unidades de Conservação) no estado do Amapá sofrem com o desflorestamento.

A quantificação do desflorestamento no biênio 2017-2018, para as Terras Indígenas, contabilizou um total de 15,08 km² e nas Unidades de Conservação, foi na ordem de 31,36 km², representando 56,53 % (46,44 km²) do desflorestamento detectado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA) (SEMA – AP, 2019), ou seja, no mínimo mais da metade do desmate detectado foi realizado ilegalmente no biênio 2017-2018. Nos anos de 2013 e 2014 o desflorestamento ilegal chegou a 50,13% (Costa et al., 2018).

Por isso, são necessárias estimativas precisas da distribuição da biomassa florestal para reduzir dúvidas na estimativa de estoque de carbono e, conseqüentemente, dos gases de efeito estufa (GEE) (Chave et al., 2004, 2014; Fearnside, 1997, 2000; Houghton et al., 2009; Houghton, 2010), proveniente do desflorestamento e da degradação ambiental associadas com a extração seletiva e com as queimadas. Vários grupos de pesquisadores e redes de monitoramento utilizam medições atmosféricas (LBA – DMIP) (De Gonçalves et al., 2013) e parcelas permanentes (RAINFOR: <http://www.rainfor.org/pt>, ATDN: <http://atdn.myspecies.info/> e CTFS: <https://forestgeo.si.edu/ctfs-forestgeo-worldwide-network-monitoring-forests-era-global-change>) para detectar as perdas e ganhos de carbono na floresta.

Iniciativas utilizando dados de inventários florestais realizados na década de 70 e 80 (principalmente do projeto RADAM Brasil) aliados a dados recentes coletados em campo e

informações da distribuição das diferentes fitofisionomias produziram estimativas da distribuição da biomassa florestal na Floresta Amazônica (Baccini et al., 2012; Barni et al., 2016; 2011; Nogueira et al., 2008, 2015; Saatchi et al., 2007, 2011).

No estado do Amapá existem dados de inventários pretéritos e também de inventários recentes da vegetação em áreas de floresta, porém ainda não foi realizado um trabalho sistemático para organizar esses dados e montar um mapa da distribuição da biomassa. O estado ainda possui boa parte da sua cobertura vegetal conservada, porém, o crescente avanço do desflorestamento ilegal em áreas de floresta aumentarão as emissões de carbono. Dessa forma, a determinação da quantidade e da distribuição da biomassa e carbono nas diferentes fitofisionomias do estado é essencial para a determinação das perdas futuras nos estoques de carbono. A hipótese do trabalho sugere que a média de biomassa florestal no Amapá estocam quantidades mais elevadas em relação a Amazônia Brasileira.

Nesse contexto, o objetivo geral desta dissertação foi modelar a distribuição espacial da biomassa da floresta ombrófila densa e avaliar o estoque original de biomassa (viva + morta, acima e abaixo do solo) do estado do Amapá. Para tanto, nossos objetivos específicos foram: (i) estimar a biomassa total a partir da expansão do volume comercial de inventários florestais realizados em florestas ombrófilas densas no Amapá e arredores; (ii) gerar um mapa de referência a partir da modelagem espacial da biomassa florestal usando técnicas geoestatísticas; (iii) determinar o conteúdo de biomassa (Mg ha^{-1}) em cada fitofisionomia de floresta ombrófila densa e perdas devido ao desmatamento, e (iv) estimar o estoque de biomassa original em Áreas Protegidas (AP) (Unidades de Conservação - UC, Terras Indígenas – TI e Áreas Quilombolas - AQ) e das Áreas de Uso Agrossilvipastoril (AUA) (Projetos de Assentamentos - PA e Outras Áreas - OA).

2 REFERÊNCIAS

- Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Laporte, N.T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S., Houghton, R.A., 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nat. Clim. Change* 2, 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>.
- Barni, P.E., Manzi, A.O., Condé, T.M., Barbosa, R.I., Fearnside, P.M., 2016. Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. *For. Ecol. Manage.* 377, 170–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.010>.
- Brown, S., Lugo, A.E., 1992. Biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17 (1), 8–18.
- Costa, J. D. M.; Santos, S. L. C.; Funi, C., 2018. Avaliação da dinâmica do desflorestamento legal no estado do Amapá com a utilização de geotecnologias. *Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais*, 9 (2), 291-303, <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.002.0024>.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., Perez, R., 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos. Trans. R. Soc. B* 359, 409–420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Péllissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20 (10), 3177–3190. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- De Gonçalves, L. G. G., Borak, J. S., Costa, M. H., Saleska, S. R., Baker, I., Restrepo-Coupe, N., Muza, M. N., Poulter, B., Verbeeck, H., Fisher, J. B., et al., 2013. Overview of the large-scale biosphere–atmosphere experiment in Amazonia data model intercomparison project (lba dmip). *Agric. For. Meteorol.* 182, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.030>.
- Fearnside, P. M., 1992. Forest biomass in Brazilian Amazônia: comments on the estimate by Brown and Lugo. *Interciencia* 17 (1), 19–27.
- Fearnside, P. M., 1994. Biomassa das florestas Amazônicas brasileiras. In: Bandeira, R.L., Reis, M., Borgonovi, M. N., Cedrola, S. (Eds.), *Emissão Sequestro de CO₂: Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil*. Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 95–124.
- Fearnside, P.M., 1996. Amazonia and global warming: annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. In: Levine, J. (Ed.), *Biomass Burning and Global Change, Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait*, vol. 2. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 606–617.
- Fearnside, P.M., 1997. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Clim. Change* 35 (3), 321–360.

- Fearnside, P.M., 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Clim. Change* 46 (1–2), 115–158.
- Fearnside, P. M., Nogueira, E. M., Yanai, A. M., 2018 . Maintaining carbon stocks in extractive reserves in Brazilian Amazonia. *Desenvolv. Meio Ambiente*, 48, 446–476, <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v48i0.58780>.
- Houghton, R.A., Hall, F., Goetz, S.J., 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *J. Geophys. Res.* 114, G00E03. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>.
- Houghton, R.A., 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change?. *Tellus*. 62B, 337–351. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00473.x>.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *For. Ecol. Manage.* 256, 1853–1867. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.022>.
- Nogueira, E.M., Yanai, A.M., Fonseca, F.O.R., Fearnside, P.M., 2015. Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. *Glob. Change Biol.* 21, 1271–1292. <https://doi.org/10.1111/gcb.12798>.
- Saatchi, S. S., Houghton, R. A, Dos Santos, R. C., Soares, J. V., Y. YU, Y., 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Glob Chang Biol* 13(4):816–837. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x>.
- 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., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 108 (24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>.
- SEMA-AP (Secretaria de Estado do Meio Ambiente – Amapá), 2017. Relatório Técnico de Desmatamento no Estado do Amapá, referente ao período 2015 e 2016. Macapá, AP, 6 pp.
- SEMA-AP (Secretaria de Estado do Meio Ambiente – Amapá), 2019. Relatório Técnico de Desmatamento no Estado do Amapá, referente ao período 2017 e 2018. Macapá, AP, 6 pp.

ARTIGO CIENTÍFICO

**Spatial distribution of dense ombrophyllous forest biomass in Brazil's state of Amapá,
northeastern Amazonia**

Artigo submetido ao periódico "Plant Ecology"

Spatial distribution of dense ombrophylous forest biomass in Brazil's state of Amapá, northeastern Amazonia

Tropical forests are essential for mitigating climate change, as they store large amounts of carbon in the biomass and organic matter in the soil. There is evidence that the Guiana Shield forests store higher quantities of biomass, however, uncertainties about stocks in this region are large due to the scarcity of inventory data and the lack of data spatialization that takes into account factors that determine the variation between different forest types. However, standardized networks of forest inventories provide an alternative to mitigate this problem. This study aimed to model the spatial distribution of the original total biomass stock of forests in the State of Amapá, northeastern of the Amazon. Data from forest inventories were used in geostatistical interpolation (kriging) models to generate a spatial distribution map of forest biomass with high spatial resolution. The stocks of biomass have been associated with different forest types and land uses. The total estimated stock was 5.66×10^9 Mg of biomass in an area of 107×10^3 km². The average biomass was 536 ± 64.25 Mg ha⁻¹ (mean \pm SD) and the average stock in protected areas (535 ± 64.69 Mg ha⁻¹) was higher than in areas allocated for agrosilvopastoral activities (532 ± 61.26 Mg ha⁻¹), storing about 84% of forest biomass, emphasizing the importance of maintaining protected areas for the conservation of forest carbon. The map produced in this study is essential for the carbon balance at different scales and brings evidence that the forests in the region hold the largest carbon stocks in the Amazon.

Keywords: Carbon stock; Deforestation; Protected areas; REDD; GHG.

1. Introdução

A Amazônia brasileira é um dos grandes reservatórios de carbono principalmente na biomassa das árvores. A Floresta Amazônica é um importante componente do sistema terrestre, exercendo um papel indispensável no controle do clima e no balanço de carbono do mundo (Brown and Lugo, 1992; Fearnside, 1992; 1994; 1996; Fearnside et al., 2018). Porém, o processo de desflorestamento e degradação oculta (extração de madeira e fogo no sub-bosque) vem resultando na redução da capacidade da floresta de absorver e armazenar carbono.

A biomassa nas florestas da Amazônia é estudada por vários grupos de pesquisadores e redes de monitoramento usando medições atmosféricas (por exemplo, Projeto de Intercomparação de Modelos de Dados do LBA) (De Gonçalves et al., 2013) e parcelas permanentes (por exemplo, Rede Amazônica de Inventários Florestais - RAINFOR, Rede de Diversidade de Árvores da Amazônia - ATDN e Centro de Ciência das Florestas Tropicais - Observatório Global da Terra na Floresta - CTFS-ForestGEO) para estimar perdas e ganhos de carbono, pois a biomassa afeta diretamente o cálculo dos estoques de carbono e, conseqüentemente, dos gases de efeito estufa (GEE) (Chave et al., 2004, 2014; Fearnside, 1997a, 2000; Houghton, 2010).

Estimativas precisas da distribuição espacial da biomassa florestal são necessárias para reduzir as incertezas nos estoques de carbono e nas emissões de GEE, além de auxiliar na informação sobre a Redução das Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD) (Harris et al., 2012; Nepstad et al. , 2011; Saatchi et al., 2011; Soares-Filho et al., 2010). Avanços no sentido de aumentar o número de parcelas, a abrangência espacial nos diferentes ecossistemas, assim como de melhorar os inventários aumentando a precisão das medições e acrescentando novas medidas (como altura e densidade da madeira) foram implementados nas últimas décadas para aumentar a precisão das estimativas. No entanto, a variabilidade de

ambientes e de espécies arbóreas com variação intra- e inter-específica na estrutura acrescentam grande variabilidade espacial que precisa ser estudada e reduzida para melhorar as estimativas de biomassa na região.

