



KALILL JOSÉ VIANA DA PÁSCOA

**MODELOS PARA EXPRESSAR A DENSIDADE
DA MADEIRA, BIOMASSA E CARBONO DE
FLORESTAS NATIVAS EM MINAS GERAIS**

**LAVRAS – MG
2018**

KALILL JOSÉ VIANA DA PÁSCOA

**MODELOS PARA EXPRESSAR A DENSIDADE DA MADEIRA,
BIOMASSA E CARBONO DE FLORESTAS NATIVAS EM MINAS
GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

Dr. Lucas Rezende Gomide
Coorientador

**LAVRAS – MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Páscoa, Kalill José Viana da.

Modelos para expressar a densidade da madeira, biomassa e
carbono de florestas nativas em Minas Gerais / Kalill José Viana da
Páscoa. - 2018.

105 p. : il.

Orientador(a): José Roberto Soares Scolforo.

Coorientador(a): Lucas Rezende Gomide.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Densidade da madeira. 2. Biomassa aérea. 3. Estoque de
carbono. I. Scolforo, José Roberto Soares. II. Gomide, Lucas
Rezende. III. Título.

KALILL JOSÉ VIANA DA PÁSCOA

**MODELOS PARA EXPRESSAR A DENSIDADE DA MADEIRA,
BIOMASSA E CARBONO DE FLORESTAS NATIVAS EM MINAS**

GERAIS

***MODELS FOR EXPRESSING WOOD DENSITY, BIOMASS AND
CARBON OF NATIVE FORESTS IN MINAS GERAIS***

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 07 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho	UNICENTRO
Prof. Dr. José Márcio de Mello	UFLA
Prof. Dr. João Domingos Scalon	UFLA
Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide	UFLA

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

**LAVRAS – MG
2018**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Ciências Florestais e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

Ao Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal (LEMAF) e aos professores que fazem parte do mesmo, gostaria de demonstrar minha imensa gratidão pelos 10 anos de oportunidades, ensinamentos e convivência que, certamente, foram de grande importância para meu crescimento pessoal e profissional.

Ao professor José Roberto Soares Scolforo, que em 2008 me abriu as portas do LEMAF para início da minha caminhada, como estagiário no projeto Candeia, e me acompanhou até o presente momento com sua orientação.

Ao professor Lucas Rezende Gomide, obrigado pela motivação nos momentos de fraqueza, pela ajuda na concepção e revisão dos artigos que integram essa tese, pelos momentos de discussão de ideias e pela amizade e confiança a mim investida.

Ao professor José Marcio Mello, pela revisão do trabalho e pelos ensinamentos acadêmicos ao longo dessa jornada de graduação e pós-graduação.

Ao professor Antônio Carlos Ferraz Filho, que mesmo a distância foi fundamental nas revisões e sugestões de melhorias.

A todos os amigos, que por algumas vezes nos referimos como estagiários, obrigado pela imensa ajuda no processamento das amostras, nas análises em laboratório e pelos momentos de descontração, sem vocês a realização dessa tese seria impossível.

Aos meus queridos amigos e companheiros de trabalho Thiago e Thiza, obrigado pela ajuda incondicional, pelas conversas que ajudam a confortar a mente, a convivência com vocês faz o trabalho ser incrivelmente gratificante.

A Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG pelo financiamento do projeto CEMIG GT 456 - Modelo Fitogeográfico da Bacia do Rio Grande, base para a realização desse trabalho.

Aos professores da banca examinadora que aceitaram o convite para contribuir com sua avaliação e sugestões de melhorias.

Aos meus pais, Josimar e Maria Auxiliadora, pela educação, amor e pelo esforço para que eu alcançasse esta realização, também por me ensinarem a importância da dedicação e do trabalho e de sempre fazer o seu melhor.

A minha namorada Mariane pelo amor, apoio, paciência e pela renúncia da minha presença em tantos momentos dessa fase.

À Nossa Senhora Aparecida pelas graças alcançadas durante tantos anos.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa conquista, meu muito obrigado.

RESUMO

As florestas nativas desempenham importantes serviços à sociedade, entre eles, o sequestro e estoque de carbono pela biomassa dos seus diversos compartimentos. Conhecer a dimensão desse serviço é desafiador, porém necessário, frente aos atuais cenários de mudanças climáticas, pois ajudam a entender o papel das florestas na regulação dos teores de CO₂ na atmosfera e justificar a importância da sua preservação. Conhecer o estoque de carbono de uma floresta depende do conhecimento da sua biomassa, que consequentemente depende da variação da densidade básica da madeira. Nesse cenário, o objetivo desse trabalho foi realizar um amplo estudo da amostragem e cálculo da densidade da madeira de árvores nativas, da modelagem da biomassa e da espacialização do carbono estocado nos remanescentes florestais da bacia hidrográfica do Rio Grande, estado de Minas Gerais, Brasil. A análise da amostragem, visando estudos da densidade básica da madeira, indica que a partir de 30 árvores ocorre a estabilização do coeficiente de variação, dessa forma, amostras menores deveriam ser evitadas. O valor médio da densidade básica da madeira de uma árvore está altamente correlacionada com a densidade observada a 25 e 50% da altura, o que é um bom indicador para amostragens não destrutivas. A biomassa total das árvores amostradas, indicam que, em média, 55,7% está alocada no fuste; 24,5% nos galhos grossos; 13,7% nos galhos finos e 6,6% nas folhas. A biomassa total se mostrou bastante correlacionada com os valores de diâmetro, altura total, área de copa e densidade básica da madeira, onde os modelos que utilizaram essas variáveis de forma conjunta apresentaram ótimos resultados. As estimativas de estoque de carbono para a bacia foram de 118,8 Tg, o que equivale a 436,0 Tg de dióxido de carbono, com um valor de mercado de R\$ 13,4 bilhões. Os maiores valores médios foram encontrados na fitofisionomia Ombrófila (90 Mg ha⁻¹) e menores no Cerrado (30 Mg ha⁻¹), como esperado. A floresta Ombrófila se caracteriza como um tipo vegetacional pertencente ao bioma da Mata Atlântica que se destaca por apresentar componente arbóreo alto e denso, com sub-bosque bem povoado, enquanto o Cerrado é um tipo de vegetação xeromorfa que se desenvolve em solos pobres com porte variando desde um estrato gramíneo até um estrato arbóreo de troncos tortuosos. Em relação aos valores totais, o bioma Mata Atlântica (Ombrófila e Semidecídua) estoca 57,9% do carbono e o Cerrado 31,8%. Desse total, 84% estão em florestas localizadas em propriedades privadas, contra 16% em unidades de conservação. Do carbono estocado nas propriedades privadas, 62% está em pequenas propriedades, 24,7% em médias e 13,3% em grandes propriedades, demonstrando a importância da conservação desses remanescentes, por meio da redução do desmatamento e do aumento da área florestal.

Palavras-chave: Remanescentes florestais. Relações alométricas. Serviços ambientais.

ABSTRACT

Native forests have an important role in society, including sequestration and carbon storage in different biomass compartments. Knowing the size of this service is challenging, but necessary, due to current climate change scenarios, because they help to understand the role of forests in regulating CO₂ levels in the atmosphere and justify the importance their preservation. Knowing the carbon stock of a forest depends on the knowledge of their biomass, which consequently depends on the variation of the wood basic density. In this scenario, the objective of this study was to conduct a comprehensive study about the sampling and calculation of wood basic density of native trees, modeling of biomass and spatial distribution of carbon stored in forest remaining in the Rio Grande watershed, state of Minas Gerais, Brazil. The analysis of the sampling for studies about wood basic density indicates that from 30 trees occurs the stabilization of the coefficient of variation, so smaller samples should be avoided. The average of wood basic density in a tree is highly correlated with the density observed at 25 and 50% of its height, which is a good indicator for nondestructive sampling. The total biomass of the sampled trees indicate that, on average, 55.7% is allocated on the trunk, 24.5% on thick branches, 13.7% on fine branches and 6.6% on leaves. The total biomass was highly correlated with values of diameter, total height, crown area and wood basic density, where the models that used these variables together presented excellent results. Carbon stock estimates for the watershed were 118.8 Tg, which is equivalent to 436.0 Tg carbon dioxide, with a market value of R\$ 13.4 billion. The highest values were found in the Rain forest vegetation type (90 Mg ha⁻¹) and lower in the Savanna (30 Mg ha⁻¹), as expected. The Rain forest is characterized as a vegetation type belonging to the Atlantic Forest biome that stands out for having a high and dense tree component with a well-populated sub-forest, while the Savanna is a type of xeromorphic vegetation that develops in poor soils varying in size from grassy to arboreal with tortuous branches. In relation to the total, Atlantic Forest (Rain forest and Semideciduous forest) stocks 57.9% of the carbon and the Savanna 31.8%. Of this total, 84% are in forests located in private properties, against 16% in conservation units. Of the carbon stored in private properties, 62% is located in small properties, 24.7% in mean and 13.3% in large properties, indicating the importance of conservation of forest remaining, by the reduction of deforestation and increase of forest area.

Keywords: Forest remaining. Allometric relationships. Environmental services.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Caracterização da bacia hidrográfica do Rio Grande.....	12
2.2 Caracterização dos remanescentes florestais da bacia	12
2.3 Estoque de carbono pelas florestas acima do solo.....	13
2.4 Acordos climáticos internacionais e metas brasileiras	15
2.5 Mercado de carbono	17
3 CONSIDERAÇÕES GERAIS	19
REFERÊNCIAS.....	20
SEGUNDA PARTE	22
ARTIGO 1 - Amostragem da densidade básica da madeira em florestas tropicais: Uma simulação de seus padrões funcionais.....	23
ARTIGO 2 - Biomassa acima do solo e suas relações alométricas: Diâmetro versus variáveis complementares	52
ARTIGO 3 - Estoque e valor econômico do carbono nos remanescentes florestais da bacia do rio Grande-Mg.....	75

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas florestais são cruciais para a manutenção e desenvolvimento das sociedades e das economias, apesar disso, o crescimento populacional e a expansão das áreas agrícolas pressionam cada vez mais os remanescentes de vegetação nativa (ZANG et al., 2017). Nas últimas décadas, inúmeras incertezas em relação aos efeitos da alteração do uso do solo e sua relação com as mudanças climáticas foram apontadas (VELASCO-MOLINA, 2016). Por essa razão, a quantificação e o monitoramento dos serviços ecossistêmicos, entre eles o sequestro e estoque de carbono, tornou-se foco entre comunidades de cientistas e profissionais, visando esclarecer as relações entre as mudanças antrópicas e a sustentabilidade dos serviços ambientais.

Atualmente, já se sabe que o desmatamento, incêndios e a degradação das florestas naturais têm contribuído intensamente para o aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, principalmente observado na maioria dos países tropicais (VICHARNAKORN et al., 2014). Segundo Pan et al. (2011) apenas o desmatamento nas regiões tropicais liberou entre 2,8 e 3,0 Pg de carbono por ano, no período entre 1990 e 2007, o equivalente a 40% das emissões globais advindas da queima de combustíveis fósseis nesse mesmo período.

No Brasil, essas são as principais práticas que contribuem para o fluxo de carbono para a atmosfera, colocando o país em quarto lugar, atrás dos Estados Unidos, China e Rússia, no *ranking* dos países que mais emitem CO₂ (MATTHEWS et al., 2014). Por isso, os estudos que avaliam e quantificam o sequestro e estoque de carbono pelas florestas, vêm buscando destacar a importância da preservação desses ecossistemas para o controle das concentrações de CO₂ na atmosfera e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

O grande apelo pela preservação e restauração das florestas se deve ao fato de as mesmas fixarem quantidades incrivelmente grandes de carbono, captado da atmosfera em sua biomassa por meio da fotossíntese (TESFAYE et al., 2016).

Pan et al. (2011) relataram que os mais de 3,9 bilhões de hectares de florestas existentes no globo absorvem entre 1,0 e 2,6 Pg de carbono por ano, nos seus mais diversos compartimentos, contudo, quando entram em processo de decomposição, as mesmas passam a se converter em grandes fontes de CO₂ para a atmosfera.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo principal estimar o estoque de carbono nos remanescentes florestais da bacia hidrográfica do Rio Grande, estado de Minas Gerais, avaliando também o estoque de CO₂ equivalente (Créditos de Carbono) e o seu valor de mercado.

Além disso, conhecer o estoque de carbono e biomassa de uma floresta exige o conhecimento da variação da densidade básica da madeira, dessa forma os objetivos específicos foram:

- i) Realizar um amplo estudo da amostragem e cálculo da densidade da madeira de árvores nativas;
- ii) Modelar a biomassa;
- iii) Avaliar a dependência espacial do carbono estocado;
- iv) Analisar o estoque de carbono nas diferentes formações vegetacionais de ocorrência na bacia e;
- v) Discutir acerca da viabilidade dos pagamentos por serviços ambientais na bacia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da bacia hidrográfica do Rio Grande

A bacia hidrográfica do Rio Grande (BHRG) está localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, sudeste do Brasil. Forma juntamente com o Rio Paranaíba, a Bacia do Rio Paraná, que por sua vez, em conjunto com as bacias do Paraguai e Uruguai, compõe a Bacia do Prata. Sua nascente se localiza na Serra da Mantiqueira, no município de Bocaina de Minas-MG, a uma altitude de 1.980 metros, percorrendo a partir dela 1.360 Km até encontrar o Rio Paranaíba no município de Carneirinho-MG, já no triângulo mineiro.

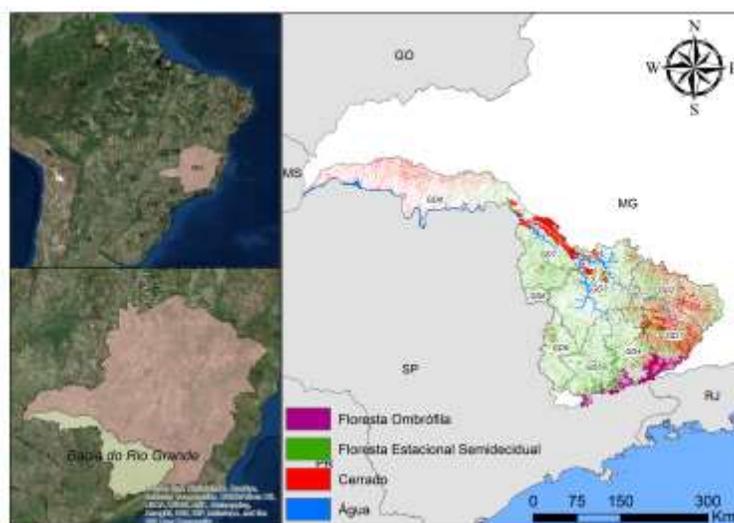
É uma bacia de expressiva extensão territorial, com mais de mais de 143 mil Km² de área de drenagem, divididos entre os estados de Minas Gerais (60,2%) e São Paulo (39,8%). Essa grande abrangência territorial garante à bacia uma grande diversidade vegetal, com áreas que variam desde Cerrado até áreas montanhosas cobertas por Mata Atlântica, típicas da costa sudeste do Brasil. O clima da região é influenciado tanto por massas de ar proveniente do extremo sul do continente (frias), quanto da região equatorial amazônica (quentes), assim são encontradas áreas com clima tropical e subtropical (ALVARES et al., 2013). A geração de energia elétrica pela bacia também merece destaque, já que ao longo do seu curso 13 barragens estão instaladas, respondendo juntas por 8% da produção energética nacional. Ao longo do curso do rio ainda estão localizadas importantes áreas agrícolas e pecuárias do estado de Minas Gerais, que também são abastecidas por ele.

2.2 Caracterização dos remanescentes florestais da bacia

A vegetação do sudeste brasileiro possui grandes variações em sua estrutura e composição, ao longo dos gradientes de latitude, longitude e altitude (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000). A vegetação da bacia do Rio Grande não

foge a essa regra, apresentando grandes áreas transicionais entre os biomas Mata Atlântica (Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Ombrófila) e Cerrado (Campo, Campo cerrado, Cerradão e Cerrado *sensu stricto*), biomas esses que sofreram os maiores impactos antropogênicos ao longo dos anos, em relação a substituição da vegetação natural, para a expansão das atividades agropecuárias, sendo os remanescentes florestais da bacia marcados pela formação de fragmentos isolados (Figura 1).

Figura 1 – Representação da vegetação remanescente da bacia do Rio Grande com a diferenciação das principais fitofisionomias.



Fonte: Do autor (2018).

2.3 Estoque de carbono acima do solo em florestas

Os ecossistemas florestais prestam importantes serviços ecossistêmicos a sociedade, entre eles o sequestro e estoque de carbono, fixando quantidades incrivelmente grandes de carbono captado da atmosfera na forma de CO₂ em sua biomassa por meio da fotossíntese (TESFAYE et al., 2016). O estoque atual de

carbono nas florestas do mundo é estimado em 861 Pg (1 Petagrama (Pg) = 10^8 Megagramas (Mg) = 1 bilhão de Toneladas), onde 471 Pg (55%) estão estocados nas florestas tropicais, 272 Pg (32%) nas florestas boreais e 119 Pg (14%) nas florestas temperadas, com valores médios de 242 Mg.ha⁻¹; 239 Mg.ha⁻¹ e 155 Mg.ha⁻¹ respectivamente para os três tipos florestais (PAN et al.; 2011).

As quantidades de carbono estocadas são controladas principalmente pela biomassa da árvore, assim, estimativas acuradas da biomassa são fundamentais para corretas estimativas de estoque de carbono pelas florestas. A maioria dos estudos de biomassa florestal foca no componente acima do solo (RIBEIRO et al., 2011), sendo que entre esses, com maior frequência apenas quantificando a biomassa do tronco e galhos (>3 cm de diâmetro), já que a essa biomassa há uma valoração econômica. Dessa forma, a contribuição dada por galhos finos e folhas raramente são estudadas, muito porque apresentam baixa influência na biomassa total (WATZLAWICK et al., 2012). Contudo, do ponto de vista dos estudos focados no estoque de carbono, esses compartimentos ganham destaque, uma vez que o objetivo é quantificar toda biomassa existente capaz de estocar carbono, da forma mais fidedigna possível.

As equações alométricas, sem dúvidas, estão entre as ferramentas mais utilizadas para a predição da biomassa florestal (RIBEIRO et al., 2011) já que, na maioria das vezes, a biomassa individual da árvore tem que ser estimada, por não ser medida diretamente no ambiente. Assim, a estimativa é feita com base em uma relação empírica entre biomassa e variáveis facilmente medidas, como o diâmetro medido a 1,30 metros do solo (DAP), altura total (HT) e em casos mais raros a área de projeção da copa (AC) e a densidade básica da madeira (db), utilizando a análise de regressão.

A base para aplicação dessa técnica é a amostragem destrutiva, onde indivíduos são abatidos, quantificando via métodos próprios a biomassa contida em seus compartimentos. Porém, dados de amostragem destrutiva para florestas

tropicais são raros, já que os métodos de quantificação diretos são difíceis, demorados e onerosos (CUBAS et al., 2016). Por essa razão, muitos autores optam por utilizar fatores de expansão da biomassa, que convertem as estimativas de volume em estimativas de biomassa. Conseqüentemente, obtendo o estoque de biomassa e a posterior quantidade de carbono estocado indiretamente (RIBEIRO et al., 2011). O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) recomenda inclusive o fator 0,47 para a conversão da biomassa em carbono de espécies arbóreas pertencentes a florestas tropicais e subtropicais (IPCC, 2006).

Assim, o conhecimento da capacidade de absorção do carbono das diferentes fitofisionomias florestais, bem como o estoque de carbono fixado na biomassa florestal, pode fornecer informações fundamentais para a tomada de decisões quanto ao manejo, à proteção e à valoração das florestas, inclusive em relação ao pagamento por serviços ambientais.

2.4 Acordos climáticos internacionais e metas brasileiras

O aumento da concentração dos gases do efeito estufa na atmosfera, advindos de atividades antrópicas, principalmente, devido a queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento, vêm gerando um desequilíbrio no fenômeno natural de regulação da temperatura média da Terra, ocasionando sua elevação a níveis prejudiciais a humanidade, resultando nas conhecidas mudanças climáticas (UNFCCC, 2004).

Diante desse cenário, os países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) reúnem-se periodicamente nas chamadas Conferência das Partes (*Conference of Parties - COP*) para negociações com o objetivo de estabilizar a concentração desses gases na atmosfera a níveis que evitem tais alterações climáticas. Entre as estratégias discutidas nessas conferências internacionais duas

se destacam como as mais promissoras, a substituição das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis por energias renováveis e o aumento do sequestro de carbono, por meio do combate ao desmatamento e programas de reflorestamento. Essa segunda opção, segundo Cunha-e-Sá et al. (2013), é economicamente viável e não pode ser negligenciada em uma política que vise a diminuição da concentração de CO₂ na atmosfera, por isso, a Organização das Nações Unidas (ONU) propôs um mecanismo de reduções de emissões de gases do efeito estufa baseado no combate ao desmatamento, incentivo ao reflorestamento e recuperação de áreas degradadas, conhecido como REDD+ (Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal).

Desde 2009 na COP15 realizada em Copenhague, o Brasil assume metas individuais para contribuir com as reduções das emissões, principalmente baseadas no combate ao desmatamento e na restauração de florestas. Em 2015, durante a Conferência do Clima de Paris (COP21), o Brasil assumiu reduzir suas emissões em 43%, em relação aos patamares alcançados em 2012 (1,16 bilhões de toneladas), além de restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, uma área equivalente ao território da Inglaterra, e eliminar o desmatamento ilegal na Amazônia (BRASIL, 2015).

Mais recentemente, em 2017 durante a COP23 em Bonn, na Alemanha, o Brasil anunciou o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG). O objetivo é impulsionar a regularização ambiental das propriedades rurais brasileiras, nos termos do Novo Código Florestal (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012), por meio de incentivos financeiros e outras medidas necessárias para o cumprimento da meta de restauração florestal apresentada em Paris, recuperando principalmente áreas degradadas com baixa produtividade, Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reserva Legal (RL),

onde estimativas apontam um déficit de cerca de 21 milhões de hectares em vegetação nativa (MMA, 2017a).