Estimativas mais acuradas da biomassa florestal podem ser alcançadas quando a variabilidade espacial é levada em conta (Baccini et al., 2012; Barni et al., 2016; Harris et al., 2012; Saatchi et al., 2011). Fatores ambientais como solo, relevo e clima podem ser usados como preditores da distribuição espacial da biomassa florestal quando existe relação entre as variáveis ambientais e as diferentes fitofisionomias (Baccini et al., 2012; Barni et al., 2016; Feldpausch et al., 2011; Malhi et al., 2006). Dados dos inventários florestais do projeto RADAMBRASIL (Brazil, RADAMBRASIL, 1973-1983) realizados na Amazônia brasileira vem sendo usados para determinar a biomassa total (Fearnside, 1994, 1996, 1997a; Nogueira et al., 2008). Informações sobre o volume comercial são expandidos para a biomassa total (viva + morta; abaixo e acima do solo) com base em razões estabelecidas para diferentes tipos de florestas (Fearnside et al., 2000; Nogueira et al., 2008), permitindo a extrapolação da biomassa em áreas maiores que englobam diferentes tipos de florestas (Barni et al., 2016; Brazil, MCT, 2010; Fearnside, 2000; Nogueira et al., 2008; Nogueira et al., 2015; Sales et al., 2007).

No estado do Amapá existem dados de inventários pretéritos e também de inventários recentes da vegetação em áreas de floresta, porém ainda não foi realizado um trabalho sistemático para organizar esses dados e montar um mapa da distribuição da biomassa. O estado ainda possui boa parte da sua cobertura vegetal conservada, porém, o crescente avanço do desflorestamento ilegal em áreas de floresta aumentarão as emissões de carbono. Dessa forma, a determinação da quantidade e da distribuição da biomassa e carbono nas diferentes fitofisionomias do estado é essencial para a determinação das perdas futuras nos estoques de carbono.

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo foi modelar a distribuição espacial da biomassa da floresta ombrófila densa e avaliar o estoque de biomassa (viva + morta, acima e abaixo do solo) do estado do Amapá. Para tanto, nossos objetivos específicos foram: (i) estimar a biomassa total a partir da expansão do volume comercial de inventários florestais realizados em florestas ombrófilas densas no Amapá e arredores; (ii) gerar um mapa de referência a partir da modelagem espacial da biomassa florestal usando técnicas geoestatísticas; (iii) determinar o conteúdo de biomassa (Mg ha^{-1}) em cada fitofisionomia de floresta ombrófila densa e perdas devido ao desmatamento, e (iv) estimar o estoque de biomassa original em Áreas Protegidas (AP) (Unidades de Conservação - UC, Terras Indígenas - TI e Áreas Quilombolas - AQ) e das Áreas de Uso Agrossilvipastoril (AUA) (Projetos de Assentamentos - PA e Outras Áreas - OA).

2. Materiais e métodos

2.1. Área de estudo

O estado do Amapá está localizado na porção norte da Amazônia brasileira e tem uma extensão territorial de $142,8 \times 10^3 \text{ km}^2$ (Fig.1). Possui ~ 97% de cobertura florestal intacta, com um total de 73% do território correspondente a áreas protegidas, incluindo unidades de conservação, terras indígenas e quilombolas (Brazil, SEMA-AP, 2015, 2017; Drummond et al., 2008).

O clima é tropical úmido de monção, apresentando temperaturas mínima de 26°C e máxima de 33°C (Alvares, 2013; Brazil, INMET, 2018; Golfari et al., 1978; Peel, 2007). A região norte e a região costeira do estado apresentam uma maior precipitação anual que varia entre 2700 a 2900 mm^{-1} (Brazil, ANA, 2018) ao passo que em outras partes do estado a precipitação é menor, variando entre 2300 a 2700 mm^{-1} anuais (Brazil, ANA, 2018) na porção sul e entre 2000 e 2200 mm^{-1} nas áreas localizadas a oeste e sudoeste (região de Montanhas do Tumucumaque e Rio Jari) (Alvares, 2013; Brazil, ANA, 2018; De Souza and Cunha, 2010).

A vegetação no Amapá é caracterizada pelo predomínio de floresta ombrófila densa (75,5%) que é classificada em 4 fitofisionomias: (i) floresta ombrófila densa aluvial (Da), (ii) floresta ombrófila densa de terras baixas (Db), (iii) floresta ombrófila densa submontana (Ds) e (iv) floresta ombrófila densa montana (Ds) (Brazil, BDIA, 2018a; Brazil, IBGE, 2012) (Fig. 1) (Table 1).

Nas florestas ombrófilas densas aluviais o solo predominante é o aluvial com média a alta fertilidade, apresentando um período de alagamento associado também ao efeito das marés que causam a elevação e diminuição diária do nível da água, e no período das chuvas muitas áreas permanecem alagadas ou pelo menos com os solos saturados de água (Almeida et al., 1996; IBGE, 2012). As principais famílias botânicas são *Fabaceae*, *Arecaceae*, *Clusiaceae*, *Bombacaceae*, *Myrtaceae* e *Mimosaceae* (Carim et al., 2008; Costa-Neto and Silva, 2003).

Nas florestas de terras baixas os solos predominantes são os latossolo vermelho – amarelo e latossolo amarelo (Brazil, BDIA, 2018b; Peres et al., 1974), e o relevo varia bastante (com altitudes entre 5 m a 100 m), existindo áreas bastante planas e também dissecadas com uma rede de pequenos corpos d'água (*igarapés*) que também sofrem alagamentos periódicos no período das chuvas. As famílias *Sapotaceae*, *Lecythidaceae*, *Fabaceae*, *Burseraceae* e *Chrysobalanaceae* são as predominantes (Brazil, INAM, 2010).

Nas florestas submontanas o solo predominante é o latossolo vermelho – amarelo (Brazil, BDIA, 2018b; Peres et al., 1974), apresentando relevo suave-ondulado a colinoso, com cotas de 100 m e raramente ultrapassando os 500 m. Esse tipo vegetacional é caracterizado por comunidades primárias, com pouquíssima ou nenhuma alteração, com algumas árvores superando os 60 m de altura. As famílias *Meliaceae*, *Annonaceae*, *Chrysobalanaceae*, *Sapotaceae*, *Burseraceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Lecythidaceae* são as mais abundantes (Brazil, ICMBIO, 2009).

Nas florestas montanas o solo predominante é o latossolo vermelho - amarelo (Brazil, BDIA, 2018b; Peres et al., 1974), apresentando um relevo com serras, onde se destaca a Serra de Tumucumaque no extremo Oeste, junto à tríplice fronteira entre Brasil, Guiana Francesa e Suriname, apresentando uma fisionomia de afloramentos rochosos e morros, com altitudes de 600 m a 700 m (Brazil, IBGE, 2012; Brazil, ICMBIO, 2009).

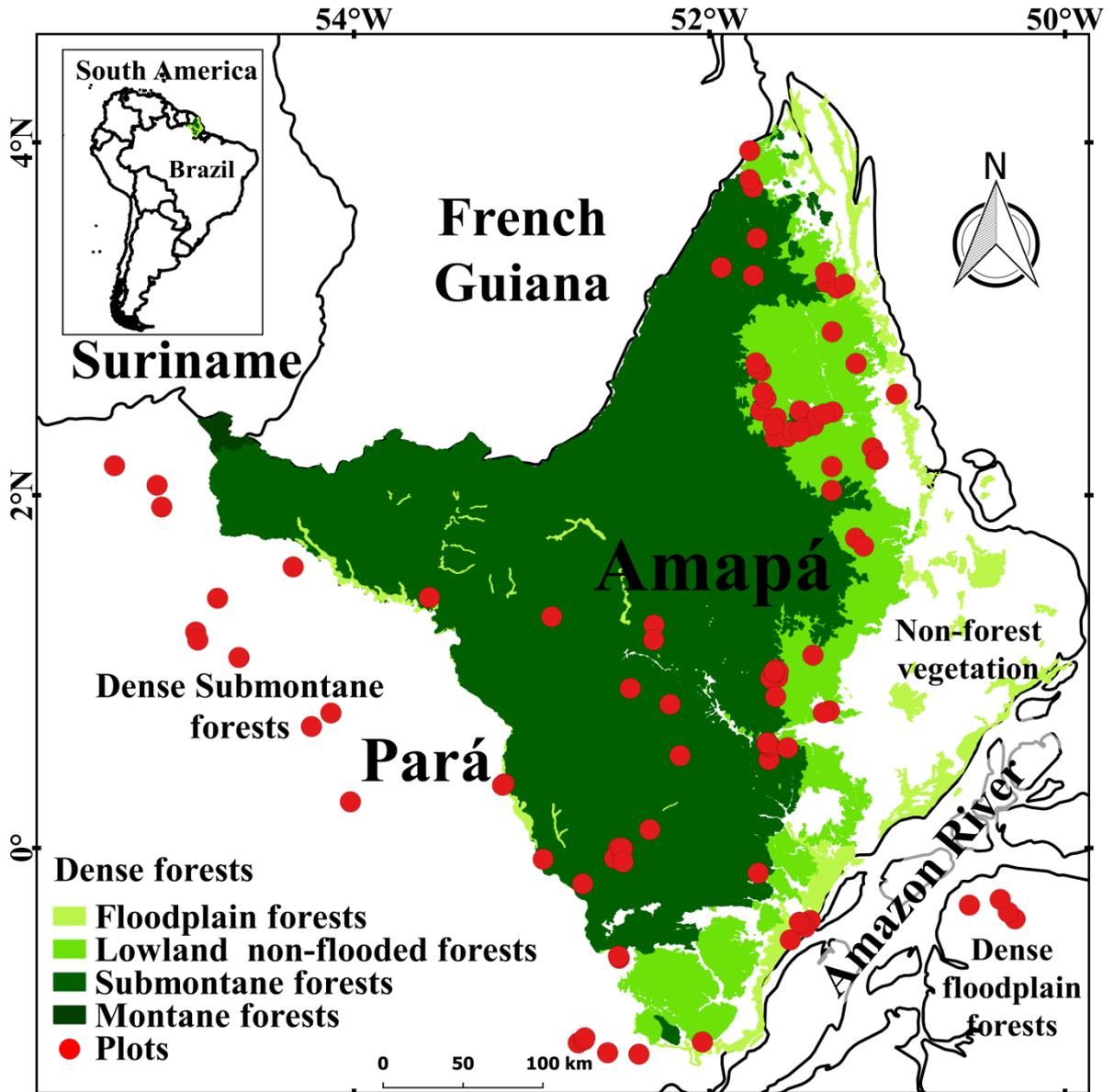


Fig. 1. Spatial distribution of plots along different types of forests in the Amapá state and up to 100 km from the state's borders.

2.2. Limites das fitofisionomias da floresta ombrófila densa

A definição dos limites da floresta ombrófila densa no Amapá foi derivado de um mapa de vegetação do Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA) na escala de 1: 250.000 (Brazil, BDIA, 2018a). A floresta ombrófila densa é dividida em 4 fitofisionomias, no entanto exclui-se a fitofisionomia de floresta ombrófila densa montana (Dm), devido a ausência de inventários florestais na área e por ocupar uma área muito pequena (0,3%). Foram utilizadas para o estudo as 3 fitofisionomias: (i) florestas ombrófilas densa aluvial (Da), floresta ombrófila densa de terras baixas (Db) e floresta ombrófila densa submontana (Ds) (Table 1).

Table 1
Phytophysiognomies in the state of Amapá.

Phytophysiognomy ^a	Dense ombrophilous forest	
	Area (10 ³ km ²)	%
Dense-canopy rainforest on river floodplain – Da	6.07	4.3
Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands – Db	20.71	14.5
Dense-canopy rainforest, montane – Dm	0.4	0.3
Dense-canopy rainforest, submontane – Ds	80.58	56.4
Phytophysiognomy total	107.76	75.5

^aVegetation codes (Brazil, IBGE, 2012).

2.3. Estimativa da biomassa

A biomassa original total (viva+ morta, acima e abaixo do solo) por unidade de área (Mg ha⁻¹) foi estimada a partir dos inventários florestais (Brazil, RADAMBRASIL, 1973-1983) realizados no Amapá (37 parcelas de 1 ha, sendo 3 parcelas na floresta ombrófila densa aluvial, 21 na floresta ombrófila densa de terras baixas e 13 em floresta ombrófila densa submontana) e na região do entorno (Estado do Pará) em uma faixa de 100 km de distância da divisa do estado (17 parcelas de 1 ha, sendo 4 parcelas na floresta ombrófila densa aluvial, 1 na floresta ombrófila densa de terras baixas e 12 em floresta ombrófila densa submontana) (Brazil, BDIA, 2018a). Desses inventários foram utilizadas informações de volume comercial das árvores com circunferência à altura do peito ≥ 100 cm (diâmetro ≥ 31.8 cm). A esse banco de dados foram adicionados 75 parcelas de inventários mais recentes no Amapá, sendo 15 parcelas de 1 ha na

floresta ombrófila densa aluvial, 59 na floresta ombrófila densa de terras baixas e 55 em floresta ombrófila densa submontana, totalizando 129 pontos amostrais (Fig. 2).

Das 75 parcelas inventariadas mais recentemente, apenas indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) $\geq 31,8$ cm foram utilizados para os cálculos da biomassa a fim de minimizar a variabilidade existente entre os inventários recentes e os do projeto RADAMBRASIL.

O volume do tronco até a altura do fuste (altura até o primeiro galho grosso) de cada árvore inventariada foi calculado através da equação $\text{Volume do fuste} = ((3,1416 \times \text{DAP}^2)/4 \times \text{altura do fuste} \times 0,7)$ (Brazil, RADAMBRASIL, 1973-1983) e aplicado um ajuste (0,956) que considera árvores ocas e de formas irregulares (Nogueira et al., 2008). Quando não se havia medidas de altura do fuste para todas as árvores, foram desenvolvidos modelos alométricos locais usando DAP e altura do fuste de uma amostra de árvores disponível para cada local (Table A1). Em seguida foi inserida à cada árvore a densidade básica da madeira (peso seco em estufa dividido pelo volume verde; g cm^3) obtida em bancos de dados através da identidade taxonômica das árvores (Fearnside, 1992, 1997b). Quando não havia identificação ao nível de espécie foi usada a média para o gênero ou família, e quando não havia identificação foi usado a média da parcela. O volume do fuste e densidade básica da madeira de cada árvore foram transformado à nível de parcela (em 1 ha) para aplicação dos fatores de expansão. Os fatores de expansão foram aplicados a todos os 129 pontos de amostragem para converter desde volume do fuste ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) até biomassa total (Mg ha^{-1}).

O fator de expansão de volume (FEV) ajustou as árvores com DAP (diâmetro à altura do peito medido 1,3 m acima do solo) entre 10 cm e o diâmetro mínimo usado no levantamento florestal (31,8 cm). O valor de FEV utilizado para corrigir a faixa de 10 – 31,8 cm de DAP foi de 1,537 para florestas densas (Nogueira et al., 2008). O fator de expansão de biomassa (FEB) ajustou a copa das árvores. A biomassa do fuste foi multiplicada pelo FEB, cujo valor utilizado

foi de 1,635 se a biomassa do fuste foi $\geq 190 \text{ Mg ha}^{-1}$ [calculado por Nogueira et al. (2008) a partir de dados de Higuchi et al. (1998) normalizado por distribuição de diâmetro na Amazônia central], e a equação $\text{Biomassa} = \text{Exp}(3,213 (0,506 \times \text{Ln}(\text{biomassa do fuste})))$ foi empregada se a biomassa do fuste foi $< 190 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Brown and Lugo, 1992).

Para converter os valores da biomassa expandida em biomassa total, fatores de expansão foram aplicados para biomassa viva acima do solo (0,7237), biomassa morta acima do solo (0,1157) e biomassa abaixo do solo (0,1605) (Nogueira et al., 2008).

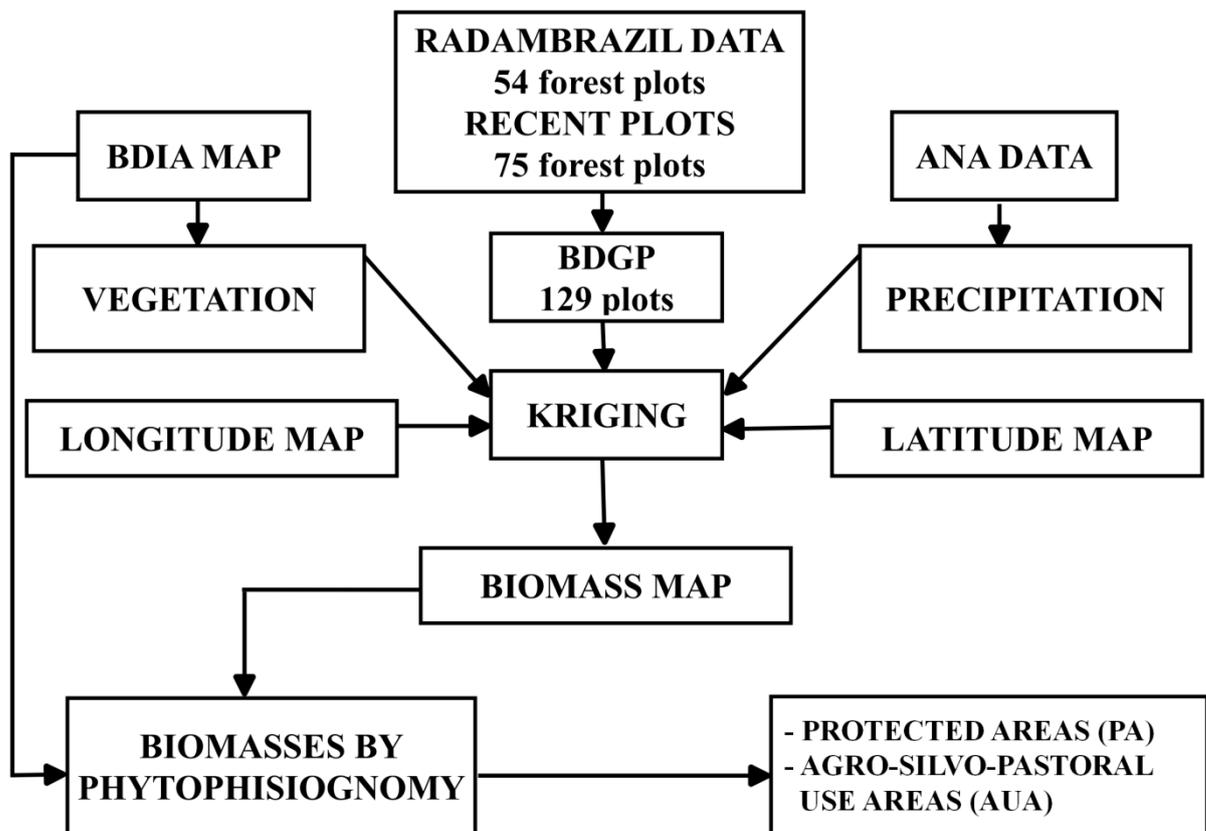


Fig. 2. Flowchart for estimation of forest biomass in Amapá. BDIA = Database Environmental Information. BDGP = georeferenced database of plots. ANA= National Waters Agency.

2.4. Validação do modelo de interpolação

O banco de dados georreferenciado foi dividido aleatoriamente em duas subamostras, uma contendo 13 pontos de amostragem (~10%) e outro contendo 116 pontos (~90%). O primeiro conjunto ($n_1 = 13$) foi reservado para validação e determinação do melhor modelo de interpolação após a obtenção dos mapas de biomassa florestal.

2.5 Critérios de validação

Os critérios para validação (acurácia) e para escolha do melhor modelo interpolador foram: (i) o menor erro quadrado médio (EQM), (ii) o percentual de eficiência (% EF) e (iii) o maior coeficiente de determinação (R^2 ajustado). O R^2 ajustado também serviu para avaliar a precisão do modelo em termos percentuais, onde erro $(\varepsilon) = (1 - R^2) \times 100$.

Os parâmetros foram calculados a partir da subamostra de 13 pontos e comparados com os valores previstos pelos três modelos de interpolação (Krigagem ordinária, Co-Krigagem e Krigagem com Deriva Externa) nas mesmas coordenadas geográficas (Barni et al., 2016; Bello-Pineda and Hernández-Stefanoni, 2007; Gardiman Junior et al., 2012).