2.5 Mercado de carbono

A primeira vez que se debateu a possibilidade de criação de um mercado internacional de carbono foi durante a ECO-92 (1ª convenção das Nações Unidas sobre mudanças climáticas). Contudo, o mesmo só foi realmente efetivado em 1997 na COP 3, como parte do Protocolo de Quioto. Nesse mercado, as reduções de emissão de gases poluentes seriam certificadas, dando direito a créditos de carbono, que poderiam ser comercializados internacionalmente. Entre os três tipos de mecanismos de flexibilização de emissões propostos, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi visto por muitos anos como uma oportunidade de negócios para países emergentes, como o Brasil (SOUZA et al., 2012). Nele, os créditos originados pela redução das emissões em países em desenvolvimento poderiam ser comercializados com países desenvolvidos que não atingissem suas metas, contudo, na negociação do Protocolo de Quito as políticas relacionadas ao desmatamento e à degradação florestal ficaram fora do acordo.

Já em 2005, na COP 11, o debate acerca da inclusão dos remanescentes de florestas naturais no mercado de carbono voltou à tona, e após anos de discussões em 2013 na COP 19 foi instituindo, por meio do Marco de Varsóvia, o mecanismo de Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação Florestal (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* - REDD+), pelo qual se propõe que países desenvolvidos forneçam compensações financeiras, aos países em desenvolvimento, que reduzirem suas emissões de gases provenientes do

desmatamento e invistam em desenvolvimento sustentável e práticas de baixo carbono para o uso da terra.

Portanto, para que um país em desenvolvimento valide suas reduções é necessário a apresentação dos resultados bianualmente à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, sendo essa informação de inteira responsabilidade do país proponente. As análises das reduções devem ser feitas com base no nível de referência nacional de emissões florestais, um estudo realizado seguindo orientação metodológica do IPCC, com base em sistemas de monitoramento do desmatamento. A verificação dos resultados apresentados é feita por especialistas no setor de uso e mudança do uso da terra e florestas indicados pelas Nações Unidas, e após a verificação dos resultados, os pagamentos são efetuados (MMA, 2016). Os valores para esses pagamentos são oriundos do Fundo Verde para o Clima, que canaliza os recursos depositados pelos países desenvolvidos.

No Brasil, os níveis de referência nacional de emissões florestais, principais instrumentos de integração e articulação de iniciativas de REDD+, são chamados de Planos de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento nos biomas. A Amazônia e o Cerrado são os dois únicos biomas que possuem planos de ação em fase de execução, o da Amazônia desde 2004 e o do Cerrado desde 2010, sendo que o do Cerrado ainda se encontra em fase de análise, tornando elegíveis projetos REDD+ apenas para o bioma Amazônico até o momento (MMA, 2017b).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A bacia do Rio Grande apresenta uma grande importância tanto em relação ambiental como econômica, sendo fundamental para geração de energia elétrica e fornecimento hídrico a importantes áreas agrícolas e zonas urbanas. Por isso, a sustentabilidade da mesma não é uma opção, preservar os remanescentes florestais existentes é uma forma de preservar os seus serviços ambientais. Ecologicamente, sua grande diversidade de formações vegetacionais é algo único, que assim como toda a vegetação do sudeste do Brasil sofreu alta fragmentação ao longo dos anos. Nesse cenário, identificar o estoque de carbono existente nos remanescentes florestais e realizar a sua valoração econômica, podem ajudar a justificar a necessidade de proteção e recuperação dessas áreas, impulsionando a regularização das propriedades rurais de acordo com os termos da legislação ambiental vigente. Isso seria de extrema importância para que o Brasil cumpra as metas referentes a restauração florestal do acordo de Paris e poderá no futuro ser fonte de renda com o pagamento por sequestro de carbono por meio do mecanismo REDD+.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, December 2013.

BRASIL. **Com proposta mais ambiciosa, Brasil chega à COP21 como importante negociador do clima.** 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/11/com-proposta-mais-ambiciosa-Brasil-chega-a-COP21-como-importante-negociador-mundial-do-clima>>. Acesso em 30 de novembro de 2015.

CUBAS, R.; et al. Carbon contents and modelling of total organic carbon for *Pinus taeda* L. from natural regeneration. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 40, n. 4, p. 661-668, July/Aug. 2016.

CUNHA-E-SÁ, M. A. et al. Natural carbon capture and storage (NCCS): forests, land use and carbon accounting. *Resource and Energy Economics*, [S.I.], v. 35, n. 2, p. 148-170, May 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories:** agriculture, forestry and other land use. Japan: Institute for global environmental strategies (IGES), 2006. v. 4. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 5 December 2017.

MATTHEWS, H. D. et al. National contributions to observed global warming. *Environmental Research Letters*, [S.I.], v. 9, n. 1, p. 1-9, January 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Mensuração, Relato e Verificação (MRV) de resultados de REDD+.** 2016. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/pt/mensuracao-relato-e-verificacao-mrv-de-resultados-de-redd>>. Acesso em: 10 January. 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Brasil lança Planaveg na Conferência do Clima.** 2017a. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/index.php/comunicacao/agencia-informma?view=blog&id=2695>>. Acesso em: 10 January. 2018

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Acompanhamento e a análise de impacto das políticas públicas.** 2017b. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/pt/acompanhamento-e-a-analise-de-impacto-das-politicas-publicas>>. Acesso em: 10 January. 2018.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. A. L. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica**, Gainesville, v. 32, n. 4b, p. 793-810, December 2000.

PAN, Y. et al. A large and persistent carbon sinks in the world's forests. **Science**, Washington, D.C., v. 333, n. 6045, p. 988-993, August 2011.

RIBEIRO, S. C. et al. Above-and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 262, n. 3, p. 491-499, August 2011.

SOUZA, A. L. et al. O Mercado Internacional de créditos de carbono: estudo comparativo entre as vertentes regulada e voluntária no Brasil no período de 2004 a 2011. **Sistemas & Gestão**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 4, p. 526-544, January 2012.

TESFAYE, M. A. et al. Impact of changes in land use, species and elevation on soil organic carbon and total nitrogen in Ethiopian Central Highlands. **Geoderma**, [S.I.], v. 261, p. 70-79, January 2016.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC. **The First Ten Years**. Bonn, Germany, 2004. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/publications/first_ten_years_en.pdf>. Acesso em: 10 December. 2017.

VELASCO-MOLINA, M. et al. Biochemically altered charcoal residues as an important source of soil organic matter in subsoils of fire-affected subtropical regions. **Geoderma**, [S.I.], v. 262, p. 62-70, January 2016.

VICHARNAKORN, P. et al. Carbon stock assessment using remote sensing and forest inventory data in Savannakhet, Lao PDR. **Remote Sensing**, Beijing, v. 6, n. 6, p. 5452-5479, June 2014.

WATZLAWICK, L. F. et al. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 353-362, Setember 2012.

ZANG, Z. et al. Impact of landscape patterns on ecological vulnerability and ecosystem service values: An empirical analysis of Yancheng Nature Reserve in China. **Ecological Indicators**, Kiel, v. 72, p. 142-152, January 2017.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1 - Amostragem da densidade básica da madeira em florestas tropicais: Uma simulação de seus padrões funcionais

Basic Wood Density Sampling in Tropical Forests: A Simulation of its Functional Patterns

Kalill José Viana da Páscoa, Lucas Rezende Gomide, José Roberto Soares Scolforo, Antônio Carlos Ferraz Filho, José Márcio de Mello

O presente artigo é uma versão preliminar, redigido conforme normas da revista *Trees* (fator de impacto: 1,842), que poderá sofrer alterações a critério do corpo editorial, sendo apresentada aqui, na versão em português.

Resumo

A densidade básica da madeira (DBM) é uma variável primordial para o conhecimento da biomassa e do carbono estocado pelas florestas. Sua determinação demanda um alto esforço em campo, tornando seu levantamento economicamente oneroso. Os levantamentos tentando contornar esse obstáculo adotam diferentes metodologias para sua determinação, o que dificulta a comparação entre as estimativas geradas. Assim, esse estudo utilizou a simulação computacional para a determinação da intensidade amostral ótima da densidade de discos ao longo do tronco, para o cálculo da DBM de árvores pertencentes a diferentes fitofisionomias de floresta tropical. Para isso, foram cubadas 1.671 árvores de onde foram retiradas amostras do tronco nas alturas relativas 0%, 25%, 50% 75% e 100% em à relação a altura comercial (altura em que o fuste atinge 3 cm de diâmetro) usadas para determinar a DBM. Com base na técnica de reamostragem *Bootstrap* foi definido o tamanho da amostra onde ocorria a estabilização do coeficiente de variação, e com base nesse, calculada a intensidade amostral ótima. A DBM foi modelada em função das diversas combinações entre as densidades das amostras extraídas nas 5 alturas relativas do tronco, e com bases nos valores de AIC e Syx% foram definidos os modelos que apresentavam os melhores resultados. Aproximadamente 30 árvores são suficientes para que o valor do coeficiente de variação se estabilize, enquanto o melhor modelo foi aquele que utilizou 5 amostras. No entanto, as estimativas de DBM em função das amostras retiradas a 25 e 50% são capazes de produzir estimativas de DBM próximas as do melhor modelo, as quais podem ser utilizadas por meio de metodologias semi destrutivas, e portanto, constituir uma opção para a redução dos custos dos inventários de estoque de carbono nas florestas.

Palavras-Chave: Floresta Nativa; Biomassa florestal; Intensidade amostral; *Bootstrap*.

Introdução

A densidade básica da madeira (DBM) é uma variável que relaciona diretamente a massa seca com o volume, refletindo a proporção da madeira ocupada por espaços vazios. Ela é usada para definir a qualidade e potencial de uso da madeira, sendo considerada uma variável chave para as plantas lenhosas, devido a sua conexão com importantes características do seu processo evolutivo, como a estabilidade mecânica e condutividade hidráulica (He e Deane, 2016). Acredita-se que a DBM forneça conhecimentos sobre a ecologia das plantas, uma vez que está diretamente correlacionada com as suas estratégias de sobrevivência, associadas às restrições que os diferentes ambientes impõem ao seu desenvolvimento (Swenson e Enquist, 2008).

A DBM é controlada pela atividade cambial da árvore (Hein et al., 2016). Assim, plantas que se desenvolvem sob condições bióticas adversas geralmente apresentam baixas taxas de crescimento e compensam suas menores dimensões aumentando sua resistência mecânica, produzindo células com paredes mais espessas e lúmen mais estreito, resultando em madeiras mais densas (Montes et al., 2017; Shimamoto et al., 2016). Já as plantas que se desenvolvem em condições mais favoráveis apresentam maiores taxas de crescimento e produzem madeiras mais leves (Oliveira et al., 2012; Soares et al., 2015).

Além dos fatores ambientais, a DBM sofre considerável influência da expressão de fatores genéticos, ocorrendo grande variação entre espécies (Wiemann e Williamson, 2007), entre grupos de indivíduos dentro de uma espécie e mesmo dentro do próprio indivíduo, seja no sentido radial ou longitudinal (Yeboah et al., 2014). Por essa razão, o interesse na variação inter e intraespecífica da DBM e nas suas causas de variação é crescente, principalmente em florestas tropicais, devido à grande variabilidade existente nessas áreas, tanto em termos genéticos quanto em condições edafoclimáticas.

Embora exista uma busca por métodos alternativos para estimar a DBM, como em Swenson e Enquist (2008), que avaliaram a relação entre a DBM e a área foliar, e He e Deane (2016) que estudaram a relação entre DBM e a densidade básica dos galhos, todos dependem de medições destrutivas de árvores individuais, para a calibração dos resultados. No entanto, a amostragem destrutiva representa grandes dificuldades em termos operacionais, seja por seu alto custo no campo ou pela dificuldade de permissão do abate por meio dos órgãos ambientais.

O crescente interesse sobre a DBM, deve-se ao fato de que seu uso como variável preditora em equações alométricas para a estimativa da biomassa florestal, em adição a dados de diâmetro à 1,30 metro do solo (DAP) e altura das árvores (HT), possibilita a obtenção de estimativas mais realistas da massa seca da árvore (Nam et al., 2016). Isso permite converter dados do inventário florestal em estimativas de biomassa e carbono, informação essa fundamental para avaliar as respostas dos ecossistemas florestais aos cenários climáticos futuros (Restrepo-Coupe et al., 2017).

É importante ressaltar que a biomassa florestal, juntamente com o sequestro e o estoque de carbono, são excelentes indicadores dos serviços ambientais que uma floresta pode fornecer, agregando informação ao conhecimento que as variáveis tradicionais como volume de madeira e a riqueza de espécies fornecem, permitindo uma melhor avaliação ambiental dos benefícios gerados pelas florestas.

De acordo com Nogueira et al. (2007), é possível encontrar estudos que estimam a biomassa para grandes áreas, utilizando valores médios de DBM compilados a partir de outros trabalhos, que geralmente utilizam métodos diferentes, em relação ao número de plantas amostradas e a posição de coletas das amostras dentro do tronco, não considerando, por exemplo, o padrão decrescente da DBM com a altura, comumente relatado para a maioria das espécies florestais

tropicais (Auty et al., 2014). Essas diferenças ocorrem devido às limitações financeiras dos estudos de biomassa, que por necessidade simplificam as estratégias de amostragem.

Diante do exposto, fica claro a necessidade de melhor compreender a variabilidade da DBM existente nas árvores das florestas tropicais e entre suas fitofisionomias. Esse conhecimento poderia permitir a definição de um esforço amostral adequado, tanto em relação ao número de indivíduos amostrados, quanto à posição de coleta das amostras dentro da árvore, o que resultaria em uma referência para elaborar levantamentos de biomassa em florestas nativas ao redor do mundo com vegetações similares às encontradas nesse estudo.

Considerando a importância do tema, os objetivos desse estudo são: i) Avaliar a DBM em diferentes fitofisionomias que ocorrem no estado de Minas Gerais; ii) Definir a intensidade amostral ideal dos indivíduos para quantificar a DBM em cada fitofisionomia; iii) Avaliar o efeito da posição longitudinal amostrada ao longo do fuste para estimar a DBM; iv) Avaliar a viabilidade do uso da amostragem semi destrutiva, associada a modelos estatísticos, para quantificar a DBM.

Material e Métodos

Área de estudo

O Brasil possui uma área total de 8.514.877 Km², sendo que o estado Minas Gerais (MG) representa 7% (586.528 Km²), uma área equivalente aos territórios da França e Bélgica combinados, sendo o quarto maior território em relação aos outros estados do país. Localizado na região sudeste do Brasil, MG apresenta uma grande variação de paisagem e clima devido a sua ampla faixa territorial.

Cortado por extensas cadeias de montanhas, uma das principais características da paisagem do estado, e influenciado por massas de ar proveniente do sul do continente (frias) e da região da Amazônia equatorial (quentes), fazem o clima variar, com base na classificação de Köppen, desde áreas com clima tropical do tipo Aw (tropical com chuvas concentradas no verão e inverno seco) e As (tropical quente e úmido, com inverno seco), até áreas com clima subtropical do tipo Cfa (subtropical, com verão quente), Cfb (temperado, com verão suave), Cwa (subtropical de inverno seco) e Cwb (subtropical de altitude, com inverno seco e verão suave) (Alvares et al., 2013).

A variação climática mencionada reflete na distribuição espacial das fitofisionomias (Figura 1), que variam desde áreas de Savanna (Cerrado *Sensu Stricto* e Cerradão), passando por Mata Atlântica (Semidecídua e Ombrófila) até a Caatinga (Decídua), representando respectivamente 57%, 41%, e 2% da vegetação remanescente do estado (Scolforo et al., 2016).

Amostragem

Esta pesquisa utilizou um extenso banco de dados de cubagem destrutiva, formada por 1.671 árvores, derivadas de 349 espécies, incluindo todas as 5 fitofisionomias do estado (Cerrado S.S., Semidecídua, Ombrófila, Cerradão e Decídua), contemplando 47 fragmentos florestais (Figura1). O número de indivíduos amostrados por classes de diâmetro e fitofisionomia é apresentado na Tabela 1.

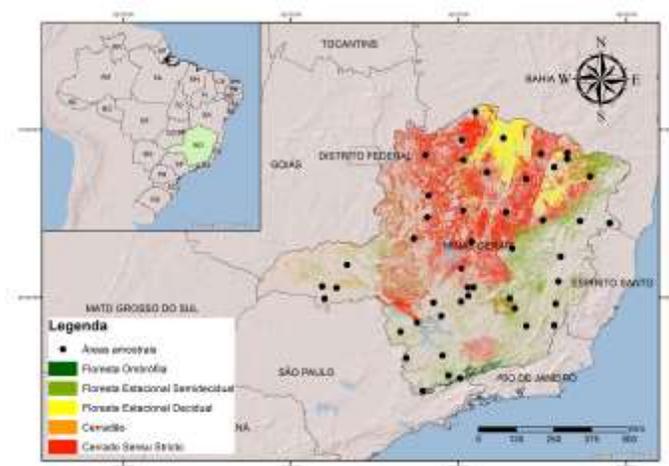


Fig. 1 Remanescentes florestais do estado de Minas Gerais e locais de amostragem utilizados no estudo

Tabela 1 Número de árvores amostradas por classe de diâmetro nas fitofisionomias estudadas.

Fitofisionomia	Classe de diâmetro (cm)								Total
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	>40	
Cerrado S. S.	155	141	145	114	73	57	32	26	743
Semidecídua	80	92	90	69	61	42	29	25	488
Ombrófila	28	25	34	21	21	16	18	19	182
Cerradão	26	22	28	22	23	23	15	17	176
Decídua	22	16	12	11	10	6	4	1	82
Total	311	296	309	237	188	144	98	88	1671

As árvores amostradas foram selecionadas aleatoriamente, identificando indivíduos representativos, abrangendo todas as classes de diâmetro e selecionando apenas indivíduos com bom estado fitossanitário. As árvores foram então abatidas e suas dimensões foram medidas para obtenção do volume pelo método de Huber. Os galhos com diâmetros menores que 3 cm (diâmetro

comercial) foram separados do restante da árvore e a altura comercial (HC) foi medida a partir do comprimento da base do tronco principal até o diâmetro comercial, seguindo sua tortuosidade. O tronco principal foi definido como aquele com maior comprimento e dominância de diâmetro. As alturas relativas de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% em relação a HC foram então identificadas e amostradas, removendo discos de aproximadamente 5 cm de espessura, conforme proposto pela *Food and Agricultural Organization of the United Nations* - FAO (Picard; Saint-André; Henry, 2012).

A metodologia da FAO também foi aplicada para determinar a DBM em laboratório, onde foram retiradas amostras opostas a medula de cada disco. As amostras foram submersas em água até atingir o ponto de saturação, identificado como o momento em que a massa constante é alcançada, sendo determinado o volume saturado (V_{sat}), quando os espaços preenchidos com ar na madeira são ocupados pela água. O princípio de Arquimedes foi utilizado para determinar o V_{sat} , onde a amostra saturada foi submersa em água dentro de um recipiente colocado sobre uma balança, indicando assim a massa de líquido deslocado equivalente ao peso da amostra submersa, considerando a densidade da água como referência (1 g.cm^{-3}). Para determinar a massa seca, as amostras foram colocadas em uma câmara de secagem, com temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até apresentarem pesos constantes, obtendo a massa seca (m_s). A densidade básica de cada amostra foi então definida pela razão entre a massa seca (g) e o V_{sat} (cm^3).

A densidade para cada altura amostrada (discos) foi definida como a média das duas amostras. Para calcular a DBM de cada árvore, os valores médios de densidade para cada altura foram ponderados pelo volume da seção de onde foram retirados, usando a equação (1), conforme aplicado por Trugilho (2009), onde: DBM_i = densidade básica da madeira da i -ésima árvore amostrada; d_0 ; d_{25} , d_{75} e d_{100} são densidade média das duas amostras opostas retiradas das diferentes

alturas relativas da árvore, e V_1 , V_2 , V_3 e V_4 são os volumes das seções entre os discos.

$$DBM_i = \frac{\left(\frac{d_0 + d_{25}}{2}\right) \cdot V_1 + \left(\frac{d_{25} + d_{50}}{2}\right) \cdot V_2 + \left(\frac{d_{50} + d_{75}}{2}\right) \cdot V_3 + \left(\frac{d_{75} + d_{100}}{2}\right) \cdot V_4}{V_1 + V_2 + V_3 + V_4} \quad (1)$$

Simulação da intensidade amostral de árvores

Utilizando Modelos Lineares de Efeitos Mistos pelo pacote *nlme* (Pinheiro et al., 2017) do *software* R (R Core Team, 2016), foi ajustado um modelo, onde a DBM foi considerada a variável dependente, explicada pelos efeitos da fitofisionomia e da classe diamétrica, considerando as espécies como um efeito aleatório.

Uma análise inicial da significância estatística dos parâmetros do modelo indicou que a classe diamétrica não era um fator significativo. Portanto, um novo modelo foi ajustado considerando apenas o fator “fitofisionomia” como variável independente juntamente ao efeito aleatório da espécie.

Com os modelos ajustados foi possível realizar a comparação entre os valores médios de DBM obtidos para cada fitofisionomia, para isso, os valores de erro padrão residual e do valor p, obtidos pelo teste F da análise de variância, relativos aos modelos para cada fitofisionomia, foram avaliados e indicaram quais modelos diferiam uns dos outros, e conseqüentemente, quais médias de DBM podem ser consideradas diferentes entre as fitofisionomias.

Na sequência, um código computacional para simular o efeito da intensidade da amostragem, utilizando a reamostragem *Bootstrap*, foi desenvolvido no *software* R para definir a intensidade amostral ideal por fitofisionomia para a DBM. Este método possibilitou a obtenção de uma sub-

amostra via reamostragem da amostra original, permitindo à randomização sem reposição via distribuição uniforme (Oliveira e Ferreira, 2017).

Na simulação, o banco de dados foi subdividido por fitofisionomia e, para cada uma, foram realizados 1.000 sorteios sem reposição com o tamanho da amostra variando de 5 a 80 árvores, com intervalo de 5 árvores entre eles, totalizando 16 intensidades amostrais avaliadas. Para cada sorteio, calculou-se o coeficiente de variação em porcentagem (CV%) para a DBM, considerando a existência de 5 fitofisionomias e 16 níveis de intensidades amostrais, geraram-se 80 mil processamentos.