2.6. Modelagem e espacialização da biomassa

A espacialização da biomassa florestal foi determinada a partir do melhor modelo entre três técnicas de krigagem executadas no *software ArcGIS* (Fig. 3): (i) Krigagem ordinária (Krig-Ord), (ii) Co-Krigagem (Co-Krig) e (iii) Krigagem com Deriva Externa (KDE). A krigagem consiste em estimar valores de uma variável espacial em locais não amostrados e avaliar a incerteza associada ao valor previsto. Para a execução da krigagem é necessário primeiro modelar um semivariograma. A função semivariograma quantifica a suposição de que os pontos próximos tendem a ser mais semelhantes do que os mais distantes. O semivariograma mostra a autocorrelação espacial dos pontos da amostra medidos. Depois que cada par de locais é plotado, um modelo é ajustado através deles, mas para isso o semivariograma utiliza para a

análise o (i) *Nugget* ou efeito pepita, que avalia a estacionaridade dos dados ou a não-mudança dos seus valores em função da distância de separação entre pontos mais próximos; (ii) *sill* ou patamar, que indica o ponto em que os dados se estabilizam; (iii) *range* ou alcance, mede a distância na qual as amostras estão espacialmente correlacionadas, a partir do alcance as amostras passam a não ser mais espacialmente correlacionadas e a relação entre as amostras passa a ser aleatória (cf. Burrough and Mcdonell 1998; Landim and Sturaro 2002). Um modelo conceitual de cálculo do semivariograma é exemplificado na equação (1).

$$\text{Semivariogram}(y) = \text{Nugget} + (\text{Sill} - \text{Nugget}) \times \text{Range}(1)$$

Na Krig-Ord, o semivariograma foi modelado a partir da variável de pontos amostrais (biomassa total) como entrada, assim obtendo um mapa de biomassa (Mg ha^{-1}) contínua dos valores previstos a partir dos dados conhecidos (Isaaks and Srivastava, 1989). No caso da Co-Krig, além da variável principal (biomassa total), foram utilizadas três variáveis auxiliares: (i) o mapa de vegetação (V) do BDIA, tendo como classes as três fitofissionomias florestais, (ii) o mapa de precipitação (P) média anual, obtido no sítio da Agência Nacional de Água (ANA 2013) e, (iii) o mapa de longitude (Lo) produzido a partir da longitude de cada ponto conhecido. Os três mapas foram projetados para UTM / Zona 22 N, WGS 84 e convertidos para o formato *raster* com resolução espacial de 1 ha por pixel.

Na KDE o mapa final de biomassa (Mg ha^{-1}) foi obtido por aplicação de Regressão Linear Múltipla (RLM) tendo os mapas raster (grade de células) das variáveis auxiliares V, P, latitude (La), Lo e R (mapa de resíduos), como variáveis independentes (Eq.2). O mapa KDE foi criado a partir de três etapas: (1) obtenção dos resíduos e os coeficientes da RLM (Table 2) pela aplicação do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) entre a variável principal e as variáveis auxiliares (pontos amostrais); (2) obtenção do mapa raster de resíduos (Resolução espacial de 1 ha, UTM / Zona 22 N, WGS 84) através da krigagem ordinária dos resíduos e; (3) execução da RLM (Eq.(2)).

$$\text{KDE biomass (Y)} = 1481.436117 + (-16.401831 \times La) + (23.73743 \times Lo) + (0.060044 \times P) + (7.748431 \times V) + (-7.913882 \times R)$$

(2)

Onde: Y = variável dependente (BIOMASSA TOTAL), La = mapa da latitude, Lo = mapa da longitude, P = mapa da precipitação, V = mapa da vegetação e R = mapa de resíduos.

Table 2

Summary of OLS regression results – (model performance $R^2 = 0.84$).

<i>Variables</i>	<i>Coefficients</i>	<i>Probability</i>
Intercept	1481.436117	0.000080
Latitude	-16.401831	0.031628
Longitude	23.73743	0.000411
Precipitation	0.060044	0.000328
Vegetation	7.748431	0.000000
Residuals	-7.913882	0.000000

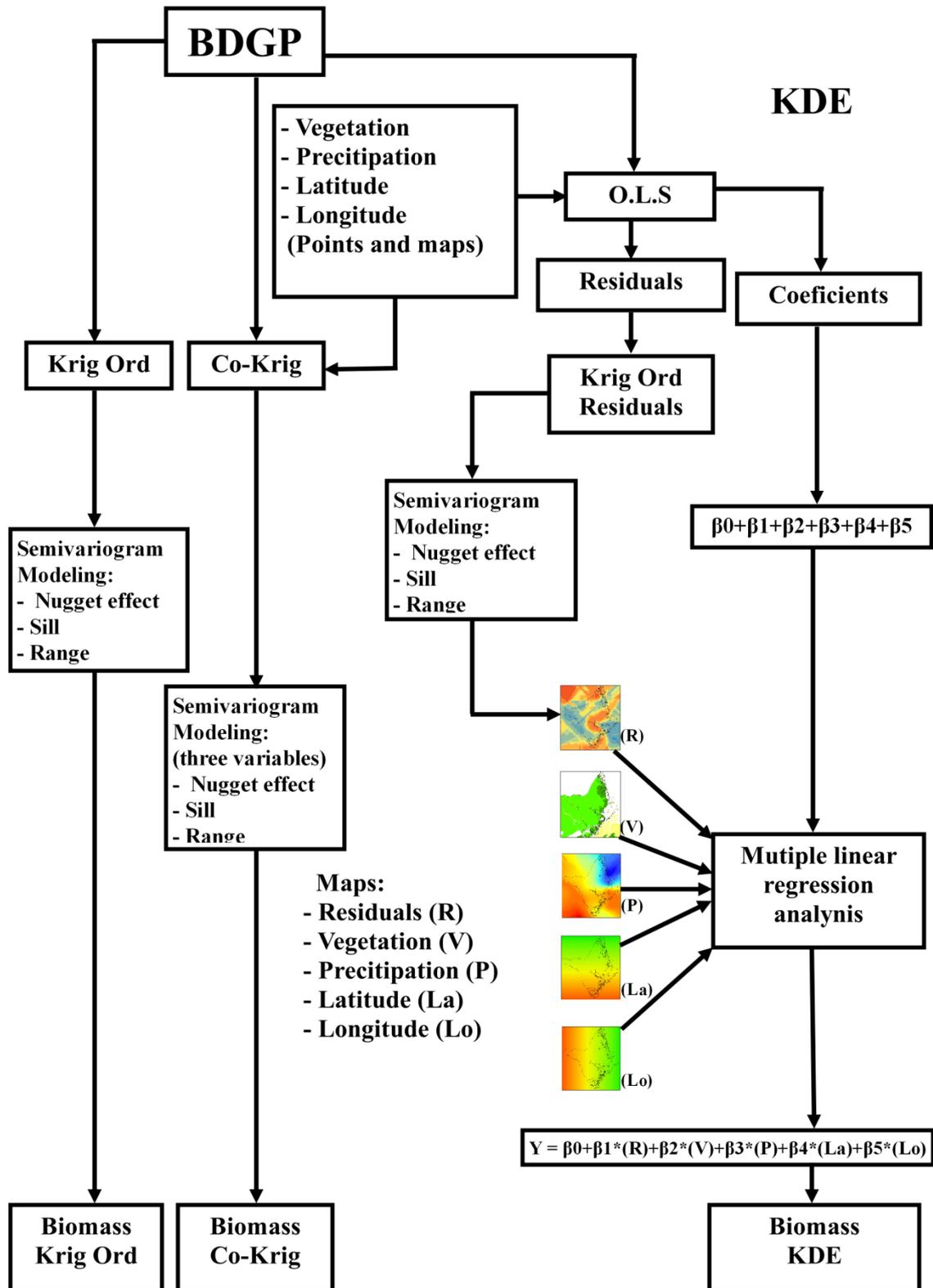


Fig. 3. Flowchart for the application of Kriging to the georeferenced database and five auxiliary variables. (V) = Vegetation map; (P) = Precipitation map; (La) = Latitude map; (Lo) = Longitude map; (R) = Residuals map; Krig-Ord = Ordinary Kriging; Co-Krig = Co-Kriging; KDE = Kriging with external drift. In the case of co-Kriging three auxiliary variables were used (V, P and Lo) and in the KDE five variables were used (V, P, La, Lo and R). BDGP = georeferenced database of plots.

2.7 Mapas de biomassa por fitofisionomia

Para explicitar o conteúdo de biomassa por fitofisionomia florestal foram criados mapas binários (0, 1) de 1 ha de resolução espacial para cada fitofisionomia do BDIA. Em cada mapa criado, os pixels representando o domínio ou a extensão das fitofisionomias receberam o valor 1 (um) e os demais pixels o valor 0 (zero). Todos os mapas foram criados com o mesmo número de linhas (6153) e de colunas (5392). Em seguida, estes mapas foram cruzados, individualmente, com o Mapa de Biomassa Florestal Densa (MBFD) (Mg ha^{-1}) em operação de álgebra de mapas para a obtenção de mapas de biomassa por fitofisionomias (Eq.(3)). Assim:

$$BIOM.TYPE_{(i)} = Map.Type_{(i)} \times MBFD(3)$$

Onde, $BIOM.TYPE_{(i)}$ são os mapas de biomassa por fitofisionomia florestal; $Map.Tipo_{(i)}$ são os mapas de cada classe gerada a partir do mapa do BDIA (Da, Db e Ds).

2.8. Biomassa nas Áreas Protegidas e nas áreas de uso agrossilvipastoril

Para determinar a biomassa em Áreas Protegidas (AP), foram aplicados cruzamentos entre os mapas binários de Unidades de Conservação (UC), Terras Indígenas (TI) e Áreas Quilombolas (AQ) utilizando a base de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (Brazil, MMA, 2018) e do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) (Brazil, INCRA, 2018) com os mapas de biomassa gerados por tipo florestal. A biomassa das áreas de uso agrossilvipastoril (AUA) (Projetos de Assentamentos - PA e Outras Áreas - OA) foram determinadas a partir das áreas de exclusão das AP.

As Unidades de Conservação foram divididas em Unidades de proteção integral, que têm por objetivo preservar a natureza, sendo admitido somente o uso indireto dos seus recursos naturais, e Unidades de uso sustentável, que têm por objetivo aliar a conservação da natureza com o uso sustentável de parte dos seus recursos naturais.

2.9. Análise estatística

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi aplicado a todos os conjuntos de dados obtidos pelos cruzamentos de informações entre as categorias de uso. O teste t foi utilizado para testar se os valores predidos pelos três modelos (Krigagem ordinária, Co-Krigagem e Krigagem com Deriva Externa) e os valores da subamostra apresentaram médias diferentes. Essas análises foram realizadas no software livre R (R Development Core Team 2018). A regressão múltipla usada para prever os valores do mapa final na Krigagem com Deriva Externa usando mapas das variáveis auxiliares (Vegetação, Precipitação, Latitude, Longitude e Resíduos) foi realizada no software ArcGIS.