A partir das simulações, a intensidade amostral foi definida, através da equação (2), bem como seu ponto de estabilização, observado como ponto a partir do qual o valor de n não se altera, em que: n = intensidade amostral ótima; $CV\%$ = coeficiente de variação em porcentagem para a DBM; $E\%$ = erro máximo admissível estipulado (nesse trabalho 5%); t = valor da distribuição t de Student ($\alpha=0,05$).

$$n = \frac{t^2 * CV\%^2}{E\%^2} \quad (2)$$

Simulação da densidade ao longo do fuste

Uma segunda simulação foi programada para analisar o efeito aditivo das amostras ao longo do fuste na determinação da DBM. A mesma ideia foi implementada, considerando uma seleção aleatória por meio de distribuição uniforme. Nessa fase, o conceito de modelo completo (3) foi adotado, sendo formado por todas as cinco posições amostradas na árvore. Os modelos reduzidos foram testados para todas as combinações de posições amostradas, gerando 31 opções, onde a ativação de cada posição foi feita por meio de uma variável auxiliar *Dummy*. Foram utilizadas 70 árvores para compor cada amostra, com base nos

resultados obtidos por esse estudo como valor mínimo de amostras para estabilização do CV% em todas as fitofisionomias. Assim, para cada sorteio, um modelo linear múltiplo foi ajustado com a combinação formada, e no final, foram gerados 155 mil ajustes. Testou-se ainda o agrupamento de todas as fitofisionomias, que gerou mais 31 mil ajustes, totalizando 186 mil.

$$DBM_i = \beta_0 + \beta_1 \times D_{0\%} \times v_1 + \beta_2 \times D_{25\%} \times v_2 + \beta_3 \times D_{50\%} \times v_3 + \beta_4 \times D_{75\%} \times v_4 + \beta_5 \times D_{100\%} \times v_5 + e_i \quad (3)$$

Em que: $D_{0\%}$, $D_{25\%}$, $D_{50\%}$, $D_{75\%}$ e $D_{100\%}$ são as densidades da madeira amostradas nas alturas relativas, v_i é a variável auxiliar binária que ativa o uso da densidade em determinada posição e e_i é o erro da estimativa.

No total, foram criadas 31 variações do modelo (3), o que permitiu avaliar a importância de cada amostra para a precisão das estimativas de DBM e a perda de informação gerada pela não utilização de certas amostras (diminuição dos pontos de amostragem). No final, para cada um desses ajustes, o erro padrão residual em porcentagem (Syx %), o critério de informação de Akaike (AIC) e do desvio padrão foram calculados. Os valores médios das estatísticas para cada um dos 31 modelos, foram utilizados para a análise de sua precisão, com base nas estatísticas do modelo completo. Portanto, a proposta dessa análise baseia-se na avaliação de quais posições são cruciais na amostragem, bem como na correlação com a DBM, indicando ganhos e perdas na adoção de uma determinada combinação selecionada.

Resultados

Fatores de influência sobre a Densidade básica da madeira

Por meio da análise de variância dos modelos lineares de efeitos mistos para cada fitofisionomia foram encontrados valores do erro padrão residual para espécies de $0,0884 \text{ g.cm}^{-3}$ e erro padrão residual de $0,0783 \text{ g.cm}^{-3}$. Na Tabela 2 estão os valores médios de DBM, juntamente com o erro padrão e o valor p da análise de variância associados a cada fitofisionomia.

Tabela 2 Valores médios de densidade básica da madeira por fitofisionomia, coeficiente de variação em porcentagem (CV) e valores de erro padrão e valor-p obtidos pelo teste F.

Fitofisionomia	Média (g.cm^{-3})*	CV (%)	Erro padrão (g.cm^{-3})*	Valor-p
Decídua	0,6205 a	17,9	0,0085	0,0000
Cerrado S. S.	0,6023 a	24,3	0,0110	0,0000
Cerradão	0,5964 a	19,1	0,0150	0,1082
Semidecídua	0,5577 b	20,2	0,0072	0,4154
Ombrófila	0,5268 c	19,1	0,0088	0,0000

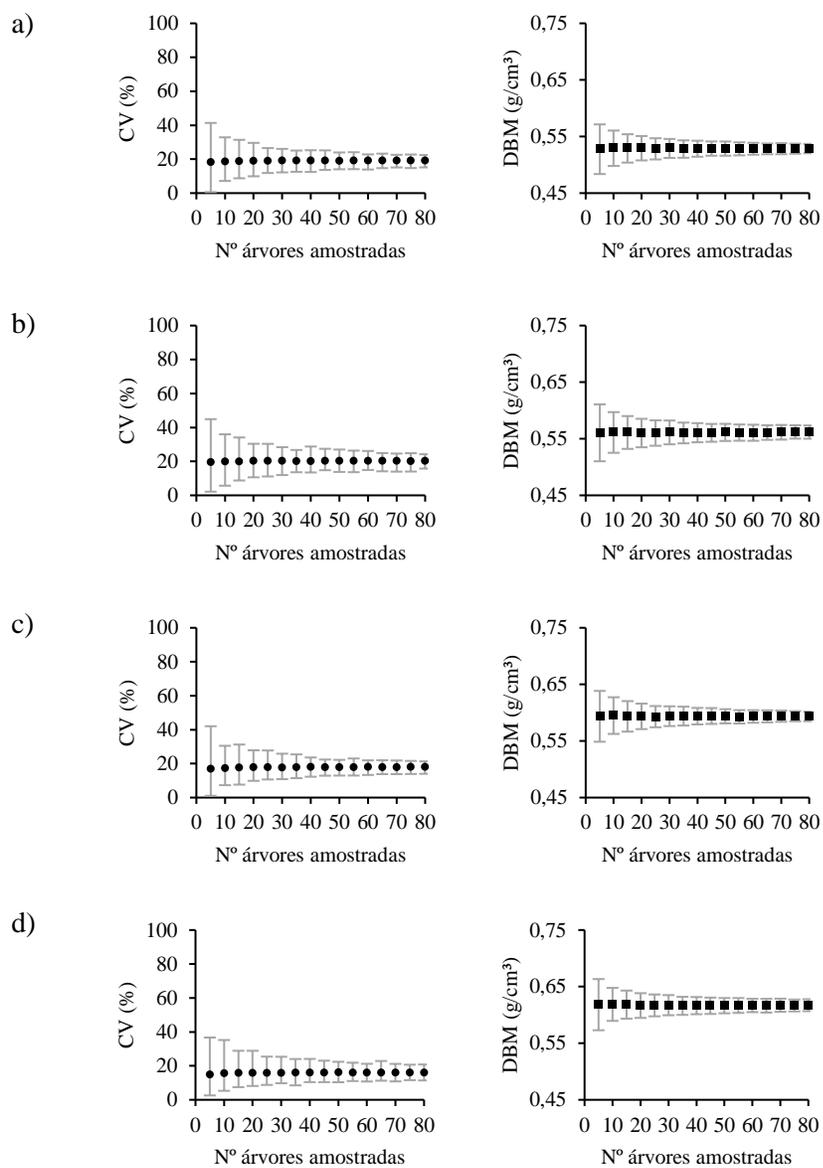
*As médias seguidas de letras iguais na mesma coluna são consideradas estatisticamente iguais pelo fato dos modelos não se diferirem entre si.

Esses resultados indicam que os valores DBM das árvores pertencentes às florestas Decíduas geralmente são maiores do que os outros, mas estatisticamente não diferem das médias encontradas para o C.S.S. e Cerradão. Por outro lado, as árvores com densidades mais baixas pertencem as florestas Ombrófilas.

Intensidade amostral para a Densidade básica da madeira

A Figura 2 mostra o comportamento do CV% (máximo, médio e mínimo) e da média (+/- 1 desvio padrão) da DBM obtido via reamostragem *bootstrap* em

cada tamanho de amostra por fitofisionomia para as 1000 simulações, que foram usadas para calcular a intensidade amostral ótima.



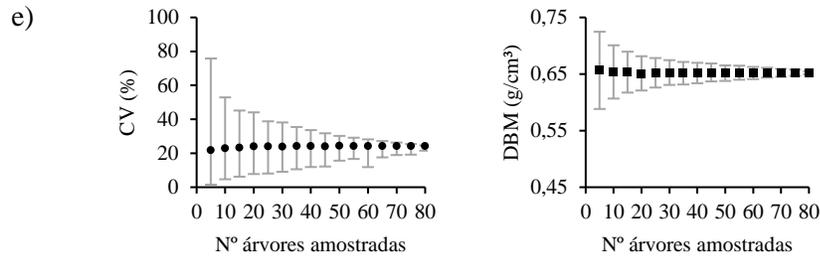


Fig. 2 Análise do comportamento do coeficiente de variação (CV%) e Densidade Básica da Madeira (DBM) com o aumento da intensidade amostral para as fitofisionomias em estudo (a) Ombrófila; (b) Semidecídua; (c) Cerradão; (d) Cerrado S.S. e (e) Decídua.

É possível observar na Figura 2 que os valores médios entre os 1.000 sorteios (média *bootstrap*) permaneceram praticamente estáveis, no entanto, os valores máximo e mínimo de CV% e o desvio padrão para a média de DBM são claramente reduzidos com a adoção de maiores tamanhos da amostra (acima de 30 árvores), demonstrando uma melhor representatividade da variabilidade existente.

A análise da intensidade amostral ótima (Figura 3) indica que, para o banco de dados analisado, o valor de n para a maioria das fitofisionomias se estabiliza com um número de árvores entre 30 e 50 árvores (Cerrado S.S - 29; Cerradão - 37; Ombrófila - 41; Semidecídua - 46), sendo que apenas a fitofisionomia Decídua exige uma amostragem maior (66 árvores). Onde o eixo X indica o número de árvores utilizados para o cálculo do CV% e o eixo Y a intensidade amostral ótima encontrada pelo uso da fórmula da suficiência amostral.

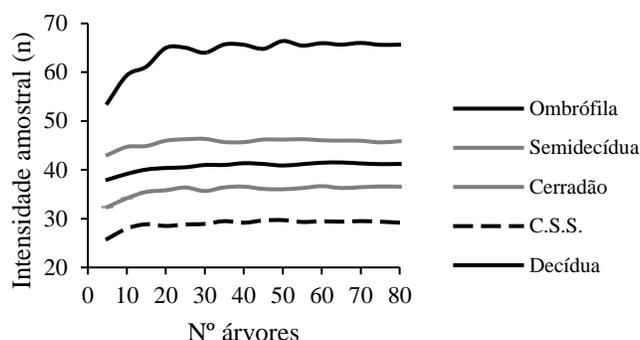


Fig. 3 Comportamento da intensidade amostral ótima para o estudo da densidade básica da madeira em diferentes fitofisionomias de Minas Gerais.

Efeito do número e posição das amostras de madeira

As estatísticas analisadas na avaliação dos modelos apresentaram comportamento semelhantes, em relação ao número das amostras do tronco. A tendência geral é um aumento na precisão com a inserção de mais amostras na direção longitudinal (Figura 4), ou seja, mais amostras distribuídas sistematicamente no fuste. Isso pode ser visto comparando os valores das estatísticas para os modelos que usam uma amostra como variável independente (modelos 1 a 5) frente ao modelo completo que utiliza 5 amostras como variáveis independentes (modelo 31) (Tabela 3). É possível observar que, dentre os 31 modelos avaliados, apenas o modelo 5 (DBM como função apenas da amostra a 100% da HC) mostrou um valor de Syx superior a 10%, mostrando que, em geral, mesmo os modelos mais simples têm boa capacidade preditiva de DBM.

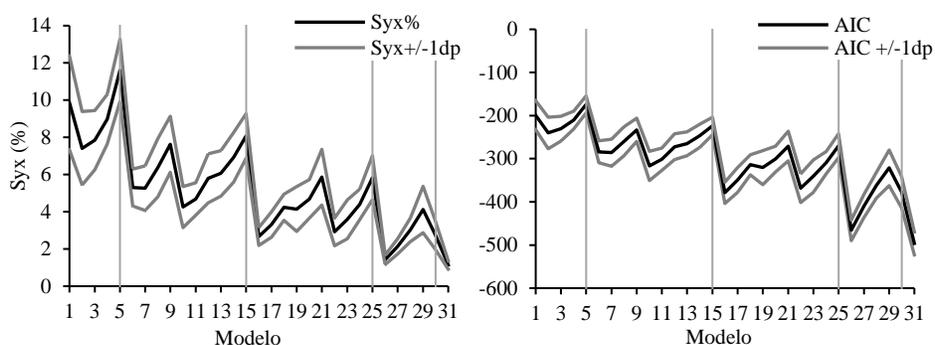


Fig.4 Comportamento do erro padrão residual (Syx%) e do critério de informação de Akaike (AIC), com os respectivos intervalos de confiança, para os modelos ajustados, em relação ao número e posição das amostras utilizadas para a estimativa de DBM.

O AIC tem sido amplamente usado como uma ferramenta para a seleção e comparação entre modelos estatísticos, uma vez que quanto menor o AIC, maior a precisão do mesmo. Assim, aquele modelo que apresenta menor valor da estatística, pode ser definido como o de melhor performance. No entanto, de acordo com Burnham et al. (2011), é possível avaliar a significância dessa diferença adotando um valor crítico entre os valores de AIC, que é grande o suficiente para quebrar os vínculos entre os modelos concorrentes, portanto, modelos com uma diferença de AIC até 7 são essencialmente indistinguíveis, considerando que um modelo só pode ser considerado superior com diferenças de AIC superiores a 14.

Na Tabela 3 tem se as diferentes combinações geradas através dos 31 modelos ajustados, onde o valor 1 nas colunas de “Altura” indica que o valor da densidade na referida altura foi utilizado pelo modelo i para a estimativa da DBM, e o valor 0 indica que essa não foi usada. Também são apresentados os valores de AIC e Syx%, classificados do menor para o maior, juntamente com o número de posições utilizadas para cada modelo (NP).

Tabela 3 Modelos testados e valores de AIC e Syx, juntamente com número de amostras (NP) e posições utilizadas (Altura).

Posição	Modelo	Altura %					NP	Syx%	AIC
		0	25	50	75	100			
1	31	1	1	1	1	1	5	1,14	-496,29
2	26	1	1	1	1	0	4	1,42	-466,02
3	27	1	1	1	0	1	4	2,14	-409,38
4	16	1	1	1	0	0	3	2,67	-378,79
5	30	0	1	1	1	1	4	2,73	-377,47
6	22	0	1	1	1	0	3	2,92	-368,04
7	28	1	1	0	1	1	4	3,02	-361,39
8	17	1	1	0	1	0	3	3,32	-349,09
9	23	0	1	1	0	1	3	3,59	-340,55
10	29	1	0	1	1	1	4	4,12	-321,18
11	19	1	0	1	1	0	3	4,15	-320,61
12	10	0	1	1	0	0	2	4,25	-316,67
13	18	1	1	0	0	1	3	4,24	-313,85
14	24	0	1	0	1	1	3	4,39	-309,31
15	11	0	1	0	1	0	2	4,69	-301,11
16	20	1	0	1	0	1	3	4,69	-300,81
17	7	1	0	1	0	0	2	5,27	-285,85
18	6	1	1	0	0	0	2	5,30	-283,87
19	12	0	1	0	0	1	2	5,80	-272,19
20	21	1	0	0	1	1	3	5,86	-270,69
21	25	0	0	1	1	1	3	5,83	-269,93
22	13	0	0	1	1	0	2	6,06	-265,39
23	8	1	0	0	1	0	2	6,37	-259,82
24	14	0	0	1	0	1	2	6,92	-246,70
25	2	0	1	0	0	0	1	7,41	-240,27
26	9	1	0	0	0	1	2	7,63	-233,11
27	3	0	0	1	0	0	1	7,85	-230,39
28	15	0	0	0	1	1	2	8,08	-224,01
29	4	0	0	0	1	0	1	8,98	-210,20
30	1	1	0	0	0	0	1	9,86	-199,23
31	5	0	0	0	0	1	1	11,60	-174,24

O modelo 31 (modelo completo) foi o que apresentou a maior precisão, sendo que os demais se diferem dele, considerando o valor de AIC crítico (14) proposto por Burnham et al. (2011). Entre os 10 melhores modelos, nove usam a densidade em 25%, oito a densidade a 50% e sete as duas conjuntamente, demonstrando a importância da amostragem dessas duas alturas para a estimativa de DBM. Além disso, em relação a essas duas posições, o modelo 10 (que utiliza apenas as densidades nas alturas 25 e 50%) se destaca, apresentando precisão similar aos modelos 29 (densidades 0, 50, 75 e 100%) e 19 (densidades 0, 50 e 75%), que utilizam 4 e 3 amostras, respectivamente.

Em relação ao número de posições utilizadas para a estimativas, novamente entre os 10 melhores modelos, estão os cinco modelos que usam 4 amostras, quatro (de 10) que usam 3 amostras e o modelo completo. Enquanto isso, entre os 10 piores modelos estão 5 (de 10) que usam apenas 2 amostras e os 5 modelos em função de uma única altura amostrada. Os modelos que utilizam apenas uma amostra (1 a 5) apresentaram valores de Syx 8 vezes maiores do que o modelo completo. Os modelos com duas amostras (6 a 15) foram em média 5,3 vezes maiores, os com três amostras (16 a 25), 3,7 vezes maiores e os com quatro (26 a 30) 2,4 vezes maiores. Esses resultados mostram que um número maior de posições amostradas fornece estimativas mais próximas do parâmetro.

No entanto, entre os modelos que utilizam apenas uma amostra, o modelo 2 (densidade a 25%) foi o que apresentou melhor resultado com Syx de 7,4%. Entre os que utilizam duas amostras o modelo 10 (densidade a 25 e 50%) foi o que apresentou o menor erro (4,2%). Esses resultados demonstram que a aplicação de amostragem semidestrutiva, onde as amostras do tronco são retiradas nas posições 25 e 50% da altura comercial ou apenas na 25%, possibilita estimativas da DBM com relativa precisão, seu custo-benefício deve ser analisado para cada caso de pesquisa, a fim de identificar a sua viabilidade. Uma justificativa para a

boa contribuição das amostras a 25 e 50% é a alta relação da densidade da madeira nessas duas alturas com a DBM, onde os valores de correlação para as alturas 0, 25, 50, 75 e 100% foram de, respectivamente, 85,1%; 93,0%; 92,3%; 87,4% e 76,1%. Para a amostragem semidestrutiva com a amostra a 25%, pode-se usar a equação (4), que apresenta as seguintes estatísticas, coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{\text{ajst.}}$) de 86,5% e erro padrão da estimativa em porcentagem ($\text{Syx}\%$) de 7,1%. Quanto à estimativa usando as amostras nas alturas de 25 e 50% da HC, pode-se usar a equação (5), cujo valor de $R^2_{\text{ajst.}}$ é de 95,3% e de Syx de 4,1%.

$$DBM = 0,1171 + 0,7929 * D_{25\%} \quad (4)$$

$$DBM = 0,05541 + 0,45374 * D_{25\%} + 0,45122 * D_{50\%} \quad (5)$$

As análises dos ajustes realizados por fitofisionomia, utilizando a intensidade amostral ótima de 30 árvores (Figura 5), permitem observar que, mesmo que haja uma diferença significativa entre os valores médios de DBM, a maioria das fitofisionomias apresenta valores de Syx (%) semelhantes ao modelo geral, com exceção da floresta Decídua, onde o ajuste por fitofisionomia apresentou valores médios de Syx menores em 1,3% e diferença máxima de 3,6% (modelo 3). A menor diferença para o modelo geral foi encontrada em relação aos modelos ajustados para a floresta Ombrófila e Cerradão, onde, em média, os valores de Syx foram 0,1% menores. Isso indica que o comportamento de variação longitudinal da DBM é semelhante entre as fitofisionomias estudadas.

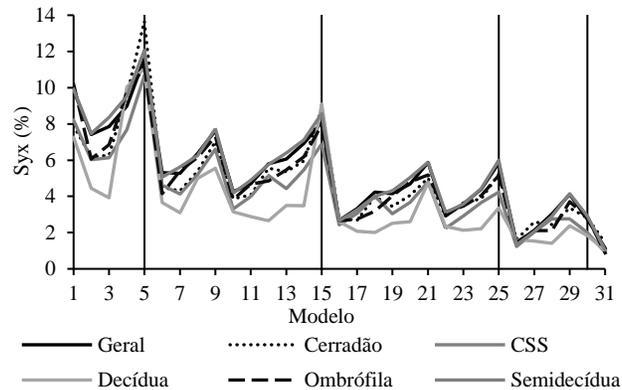


Fig.5 Comportamento da precisão dos modelos na estimativa da densidade básica da madeira por número de discos amostrados na árvore em cada fitofisionomia.

Discussão

Limitações da amostragem da DBM

A importância de uma melhor compreensão do comportamento da DBM deve-se ao fato de que a mesma apresenta uma alta correlação com a biomassa da floresta e conseqüentemente com o estoque de carbono. Assim, estimar corretamente a biomassa é o ponto de partida para conhecer o estoque de carbono das diferentes fitofisionomias florestais.

Esse poder preditivo da DBM, especialmente para florestas tropicais, sujeitas a grande heterogeneidade, está relacionado a um banco de dados representativo, usando uma metodologia de coleta padronizada, de modo que os resultados encontrados reflitam a variabilidade natural da variável de interesse, sem a influência de fatores relacionados à coleta que possam levar a análises errôneas.

Devido às limitações na aplicação prática da teoria da amostragem, o número de árvores geralmente medido para estimativas de volume e biomassa é

selecionado empiricamente, com base em regras estabelecidas pela experiência, seguindo o princípio de que quanto maior for o tamanho da amostra, melhor será a representatividade alcançada, e em alguns casos, o tamanho da amostra é determinado pelo custo das medições em vez da precisão desejada.

O manual da FAO (Picard, Saint-André; Henry, 2012) para a construção de equações alométricas de volume e biomassa recomenda a medição de cerca de 100 árvores. Como a biomassa acima do solo de uma árvore é mais difícil de medir do que o volume do tronco, as pesquisas de biomassa tendem a ser construídas usando menos observações do que o volume. O grande risco de usar pequenas amostras é que os levantamentos se tornam pouco confiáveis, válidos apenas localmente, e é por isso que as bases estatísticas são necessárias para a definição correta da intensidade amostral.

A amostragem destrutiva tem um alto custo do ponto de vista técnico, logístico e financeiro ou mesmo legal, uma vez que em algumas áreas é impossível derrubá-las árvores porque elas são protegidas por leis ambientais, o que geralmente impossibilita o levantamento de biomassa florestal fora da área científica.

Logo, são desejáveis metodologias alternativas de estimativas da DBM que associem boa representatividade, custos financeiros mais baixos, complexidade adequada e impacto reduzido. O que pode ser alcançado, associando ao processo de amostragem, metodologias que permitam a determinação da variável sem a destruição da árvore, como o NIR (*Near-infrared spectroscopy* - Espectroscopia do infravermelho próximo), a amostragem via trado de incremento, resistógrafo ou outra (Gouvêa et al., 2011; Perlin et al., 2015).

Diferenças entre as DBM nas fitofisionomias

Sobre a significância do efeito da fitofisionomia em relação a DBM, esse comportamento já foi documentado por vários trabalhos, como em Shimamoto et al. (2016) e Swenson e Enquist (2008), o que reforça a hipótese de que existe uma forte correlação dos valores de DBM com as condições bióticas dos locais, uma vez que a alocação de biomassa pelas plantas está diretamente relacionada à sua estratégia de sobrevivência, que neste caso, pode ser associadas às restrições que o ambiente impõe ao seu desenvolvimento.

Os resultados deste estudo confirmam essa afirmação uma vez que, comparativamente, plantas de diferentes tipos de vegetação, submetidas a condições edafoclimáticas variadas, apresentaram valores diferentes de DBM, com os maiores valores ocorrendo em tipos de vegetação com maiores restrições.

Isso ocorre porque as plantas que se desenvolvem em condições adversas têm baixas taxas de crescimento, devido a recursos escassos, para compensar esse baixo crescimento, elas investem em alta resistência mecânica, que está relacionada a valores mais altos de DBM, a fim de assegurar a sua perpetuação no local por meio de uma menor susceptibilidade aos ataques de patógenos, predadores ou a fatores físicos (Shimamoto et al., 2016).

A região de ocorrência de florestas decíduas no estado de Minas Gerais, onde foram encontrados os maiores valores de DBM, apresenta os maiores valores de déficit hídrico e temperatura e os menores valores de precipitação do estado, fatores esses que afetam a atividade cambial (Callado et al., 2013).

Seguindo para as outras fitofisionomias avaliadas, existe uma correlação entre os valores mais baixos de DBM encontrados nelas, com a redução do déficit hídrico e das temperaturas e o aumento da precipitação, até a fitofisionomia Ombrófila, que em tese está associada às áreas com melhores condições ambientais e maior atividade fisiológica e cambial.

Embora a classe diamétrica não tenha sido um fator estatisticamente significativo, vários relatos encontraram alta relação entre o tamanho da árvore e

os valores da DBM, devido à diferença na proporção entre cerne e alburno, conforme Henry et al. (2010) e He e Deane (2016).

Por outro lado, a variabilidade da DBM em florestas nativas ainda pode ser explicada por outros fatores não avaliados neste trabalho, como clima, topografia, fertilidade do solo, disponibilidade de água e distribuição e riqueza de espécies. Esses fatores devem ser investigados, uma vez que são determinantes para a existência das diferentes fitofisionomias.

Em relação à espécie, não há consenso na literatura para trabalhar neste nível, uma vez que a dificuldade na amostragem de um grande número de espécies não justificaria os ganhos para estimativas de biomassa (Henry et al., 2010).

Intensidade amostral para estudos da DBM

Atualmente, existe uma grande quantidade de modelos para estimar a biomassa desenvolvidos com dados de florestas tropicais. A intenção, nesta pesquisa, não foi propor mais um modelo, mas avaliar os efeitos da intensidade amostral nessas estimativas, subsidiando a otimização da amostragem e evitando despesas desnecessárias com a coleta de dados.

Assim, com base na perda de informação gerada pela flexibilização da amostragem, tanto em relação ao número de plantas amostradas, quanto em relação ao número de pontos amostrais da DBM ao longo do fuste, é possível definir a intensidade de amostragem apropriada com base no objetivo da pesquisa a ser realizada.

A estabilização do coeficiente de variação e do n ocorreu com um baixo número de plantas amostradas, devido à baixa variação entre os dados, que dentro das fitofisionomias variaram de 16,0 a 24,1% e de forma conjunta apresentaram coeficiente de variação de 19,5%.

Os valores de coeficiente de variação nessa ordem são comumente encontrados em estudos sobre a densidade básica da madeira, por exemplo Sungpalee et al. (2009) trabalhando com a variação da densidade básica da madeira na escala espacial em uma Floresta Tropical do norte da Tailândia encontraram coeficiente de variação de 23,4% entre os indivíduos das 72 espécies estudadas.

Esse comportamento de estabilização, associado ao fato de que o coeficiente de variação e a média da DBM convergem para o valor paramétrico, nada mais é do que uma constatação dos pressupostos do teorema central do limite.

Deve se notar, que a variação encontrada entre indivíduos para a variável densidade básica da madeira é relativamente baixa quando comparada com outras variáveis dendrométricas de florestas tropicais, por exemplo, considerando o mesmo banco de dados utilizado nesse estudo, a variável DAP apresentou coeficiente de variação de 53,5%; altura total de 40% e volume total 141,8 %.

Assim, as intensidades amostrais aqui propostas são exclusivamente para pesquisas voltadas ao conhecimento da densidade básica da madeira, e não se aplicam a levantamentos volumétricos ou fitossociológicos.

Estimativa da DBM utilizando amostras ao longo do fuste

Como demonstrado anteriormente, a densidade básica da madeira apresenta uma grande variação interna na árvore, sendo frequentemente adotada a metodologia de se retirar um determinado número de amostras para sua determinação, considerando a densidade decrescente com a altura ao longo do tronco (Auty et al., 2014).

Em geral, as contribuições das amostras retiradas nas diferentes alturas relativas do tronco são lógicas, onde os modelos que usam um número maior de

amostras geram estimativas mais precisas, no entanto, essa melhoria geralmente não é significativa para justificar um aumento tão grande no tamanho da amostra e no trabalho de campo.

Entre as alturas relativas avaliadas, destacam-se as amostras 25 e 50%, contribuindo de forma decisiva para a assertividade das estimativas. Considerando o modelo que utiliza apenas essas duas amostras para a estimativa da densidade básica da madeira, o mesmo apresenta valores muito próximos ao modelo completo contendo todas as amostras. Mesmo que não seja o mais adequado, o modelo que utiliza apenas a amostra a 25% também merece destaque, devido à maior facilidade de implementação no campo.

Alguns autores afirmam que esse desempenho das amostras da base, se deve ao fato de as seções dessa fração do tronco apresentarem um volume maior, que pelo cálculo da densidade básica da madeira poderia justificar tal correlação, devido ao maior peso atribuído a amostra, contudo o desempenho da amostra a 0% não cumpriu essa afirmação, uma vez que a primeira seção apresenta o maior percentual de volume da árvore.

No entanto, entre 0 e 25% o erro se estabiliza entre 7,41 e 9,86%, o que torna essa posição também interessante para facilitar ainda mais a amostragem no caso de árvores muito altas. Esses resultados sugerem um alto nível de variação na densidade do tronco com o aumento da altura da amostra (Auty et al., 2014, Yeboah et al., 2014).

Dessa forma, se houver um padrão de diminuição da densidade com a altura, há um ponto em que os valores de DBM e da densidade em uma determinada altura são muito próximos, o que provavelmente ocorre entre 25 e 50%, na maioria dos casos observados.

Assim, o desenvolvimento de métodos alternativos semi destrutivos, usando amostras do tronco, resulta em avanços para levantamentos de biomassa. As relações encontradas entre a densidade básica da madeira com a densidade de

25 e 50% indicam que seu uso é adequado para estimar a densidade básica da madeira com uma boa precisão e relativa simplicidade no campo, empregando posições predeterminadas e de fácil operacionalização no campo com baixo custo e os modelos aqui propostos para a conversão dos valores de densidade nessas determinadas alturas para a densidade básica da madeira da árvore.

Embora estudos semelhantes sejam mais comuns para plantações comerciais, alguns estudos com outras espécies relatam alturas próximas a estas para avaliação de DBM, como Trautenmüller et al (2014), que estudaram a variação longitudinal da densidade básica da madeira da *Alchornea triplinervia* e avaliaram que a faixa entre o DAP e 50% da altura é a que melhor representa a densidade básica da madeira.

Conclusões

Existem diferenças entre os valores médios da densidade básica da madeira entre as diferentes fitofisionomias do estado, com os valores médios decrescendo da floresta Decídua para a floresta Ombrófila. A intensidade amostral entre 29 e 66 plantas são suficientes para produzir boas estimativas sobre o padrão da média da DBM de um fragmento de floresta, dependendo do tipo de vegetação a que pertence. Existe alta correlação entre as amostras obtidas a cerca de 25% e 50% da altura comercial e a DBM, assim, no caso de recursos limitados, essas amostras são capazes de produzir estimativas muito próximas do valor da densidade básica da madeira.

Referências

Auty, D, Achim A, Macdonald E, Cameron A D, Gardiner BA (2014) Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry* 87: 449-458. Doi: 10.1093/forestry/cpu005.

- Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G (2014) Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22:711-728. Doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Burnham KP, Anderson DR, Huyvaert K (2011) AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 65:23-35. Doi: 10.1007/s00265-010-1029-6
- Callado CH, Roig FA, Tomazello-Filho M, Barros CF (2013) Cambial growth periodicity studies of South American woody species—a review. *IAWA Journal* 34: 213-230. Doi: 10.1163/22941932-00000019
- Gouvêa AFG, Trugilho PF, Gomide JL, Silva JRM, Andrade CR, Alves ICN (2011) Determination of Eucalyptus basic density by different nondestructive methods. *Revista Árvore* 3:349-358.
- He D, Deane DC (2016) The relationship between trunk-and twigwood density shifts with tree size and species stature. *Forest Ecology and Management* 372: 137-142. doi: 10.1016/j.foreco.2016.04.015
- Hein PRG, Chaix G, Clair B, Brancheriau L, Gril J (2016) Spatial variation of wood density, stiffness and microfibril angle along Eucalyptus trunks grown under contrasting growth conditions. *Trees* 30: 871-882. doi: 10.1007 / s00468-015-1327-8
- Henry M, Besnard A, Asante WA, Eshun J, Adu-Bredu S, Valentini R, Bernoux M, Saint-André L (2010) Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management* 260:1375-1388. Doi: 10.1016/j.foreco.2010.07.040
- Montes CS, Weber JC, Garcia RA, Silva DA, Muñoz GIB (2017) Variation in growth, wood stiffness and density, and correlations between growth and wood stiffness and density in five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. *Trees* 31:833-849. doi: 10.1007/s00468-016-1508-0
- Nam VT, Kuyk MV, Anten NPR (2016) Allometric Equations for Aboveground and Belowground Biomass Estimations in an Evergreen Forest in Vietnam. *PLoS One* 11:1-19. doi: 10.1371/journal.pone.0156827
- Nogueira EM, Fearnside PM, Nelson BW, França MB (2007) Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 248:119-135.doi: 10.1016/j.foreco.2007.04.047.

Oliveira GMV, Mello JM, Trugilho PF, Scolforo JRS, Altoé TF, Neto AJS, Oliveira AD (2012) Environment effects on wood density of vegetation types in Minas Gerais state - Brazil. *Cerne* 18:345-352. Doi: 10.1590/S0104-77602012000200020

Oliveira HM, Ferreira EB (2017) Comparação de testes para igualdades de médias sob heterocedasticidade: simulação e aplicação. *Rev. Bras. Biom* 35:132-159.

Perlin LP, Juliani MA, Valle A, Pinto RCA (2015) Mathematical basis of ultrasonic tomography for integrity evaluation in wood structural elements. *Cerne* 21:503-509. Doi: 10.1590/01047760201521031868

Picard N, Saint-André L, Henry M (2012) Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier

Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team (2017). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1-131, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Restrepo-Coupe N, Levine NM, Christoffersen BO, Albert LP, Wu J, Costa MH, Galbraith D, Imbuzeiro H, Martins G, Araujo AC, Malhi YS, Zeng X, Moorcroft P, Saleska SR (2017) Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison. *Global change biology* 23:191-208. Doi: 10.1111/gcb.13442

Scolforo HF, Scolforo JRS, Mello JM., Mello CR, Morais VA (2016) Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. *Forest Ecology and Management* 376:24-35. Doi: 10.1016/j.foreco.2016.05.047

Shimamoto CY, Botosso PC, Amano E, Marques MCM (2016) Stem growth rhythms in trees of a tropical rainforest in Southern Brazil. *Trees* 30: 99-111. doi: 10.1007/s00468-015-1279-z

Soares VC, Bianchi ML, Trugilho PF, Höfler J, Pererira AJ (2015) Properties of eucalyptus wood hybrids and charcoal at three ages. *Cerne* 21:191-197. doi: 10.1590/01047760201521021294

Sungpalee W, Itoh A, Kanzaki M, Sri-ngernyuang K (2009) Intra-and interspecific variation in wood density and fine-scale spatial distribution of stand-level wood density in a northern Thai tropical montane forest. *Journal of Tropical Ecology* 25: 359-370. Doi: 10.1017/S0266467409006191

Swenson NG, Enquist B (2008) The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area. *American Journal of Botany* 95:516-519. doi: 10.3732/ajb.95.4.516

Trautenmüller JW, Balbinot R, Borella J, Trevisan R, Balestrin D, Vendruscolo R, Sabadini AM (2014) Longitudinal variation of basic density of *Cordia americana* and *Alchornea triplinervia*. *Ciência Rural* 44: 817-821.

Trugilho PF (2009) Basic density and dry mass and lignin mass estimate in Eucalyptus wood species. *Ciência e Agrotecnologia* 33:1228-1239. Doi: 10.1590/S1413-70542009000500005

Yeboah D, Burton AJ, Storer AJ, Opuni-Frimpong E (2014) Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New forests* 45:35-52. doi: 10.1007/s11056-013-9390-8

Wiemann MW, Williamson GB (2007) Geographic variation in wood specific gravity: effects of latitude, temperature, and precipitation. *Wood and Fiber Science* 34:96-107.

**ARTIGO 2 - Estimativa da biomassa aérea utilizando relações alométricas:
Diâmetro versus variáveis complementares**

Kalill José Viana da Páscoa, Lucas Rezende Gomide, José Roberto Soares
Scolforo, Antônio Carlos Ferraz Filho, José Márcio de Mello, Fausto Weimar
Acerbi Júnior

O presente artigo é uma versão preliminar, redigido conforme normas da revista Southern Forests (fator de impacto: 0.848), que poderá sofrer alterações a critério do corpo editorial, apresentada aqui na versão em português.

Resumo

A conversão de dados de inventário florestal em estimativas de biomassa em maciços florestais nativos é uma informação com grande apelo ambiental. O grande desafio na estimativa dessa variável é desenvolver relações alométricas mais precisas, que garantam estimativas mais confiáveis. Assim, utilizando um conjunto de dados formado por 232 árvores, amostradas destrutivamente em florestas tropicais do sudeste do Brasil, localizadas na bacia hidrográfica do Rio Grande, estado de Minas Gerais, foi avaliada a porcentagem de biomassa aérea contida nos diversos compartimentos existentes acima do solo. Com esses dados, foram desenvolvidos modelos matemáticos em função de variáveis dendrométricas convencionais (diâmetro e altura) juntamente com dados relativos a área de copa e densidade básica da madeira, variáveis essas consideradas complementares devido à alta capacidade de explicação da biomassa aérea. Da biomassa total de uma árvore, em média 55,7% está alocada no fuste; 24,5% na galhada; 13,7% nos galhos finos e 6,6% nas folhas, contudo essas proporções variam com o porte das árvores. A biomassa total se mostrou bastante correlacionada com os valores de diâmetro, altura total, área de copa e densidade básica da madeira, onde, o uso em conjunto dessas variáveis por meio de equações alométricas permitiram melhorar consideravelmente as estimativas individuais de biomassa. Entre as variáveis associadas a densidade básica de madeira, cabe destaque a densidade do fuste, a densidade da madeira a 25%, 50% e 0% da altura comercial, essas podem ser obtidas sem necessariamente o abate da árvore e apresentaram bons resultados quando utilizadas pelos modelos.

Palavras-Chave: Relações alométricas; Área de copa; Compartimentos.

INTRODUÇÃO

Relações alométricas existentes nas árvores são utilizadas com frequência para facilitar a estimativa de variáveis de difícil mensuração em campo (Marziliano et al. 2017), como por exemplo, na conversão de dados do inventário florestal em estimativas de biomassa, variáveis essas de difícil mensuração direta. Contudo, os modelos matemáticos para estimativa da biomassa em áreas de Mata Atlântica e Cerrado são escassos, visto que a maioria dos modelos foram gerados para áreas do bioma Amazônico (Chave et al., 2005; Goodman et al., 2014).

A quantificação precisa dos estoques de biomassa existentes acima do solo, nas florestas tropicais, é essencial para entender o papel desses ecossistemas no ciclo global do carbono, já que a transformação entre o estoque de biomassa e de carbono é quase uma medida direta (Ribeiro et al., 2011). Esses dados ajudam a entender como a conservação das florestas pode minimizar os efeitos das mudanças climáticas. Não por acaso, esse escopo faz parte de acordos climáticos internacionais (Marziliano et al., 2017).

As equações alométricas estão, sem dúvidas, entre as ferramentas mais utilizadas para a predição da biomassa florestal (Ribeiro et al., 2011). Contudo, o grande desafio é desenvolver modelos capazes de produzir estimativas com alto nível de confiabilidade.

Um requisito fundamental para o desenvolvimento de equações alométricas mais precisas é incorporar variáveis estruturais apropriadas que afetam a biomassa. Por isso, diversos autores vêm buscando, com sucesso, associar a esses modelos, variáveis que melhorem o poder de predição, em adição aos já consagrados dados de diâmetro medido a 1,30 m do solo (DAP), que muitas vezes são insuficientes para gerar boas estimativas (Guangyi et al., 2017).

Entre esses trabalhos destacam-se o de Goodman et al. (2014) que avaliaram a importância do tamanho e arquitetura da copa nas estimativas de

biomassa de árvores do sudeste da Amazônia, e Chave et al. (2005) que incorporaram aos modelos a informação relativa à densidade básica da madeira, para árvores de florestas tropicais de três continentes: América, Ásia e Oceania.

Enquanto a informação relativa à área de copa adiciona ao modelo a capacidade de explicar uma variação que não é bem explicada pelo diâmetro, caso da biomassa de galhos e folhas (Goodman et al., 2014), a densidade básica da madeira relaciona diretamente o peso seco da madeira com o seu volume, refletindo a proporção entre o lúmen e a parede celular, diretamente relacionada a biomassa do fuste (Swenson e Enquist, 2008).

Considerando que, segundo Terra et al. (2017), existem apenas no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, aproximadamente $24,5 \times 10^9$ indivíduos arbóreos, divididos entre 3.592 a 3.743 espécies, que por sua vez apresentam distribuição espacial bastante variada (Carvalho et al., 2017), fica evidente a necessidade de pesquisas que estabeleçam relações alométricas, que facilitem a estimativa da biomassa florestal, não só contida na parte comercial, mas também nos demais componentes das árvores, incluindo os galhos e folhas.

O uso dessas relações, por meio da calibração de modelos matemáticos utilizando variáveis complementares, resultará em estimativas mais precisas, permitindo inclusive a incorporação de novas tecnologias, resultando em avanços na valoração do potencial ambiental, ecológico e econômico dos remanescentes florestais (Mantau et al., 2016).

Assim, os objetivos desse trabalho foram: avaliar a biomassa aérea existente em árvores das florestas tropicais do sudeste do Brasil, localizadas ao longo da bacia hidrográfica do Rio Grande, examinando sua distribuição nos diversos compartimentos da árvore; estudar a correlação entre a biomassa total e os valores de área de copa e densidade da madeira, desenvolvendo modelos matemáticos para a predição da biomassa por meio dessas relações alométricas, identificando a contribuição das mesmas na melhoria dos ajustes.

MATERIAL E METODOS

Base de dados

As árvores utilizadas pelo estudo fazem parte de um conjunto de 232 indivíduos, de 79 espécies, amostradas em três fragmentos florestais localizados na bacia hidrográfica do Rio Grande, estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Cada fragmento amostrado é representativo de uma das fitofisionomias existentes ao longo da área (Floresta Ombrófila, Floresta Semidecídua e Cerradão) e as árvores são representativas da estrutura populacional existentes.

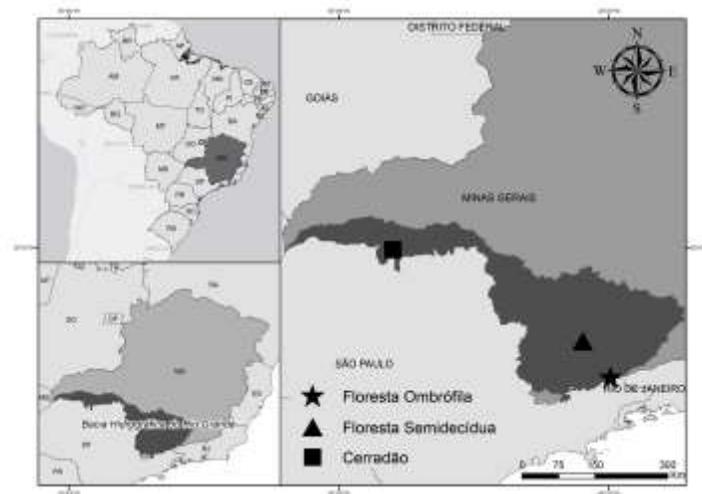


Figura 1: Mapa de localização das regiões amostradas ao longo da bacia do Rio Grande para o estudo da modelagem da biomassa florestal.

Dentro da abrangência territorial da bacia hidrográfica do Rio Grande é notada uma grande diversidade vegetal, com áreas cobertas por vegetação que envolvem desde florestas com grande porte, típicas do bioma Mata Atlântica (Floresta Ombrófila e Semidecidual), até áreas de Cerrado.

O Cerrado e a Mata Atlântica são biomas que apresentam forte apelo conservacionista por se tratarem de *hotspots* de biodiversidade, mas também se destacam por serem os dois biomas brasileiros que mais sofreram impactos antropogênicos ao longo dos anos, principalmente relacionados ao desmatamento e degradação da terra (Kasecker et al., 2017). A Tabela 1 apresenta a frequência de indivíduos amostrados por classe de diâmetro nas respectivas fitofisionomias.