3. Resultados

O modelo que apresentou o melhor desempenho foi o KDE para representar a biomassa total da floresta ombrófila densa no estado do Amapá (Table 3, Fig. 4). O semivariograma final ajustado (estrutura exponencial) apresentou alcance de ~168 km e uma forte correlação espacial dos dados de ~8% do efeito pepita em relação ao patamar (20141,3). No entanto a correlação espacial decresceu entre ~168 km e 253 km, pois a partir do alcance as amostras passaram a não ser mais espacialmente correlacionadas e a relação entre as amostras passou a ser aleatória.

Table 3

Results of cross-validation (accuracy) and choice of the best interpolation model for estimating mean total biomass of dense ombrophilous forest in the state of Amapá. MSE = Mean Square Error, %EF = Efficiency Percentage, R^2_{adj} = Adjusted coefficient of determination.

Interpolators	MSE	%EF	R^2_{adj}	p-value regression	p-value t-test	Mean biomass (Mg ha ⁻¹)
BDG (13 points)	-	-	-	-	-	594.01
Krig-Ord	126.9	96.70	0.48	0.0052	0.057	524.81
Co-Krig	123.4	93.19	0.45	0.0069	0.071	531.47
KDE	121.7	83.04	0.61	0.0010	0.092	534.78

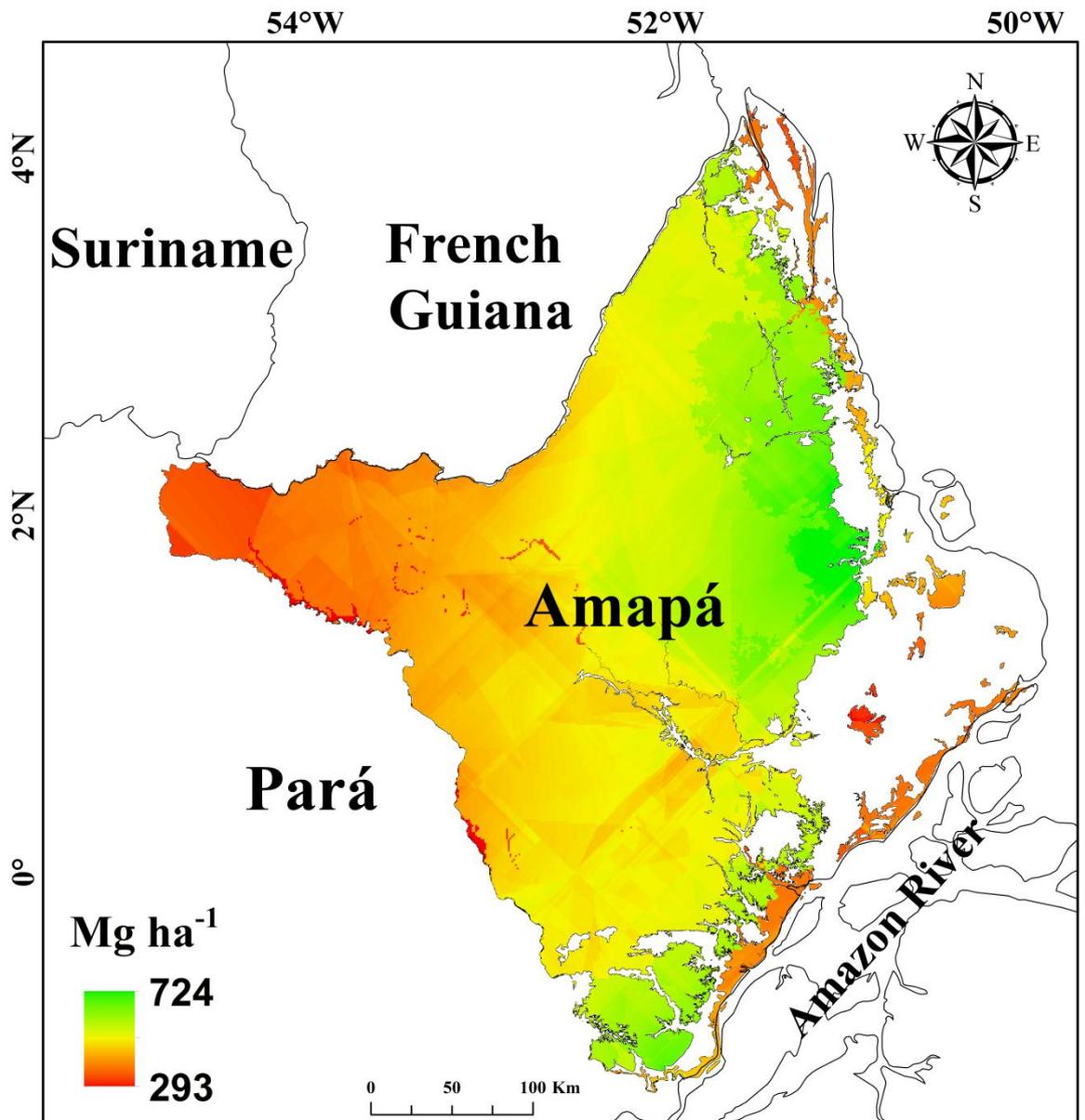


Fig. 4. Reference map of the distribution of biomass (Mg ha^{-1}) in the state of Amapá generated by Kriging for external drift (KED). White areas are nonforest vegetation.

O estoque de biomassa original total (viva + morta, acima e abaixo do solo) para a floresta ombrófila densa no estado do Amapá (sem desmatamento) a partir do modelo KDE foi estimada em $5,66 \times 10^9$ Mg (107.193 Km^2 ou 71,9 % da área do estado), dos quais a biomassa viva acima do solo representou $4,10 \times 10^9$ Mg (72,4%), biomassa morta acima do solo $0,65 \times 10^9$ Mg (11,5%) e biomassa viva abaixo do solo $0,91 \times 10^9$ Mg (16,1%) (Table 4). A fitofisionomia de floresta ombrófila de terras baixas foi a que apresentou a maior média de biomassa total (619 Mg ha^{-1} ; mín. - máx. = $397 - 724 \text{ Mg ha}^{-1}$), seguida pela floresta ombrófila submontana (521 Mg ha^{-1} ; $293 - 709 \text{ Mg ha}^{-1}$) e pela floresta ombrófila aluvial, que apresentou a menor média (448 Mg ha^{-1} ; $293 - 692 \text{ Mg ha}^{-1}$).

A perda acumulada até 2018 de biomassa no estoque do Amapá por desmatamento foi de $0,098 \times 10^9$ Mg (1,74%), sendo que a floresta ombrófila de terras baixas foi a que apresentou a maior perda acumulada ($0,056 \times 10^9$ Mg; 0,99%).

Table 4

Original stock of total biomass (live + dead; above- and belowground) and estimated weighted average per unit area of dense ombrophilous forest in the state of Amapá, representing biomasses with human impacts (deforestation).

Phytophysiognomy	Area (10 ³ Km ²)	Live aboveground (10 ⁹ Mg) ^b	Dead aboveground (10 ⁹ Mg) ^b	Live belowground (10 ⁹ Mg) ^b	Total biomass stock (10 ⁹ Mg)	%	Mean (±SD) (Mg ha ⁻¹)	Range (Mg ha ⁻¹)	Biomass loss (10 ⁹ Mg)	%
Da ^a	6.051	0.174	0.028	0.039	0.241	4.3	447.60 ± 45.51	293.0 - 692.0	0.008	0.14
Db ^a	20.688	0.895	0.143	0.199	1.237	21.9	619.13 ± 38.27	397.0 - 724.0	0.056	0.99
Ds ^a	80.454	3.026	0.484	0.672	4.182	73.9	521.83 ± 49.82	293.0 - 709.0	0.033	0.58
Total	107.193	4.096	0.655	0.909	5.659	100.0	536.48 ± 64,25	293.0 - 724.0	0.098	1.73

^aVegetation codes (Brazil, IBGE, 2012).

^bPercentages for calculation of biomass by forest compartment as in Nogueira et al. (2008).

O estoque de biomassa total nas áreas protegidas (UC, TI e AQ) no Amapá, foi estimado em $4,76 \times 10^9$ Mg (média de 535 Mg ha^{-1} ; amplitude: $293 - 721 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Table 5). O maior estoque foi observado nas unidades de conservação (89%; $4,24 \times 10^9$ Mg), com 2,1% ($0,088 \times 10^9$ Mg) em floresta ombrófila densa aluvial, 19,5% ($0,829 \times 10^9$ Mg) em floresta ombrófila densa de terras baixas e 78,4% ($3,32 \times 10^9$ Mg) em floresta ombrófila densa submontana. A média de biomassa das áreas de uso agrossilvipastoril (AUAs) foi de 532 Mg ha^{-1} ($312 - 724 \text{ Mg ha}^{-1}$), sendo que nos Projetos de Assentamento foi observado o maior estoque na fitofisionomia densa submontana (64%; $0,332 \times 10^9$ Mg).

As áreas de uso agrossilvipastoril foram as que apresentaram as maiores perdas acumuladas de biomassa no estoque total do Amapá ($72,25 \times 10^6$ Mg; 1,27%), enquanto que as áreas protegidas apresentaram as menores perdas acumuladas ($26,21 \times 10^6$ Mg; 0,46%).

A Unidades de Conservação guardam as maiores coberturas de floresta ombrófila densa submontana no estado do Amapá, estocando uma grande quantidade de biomassa. O estoque de biomassa total nas unidades de conservação de uso sustentável foi estimado em $2.263,30 \times 10^6$ Mg (média de 573 Mg ha^{-1} ; amplitude: $340 - 721 \text{ Mg ha}^{-1}$) 53% do total, enquanto que nas unidades de proteção foi um pouco menor, $1.980,62 \times 10^6$ Mg ($502,27 \text{ Mg ha}^{-1}$; $293 - 639 \text{ Mg ha}^{-1}$), 47% do total (Table 6). O maior estoque foi observado na unidade de conservação de proteção integral Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque, estimado em $1.872,98 \times 10^6$ Mg (501 Mg ha^{-1} ; $293 - 613 \text{ Mg ha}^{-1}$) seguido pela unidade de conservação de uso sustentável, Floresta Estadual do Amapá, estimado em $1.325,85 \times 10^6$ Mg (588 Mg ha^{-1} ; $397 - 721 \text{ Mg ha}^{-1}$). Na Floresta Nacional do Amapá foi observado a maior média de estoque de biomassa das unidades de uso sustentável (599 Mg ha^{-1} ; $495 - 654 \text{ Mg ha}^{-1}$) enquanto a maior média das unidades de proteção integral foi encontrada na Estação Ecológica do Jari ($533,55 \pm 6,28 \text{ Mg ha}^{-1}$; $515 - 552 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Table 5

Area (km²), mean biomass (%; Mg ha⁻¹), range (Mg ha⁻¹) biomass stock (Mg) and biomass loss (%; 10⁶ Mg) (deforestation up to 2018) by phytophysiognomy and use group in the state of Amapá.