Tabela 1 - Resumo da frequência de indivíduos amostradas por classes de diâmetro em cada fitofisionomia.

Vegetação	Classe de Diâmetro (cm)									Total
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	> 40	
Ombrófila	10	9	12	10	11	10	8	6	5	81
Semidecídua	15	11	11	11	10	10	4	-	1	73
Cerrado	10	10	10	9	11	8	7	5	8	78
Total	35	30	33	30	32	28	19	11	14	232

Coleta dos dados em campo

Antes do abate das árvores foram mensurados o DAP, altura total (HT) e a área de projeção da copa (AC), além da identificação botânica da espécie. Imediatamente após o corte as árvores, estas foram subdivididas de acordo com os compartimentos de biomassa em estudo: galhos (>3cm de diâmetro), galhos finos (<3cm de diâmetro), folhas e fuste. A cubagem consistiu na medição das dimensões das árvores para o cálculo do volume e pesagens para a obtenção da biomassa total (BM_{total}), dada pelo somatório dos 4 compartimentos.

As variáveis coletadas após o abate foram: altura comercial (Hcom) - entendida como a altura até o diâmetro mínimo de 3 cm; altura da base da copa (Hbase) - altura até a primeira bifurcação; densidade básica da madeira ($db_i\%$) nas alturas relativas 0%, 25%, 50% 75% e 100% em relação à altura comercial e

densidades dos galhos ($dbG_i\%$) a 25 e 75% do seu comprimento (Figura 2), além do peso úmido de folhas (PU_{folha}) e dos galhos finos (PU_{gf}).

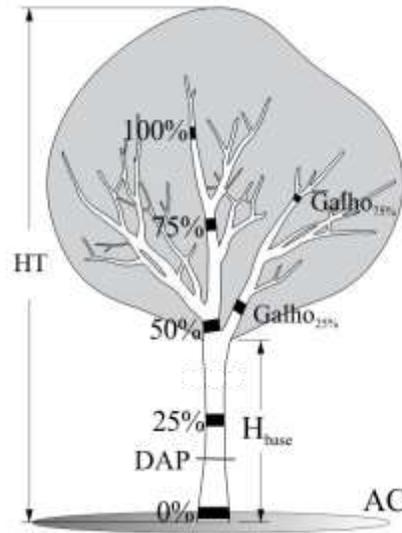


Figura 2: Esquema das variáveis coletadas em cada árvore amostrada.

Para o cálculo da densidade básica da madeira foi aplicada a metodologia proposta pela *Food and Agricultural Organization of the United Nations* - FAO (Picard; Saint-André; Henry, 2012) que posteriormente permitiu a conversão do volume do fuste e dos galhos em suas respectivas biomassas (BM_{fuste} e BM_{galho}). Os galhos finos e folhas, após terem seu peso úmido total mensurado em campo, foram transformados em biomassa, utilizando seus teores de umidade. Para isso, três amostras de galhos finos com folhas foram coletadas e neles avaliadas a proporção de cada estrutura.

Essas amostras foram pesadas e levadas a laboratório e secas em câmara de secagem, com temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por 48 horas ou até apresentarem peso constante. Com os valores de umidade e considerando a proporção das estruturas existentes nos galhos amostrados foi calculada a biomassa dos galhos finos (BM_{gf}) e a biomassa das folhas (BM_{folha}).

Análise dos dados e modelagem matemática

Inicialmente, foi avaliada a contribuição percentual da biomassa contida em cada compartimento, em relação a biomassa total, e analisado o comportamento dessa em relação as diferentes classes de diâmetro amostradas, visando observar a existência de algum padrão biológico.

Na sequência, foi calculada a correlação de Pearson entre a biomassa dos diferentes compartimentos da árvore, incluindo a total, com as variáveis dendrométricas e dados de densidades básicas do fuste e dos galhos, avaliando seu nível de significância estatística ($\alpha \leq 0,01$). Essas correlações foram então empregadas como parâmetro para a seleção das variáveis que seriam utilizadas para a construção dos modelos de predição da biomassa aérea, indicando quais variáveis teriam maior poder de explicação junto aos modelos.

Por fim, na construção dos modelos se empregou o ajuste de modelos lineares múltiplos com uma variável auxiliar *dummy*, referente as fitofisionomias estudadas, avaliando o efeito aditivo da inclusão de novas variáveis e o ganho real que a mesma trouxe para o ajuste. Os melhores modelos foram selecionados com base no critério de informação de Akaike (AIC), erro padrão da estimativa em porcentagem (Syx%) e do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}).

RESULTADOS

Proporção de biomassa acima do solo por compartimento

A Figura 3 apresenta os valores médios de biomassa aérea por compartimento em porcentagem para as diferentes classes de diâmetro e fitofisionomia estudadas.

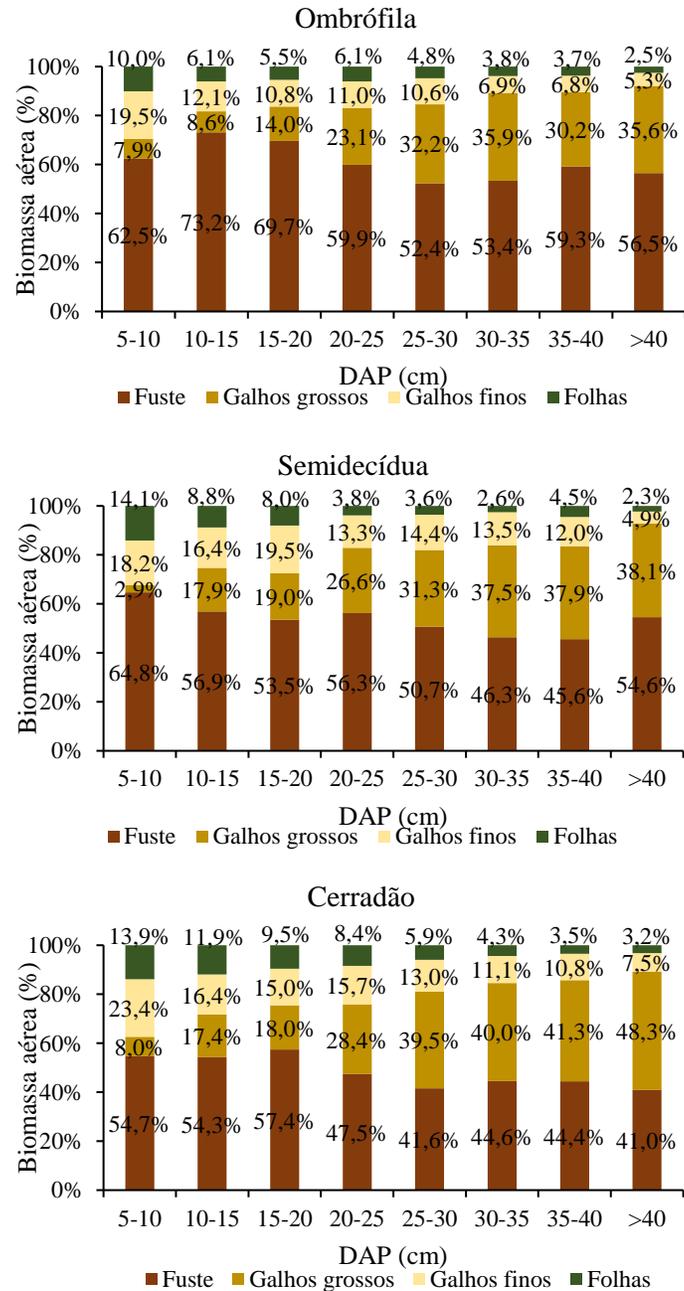


Figura 3: Contribuição média dos compartimentos na biomassa aérea das árvores de diferentes classes de diâmetro amostradas por fitofisionomias.

Foi avaliada a proporção da biomassa existente em cada compartimento e nota-se um predomínio da biomassa estocada no fuste em todas as fitofisionomias, com 57,2% na Ombrófila (A); 50,5% na Semidecídua (B) e 43,1% no Cerradão (C), também merece destaque a biomassa contida nos galhos (A: 31,9%; B: 32,6% e C: 42,9%). Por sua vez, os galhos finos são responsáveis por estocar, respectivamente, 7,2%; 12,9% e 9,8% (para A, B e C), enquanto as folhas apresentam os menores valores de biomassa (A: 3,7%; B: 3,9% e C: 4,2%).

Quando se analisa as proporções da biomassa nas diferentes classes de diâmetro, observa-se que existe um aumento da participação dos galhos, principalmente nas árvores maiores que 20 cm de diâmetro. No Cerradão a participação desse componente atinge valor máximo (48,3%) na classe de diâmetro > 40 cm, enquanto nas demais fitofisionomias, esse valor fica próximo a 35%, evidenciando a importância desse compartimento nas estimativas de biomassa total. Por outro lado, a proporção do fuste, folhas e galhos finos na biomassa total sofre considerável redução com o aumento do diâmetro, apesar de os resultados absolutos serem maiores. A proporção de biomassa no fuste cai em média de 62% para 51%, folhas de 13% para 8% e galhos finos de 20% para 6% com o aumento da classe de 5-10 cm, para a classe > 40 cm.

Correlações entre as variáveis dendrométricas e a biomassa

A Tabela 2 apresenta os resultados das correlações lineares de Pearson, entre os valores de biomassa em cada compartimento e as variáveis dendrométricas obtidas nas três fitofisionomias estudadas.

Tabela 2: Coeficientes de correlação linear de Pearson entre a biomassa dos compartimentos e as variáveis dendrométricas.

Variável	Compartimento				
	Fuste	Galho grosso	Galho Fino	Folha	Total
DAP	0,81***	0,80***	0,75***	0,72***	0,86***
HT	0,64***	0,46***	0,44***	0,42***	0,58***
Hcopa	0,33***	0,11	0,0076	-0,0024	0,22***
Hcom	0,71***	0,53***	0,47***	0,49*	0,66***
AC	0,69***	0,86***	0,88***	0,80***	0,85***
db _{0%}	0,25***	0,25***	0,14*	0,18**	0,26***
db _{25%}	0,29***	0,32***	0,18*	0,18**	0,31***
db _{50%}	0,34***	0,42***	0,29***	0,28***	0,40***
db _{75%}	0,30***	0,39***	0,22***	0,20**	0,36***
db _{100%}	0,18**	0,25***	0,15*	0,06	0,22***
db _{fuste}	0,30***	0,35***	0,21**	0,21**	0,34***
db _{galhada}	0,34***	0,36***	0,31***	0,29***	0,37***
db _{total}	0,29***	0,36***	0,20**	0,19**	0,33***

nível de significância estatística: *** (0,000); ** (0,001); * (0,01); · (0,05); · (0,1).

A biomassa total mostrou correlação significativa estatisticamente com todas as variáveis analisadas, mesmo que para algumas a correlação seja menor que 0,40. De forma geral, pode-se afirmar que a biomassa total se relaciona diretamente com o diâmetro da árvore, altura, densidade e área de copa. Destacam-se os valores de correlação encontrados entre a biomassa total e as variáveis DAP e AC, com valores de correlação acima de 0,8 (0,86 e 0,85 respectivamente).

A biomassa do fuste apresentou boas correlações com os valores de diâmetro e altura total, variáveis essas predominantemente utilizadas pelos modelos estatísticos existentes na literatura florestal para a sua estimativa. Já a

biomassa dos galhos, dos galhos finos e folhas, a exemplo da biomassa total, foi correlacionada ao DAP e AC, indicando que essas duas variáveis têm potencial para serem utilizadas na modelagem da biomassa.

Os valores de densidade básica apesar de apresentar valores de correlação considerados baixos ($<0,6$) foram significativos para quase todos os compartimentos. Assim, analisada juntamente com outras variáveis, a mesma poderá produzir boas explicações sobre a biomassa das árvores. Outro fato a se destacar é que a densidade dos galhos em muitos casos apresentou valores de correlação maiores que os encontrados para a densidade do fuste, indicando a possibilidade do seu uso por meio de uma amostragem semi destrutiva.

Modelos para a predição da biomassa acima do solo

Ao todo foram avaliados 20 modelos lineares, que utilizaram como variáveis independentes o DAP, HT, AC e a densidade básica (fuste, galhos, total e nas diferentes alturas do fuste), junto aos valores log-transformados da biomassa total como variável dependente, adequando o comportamento dos dados a forma dos modelos.

Além dessas, foi inserida entre as variáveis dependentes uma variável auxiliar *dummy* que permitiu o ajuste dos parâmetros do modelo de forma específica para às 3 fitofisionomias, onde a variável ativa e/ou desativa quando se deseja estimar os valores de biomassa para as árvores de uma determinada fitofisionomia. Os valores das estatísticas de ajuste e da posição dos melhores modelos (com base nos valores de $Syx\%$) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Estatísticas de ajuste dos modelos para a estimativa da transformação logarítmica da biomassa total, juntamente com as variáveis independentes utilizadas.

Mod.	Variáveis independentes				R ² _{ajust} %	Syx %	AIC	Ranking
1	Ln(DAP)	-	-	-	96,0	19,2	104,67	19°
2	Ln(DAP)	HT	-	-	96,4	20,6	83,87	20°
3	Ln(DAP)	AC	-	-	96,7	16,8	65,87	17°
4	Ln(DAP)	HT	AC	-	96,9	18,0	53,62	18°
5	Ln(DAP)	AC	db _{fuste}	-	97,2	14,5	27,25	10°
6	Ln(DAP)	AC	db _{galho}	-	97,1	15,0	33,44	15°
7	Ln(DAP)	AC	db _{total}	-	97,2	14,5	25,25	11°
8	Ln(DAP)	AC	db _{0%}	-	97,2	14,3	29,28	9°
9	Ln(DAP)	AC	db _{25%}	-	97,1	14,6	32,31	12°
10	Ln(DAP)	AC	db _{50%}	-	97,1	14,6	30,06	13°
11	Ln(DAP)	AC	db _{70%}	-	97,2	14,7	26,72	14°
12	Ln(DAP)	AC	db _{100%}	-	97,0	16,7	47,51	16°
13	Ln(DAP)	HT	AC	db _{fuste}	97,6	12,4	-8,39	1°
14	Ln(DAP)	HT	AC	db _{galho}	97,4	14,1	17,53	7°
15	Ln(DAP)	HT	AC	db _{total}	97,6	14,0	-7,57	6°
16	Ln(DAP)	HT	AC	db _{0%}	97,6	12,8	-2,37	4°
17	Ln(DAP)	HT	AC	db _{25%}	97,6	12,5	-4,74	2°
18	Ln(DAP)	HT	AC	db _{50%}	97,6	12,7	-3,90	3°
19	Ln(DAP)	HT	AC	db _{75%}	97,5	13,0	1,14	5°
20	Ln(DAP)	HT	AC	db _{100%}	97,2	14,2	26,61	8°

O modelo 1 partiu da simples relação entre a biomassa total e a transformação logarítmica do diâmetro da árvore, já que essa variável foi a que apresentou a maior correlação linear de Pearson. Contudo, o desempenho desse modelo esteve entre os piores (19°), demonstrando que apenas o DAP é pouco eficaz em explicar a biomassa total.

Na sequência se buscou adicionar o efeito da HT (modelo 2), variáveis essas que são geralmente utilizadas em conjunto para a estimativa da biomassa e

normalmente mensuradas nos inventários florestais da região, o que não trouxe ganhos na qualidade do ajuste (2º).

Adicionando ao DAP apenas a informação relativa a AC (modelo 3), outra variável com destaque na correlação linear de Pearson, os valores das estatísticas indicaram que a AC não trouxe benefícios significativos para o ajuste, contudo essa variável em conjunto com outras variáveis trouxe bons resultados.

A análise dos demais modelos indica que somente após a inclusão da informação relativa à densidade básica da madeira, juntamente ao DAP, HT e AC, foi possível encontrar os melhores modelos, dessa forma, a densidade se mostrou uma variável importante para a estimativa da biomassa, mesmo apresentando os menores valores de correlação de Pearson, onde os modelos que utilizaram a db_{fuste} , db_{total} e as densidade nas alturas 0%, 25%, 50%, 75% e 100% (modelos 13 ao 20), estiveram entre os melhores.

Dentre as variáveis associadas à densidade da madeira, cabe destaque a densidade do fuste, variável contida no melhor modelo ajustado (modelo 13), densidade a 25% (2º - modelo 17), densidade a 50% (3º - modelo 18) e a densidade 0% (4º - modelo 16), todos com estatísticas de ajuste muito semelhantes. As 20 equações ajustadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Equações ajustadas para a estimativa da transformação logarítmica da biomassa total em função das variáveis dendrométricas.

	Equação
1	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-2,1584 + 2,3852 \cdot Ln(DAP)) \cdot v_A + \\ & (-2,1648 + 2,3446 \cdot Ln(DAP)) \cdot v_B + \\ & (-2,6900 + 2,5629 \cdot Ln(DAP)) \cdot v_C \end{aligned}$
2	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-2,1612 + 2,2294 \cdot Ln(DAP) + 0,0430 \cdot HT) \cdot v_A + \\ & (-2,1850 + 2,2395 \cdot Ln(DAP) + 0,0336 \cdot HT) \cdot v_B + \\ & (-2,4921 + 2,3467 \cdot Ln(DAP) + 0,0523 \cdot HT) \cdot v_C \end{aligned}$
3	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,4641 + 2,0575 \cdot Ln(DAP) + 0,0140 \cdot AC) \cdot v_A + \\ & (-1,6665 + 2,0853 \cdot Ln(DAP) + 0,0116 \cdot AC) \cdot v_B + \\ & (-2,3809 + 2,4281 \cdot Ln(DAP) + 0,0035 \cdot AC) \cdot v_C \end{aligned}$
4	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,5605 + 1,9881 \cdot Ln(DAP) + 0,0314 \cdot HT + 0,0121 \cdot AC) \cdot v_A + \\ & (-1,6998 + 1,9976 \cdot Ln(DAP) + 0,0306 \cdot HT + 0,0112 \cdot AC) \cdot v_B + \\ & (-2,2884 + 2,2833 \cdot Ln(DAP) + 0,0420 \cdot HT + 0,0027 \cdot AC) \cdot v_C \end{aligned}$
5	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,9232 + 2,0321 \cdot Ln(DAP) + 0,0140 \cdot AC + 0,9535 \cdot db_{fuste}) \cdot v_A + \\ & (-2,4145 + 2,1485 \cdot Ln(DAP) + 0,0080 \cdot AC + 1,1937 \cdot db_{fuste}) \cdot v_B + \\ & (-3,0185 + 2,3935 \cdot Ln(DAP) + 0,0029 \cdot AC + 1,2799 \cdot db_{fuste}) \cdot v_C \end{aligned}$
6	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,4245 + 1,9410 \cdot Ln(DAP) + 0,0157 \cdot AC + 0,5453 \cdot db_{galho}) \cdot v_A + \\ & (-1,5715 + 1,9769 \cdot Ln(DAP) + 0,0116 \cdot AC + 0,4838 \cdot db_{galho}) \cdot v_B + \\ & (-2,9589 + 2,3232 \cdot Ln(DAP) + 0,0028 \cdot AC + 1,6351 \cdot db_{galho}) \cdot v_C \end{aligned}$
7	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,9069 + 2,0238 \cdot Ln(DAP) + 0,0146 \cdot AC + 0,9563 \cdot db_{total}) \cdot v_A + \\ & (-2,5324 + 2,1692 \cdot Ln(DAP) + 0,0075 \cdot AC + 1,3364 \cdot db_{total}) \cdot v_B + \\ & (-3,0610 + 2,3933 \cdot Ln(DAP) + 0,0028 \cdot AC + 1,3811 \cdot db_{total}) \cdot v_C \end{aligned}$
8	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,9574 + 2,0395 \cdot Ln(DAP) + 0,0137 \cdot AC + 0,9447 \cdot db_{0\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,3681 + 2,16149 \cdot Ln(DAP) + 0,0079 \cdot AC + 0,9447 \cdot db_{0\%}) \cdot v_B + \\ & (-3,0214 + 2,4285 \cdot Ln(DAP) + 0,0030 \cdot AC + 0,9447 \cdot db_{0\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
9	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,9150 + 2,0210 \cdot Ln(DAP) + 0,0139 \cdot AC + 0,9935 \cdot db_{25\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,2262 + 2,1291 \cdot Ln(DAP) + 0,0088 \cdot AC + 0,9172 \cdot db_{25\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,9221 + 2,4117 \cdot Ln(DAP) + 0,0030 \cdot AC + 1,0214 \cdot db_{25\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
10	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,8601 + 2,0456 \cdot Ln(DAP) + 0,0136 \cdot AC + 0,7908 \cdot db_{50\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,4362 + 2,1533 \cdot Ln(DAP) + 0,0079 \cdot AC + 1,2389 \cdot db_{50\%}) \cdot v_B + \\ & (-3,0193 + 2,3847 \cdot Ln(DAP) + 0,0025 \cdot AC + 1,3564 \cdot db_{50\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
11	$\begin{aligned} Ln(BM) = & (-1,9307 + 2,0424 \cdot Ln(DAP) + 0,0144 \cdot AC + 0,9072 \cdot db_{75\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,4522 + 2,1513 \cdot Ln(DAP) + 0,0086 \cdot AC + 1,2737 \cdot db_{75\%}) \cdot v_B + \\ & (-3,0367 + 2,3547 \cdot Ln(DAP) + 0,0027 \cdot AC + 1,5681 \cdot db_{75\%}) \cdot v_C \end{aligned}$

Equação	
12	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-1,6276 + 2,0554 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0142 \cdot AC + 0,3052 \cdot db_{100\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,1789 + 2,1350 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0093 \cdot AC + 0,7990 \cdot db_{100\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,8532 + 2,3921 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0025 \cdot AC + 1,2149 \cdot db_{100\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
13	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,3791 + 1,9017 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0516 \cdot HT + 0,0109 \cdot AC + 1,5717 \cdot db_{fuste}) \cdot v_A + \\ & (-2,6208 + 2,0178 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0500 \cdot HT + 0,0067 \cdot AC + 1,4359 \cdot db_{fuste}) \cdot v_B + \\ & (-2,9126 + 2,2916 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0302 \cdot HT + 0,0024 \cdot AC + 1,2009 \cdot db_{fuste}) \cdot v_C \end{aligned}$
14	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-1,5297 + 1,8358 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0369 \cdot HT + 0,0138 \cdot AC + 0,6565 \cdot db_{galho}) \cdot v_A + \\ & (-1,6026 + 1,8695 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0347 \cdot HT + 0,0113 \cdot AC + 0,5186 \cdot db_{galho}) \cdot v_B + \\ & (-2,8713 + 2,2508 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0230 \cdot HT + 0,0024 \cdot AC + 1,5305 \cdot db_{galho}) \cdot v_C \end{aligned}$
15	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,3126 + 1,8955 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0493 \cdot HT + 0,0120 \cdot AC + 1,5058 \cdot db_{total}) \cdot v_A + \\ & (-2,7209 + 2,0466 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0473 \cdot HT + 0,0063 \cdot AC + 1,5058 \cdot db_{total}) \cdot v_B + \\ & (-2,9537 + 2,2956 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0290 \cdot HT + 0,0023 \cdot AC + 1,5058 \cdot db_{total}) \cdot v_C \end{aligned}$
16	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,4088 + 1,9115 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0532 \cdot HT + 0,0103 \cdot AC + 1,4967 \cdot db_{0\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,4424 + 2,0641 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0355 \cdot HT + 0,0073 \cdot AC + 1,0426 \cdot db_{0\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,9106 + 2,3296 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0287 \cdot HT + 0,0026 \cdot AC + 0,9699 \cdot db_{0\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
17	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,3478 + 1,8835 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0523 \cdot HT + 0,0108 \cdot AC + 1,5937 \cdot db_{25\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,4159 + 1,9930 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0511 \cdot HT + 0,0075 \cdot AC + 1,1368 \cdot db_{25\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,8145 + 2,2949 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0342 \cdot HT + 0,0024 \cdot AC + 0,9603 \cdot db_{25\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
18	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,3147 + 1,9258 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0501 \cdot HT + 0,0104 \cdot AC + 1,3914 \cdot db_{50\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,6230 + 2,0258 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0486 \cdot HT + 0,0067 \cdot AC + 1,4543 \cdot db_{50\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,9140 + 2,2674 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0346 \cdot HT + 0,0019 \cdot AC + 1,2947 \cdot db_{50\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
19	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-2,2440 + 1,9434 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0421 \cdot HT + 0,0120 \cdot AC + 1,2651 \cdot db_{75\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,6425 + 2,0296 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0465 \cdot HT + 0,0076 \cdot AC + 1,4999 \cdot db_{75\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,9387 + 2,2664 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0269 \cdot HT + 0,0023 \cdot AC + 1,4753 \cdot db_{75\%}) \cdot v_C \end{aligned}$
20	$\begin{aligned} \text{Ln}(BM) = & (-1,9833 + 1,9569 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0433 \cdot HT + 0,0119 \cdot AC + 0,7211 \cdot db_{100\%}) \cdot v_A + \\ & (-2,3558 + 2,0250 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0427 \cdot HT + 0,0082 \cdot AC + 1,0022 \cdot db_{100\%}) \cdot v_B + \\ & (-2,7543 + 2,2955 \cdot \text{Ln}(DAP) + 0,0288 \cdot HT + 0,0020 \cdot AC + 1,1239 \cdot db_{100\%}) \cdot v_C \end{aligned}$

Onde: v_A , v_B e v_C são variáveis auxiliares binárias *dummy* que ativam e ou desativam os coeficientes referentes as fitofisionomias A- Ombrófila, B- Semidecídua e C- Cerradão.

DISCUSSÃO

Com o crescente interesse em relação a biomassa presente nas florestas nativas, principalmente para fins ambientais, essa informação tornou-se uma ferramenta valiosa (Mantau et al., 2016). Esse interesse exige uma determinação mais precisa da variável, além disso, produzir estimativas para novas regiões geográficas e fisionomias florestais permite uma melhor compreensão do papel dessas no sequestro de carbono da atmosfera.

Contudo, os métodos de quantificação diretos são difíceis, demorados e onerosos, já os métodos indiretos, utilizando equações alométricas e atributos medidos na árvore, são os mais utilizados para quantificar a biomassa. Magalhães e Seifert (2015) ressaltaram que apesar de usados por muitos autores, o uso de fatores de expansão da biomassa pode resultar em avaliações não confiáveis, sendo preferível o uso das equações alométricas. Contudo, equações para florestas tropicais da região sudeste do Brasil são raras, ou consideram apenas a biomassa contida na parte comercial da planta, omitindo a biomassa existente nos demais compartimentos.

De acordo com os resultados, a quantificação das folhas e galhos finos (compartimentos não comerciais) produz um acréscimo nas estimativas de biomassa por árvore de 10,9%; 16,9% e 14,0%, respectivamente para as fitofisionomias A-Ombrófila, B-Semidecídua e C-Cerrado.

Ribeiro et al. (2011) estudando a biomassa acima do solo do cerrado encontrou valores de biomassa dos galhos de 14,6% e nas folhas de 20,7%, bem maiores que os encontrados na presente pesquisa, mas também indicando a importância de se trabalhar com a biomassa total de forma a evitar subestimativas.

Ainda com base nos percentuais de biomassa, observa-se que em média a biomassa estocada no fuste representa 49,7% da biomassa total da árvore, seguida pelos galhos (37%), galhos finos (9,4%) e folhas (3,9). Magalhães e Seifert (2015)

trabalhando com florestas nativas típicas da África, localizadas em Moçambique, encontraram valores de distribuição da biomassa semelhantes, com porcentagens de biomassa de 51% no caule, 24% na copa, 19% nas raízes e 6% na serrapilheira. Henry et al. (2011) também relataram valores médios que indicam maior acumulação de biomassa no caule (69%) do que na copa (28%) para 16 espécies de floresta tropical na África.

Watzlawick et al. (2012) estudando o estoque de biomassa na Floresta Ombrófila, afirmaram que a distribuição da biomassa acima do solo segue a seguinte ordem decrescente: galhos vivos (45,01%), madeira do fuste (40,53%), casca do fuste (9,99%), folha (2,40%), galhos mortos (1,16%) e frutos, sementes e outros (0,97%).

Entretanto, esses percentuais não são constantes entre as classes de diâmetro, por exemplo, árvores com diâmetros entre 5 e 10 cm apresentam 62,3%; 65,3% e 54,3% da biomassa contida no fuste para as fitofisionomias A, B e C, enquanto as árvores com diâmetros maiores que 40 cm apresentam 56,6%; 54,6% e 41,0% para as mesmas fitofisionomias.

Henry et al. (2011) também afirmaram que a proporção de biomassa do caule tende a diminuir e a proporção de biomassa da copa aumenta com o aumento do tamanho da árvore. Isso ocorre pois com o aumento do diâmetro a importância dos galhos grossos, cresce consideravelmente, já que árvores maiores necessitam de copas maiores, com mais folhas para captar energia e produzir mais fotoassimilados.

Outro fato a se destacar, é que as menores árvores contribuem pouco individualmente em termos de biomassa, mas sua contribuição na biomassa total da floresta é muito relevante (Magalhães e Seifert, 2015), isso porque, na distribuição de diâmetros existente nas florestas nativas, a maioria dos indivíduos da floresta pertencem a essas classes.

Os valores médios de biomassa para as árvores pertencentes as menores classes de diâmetro (5 a 10 cm) apresentaram valores de biomassa aérea semelhantes aos encontrados por Ehrenbergerová et. al. (2016) para árvores de *Erythrina edulis* Micheli e *Allantoma decandra* (Ducke) S.A.Mori, Ya Y.Huang & Prance, com DAP por volta de 10 cm (respectivamente, de 9,9 Kg e 18,4 Kg).

Dessa forma, é fundamental que os modelos estatísticos apresentem bons resultados para essa faixa de variação de diâmetro, já que segundo Marziliano et al. (2017) um comportamento muitas vezes relatado nos modelos matemáticos é a super, ou subestimação para os indivíduos de menores dimensões.

Pela análise de correlação linear de Pearson observa-se que o DAP e AC são altamente correlacionadas com a biomassa total ($>0,8$). Por outro lado, a HT, variável frequentemente utilizada pelos modelos para estimativas de biomassa apresentou uma correlação mais fraca (0,58), apesar de também significativa, o mesmo acontecendo com as variáveis associadas à densidade básica da madeira ($<0,4$).

Ainda são poucos modelos que buscam associar a informação das copas das árvores sobre a biomassa total, sendo que anteriormente as estimativas eram muito associadas ao DAP isoladamente ou em conjunto com HT (Goodman et al. 2014). Em relação aos modelos ajustados nesse trabalho, o que utilizou apenas o DAP como variável independente ficou entre os que apresentou os piores resultados em relação às estatísticas de ajuste e precisão, o mesmo ocorrendo com a inclusão da variável HT em conjunto com o DAP, como defendido por vários autores na literatura (Coletta et al. 2016).

Ao contrário desse resultado, Chave et al. (2005) observaram uma redução do erro padrão da estimativa de 19,5%, quando a altura total não era utilizada, para 12,5% quando a altura total era utilizada. Ribeiro et al. (2011) discutindo acerca da seleção de variáveis a serem incluídas nos modelos para estimativa da biomassa, descartam o modelo que continha como variáveis

independentes, além do DAP e densidade da madeira, a altura das árvores, mesmo esse apresentando as melhores estatísticas de ajuste. Segundo os autores a medida da altura é menos precisa, demorada e dispendiosa inviabilizando sua utilização, fato que pode variar de acordo com as características fitofisionômicas.

Nesse mesmo trabalho, Ribeiro et al. (2011) selecionaram apenas as variáveis DAP e densidade básica da madeira como variáveis independentes, segundo os autores o DAP é o mais comum e melhor preditor de biomassa em modelos alométricos devido à forte correlação com a biomassa e a densidade da madeira sendo uma variável que reflete aspectos relacionados à estrutura da floresta, como taxa de crescimento em diâmetro e estratégias adaptativas, além de apresentar certo poder discriminatório em relação às diferentes espécies, o que é importante quando se trabalha em áreas com grande diversidade.

Uma reflexão deve ser feita em relação a falta de informação sobre os valores da densidade da madeira para as mais variadas espécies. Os resultados da presente pesquisa também identificaram grande influência da densidade da madeira sobre as estatísticas de ajuste e precisão, mesmo apresentando baixa correlação com a biomassa, dessa forma, sugere-se que este parâmetro seja incluído em equações alométricas para a estimativa da biomassa aérea.

A inclusão da AC, por meio do modelo 3, trouxe maiores ganhos do que a inclusão da HT, assim, a incorporação da área de copa nas equações pode capturar uma variação na biomassa da árvore que não é explicada estatisticamente pelo DAP ou HT, como por exemplo a biomassa dos galhos.

O bom desempenho do modelo 3 indica inclusive que talvez não seja necessário incluir HT quando AC está no modelo. Segundo Goodman et al. (2014), a incorporação do tamanho da copa da árvore nos modelos pode melhorar as estimativas, permitindo inclusive a detecção remota para mudanças nos estoques de biomassa devidas as ações antrópicas, principalmente se associada a métodos baseados em sensoriamento remoto.

Por fim, mesmo que algumas das variáveis aqui discutidas não sejam comumente levantadas em inventários florestais, a avaliação do ganho em qualidade das estimativas deve ser analisada, já que as subestimativas quanto ao potencial das florestas em relação ao estoque de biomassa são prejudiciais, principalmente quando se procura justificativas que reforcem a necessidade de conservação desses remanescentes florestais.

CONCLUSÕES

Este estudo demonstra que as árvores de remanescentes florestais amostradas na região sudeste do Brasil apresentam valores de biomassa total variando entre 13,4 Kg e 1.272,1 Kg. Da biomassa aérea de uma árvore, em média, 49,7 % está alocada no fuste; 37,0 % nos galhos grossos; 9,4 % nos galhos finos e 3,9 % nas folhas. Contudo, essas proporções variam com o porte das árvores, onde as menores têm uma maior porcentagem de biomassa contida no fuste do que as maiores. A biomassa aérea se mostrou bastante correlacionada com os valores de diâmetro, altura total, área de copa e densidade básica da madeira, onde, o uso em conjunto dessas variáveis por meio de equações alométricas permitem melhorar consideravelmente as estimativas individuais de biomassa por meio dos modelos estatísticos. Em relação a esses modelos, o que utilizou apenas o DAP apresentou os piores resultados em relação as estatísticas de ajuste e precisão, indicando que o diâmetro, mesmo apresentando alta correlação com a biomassa, não deve ser utilizado isoladamente. Entre as variáveis que quando associadas ao modelo melhoram consideravelmente a precisão, destaca-se a densidade básica da madeira a 25% e 50% da altura comercial, que dependendo da altura das árvores podem inclusivamente serem obtidas sem necessariamente o abate da árvore.

REFERÊNCIAS

- Carvalho MC, Gomide LR, Santos RMD, Scolforo, JRS, Carvalho, LMTD. & Mello JMD. (2017). Modeling ecological niche of trees in Brazilian tropical area. *Cerne*, 23(2): 229-240.
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, ... & Lescure JP. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1): 87-99.
- Coletta V, Menguzzato G, Pellicone G, Veltri A, & Marziliano PA. (2016). Effect of thinning on above-ground biomass accumulation in a Douglas-fir plantation in southern Italy. *Journal of forestry research*, 27(6): 1313-1320.
- Ehrenbergerová L, Cienciala E, Kučera A, Guy L, & Habrová H. (2016). Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforestry systems*, 90(3): 433-445.
- Goodman RC, Phillips OL, & Baker TR. (2014). The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications*, 24(4): 680-698.
- Guangyi M, Yujun S, & Saeed S. (2017). Models for Predicting the Biomass of Cunninghamialanceolata Trees and Stands in Southeastern China. *PloS one*, 12(1):1-14.
- Henry M, Picard N, Trotta C, Manlay R, Valentini R, Bernoux M, & Saint André L. (2011). Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica*, 45(3B): 477-569.
- Kasecker, TP, Ramos-Neto, MB, da Silva, JMC, & Scarano, FR. (2017). Ecosystem-based adaptation to climate change: defining hotspot municipalities for policy design and implementation in Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-13.
- Magalhães TM, & Seifert T (2015). Estimation of tree biomass, carbon stocks, and error propagation in mecrusse woodlands. *Open Journal of Forestry*, 5(4): 471-488
- Mantau U, Gschwantner T, Paletto A, Mayr ML, Blanke C, Strukova E, ... & Petruskas E. (2016). From inventory to consumer biomass availability - the ITOC model. *Annals of Forest Science*, 73(4): 885-894.

- Marziliano PA, Menguzzato G, Scuderi A, Scalise C, Coletta V. (2017). Biomass conversion and expansion factors in Douglas-fir stands of different planting density: variation according to individual growth and prediction equations. *Forest Systems*, 26(1): 1-10.
- Picard N, Saint-André L, & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Montpellier. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- Ribeiro SC, Fehrmann L, Soares CPB, Jacovine LAG, Kleinn C, & de Oliveira Gaspar R. (2011). Above-and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 262(3): 491-499.
- Swenson NG, Enquist B (2008) The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area. *American Journal of Botany* 95:516-519. doi: 10.3732/ajb.95.4.516
- Terra MDCNS, dos Santos RM, Fontes MAL, de Mello JM, Scolforo JRS, Gomide LR, ... & ter Steege H. (2017). Tree dominance and diversity in Minas Gerais, Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 1-21.
- Watzlawick, L. F., Caldeira, M. V. W., Viera, M., Schumacher, M. V., Godinho, T. D. O., & Balbinot, R. (2012). Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. *Scientia Forestalis*, v. 40, n. 95, p. 353-362.

ARTIGO 3 - Valor econômico do carbono estocado pelos remanescentes florestais da bacia do Rio Grande-MG, Brasil

Kalill José Viana Da Páscoa, Lucas Rezende Gomide, José Roberto Soares Scolforo, Carlos Alberto Silva, José Márcio de Mello, Inácio Thomaz Bueno, Fausto Weimar Acerbi Júnior

O presente artigo é uma versão preliminar, redigido conforme normas da revista Carbon Management (fator de impacto: 1,589), que poderá sofrer alterações a critério do corpo editorial, apresentada aqui na versão em português.

Resumo

Os ecossistemas florestais prestam importantes serviços ecossistêmicos a sociedade, entre eles o sequestro e estoque de carbono. Esse serviço, vem sendo alvo de importante debate internacional, devido a sua capacidade de regulação da concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e minimização dos efeitos das mudanças climáticas. Assim, o objetivo desse trabalho foi estimar o estoque de carbono existente na biomassa aérea da vegetação remanescente da bacia hidrográfica do Rio Grande, calculando o valor econômico desse estoque. Para isso, 40 fragmentos florestais foram inventariados e as estimativas do estoque de carbono na biomassa aérea foi realizada por meio do uso de modelos estatísticos. Com os valores de estoque amostrados, distribuídos geograficamente pela bacia, foi realizada a interpolação do estoque para toda a área coberta por remanescentes florestais por meio da krigagem ordinária, que posteriormente foi transformado em créditos de carbono equivalente (CO_2) e em valor financeiro, com base no valor de mercado desses créditos de carbono. Os estoques ainda foram avaliados para as diferentes fitofisionomias, municípios e classe de tamanhos de propriedades rurais. O estoque de carbono total da bacia é de 118,8 Tg, o que equivale a 436,0 Tg de CO_2 , com um valor de mercado 13,4 bilhões de Reais. Os estoques médios de carbono por área se mostraram distintos entre as diferentes fisionomias vegetacionais, com os maiores valores para a fisionomia Ombrófila. Em relação aos valores totais o bioma Mata Atlântica (Ombrófila e Semidecídua) estoca 57,9% do carbono e o Cerrado 31,8%. Desse total, 84% estão em florestas localizadas em propriedades privadas, contra 16% em unidades de conservação. Do carbono estocado nas propriedades privadas, 62% está em pequenas propriedades, 24,7% em médias e 13,3% em grandes propriedades.

Palavras-Chave: Dependência espacial; Serviços ambientais; Mudanças climáticas.

INTRODUÇÃO

Entre os serviços ecossistêmicos que as florestas prestam à sociedade, o sequestro e a estocagem de carbono é um dos que recebe maior destaque, já que essas absorvem entre 1,0 e 2,6 Pg de carbono por ano, nos mais de 3,9 bilhões de hectares existentes no globo, desempenhando um papel fundamental no controle das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Pan et al., 2011).

O estoque atual de carbono nas florestas do mundo é estimado em 861 Pg, desses, 471 Pg (55%) estocados nas florestas tropicais. Contudo, as alterações no uso da terra comprometem a sustentabilidade desse serviço ao longo dos anos, ainda segundo Pan et al. (2011) apenas o desmatamento nas regiões tropicais liberou entre 2,8 e 3,0 Pg de carbono por ano, no período entre 1990 e 2007, o equivalente a 40% das emissões globais advindas da queima de combustíveis fósseis nesse mesmo período.

Por outro lado, Cunha-e-Sá et al. (2013) relataram que um aumento no armazenamento de carbono pode ser alcançado com o aumento das áreas florestais, sendo essa, uma opção economicamente viável, que não pode ser negligenciada em uma política que vise diminuir a concentração de CO₂ na atmosfera e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Nesse cenário, cabe destaque ao mecanismo de reduções de emissões de gases do efeito estufa das Nações Unidas, conhecido como REDD+ (Redução de Emissões de gases de efeito estufa provenientes do Desmatamento e da Degradação florestal), que visa reduzir os impactos das mudanças climáticas por meio do combate ao desmatamento, incentivo ao reflorestamento e recuperação de áreas degradadas.

Um dos objetivos do REDD+ é criar valores financeiros para o carbono armazenado nas florestas, oferecendo incentivos para reduzir as emissões de

gases, seguindo a lógica de pagamentos por serviços ambientais (Nathan; Pasgaard, 2017).

Goldstein et al. (2015) avaliando os fluxos financeiros de projetos REDD+ revelaram que o financiamento do carbono florestal está em alta, só em 2014 foram investidos 705 milhões de dólares em novos financiamentos, que podem ser separados em dois grupos, os que envolvem a transação de créditos de carbono e os acordos bilaterais que não envolvem, chamados de mercados voluntários, sendo que mais de um terço desse total foi canalizado por esse grupo, onde Noruega e Alemanha são os principais investidores.

Nesse cenário, a modelagem espacial do estoque de carbono tem sido considerada uma perspectiva inovadora nas tentativas de formulação de políticas de mitigação de problemas ambientais (Asadolahi et al., 2017), seguindo a premissa de que não se consegue gerenciar o que não se conhece.

O mapeamento ajuda a revelar as diferenças existentes entre os ambientes, indicando áreas prioritárias onde os investimentos podem ser alocados (Schröter; Remme, 2016), permite também o monitoramento, desde que associado ao inventário florestal terrestre e ao sensoriamento remoto, e a identificação de mudanças ocorridas nas áreas florestais (Gizachew et al., 2017).

Mesmo que diversos estudos sobre a estocagem de carbono pelas florestas de Minas Gerais venham sendo realizados (Scolforo et al., 2015; Morais et al. 2013; Amaro et al. 2013), a maioria não abordou a questão econômica e a viabilidade de implantação de projetos de pagamentos de serviços ambientais.

Diante do exposto, fica evidente a importância de se valorar o potencial ecológico e econômico dos remanescentes florestais, de forma a fornecer ao estado e aos municípios informações sobre o valor dos ativos ambientais existentes em seu território, incentivando a discussão acerca de pagamentos pelos serviços ambientais, ou mesmo de outros tipos de subsídios associados à proteção dessas áreas.

Dessa maneira, os objetivos desse trabalho foram: estimar o estoque de carbono existente na biomassa aérea da vegetação da Bacia hidrográfica do Rio Grande e posteriormente transformar esse estoque em créditos de carbono equivalente (CO₂), valorando financeiramente, com base no valor de mercado de carbono, o potencial econômico das florestas dessa região.

MATERIAL E MÉTODOS

Base de dados

A área de estudo é a Bacia hidrográfica do Rio Grande, localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, com uma extensão territorial de mais de 86 mil Km² (Figura 1). Essa abrangência territorial garante à bacia, uma grande diversidade vegetal, que varia desde áreas de Cerrado, até áreas montanhosas cobertas por Mata Atlântica, típicas da costa sudeste do Brasil.