Group	Area (10 ³ Km ²)	Mean (\pm SD) (Mg ha ⁻¹)	Range (Mg ha ⁻¹)	Biomass stock (10 ⁶ Mg)	%	Biomass loss (10 ⁶ Mg)	%
<i>Protected areas (PA)</i>							
<i>Indigenous lands (ILs)</i>							
Dense-canopy rainforest on river floodplain	0.21	434.16 \pm 22.58	348 - 600	9.24	1.9	0.01	0.002
Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	1.20	601.24 \pm 10.87	547 - 622	72.39	14.5	1.21	0.243
Dense-canopy rainforest, submontane	8.16	511.10 \pm 34.96	348 - 612	416.89	83.6	3.18	0.638
IL total	9.57	515.50 \pm 46.13	348 - 622	498.52	10.5	4.40	0.093
<i>Conservation units (CUs)</i>							
Dense-canopy rainforest on river floodplain	2.03	435.00 \pm 53.62	293 - 655	88.45	2.1	0.07	0.002
Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	13.24	626.08 \pm 35.74	397 - 721	829.06	19.5	13.94	0.328
Dense-canopy rainforest, submontane	63.78	521.58 \pm 53.64	293 - 709	3326.44	78.4	7.74	0.182
CU total	79.05	537.55 \pm 66.28	293 - 721	4243.95	89.5	21.75	0.459
<i>Quilombola area (QAs)</i>							
Dense-canopy rainforest on river floodplain	0.02	427.46 \pm 9.31	415 - 438	1.01	5.5	0.04	0.232
Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	0.29	611.26 \pm 8.50	581 - 641	17.43	94.5	0.02	0.118
Dense-canopy rainforest, submontane	-	-	-	-	-	-	-
QA total	0.31	519.36 \pm 49.66	415 - 641	18.44	0.4	0.06	0.001
PA total	88.93	535.08 \pm 64.67	293 - 721	4760.91	84.1	26.21	0.463
<i>Agro-silvo-pastoral Use Areas (AUA)</i>							
<i>Settlement project (SPs)</i>							
Dense-canopy rainforest on river floodplain	0.56	460.01 \pm 34.44	398 - 618	25.74	5.0	1.77	0.341

Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	2.64	610.47 ± 36.90	425 - 722	161.29	31.1	19.01	3.660
Dense-canopy rainforest, submontane	6.21	535.42 ± 17.14	412 - 671	332.41	64.0	14.86	2.861
SP total	9.41	535.30 ± 51.03	398 - 722	519.43	57.9	35.65	3.970
<i>Other areas (OAs)</i>							
Dense-canopy rainforest on river floodplain	3.22	453.42 ± 38.36	312 - 692	109.52	28.9	6.58	1.739
Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands	3.32	602.44 ± 47.01	397 - 724	168.50	44.5	22.29	5.890
Dense-canopy rainforest, submontane	2.31	531.12 ± 25.09	619 - 654	100.37	26.5	7.74	2.046
OA total	8.85	529.00 ± 73.33	312 - 724	378.39	42.1	36.61	4.077
AUA total	18.26	532.15 ± 61.26	312 - 724	897.82	15.87	72.25	1.277
Grand total	107.19	536.48 ± 64,25	293 - 724	5658.73	100.0	98.47	1.740

Table 6
Area (km²), biomass stock (Mg), mean biomass (%; Mg ha⁻¹) and range (Mg ha⁻¹) by Conservation units in the state of Amapá.

Conservation units (CUs)	Área (10 ³ Km ²)	Biomass stock (10 ⁶ Mg)	%	Mean (+SD) (Mg ha ⁻¹)	Range (Mg ha ⁻¹)
<i>Integral Protection (IP)</i>					
Tumucumaque Mountains National Park	3.759	1872.98	94	500.91 ± 54.74	293 - 613
Cabo Orange National Park	0.137	71.73	4	524.07 ± 84.45	394 - 639
Jari Ecological Station	0.067	35.91	2	533.55 ± 6.28	515 - 552
IP total	3.934	1980.62	47	502.27 ± 55.90	293 - 639
<i>Sustainable Use (SU)</i>					
Amapá State Forest	2.280	1325.85	58	588.10 ± 55.10	397 - 721
Cajari River Extractive Reserve	0.371	215.81	10	580.52 ± 47.62	443 - 658
Amapá National Forest	0.450	274.92	12	599.00 ± 29.32	495 - 654
Iratapuru river sustainable development reserve	0.870	446.73	20	513.66 ± 23.62	340 - 552
SU total	3.971	2263.30	53	572.79 ± 56.24	340 - 721
CU total	7.905	4243.93	100	537.23 ± 66.28	293 - 721

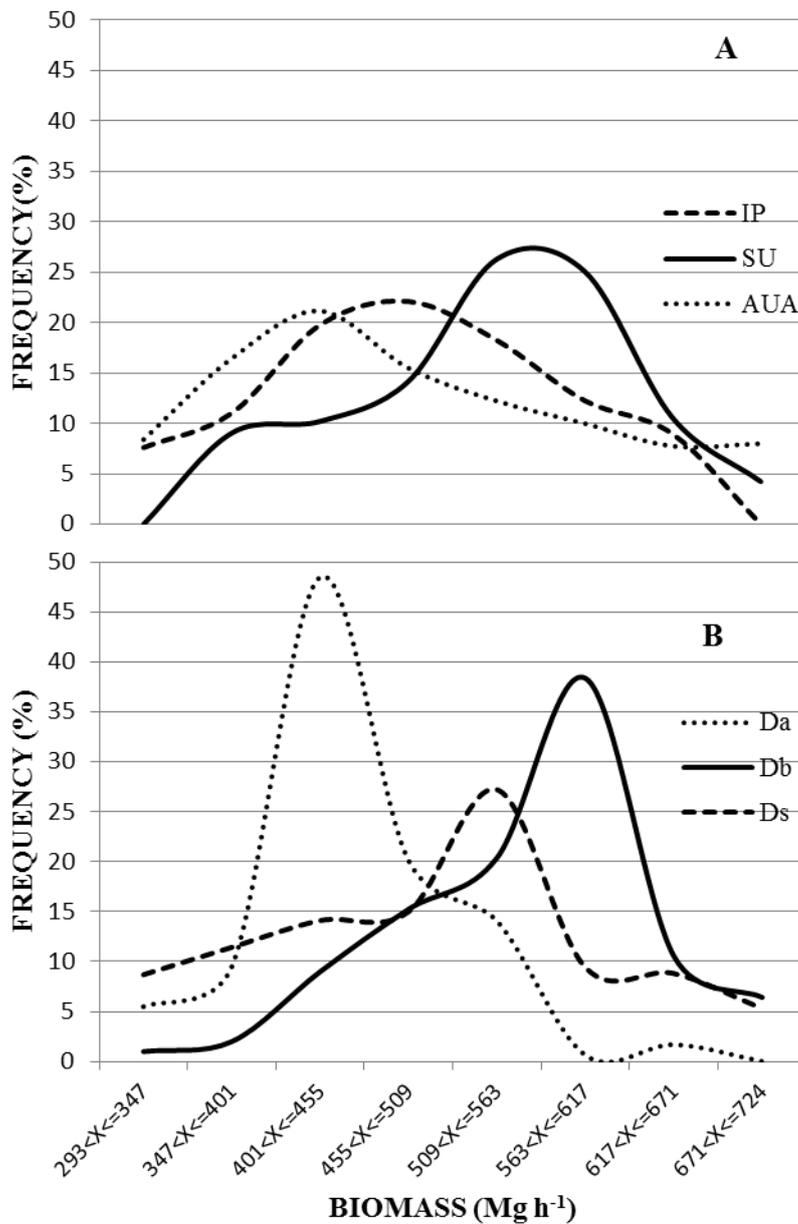


Figure 5. Biomass (Mg ha^{-1}) by frequency (number of pixels expressed as percentages of occurrence) (A) by Conservation units and Agro-silvo-pastoral Use Areas (B) by phytophysiognomy. IP= Integral Protection Conservation units; SU = Sustainable Use Conservation units; AUA = Agro-silvo-pastoral Use Areas; Da = Dense-canopy rainforest on river floodplain; Db = Dense-canopy rainforest on nonflooding lowlands; Ds = Dense-canopy rainforest, submontane. Observa-se em (A) que as SU estocam grandes quantidades de biomassa da floresta de Terras Baixas, enquanto que IP estoca mais biomassa de florestas de submontana. No caso de AUA, os percentuais de biomassa estão localizados nas florestas Aluviais. Em (B) observa-se que a maioria da biomassa das florestas Aluviais encontra-se a baixo de 420 Mg ha^{-1} , enquanto que há uma maior frequência de biomassa de florestas de Terras Baixas nos pixels de 560 a 600 Mg ha^{-1} .

4. Discussão

A aplicação de uma base de dados geográficos de inventários florestais (Brazil, BDIA, 2018a), com a utilização da krigagem com deriva externa aos dados de biomassa total ajustados (Nogueira et al., 2008), resultaram na melhor representação da modelagem dos estoques de biomassa florestal (Fig. 4).

O semivariograma mostrou que ~ 92% da variação de biomassa total estão espacialmente organizados e indicou uma variação até uma distância de ~ 168 km na área de estudo. Os métodos para estimar a distribuição espacial da biomassa total usando uma média simples para cada tipo de fitofisionomia são menos eficazes do que os métodos que utilizam a geoestatística, que possuem como característica a correlação espacial entre os pontos de amostragem (Barni et al., 2016; Sales et al., 2007; Morais et al., 2017).

Outro dado importante obtido nesta pesquisa foi a razão de 835 km² por ponto amostral. Esta razão foi menor do que a estimada para toda a área de florestas da Amazônia brasileira (1480 km²) coberta pelos inventários florestais (2702) do Projeto RADAMBRASIL. Esta menor razão indica melhora na análise espacial dos dados de biomassa total em uma escala de tipo de fitofisionomia, com uma alta resolução espacial de 1 ha, diminuindo a incerteza (resolução espacial de 1 km²) em relação a outras pesquisas na Amazônia (Barni et al., 2016; Houghton et al., 2009; Saatchi et al., 2011).

A contribuição de uma base de dados de inventários florestais georreferenciado da Guiana Francesa e a Oeste do estado do Amapá providenciaria uma melhor análise nos resultados, visto que a falta de dados nesta região de entorno foi a principal causa dos 39% (1-R²) de erro de predição (de erro) calculada na análise espacial. Mas, é presumido que o atual

mapa de referência (Fig. 4) providencia uma fonte de informações acurada em relação a distribuição espacial da biomassa total para as florestas do Amapá.

Em termos da biomassa florestal média por unidade de área, os resultados indicaram que os valores modelados (536 Mg ha^{-1} ; amplitude: $293 - 724 \text{ Mg ha}^{-1}$), no Amapá são 75% maiores do que o restante da Amazônia brasileira (307 Mg ha^{-1} ; amplitude: $303 - 385 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Nogueira et al. 2008), e por situar-se, em grande parte, do Escudo das Guianas que estocam quantidades de biomassa mais elevadas ($434,4 \text{ Mg ha}^{-1}$; $291,2-728,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Feldpausch et al., 2012).

Em relação a cada fitofisionomia, todas apresentaram médias maiores que estudo realizado por Nogueira et al. (2008) na Amazônia brasileira. A média na floresta ombrófila submontana no Amapá foi de $521,83 \pm 49,82 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto que para Amazônia foi de $385,33 \pm 92,50 \text{ Mg ha}^{-1}$. A fitofisionomia de floresta ombrófila de terras baixas foi a que apresentou a maior média no Amapá ($619,13 \pm 38,27 \text{ Mg ha}^{-1}$) e na Amazônia de $384,50 \pm 70,11 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Nogueira et al. 2008). A floresta ombrófila aluvial apresentou a menor média nos dois estudos ($447,60 \pm 45,51 \text{ Mg ha}^{-1}$) no Amapá, e para a Amazônia de ($360,83 \pm 76,59 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Nogueira et al. 2008).

A utilização de técnica de interpolação relacionada às variáveis ambientais (Latitude, Longitude, Precipitação, Vegetação e Resíduos) se mostrou significativa, através da Regressão Linear Múltipla ($R^2 = 0,84$). A longitude, precipitação e vegetação mostraram relação de natureza positiva, ou seja, quanto maiores, maior a biomassa florestal.

A biomassa total das áreas protegidas foi estimada em $4.760,91 \times 10^6 \text{ Mg}$ (média de 535 Mg ha^{-1} ; amplitude: $293 - 721 \text{ Mg ha}^{-1}$), representando 84,1% da biomassa total do Amapá. Estas estimativas indicam que as áreas protegidas no Amapá são estratégicas para mitigar as perdas nos estoques de carbono e na redução nas emissões de GEE, fazendo parte

de um grande conjunto de áreas protegidas na Amazônia que são essenciais para a manutenção dos estoques de carbono (Nepstad et al. 1999; Pfaff et al. 2015; Soares-Filho et al. 2010; Vitel et al. 2013). Estas áreas protegidas realizam um papel importante na mitigação dos efeitos da mudança climática global e podem representar futuras oportunidades para o estado do Amapá no âmbito de projetos REDD+. Estes projetos têm potencial para reduzir as emissões de GEE (Fearnside et al., 2018) e beneficiar as populações tradicionais que nelas vivem, se comprometendo a manter a floresta em pé (Greenleaf, 2019; Yanai et al. 2012; Vitel et al. 2013).

O maior estoque observado dentro das áreas protegidas foi nas unidades de conservação ($4.243,93 \times 10^6$ Mg), sendo que nas unidades de conservação de uso sustentável, foi estimado em $2.263,30 \times 10^6$ Mg, com a maior média encontrada na Floresta Nacional do Amapá (599 Mg ha^{-1} ; amplitude: $495 - 654 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Table 6).

Na Floresta Nacional do Amapá foi estimado um estoque total de $274,92 \times 10^6$ Mg maior que observado por Nogueira et al. (2018) no total de $176,47 \times 10^6$ Mg. O maior estoque foi observado na unidade de conservação de proteção integral Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque, estimado em $1.872,98 \times 10^6$ Mg, e Nogueira et al. (2018) obtiveram $1482,50 \times 10^6$ Mg. Na Floresta Estadual do Amapá foi estimado $1.325,85 \times 10^6$ Mg, e $891,56 \times 10^6$ Mg de acordo com Nogueira et al. (2018).

As áreas protegidas desempenham uma função importante na prevenção de emissões do desmatamento (Fearnside, 2008). Os estoques de biomassa e, conseqüentemente os estoques de carbono atualmente mantidos nas áreas protegidas estão sob menor risco de serem emitidos para a atmosfera pelo desmatamento do que o carbono armazenado na vegetação localizada fora das áreas protegidas.

Além de seu valor para a conservação da diversidade biológica, as áreas protegidas são extremamente valiosas porque possuem grandes quantidades de carbono. Esse carbono é especialmente valioso porque está em áreas que estão sob proteção legal, embora essas áreas tenham níveis variados de acesso e uso permitidos dos recursos naturais.

5. Conclusão

Foram realizados avanços na quantificação de estoques e na espacialização da biomassa total de florestas originais no Estado do Amapá, contribuindo assim para a redução das incertezas na distribuição espacial da biomassa florestal. Este estudo indica a necessidade de espacialização dos estoques de biomassa florestal utilizando um número maior de parcelas de entorno para minimizar as incertezas locais sobre os reservatórios de carbono.

O mapa produzido neste estudo de alta resolução espacial é essencial para o balanço do carbono em diferentes escalas e traz evidências de que as florestas da região guardam os maiores estoques de biomassa da Amazônia.

Estes estoques concentram-se em áreas protegidas que necessitam de estratégias e políticas públicas contundentes para mitigar perdas nos estoques de carbono e na redução nas emissões de GEE.

Referências

- Almeida, S. S.; Silva, M. S.; Rosa, N.A., 1996. Análise fitossociológica e uso de recursos vegetais na Reserva Extrativista do Cajari, Amapá. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Botânica*, Belém, PA, Brazil, 11, 1, 61-74.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Baccini, A., Goetz, S.J., Walker, W.S., Laporte, N.T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P.S.A., Dubayah, R., Friedl, M.A., Samanta, S., Houghton, R.A., 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nat. Clim. Change* 2, 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>.
- Barni, P.E., Manzi, A.O., Condé, T.M., Barbosa, R.I., Fearnside, P.M., 2016. Spatial distribution of forest biomass in Brazil's state of Roraima, northern Amazonia. *For. Ecol. Manage.* 377, 170–181. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.010>.
- Bello-Pineda, J., Hernández-Stefanoni, J. L., 2007. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. *Pan-Am. J. Aquat. Sci.* 2, 247–254.
- Brazil, ANA (Agência Nacional de Águas), 2018. Precipitação Média Anual - Série de 1977 a 2006, Brasília, DF, Brazil, <<http://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/>> (accessed 23/07/2018).
- Brazil, BDIA (Banco de Dados de Informações Ambientais), 2018a. Mapa de vegetação, Rio de Janeiro, RJ, Brazil,, <[http:// https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao/](http://https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/vegetacao/)> (accessed 24/07/2018).
- Brazil, BDIA (Banco de Dados de Informações Ambientais), 2018b. Mapa de pedologia, Rio de Janeiro, RJ, Brazil,, <[http:// https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia/](http://https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia/)> (accessed 27/10/2018).
- Brazil, IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2012. Manual Técnico da Vegetação Brasileira – Manuais Técnicos em Geociências No 1. 2ª Edição Revista e Ampliada. IBGE, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 271 pp <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/recursos_naturais/manuais_tecnicos/manual_tecnico_vegetacao_brasileira.pdf> (accessed 19/06/2018).
- Brazil, ICMBIO (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade), 2009. Plano de Manejo do Parque Nacional Montanhas do Tumucumaque. Brasília, DF, Brazil, 299 pp <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades_coservacao/parna_montanhas-do-tumucumaque.pdf> (accessed 19/10/2018).
- Brazil, INAM (Instituto Natureza Amazônica), 2010. Relatório do Inventário Florestal Amostral da Floresta Estadual do Amapá. Macapá, AP, Brazil, 176 pp.
- Brazil, INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), 2018. Normal Climatológica do Brasil. Brasília, DF, Brazil. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>> (accessed 10/12/2018).
- Brazil, INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), 2018. Acervo Fundiário. Brasília, DF, Brazil. <http://certificacao.incra.gov.br/csv_shp/export_shp.py> (accessed 10/11/2018).
- Brazil, MMA (Ministério do Meio Ambiente), 2018. Dados Georreferenciados Unidades de Conservação. Brasil. Brasília, DF, Brazil. <<https://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs/dados-georreferenciados.html>> (accessed 8/10/2018).
- Brazil, MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia), 2010. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. MCT, Brasília, DF, Brazil, 280 pp.
- Brazil, SEMA-AP (Secretaria de Estado do Meio Ambiente – Amapá), 2015. Relatório Técnico de Desmatamento no Estado do Amapá, referente ao período 2013 e 2014. Macapá, AP, Brazil, 32 pp.

- Brazil, SEMA-AP (Secretaria de Estado do Meio Ambiente – Amapá), 2017. Relatório Técnico de Desmatamento no Estado do Amapá, referente ao período 2015 e 2016. Macapá, AP, Brazil, 6 pp.
- Brazil, RADAMBRASIL, 1973-1983. Levantamento dos Recursos Naturais (Folhas SA.22 Macapá). Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Brown, S., Lugo, A.E., 1992. Biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17 (1), 8–18.
- Burrough, P., McDonell, R., 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, Oxford, UK. Available at: <http://www.rc.unesp.br/igce/geologia/GAA01048/papers/Burrough_McDonnell-Two.pdf> (accessed 12/11/2018).
- Carim, M. J. V.; Jardim, M. A. G.; Medeiros, T. D. S., 2008. Composição florística e estrutura de floresta de várzea no município de Mazagão, Estado do Amapá, Brasil. *Sci. For.*, 36 (79), 191-201.
- Costa-Neto, S.V.; Silva, M.S., 2003. Projeto zoneamento ecológico-econômico do setor costeiro estuarino do Estado do Amapá: diagnóstico sócio-ambiental, relatório técnico de vegetação. Macapá, AP, Brazil, 38p.
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., Perez, R., 2004. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philos. Trans. R. Soc. B* 359, 409–420.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M.S., Delitti, W.B. C., Duque, A., Eid, T., Fearnside, P.M., Goodman, R.C., Henry, M., Martínez-Yrizar, A., Mugasha, W.A., Muller-Landau, H.C., Mencuccini, M., Nelson, B.W., Ngomanda, A., Nogueira, E.M., Ortiz-Malavassi, E., Pélissier, R., Ploton, P., Ryan, C.M., Saldarriaga, J.G., Vieilledent, G., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20 (10), 3177–3190. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- De Gonçalves, L. G. G., Borak, J. S., Costa, M. H., Saleska, S. R., Baker, I., Restrepo-Coupe, N., Muza, M. N., Poulter, B., Verbeeck, H., Fisher, J. B., et al., 2013. Overview of the large-scale biosphere–atmosphere experiment in amazonia data model intercomparison project (Iba dmip). *Agric. For. Meteorol.* 182, 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.030>.
- Drummond, J.A.; Dias, T. C. A. C.; Brito, D. M. C., 2008. Atlas das Unidades de Conservação do Estado do Amapá. Macapá, AP, Brazil.
- Fearnside, P. M., 1992. Forest biomass in Brazilian Amazônia: comments on the estimate by Brown and Lugo. *Interciencia* 17 (1), 19–27.
- Fearnside, P. M., 1994. Biomassa das florestas Amazônicas brasileiras. In: Bandeira, R.L., Reis, M., Borgonovi, M. N., Cedrola, S. (Eds.), *Emissão Seqüestro de CO₂: Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil*. Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 95–124.
- Fearnside, P.M., 1996. Amazonia and global warming: annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil’s Amazon region. In: Levine, J. (Ed.), *Biomass Burning and Global Change, Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait*, vol. 2. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, pp. 606–617.
- Fearnside, P.M., 1997a. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Clim. Change* 35 (3), 321–360.
- Fearnside, P.M., 1997b. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *For. Ecol. Manage.* 90, 59–87.
- Fearnside, P.M., 2000. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Clim. Change* 46 (1–2), 115–158.
- Fearnside, P.M., 2008. The roles and movements of actors in the deforestation of Brazilian Amazonia. *Ecol. Soc.* 13, 23 [Online] URL: <<http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art23/>>.