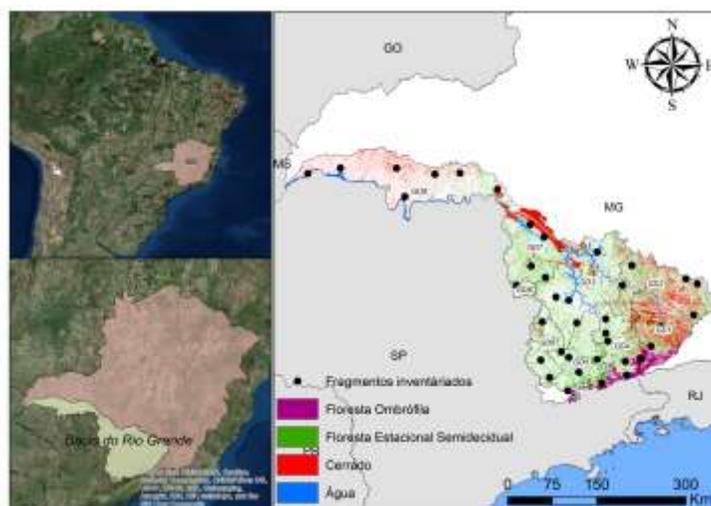


Figura 1: Mapa de localização dos fragmentos inventariados e de distribuição das diferentes fitofisionomias de ocorrência na região.

Para a elaboração desse trabalho, foi realizado o inventário florestal em 40 fragmentos florestais localizados dentro da área da bacia, cobrindo toda sua extensão territorial e abrangendo todas as fitofisionomias existentes. Nesses fragmentos, foram lançadas 1208 parcelas, onde foram mensurados o diâmetro medido a 1,30 metros do solo (DAP) e a altura total dos indivíduos (HT), dados que posteriormente foram utilizados para a estimativa de carbono por árvore.

Ao mesmo tempo, um conjunto de 232 árvores, representativas das espécies de ocorrência no local, foram amostradas destrutivamente para a quantificação do carbono na parte aérea em três fragmentos representativos das fitofisionomias: A - Floresta Ombrófila, B - Floresta Estacional Semidecidual e C - Cerrado.

A cubagem consistiu na derrubada para quantificação do volume e biomassa das árvores, seguindo metodologia proposta pela *Food and Agricultural Organization of the United Nations* - FAO (Picard; Saint-André; Henry, 2012). Além disso, foram realizadas coletas de amostras do fuste, galhos, galhos finos e folhas para análise em laboratório quanto ao teor de carbono.

As amostras para quantificação dos teores de carbono após preparadas, foram analisadas em um analisador de teor de carbono orgânico, conforme metodologia aplicada por Moraes et al. (2013). Nesse equipamento aproximadamente 2 mg de cada amostra foram colocadas em cápsulas de estanho e injetadas em uma câmara de combustão a cerca de 950°C.

O CO₂ liberado pela combustão completa da amostra foi quantificado por um sensor infravermelho, e relacionado com sua massa, fornecendo o teor de carbono existente. Com esses teores e os valores de biomassa de cada compartimento foi calculado o estoque total de carbono contido em cada árvore amostrada.

Os valores de carbono foram então utilizados para a construção dos modelos estatísticos para a estimativa do estoque de carbono por árvore, contemplando todos os compartimentos da parte aérea. O ajuste do modelo de regressão foi feito utilizando-se o modelo de Schumacher e Hall (1933) na sua forma linearizada, ajustando-se modelos para as diferentes fitofisionomias existentes na bacia, conforme equação 1.

$$\ln(C) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \beta_2 \cdot \ln(HT) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Onde: $\ln(C)$, $\ln(DAP)$ e $\ln(HT)$ são, respectivamente, as transformações logarítmicas do estoque de carbono por árvore, do diâmetro medido a 1,30 metros do solo e da altura total; β_0 , β_1 e β_2 são os parâmetros associados ao modelo; e ε_i é o erro da estimativa para a árvore i .

Os modelos foram então utilizados para gerar as estimativas de carbono das árvores mensuradas pelo inventário florestal. Com os valores de carbono estimados para as árvores das parcelas foi realizada a extrapolação para todo o fragmento, encontrando-se o valor médio de carbono por hectare (Mg. ha^{-1}).

Espacialização dos estoques de carbono

Os valores de estoque de carbono por fragmento distribuídos espacialmente na área da bacia foram utilizados para o ajuste do semivariograma, visando diagnosticar a presença de correlação espacial entre os fragmentos amostrados e o conhecimento dos parâmetros que caracterizam a estrutura de correlação: efeito pepita (*nugget*), contribuição (*partial sill*) e o alcance (*range*).

Para o ajuste do modelo teórico foi utilizado o pacote GeoR (Ribeiro Jr. e Diggle, 2001) do software estatístico R, utilizado o modelo Exponencial por meio do método dos Quadrados Mínimos Ordinários (*Ordinary Least Squares - OLS*). Para a avaliação da qualidade do ajuste do modelo foram calculadas as seguintes

estatísticas: Grau de dependência espacial (GDE) e do Critério de informação de Akaike (AIC).

Com o modelo ajustado, foi utilizado o interpolador geoestatístico de krigagem ordinária para a estimativa dos valores do estoque de carbono para os pontos não amostrados dentro da bacia. Em ambiente de sistemas de informações geográficas (SIG) a krigagem foi transformada em um *raster*, formado por *pixels* de 100 por 100 metros (1 hectare), onde para cada *pixel* foi extraído a estimativa do estoque de carbono relativo à sua área, obtido via krigagem.

Com base na classificação do uso do solo da bacia, realizado com o auxílio de imagens de satélite, foram extraídas apenas os *pixels* da interpolação localizados sobre a classe de ocupação relativa aos remanescentes florestais, dessa forma, obteve-se o estoque total de carbono existente para toda a bacia e as posteriores análises estratificadas (municípios e propriedades rurais).

As informações referentes aos limites e tamanhos das propriedades rurais foram as cadastradas pelos proprietários no sistema do Cadastro Ambiental Rural - CAR (última atualização da base de dados em 30/10/2017). Para o estudo do carbono estocado em relação ao tamanho das propriedades rurais adotou-se a seguinte estratificação: pequenas propriedades - área menor que 4 módulos fiscais; médias propriedades - área entre 4 e 15 módulos fiscais e grandes propriedades - área maior que 15 módulos fiscais.

Cálculo e valoração econômica dos créditos de carbono

Para calcular o valor de mercado do carbono, os estoques existentes nos remanescentes florestais foram transformados em estoque de CO₂, já que os créditos de carbono são calculados em função da massa desse gás, onde uma tonelada de CO₂ (1t = 1Mg) equivale a uma unidade métrica de crédito de carbono.

Para a conversão do estoque de carbono em estoque de CO₂, utilizou-se a relação entre a massa molar do CO₂ (12+2x16=44) e do carbono (12), dando origem ao fator de conversão 3,67 (fator de conversão: 1Mg de carbono = 3,67 Mg de CO₂) (Ninan; Kontoleon, 2016).

Para estimar o valor de mercado dos potenciais créditos de carbono existentes na bacia utilizou-se a cotação do crédito de carbono no mercado futuro para o mês de março de 2018 (€ 7,79) e para a transformação em moeda brasileira a cotação do dia 22/12/2017 (R\$3,96).

RESULTADOS

Valores pontuais obtidos pela amostragem destrutiva

A Tabela 1 apresenta o número de árvores amostradas por classe de diâmetro, juntamente com os valores médios para as variáveis DAP, HT e estoque de carbono por árvore (C) e seu coeficiente de variação em porcentagem, separadas por fitofisionomias.

Tabela 1 - Valores médios e coeficientes de variação para as variáveis diâmetro (DAP), altura total (HT) e estoque de carbono por árvore (C) subdivididos por classe de diâmetro e fitofisionomia.

	CLD (cm)	N	DAP (cm)	CV _{DAP} (%)	HT (m)	CV _{HT} (%)	C (Kg)	CV _C (%)
Ombrófila	5-10	10	7,4	20,2	7,5	30,4	6,3	55,2
	10-15	9	13,2	11,9	8,6	15,2	22,6	28,5
	15-20	12	17,4	7,0	10,9	33,4	42,0	40,5
	20-25	10	22,1	7,6	11,8	22,8	73,1	18,7
	25-30	11	26,7	3,0	11,6	13,8	126,2	25,0
	30-35	10	31,7	5,4	11,5	24,6	208,8	37,2
	35-40	8	37,1	4,4	12,9	33,1	360,4	53,8
	>40	11	45,6	11,9	14,8	28,6	459,7	33,0
Semidecídua	5-10	15	7,0	18,8	6,5	20,0	5,1	47,0
	10-15	11	11,6	13,8	8,7	23,3	16,3	64,8
	15-20	11	17,3	7,5	9,6	25,6	34,7	27,7
	20-25	11	21,8	5,6	10,1	15,3	68,5	22,3
	25-30	10	27,5	4,6	10,6	22,0	114,9	28,9
	30-35	10	31,5	4,8	11,2	17,1	159,1	37,1
	35-40	4	35,7	1,0	12,0	19,2	219,1	21,9
	>40	1	56,4	-	14,4	-	755,3	-
Cerrado	5-10	10	7,6	14,5	4,2	26,2	5,3	42,5
	10-15	10	12,8	9,8	7,4	17,2	23,5	44,4
	15-20	10	16,8	6,5	8,0	17,2	35,2	24,1
	20-25	9	21,8	5,7	9,1	15,9	72,2	30,7
	25-30	11	26,7	5,2	9,1	18,9	126,9	21,2
	30-35	8	32,7	3,6	11,1	18,4	259,1	26,5
	35-40	7	37,7	4,5	10,8	23,6	402,3	31,1
	>40	13	48,7	12,6	12,4	20,3	595,3	38,3

Onde: CLD é a classe de diâmetro, N é o número de árvores; CV é o coeficiente de variação para as variáveis DAP, HT e C.

Nota-se um aumento exponencial dos valores médios de carbono estocado pelas árvores com o aumento linear dos valores de diâmetro, sendo que em média, as árvores amostradas apresentaram teores médios de carbono na biomassa seca de 42% em relação a sua biomassa total.

Os valores relativos ao ajuste dos modelos de regressão, para a estimativa do estoque por árvore com base nos seus pares diâmetro e altura, obtidos no inventário florestal são apresentados na Tabela 2, juntamente com os parâmetros dos modelos (β 's) separados por fitofisionomias, e suas respectivas medidas de qualidade de ajuste: coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e valores de erro padrão das estimativas em porcentagem (Sy_x).

Tabela 2 - Valores dos parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de regressão para estimativa do estoque de carbono por árvore (Kg).

Fitofisionomia	β_0	β_1	β_2	R^2	R^2_{ajust}	Sy_x (%)
Ombrófila	-3,741	2,2234	0,5118	0,9476	0,9463	59,2
Semidecídua	-3,4218	2,2348	0,3036	0,9584	0,9572	47,6
Cerrado	-3,8763	2,3097	0,5162	0,9757	0,975	45,2

Os modelos apresentaram altos valores de coeficiente de determinação, contudo, demonstraram alguma dificuldade em estimar o estoque de carbono por árvore unicamente em função do diâmetro e da altura, o que pode ser percebido pelos valores de Sy_x .

Utilizando os modelos, foram realizadas as estimativas de carbono para as parcelas inventariadas, permitindo o conhecer os valores médio de estoque de carbono por área para cada um dos 40 fragmentos amostrados, cujo estoque de carbono ($Mg \cdot ha^{-1}$) separados por fitofisionomias são apresentados na Figura 2.

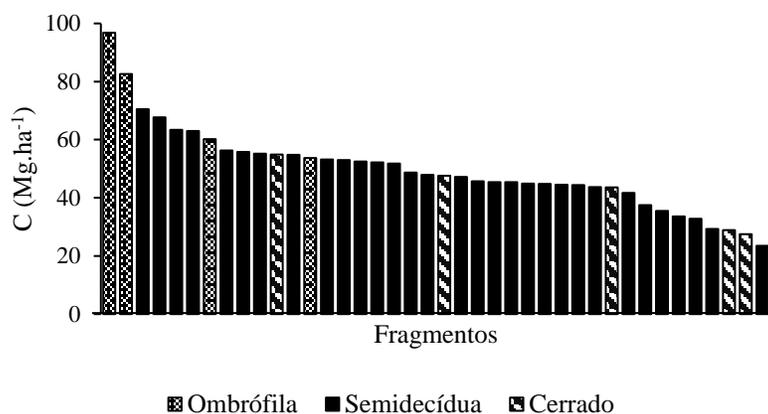


Figura 2: Valores de estoque de carbono na parte aérea (Mg.ha^{-1}) para os fragmentos florestais amostrados, subdivididos por fitofisionomia.

Os fragmentos amostrados apresentaram variação quanto ao estoque médio de carbono na parte aérea variando entre $23,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ (fragmento 36) a $96,8 \text{ Mg.ha}^{-1}$ (fragmento 11). Em relação as fitofisionomias existentes na bacia a fisionomia Ombrófila apresentou os maiores valores médios de estoque com $73,3 \text{ Mg.ha}^{-1}$; seguido pela Semidecídua com $47,9 \text{ Mg.ha}^{-1}$ e Cerrado $40,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$.

Avaliação da dependência espacial e espacialização dos dados

O ajuste do modelo exponencial via método dos quadrados mínimos ordinários apresentou estatísticas com os seguintes valores: Grau de dependência espacial (GDE) 69,9% e Critério de informação de Akaike (AIC) de -164,64. A existência da dependência espacial pode ser comprovada pelos valores de GDE próximos de 70%. Segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), valores de GDE entre 45% e 75% são considerados como média dependência espacial.

Outros autores também relatam um bom desempenho do modelo exponencial para a explicação da dependência espacial do carbono estocado em

florestas, entre eles Galeana-Pizaña et al. (2014) e Scolforo et al. (2016). A Figura 3 apresenta o semivariograma experimental com o modelo exponencial e os seguintes parâmetros encontrados pelo seu ajuste: efeito pepita: 80 (Mg/ha)²; contribuição: 185,653 (Mg/ha)² e alcance: 150.124,164 m.

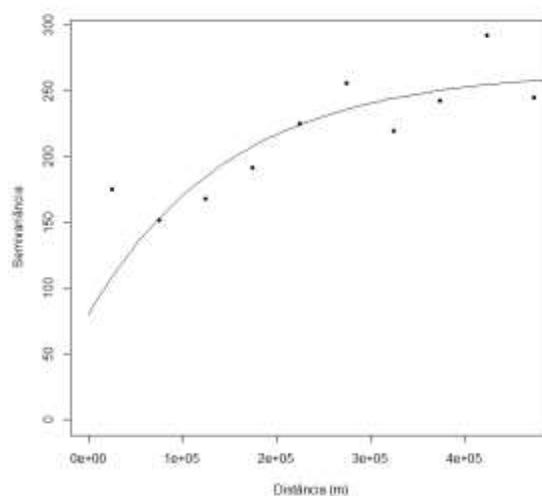


Figura 3: Comportamento da dependência espacial do estoque de carbono na parte aérea ao longo da bacia do Rio Grande

Mesmo com a alta variabilidade entre as fitofisionomias observa-se que o modelo conseguiu representar satisfatoriamente a variação espacial do carbono, o que garante confiabilidade aos resultados, uma vez que os coeficientes são dependentes das variações espaciais entre os pontos de amostragem. Utilizando os parâmetros do modelo gerou-se o mapa de krigagem para o estoque de carbono para parte aérea contido nos remanescentes florestais da bacia (Figura 4).

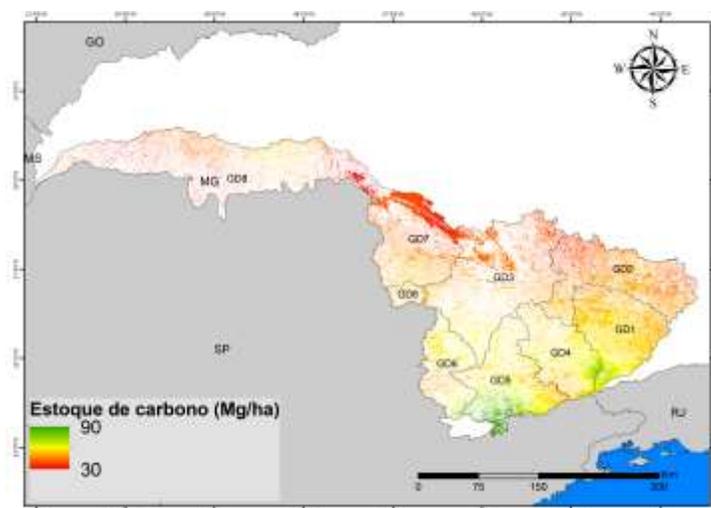


Figura 4: Mapa do estoque de carbono para a bacia do Rio Grande.

Os estoques de carbono variaram entre 30 e 90 Mg/ha ao longo da bacia. Nota-se um gradiente de diminuição do estoque do Leste para o Oeste, onde as florestas localizadas na região mais úmida (Ombrófilas da Serra da Mantiqueira - Leste) apresentam os maiores estoques em comparação com as demais fitofisionomias. Na região central, formada pelas mesorregiões Sul de Minas e Campos das Vertentes são observados valores médios de estoque, região essas ocupadas pela fitofisionomia Semidecídua e áreas de transição com o Cerrado. Enquanto os menores valores são observados para a região Oeste de Minas (Serra da Canastra) e Triângulo Mineiro, regiões essas com a vegetação bem definida como pertencente ao Bioma Cerrado.

Análise do estoque de carbono

O estoque total de carbono na parte área da vegetação (fuste, folhas e galhos) estimado para toda a bacia é de 118,8 Tg ($1,2 \times 10^8$ Mg). Já em relação ao

estoque de CO₂ esse valor é de 436,0 Tg (4,36x10⁸ Mg) o que em valores financeiros de créditos de carbono seriam equivalentes a 13,4 bilhões de Reais.

Considerando o estoque por fitofisionomia, a Floresta Estacional Semidecidual é responsável por estocar 68,8 Tg de carbono em sua biomassa aérea, seguido pelo Cerrado com 37,8 Tg e pela Floresta Ombrófila com 12,2 Tg. Em relação ao estoque de CO₂, isso equivale respectivamente a 52,5; 138,7 e 44,8 Tg de CO₂, cujo valor total dos créditos de carbono para essas fisionomias são de 7,79; 4,28 e 1,38 bilhões de Reais.

Outra subdivisão frequentemente utilizada em estudos abrangendo bacias hidrográficas são as sub-bacias, também conhecidas como Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH), no caso da bacia do rio Grande a mesma é subdividida em 8 UPGRH's, cujos valores de estoque são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de estoque de carbono, CO₂ e valor de créditos de carbono em bilhões de Reais (R\$).

Sigla	Nome	C (Tg)	CO ₂ (Tg)	R\$x10 ⁹ (Bilhões)
GD1	Alto Rio Grande	25,0	91,8	2,83
GD2	Rio Das Mortes	17,7	65,0	2,00
GD3	Entorno Do Reservatório De Furnas	15,1	55,4	1,71
GD4	Rio Verde	12,8	47,0	1,45
GD5	Rio Sapucaí	17,1	62,8	1,94
GD6	Afluentes dos Rios Mogi Guaçu e Pardo	7,5	27,5	0,85
GD7	Médio Rio Grande	13,5	49,5	1,53
GD8	Baixo Rio Grande	10,1	37,1	1,14
Total		118,8	436,0	13,4

O maior estoque está localizado na UPGRH ao entorno da nascente do Rio Grande (GD1), com aproximadamente 21% do estoque de toda bacia. Outras UPGRH's que merecem destaque são a GD2 e GD5, ambas localizadas na região

mais conservada da bacia (Leste), com respectivamente 14,9 e 14,4%, juntas essas três são responsáveis por 50,3% do estoque total de carbono.

Considerando os 214 municípios abrangidos pela bacia do Rio Grande a Figura 5 apresenta o estoque total de carbono (Tg) contido na sua área territorial.

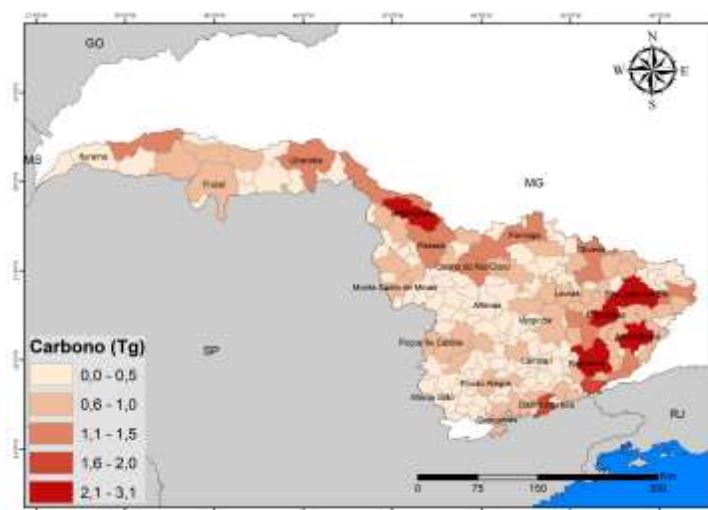


Figura 5: Estoque de carbono (Tg) por municípios pertencentes a Bacia do Rio Grande.

Os maiores estoques encontram-se nos municípios de Andrelândia (3,1 Tg), São João del Rei (3,0 Tg), Delfinópolis (2,8 Tg), Baependi (2,5 Tg), Carrancas (2,2 Tg), Aiuruoca (2,2 Tg), Itamonte (1,9 Tg), Delfim Moreira (1,6 Tg), Uberaba (1,5 Tg) e Sacramento (1,5 Tg).

Os municípios de Uberaba (2°), Sacramento (5°), São João del Rei (6°) e Delfinópolis (8°) também se destacam entre os municípios com maiores extensões territoriais da bacia, o que ajuda a explicar os altos estoques encontrados.

A Figura 6 apresenta os valores de CO₂ e valor de créditos de carbono em milhões de reais (R\$) existentes em cada município.