- Fearnside, P. M., Nogueira, E. M., Yanai, A. M., 2018 . Maintaining carbon stocks in extractive reserves in Brazilian Amazonia. *Desenvolv. Meio Ambiente*, 48, 446–476, <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v48i0.58780>.
- Feldpausch, T.R., Banin, L., Phillips, O.L., Lewis, S.L., Quesada, C.A., et al., 2011. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8, 1081–1106. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1081-2011>.
- Feldpausch, T.R., Lloyd, J., Lewis, S.L. et al., 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences* 9, 3381–3403. <https://doi.org/10.5194/bg-9-3381-2012>.
- Gardiman Junior, B. S., Magalhães, I. A. L., Freitas, C. A. A., Cecílio, R. A., 2012. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência* 8 (1), 61–71. <https://10.5777/ambiencia.2012.01.05>.
- Golfari, L., Caser, R. L., Moura, V. P. G., 1978. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2a. aproximação). PRODEPEF. Série Técnica, 11. Belo Horizonte, MG, Brazil, 66 pp.
- Greenleaf, M., 2019. The value of the untenured forest: land rights, green labor, and forest carbon in the Brazilian Amazon, *The Journal of Peasant Studies*. <https://doi.org/10.1080/03066150.2019.1579197>.
- Harris, N.L., Brown, S., Hagen, S.C., Saatchi, S.S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M.C., Potapov, P.V., Lutsch, A., 2012. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science* 336, 1573–1576. <https://doi.org/10.1126/science.1217962>.
- Houghton, R.A., Hall, F., Goetz, S.J., 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *J. Geophys. Res.* 114, G00E03. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>.
- Houghton, R.A., 2010. How well do we know the flux of CO₂ from land-use change?. *Tellus*. 62B, 337–351. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00473.x>.
- Isaaks, E., Srivastava, R., 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, USA.
- Landim, P. M. B., Sturaro, J. R., 2002. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. *Geomatemática, Texto didático*, 6. DGA, IGCE, Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Rio Claro, São Paulo, Brazil. Available at: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. (Accessed 10/04/2018).
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Pitman, N.C.A., Quesada, C. A., Salomão, R., Silva, J.N.M., Lezama, A.T., Terborgh, J., Martinez, R.V., Vinceti, B., 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Glob. Change Biol.* 12, 1107–1138. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x>.
- Morais, V. A., Santos, C. A., Mello, J. M., Dadid, H. C., Araújo, E. J. G. A., Scolforo, J. R. S., 2017. Spatial and vertical distribution of litter and belowground carbon in a Brazilian cerrado vegetation. *Cerne*, 23 (1), 43-52. <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201723012247>.
- Nepstad, D.C., Veríssimo, A., Alencar, A., Nobre, C., Lima, E., Lefebvre, P., Schlesinger, P., Potter, C., Moutinho, P., Mendoza, E., Cochrane, M., Brooks, V., 1999. Largescale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature* 398, 505–508.
- Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Soares-Filho, B., 2011. Systemic conservation, REDD, and the future of the Amazon Basin. *Conserv. Biol.* 25, 1113–1116. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01784.x>.
- Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *For. Ecol. Manage.* 256, 1853–1867.

- Nogueira, E.M., Yanai, A.M., Fonseca, F.O.R., Fearnside, P.M., 2015. Carbon stock loss from deforestation through 2013 in Brazilian Amazonia. *Glob. Change Biol.* 21, 1271–1292. <https://doi.org/10.1111/gcb.12798>.
- Nogueira, E. M., Yanai, A. M., de Vasconcelos, S. S., de Alencastro Graça, P. M. L., & Fearnside, P. M., 2018. Carbon stocks and losses to deforestation in protected areas in Brazilian Amazonia. [journal article]. *Regional Environmental Change*, 18(1), 261-270. doi: 10.1007/s10113-017-1198-1.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A., 2007. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11 (5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Peres, R. N.; Serruya, N. M.; Vieira, L. S., 1974. Levantamento Exploratório de Solos. In: Brasil Projeto RADAM. Folha NA/NB.22 Macapá. Levantamento de recursos naturais, 6, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Pfaff, A., Robalino, J., Herrera, D., Sandoval, C., 2015. Protected Areas' Impacts on Brazilian Amazon Deforestation: Examining Conservation – Development Interactions to Inform Planning. *PLoS ONE* 10(7): e0129460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129460>.
- R Development Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria <<http://www.R-project.org>>.
- 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., Petrova, S., White, L., Silman, M., Morel, A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 108 (24), 9899–9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>.
- Sales, M.H., Souza Jr., C.M., Kyriakidis, P.C., Roberts, D.A., Vidal, E., 2007. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondônia, Brazil. *Ecol. Model.* 205, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.02.033>.
- Soares-Filho, B., Moutinho, P., Nepstad, D., Anderson, A., Rodrigues, H., Garcia, R., Dietzsch, L., Merry, F., Bowman, M., Hissa, L., Silvestrini, R., Maretti, C., 2010. Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 107 (24), 10821–10826. <https://doi.org/10.1073/pnas.0913048107>.
- Souza, E. B., Cunha, A. C., 2010. Climatologia de precipitação no Amapá e mecanismos climáticos de grande escala, in: Tempo, clima e recursos hídricos—resultados do projeto REMETAP no Amapá, Cunha, A. C., Souza, E. B., Cunha, H. F. A., IEPA, Macapá, AP, Brazil, 10, 177-195. <<http://livroaberto.ufpa.br/jspui/handle/prefix/418>>. (accessed 14/02/2019).
- Vitel, C. S. M. N., Carrero, G. C., Cenamo, M. C., Leroy, M., Graça, P. M. L. A., Fearnside, P. M., 2013. Land-use change modeling in a Brazilian indigenous reserve: Construction a reference scenario for the Suruí REDD project. *Human Ecology*, 41(6), 807-826, <http://dx.doi.org/10.1007/s10745-013-9613-9>.
- Yanai, A. M., Fearnside, P. M., de Alencastro, Lima, Graça, P. M., Nogueira, E. M., 2012. Avoided deforestation in Brazilian Amazonia: simulating the effect of the juma sustainable development reserve. *For. Ecol. Manage.* 282, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.029>.

Supplementary Material

José Douglas Monteiro da Costa

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA
Rod. Juscelino Kubitschek, km 02 - Jardim Marco Zero,
68903-419, Macapá-Amapá, Brazil
email: jose.costa@ueap.edu.br

Paulo Eduardo Barni

Universidade Estadual de Roraima - UERR
Campus Rorainópolis
Av. Senador Helio Campos, s/n
69375-000 Rorainópolis-Roraima, Brazil
email: paulinpa2007@gmail.com

Eleneide Doff Sotta

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa
Rod. Juscelino Kubitschek, KM- 5
68903-197, Macapá - Amapá, Brazil
email: eleneide.sotta@embrapa.br

Marcelo de Jesus Veiga Carim

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá - IEPA
Coordenadoria de Desenvolvimento Tecnológico - CDT
Rod. Juscelino Kubitschek, KM-10
68903-419, Macapá, Amapá, Brazil
email: veigacarim@hotmail.com

Alan Cavalcanti da Cunha

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA
Rod. Juscelino Kubitschek, km 02
68903-419, Macapá-Amapá, Brazil
email: alancunha12@gmail.com

Marcelino Carneiro Guedes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa
Rod. Juscelino Kubitschek, KM- 5
68903-197, Macapá, Amapá, Brazil
email: marcelino.guedes@embrapa.br

Perseu da Silva Aparício

Universidade do Estado do Amapá - UEAP
Av. Presidente Vargas - 650
68900-070, Macapá, Amapá, Brazil
email: perseu_aparicio@yahoo.com.br

Renato Richard Hilário

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
 Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA
 Rod. Juscelino Kubitschek, km 02
 68903-419, Macapá-Amapá, Brazil
 email: renatohilario@gmail.com

Reinaldo Imbrozio Barbosa

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
 Coordenação de Dinâmica Ambiental - CDAM
 Núcleo de Pesquisas de Roraima - NPRR
 Rua Coronel Pinto 315 – Centro
 69301-150 Boa Vista-Roraima, Brazil
 email: reinaldo@inpa.gov.br

Philip Martin Fearnside

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
 Coordenação de Dinâmica Ambiental - CDAM
 Av. André Araújo 2936 - Petrópolis
 69067-375 Manaus-Amazonas, Brazil
 email: pmfearn@inpa.gov.br

José Julio de Toledo (*)

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
 Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais - PPGCA
 Rod. Juscelino Kubitschek, km 02
 68903-419, Macapá - Amapá, Brazil
 email: jjuliotoledo@gmail.com

Table A1

Local allometric models using DAP and bole height of a sample of trees available for each location.

Phytophysionomy	Local allometric models	Local
Da	$((30.4150 * \text{DAP}) / (14.6647 + \text{DAP})) - 8.2085$	Laranjal do Jari
Da	$((15.0758 * \text{DAP}) / (22.5465 + \text{DAP})) - 1.3243$	Mazagão
Db	$3.40741 * \text{DAP}^{0.30364}$	Laranjal do Jari
Db	$18.92129 * (1 - \exp(-0.08386 * \text{DAP}^{0.85330}))$	Laranjal do Jari
Db	$((30.0005 * \text{DAP}) / (25.4919 + \text{DAP})) - 0.1073$	Flona