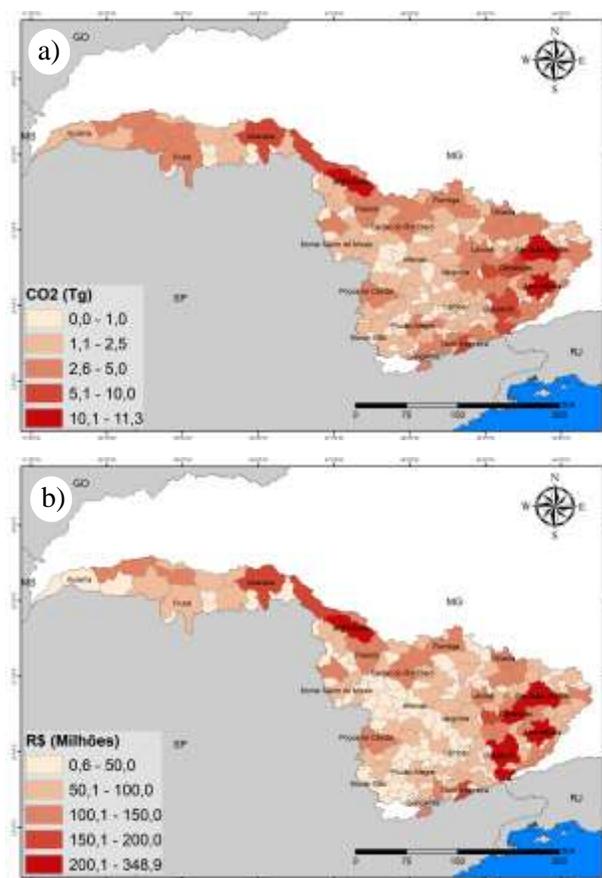


Figura 6: Estoque de CO₂ (a) e valor de créditos de carbono em milhões de reais por município (b).

Visando contornar o efeito da área do município na análise, quanto ao estoque de carbono, ponderou-se o mesmo (Mg/ha), chegando na distribuição apresentada pela Figura 7.

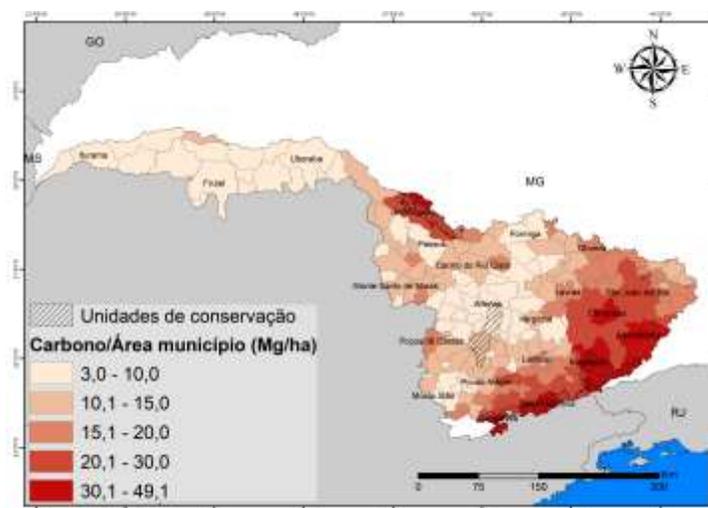


Figura 7: Estoque de carbono ponderado pela área do município.

Por ela, percebe-se novamente como a região Leste do estado se destaca entre as demais da bacia. Parte desses resultados se justificam devido ao tipo fitofisionômico da região que apresenta maior estoque médio, pelo relevo predominantemente montanhoso, que contribuiu para a manutenção de vários remanescentes, e pela existência de grandes áreas de conservação nessa região.

Entre os municípios com maiores estoques médios de carbono por área encontram-se: Sapucaí-Mirim (49,1 Mg/ha), Alagoa (44,9 Mg/ha), Gonçalves (44,9 Mg/ha), Itamonte (44,4 Mg/ha), Bocaina de Minas (42,1 Mg/ha) e Delfim Moreira (40,1 Mg/ha), todos localizados dentro dos limites de grandes unidades de conservação, como a Área de Proteção Ambiental Serra da Mantiqueira (Alagoa, Itamonte, Bocaina de Minas, Delfim Moreira), Área de Proteção Ambiental Fernão Dias (Sapucaí-Mirim, Gonçalves) e Parque Nacional do Itatiaia (Itamonte).

Como forma de se confirmar tal correlação, avaliou-se o carbono estocado nas principais unidades de conservação localizadas dentro da bacia do Rio

Grande, cujos valores de área da unidade (ha) e estoque de carbono (Tg) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Áreas e estoque de carbono das principais unidades de conservação da bacia do Rio Grande.

UC	Nome	Grupo	Área* (ha)	C (Tg)
1	A.P.A. da Serra da Mantiqueira	US	255.818,9	10,62
2	Parque Nacional da Serra da Canastra	PI	128.635,9	4,34
3	A.P.A. Fernão Dias	US	64.765,2	2,65
4	A.P.A. da Bacia do Rio Machado	US	126.595,4	1,07
5	Parque Nacional do Itatiaia	PI	10.375,9	0,59
6	A.P.A. Serra de São José	US	4.651,2	0,18
7	Reserva Biológica da Serra de Santa Rita	PI	324,7	0,02
8	Reserva Biológica de Pinheiro Grosso	PI	378,7	0,01
9	FLONA de Passa Quatro	US	341,1	0,01
10	Parque Municipal da Serra de São Domingos	PI	249,1	0,01
11	Parque Estadual Nova Baden	PI	233,7	0,01
12	FLONA de Ritópolis	US	89,2	0,003
Total				19,5

*Área no Estado de Minas Gerais; US: Uso Sustentável; PI: Proteção Integral.

As unidades de conservação são responsáveis por estocar 19,5 Tg de carbono, o que representa 16% de todo carbono estocado na bacia, com grande destaque para a A.P.A. da Serra da Mantiqueira, que estoca mais da metade do carbono existente nas unidades de conservação, sendo de extrema importância para a proteção dos remanescentes de Floresta Ombrófila do estado.

Considerando o estoque de carbono em relação ao tamanho das propriedades rurais da bacia, a Figura 8 apresenta por município a porcentagem de carbono estocado pelas propriedades pequenas (a), médias (b) e grandes (c).

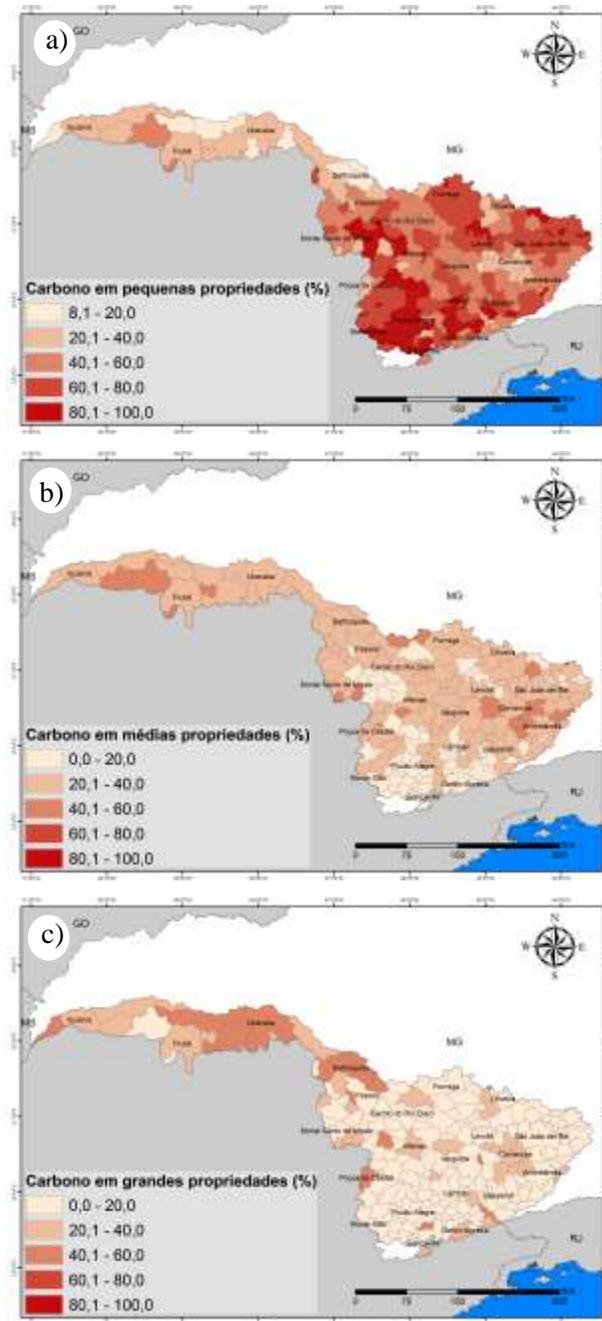


Figura 8: Porcentagem de carbono estocado pelas pequenas propriedades rurais (a), médias (b) e grandes (c) por município da bacia do Rio Grande.

De forma geral, 62,0% do carbono existente na bacia está estocado por remanescentes florestais localizados em pequenas propriedades rurais; 24,7% em médias e 13,3% em grandes propriedades.

Do total de 214 municípios, em 172 (80,4%) o estoque de carbono ocorre principalmente em propriedades pertencentes a classe das pequenas propriedades rurais, em 20 municípios (9,3%) os estoques ocorrem principalmente nas médias propriedades e em 22 municípios (10,3%) o estoque ocorre principalmente nas grandes propriedades.

DISCUSSÃO

Os resultados indicam que a biomassa aérea dos remanescentes florestais localizados na bacia hidrográfica do Rio Grande, predominantemente ocupada por áreas de Mata Atlântica e Cerrado, biomas tropicais brasileiros que sofreram os maiores impactos antropogênicos ao longo dos anos, apresenta teores médios de carbono de 42%, considerando a planta como um todo.

O valor é um pouco menor que o recomendado pelo IPCC (2006) para conversão da biomassa em carbono de espécies arbóreas pertencentes a florestas tropicais e subtropicais, de 47% (intervalo de confiança de 44 a 49%).

Esse fator apresentado pelo IPCC tem como base diversos estudos realizados ao longo no mundo, entre eles Chambers et al. (2001), que trabalhou exclusivamente com árvores da Amazônia Brasileira, com uma faixa de variação de DAP consideravelmente maior que as amostradas nesse estudo (DAP até 100 cm) e McGroddy et al. (2004) com florestas tropicais em latitudes entre 23,5° sul e 23,5° norte, também acima da área desse estudo, o que pode justificar os maiores valores.

Assim, conhecer a variação geográficas desses fatores de conversão é importante, pois, indicam que diferentes regiões tropicais apresentam diferentes teores de carbono na sua biomassa, o que deve ser levado em consideração na conversão de dados.

Apesar dos teores de carbono na biomassa não apresentarem grande variação entre as diferentes fisionomias vegetacionais existentes na bacia, principalmente, porque está localizada em uma faixa de latitude praticamente constante, os estoques médios por área se mostraram distintos, principalmente avaliando o gradiente de diminuição existente entre os fragmentos pertencentes a fitofisionomia Ombrófila e os pertencentes ao Cerrado (Leste para Oeste).

Isso é explicado pelo porte das florestas, já que as áreas cobertas por florestas Ombrófilas são áreas predominantemente declivosas, com grandes unidades de conservação protegidas por leis e que sofreram baixo impacto ao longo dos anos, por basicamente não possibilitarem o uso da terra para outros fins. Isso permitiu a existência de matas de maior porte e mais conservadas, associada também às melhores condições ambientais, principalmente relacionadas à precipitação desses locais (Watzlawick et al., 2012).

O porte também é responsável pelos maiores valores encontrados no triângulo mineiro, próximo aos municípios de Uberaba e Frutal, quando comparadas com as áreas ao seu entorno, já que nessa região ocorre a fitofisionomia Cerradão, um tipo raro de vegetação florestal pertencente ao bioma Cerrado, que ocupa apenas 1% das áreas de cerrado do Brasil, caracterizado por ser mais alto e mais denso que outros ecótipos do bioma (Junior; Haridasan, 2005).

Mesmo os remanescentes de floresta Ombrófilas apresentando maiores estoques médios de carbono, sua relevância em termos totais na bacia é considerada pequena, quando comparada com as demais fisionomias, já que apenas 10,3% do total de carbono da bacia é estocado por essa fisionomia, contra 57,9% estocado pelas Semidecíduas e 31,8% estocado pelas formações

pertencentes ao bioma Cerrado. Isso se deve basicamente, à pequena área remanescente dessa vegetação na área de estudo, contudo, quando avaliada a importância do bioma Mata Atlântica (que nesse estudo engloba a floresta Ombrófila e a Semidecídua) essa atinge valores acima de 68%.

Logo, evitar o desmatamento é fundamental para reduzir as emissões de carbono no Brasil, visto que grande parte das emissões atuais de gases de efeito estufa do país continuam sendo originadas dessa prática (Matthews et al., 2014). Um grande exemplo são os índices de desmatamento na Mata Atlântica, que entre 2015 e 2016 cresceu 60% (totalizando 29.075 hectares), a maior taxa dos últimos 10 anos (SOS Mata Atlântica, 2017).

Esses resultados não são exclusividade da Mata Atlântica, no bioma Cerrado 948.300 hectares de vegetação foram desmatados, apenas no ano de 2015, segundo dados do Plano de Prevenção e Controle do Desmatamento no Cerrado (MMA, 2016), o que faz do bioma o mais ameaçado, já que 40% da vegetação natural restante ainda pode ser legalmente convertida para outro uso, principalmente para expansão da agropecuária.

Um grande problema a ser considerado na conservação do Cerrado é o fato de existirem poucas áreas protegidas, onde apenas 7,5% da sua área remanescente são cobertos por unidades de conservação (Strassburg et al. 2017), fato também notado na bacia do Rio Grande, onde a única unidade de conservação existente no bioma é o Parque Nacional da Serra da Canastra.

Mesmo diante desse cenário, o Brasil adota a postura de propor, nos acordos climáticos internacionais, a redução de suas emissões de carbono com a queda no desmatamento da Amazônia, mas demonstra pouca atenção ao desmatamento nos demais biomas, tão importantes quanto, em relação as reduções de emissões de CO₂.

Por esse motivo, estudos de quantificação e valoração do carbono estocado nos biomas extra-amazônicos são importantes, pois além de fornecerem

informação para áreas menos visadas pela comunidade internacional, permitem ao país justificar a captação de recursos no exterior para recuperação e/ou preservação também desses biomas a exemplo do que ocorre com o Fundo Amazônia.

Outro destaque a ser feito, é a participação de florestas de propriedade estritamente privada frente as unidades de conservação no estoque de carbono da bacia (84% contra 16% respectivamente). Parte desse resultado se justifica pelo fato de a legislação brasileira exigir a proteção de determinadas áreas, cobertas com remanescentes florestais, em todas as propriedades rurais do país.

Como esse armazenamento se reflete em benefícios para a sociedade, subsidiá-lo seria um ponto de partida natural, criando incentivos, além dos legais, para que os proprietários rurais mantenham a proteção de suas florestas, seguindo a lógica de pagamentos por serviços ambientais na ótica do REDD+.

Contudo, um ponto a ser levado em consideração em projetos REDD+ é o princípio da adicionalidade da conservação ambiental, que procura assegurar que a iniciativa proposta está contribuindo para uma redução das emissões em comparação com não existência da mesma (Tahvonen; Rautiainen, 2017).

Nesse cenário, nem todas as áreas remanescentes estariam aptas a serem utilizadas em programas de redução de emissão por combate ao desmatamento, já que parte delas teoricamente não correrem risco de desmatamento por serem protegidas pela legislação vigente (Áreas de Preservação Permanente - APP e Reserva Legal).

Uma saída para essa exigência é fornecer benefícios financeiros as propriedades com área florestal remanescente maiores que as exigidas pelo Código Florestal, visto que boa parte das propriedades rurais ainda têm passivos ambientais (Young; Bakker, 2015).

Porém o nível de referência nacional de emissões florestais, estudo realizado seguindo orientação metodologia do IPCC, com base em sistemas de

monitoramento do desmatamento, exigido pelas Nações Unidas para submissão de propostas de REDD+, só existe no Brasil para os biomas Amazônico e o Cerrado, sendo que esse último ainda em apreciação, o que torna elegíveis, nesse momento, apenas projetos REDD+ na Amazônia (MMA, 2017).

No processo de valoração realizado nesse estudo não se levou em consideração tal discussão, assumindo que qualquer área, independentemente de sua adicionalidade ou localização geográfica, teria algum valor econômico associado, por isso o valor total de 13,4 bilhões de Reais não pode ser considerado como o valor total de créditos de carbono disponíveis para serem ofertados no mercado, mas sim uma estimativa do valor do carbono estocado nos remanescentes florestais da bacia, um valor mais relacionado a sua importância ambiental do que propriamente dito a um potencial valor financeiro.

Mas o grande obstáculo para a implementação de políticas de pagamentos por serviços ambientais ainda é a escassez de recursos financeiros. Na Amazônia, o Brasil vem contando com investimentos internacionais, até pelo fato desse bioma já estar apto a receber esse tipo de financiamento. Assim, espera-se que nos próximos anos o governo brasileiro realize os estudos de nível de referência nacional de emissões florestais para os demais biomas, o que viabilizaria ações REDD+ em todo o país.

Contudo, enquanto essa não é uma realidade, outras experiências locais podem ser estimuladas visando a conservação ambiental, como aumento do repasse via ICMS ecológico, a isenção do Imposto Territorial Rural (ITR) para as áreas cobertas por remanescentes florestais, e a servidão florestal, instituída pelo novo código florestal brasileiro, que possibilita a negociação entre diferentes proprietários, de cotas de áreas com vegetação nativa que exceda os requisitos legais, compensando o déficit de outra propriedade dentro do mesmo bioma (Brasil, 2012).

Em Minas Gerais, outra experiência estabelecida desde 2009 é o Bolsa Verde, que apoia a conservação e recuperação da cobertura vegetal nativa mediante pagamento por serviços ambientais aos proprietários que preservam a vegetação em suas propriedades (Minas Gerais, 2008), programa esse que até o ano de 2017 fez o repasse de 32,8 milhões de Reais a 2.726 beneficiários, estabelecendo como prioridade os agricultores familiares de pequenas propriedades rurais (IEF, 2017), que conforme os resultados encontrados são os principais responsáveis pela estocagem de carbono (62 %).

Ao mesmo tempo, os resultados demonstram que as alterações do Código Florestal, aprovadas no final de 2012 (Brasil, 2012), tiveram um relativo impacto na conservação de remanescentes florestais e no serviço de estocagem de carbono. Apesar do novo código manter a conservação das Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reservas legais, a nova lei passou a diferenciar os requisitos de conservação e restauração, principalmente para as pequenas propriedades rurais, através da flexibilização na definição da faixa de APP, além da permissão de inclusão de APP's no cálculo da área de Reserva legal.

Porém a grande maioria das propriedades brasileiras se enquadram nessa classe, que na bacia do Rio Grande englobam propriedades com áreas variando entre 80 e 140 hectares (de acordo com o módulo rural dos municípios) o que levou a uma diminuição da área total que por lei deveria ser restaurada e preservada.

Embora a maior parte do debate sobre o estoque de carbono nas florestas, até aqui, tenha se concentrado no desmatamento, a restauração florestal tem papel importante para se alcançar a meta apresentada pelo Brasil no acordo de Paris de restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030.

A chave para o sucesso dessa meta é o Cadastro Ambiental Rural (CAR), um registro público eletrônico de âmbito nacional, que integra as informações sobre a vegetação nativa e áreas de uso consolidado existentes nas propriedades

rurais, que tem como função identificar os passivos ambientais existentes. A segunda fase desse cadastro é utilizar essas informações nos programas de regularização ambiental em todos os biomas brasileiros, podendo inclusive no futuro, se atendidas as exigências das Nações Unidas, se enquadrarem em projetos REDD+.

Contudo, o grande desafio será a pressão do setor do agronegócio para que tais programas não saiam do papel, já que os mesmos trarão impactos econômicos, devido aos custos de restauração e substituição de áreas atualmente usadas para outros fins, além do argumento de que a restauração florestal conflita com a produção agrícola.

Segundo Soares-Filho et al. (2014) argumento esse totalmente inválido, já que dos 45 milhões de hectares previstos com passivos ambientais pelas regras do novo Código Florestal, apenas 0,6 milhões são ocupados por culturas (1% de das culturas em todo o país), enquanto o restante é ocupado principalmente por pastagens, muitas vezes degradadas ou com baixas densidades de cabeças de gado por hectare.

CONCLUSÕES

A estimativa do estoque de carbono existente na biomassa acima do solo da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Grande é de 118,8 Tg ($1,2 \times 10^8$ Mg), já em relação ao estoque de CO_2 esse valor é de 436,0 Tg ($4,36 \times 10^8$ Mg) o que em valores financeiros de créditos de carbono seriam equivalentes a 13,4 bilhões de Reais. Os estoques médios de carbono por área se mostraram distintos entre as diferentes fisionomias vegetacionais, com os maiores valores para a fisionomia Ombrófila. Em relação aos valores totais o bioma Mata Atlântica (Ombrófila e Semidecídua) estocam 57,9% do carbono e o Cerrado 31,8%. Do estoque total, 84% estão florestas localizadas em propriedades privadas, contra 16% em

florestas públicas. Do carbono estocado nas propriedades privadas, 62% está em pequenas propriedades, 24,7% em médias e 13,3% em grandes propriedades.

REFERÊNCIAS

- Amaro, M. A., Boechat Soares, C. P., Lopes de Souza, A., Garcia Leite, H., & Fernandes da Silva, G. (2013). Estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*, 37(5), 849-857.
- Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., & Sakieh, Y. (2017). Hyrcanian forests conservation based on ecosystem services approach. *Environmental Earth Sciences*, 76(10), 365
- Brasil, *Novo Código Florestal. Lei n 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, p. 2.166-67, 1981.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Novak, J. M., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), 1501-1511.
- Chambers, J. Q., dos Santos, J., Ribeiro, R. J., & Higuchi, N. (2001). Tree damage, allometric relationships, and above-ground net primary production in central Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 152(1), 73-84.
- Cunha-e-Sá, M. A., Rosa, R., & Costa-Duarte, C. (2013). Natural carbon capture and storage (NCCS): forests, land use and carbon accounting. *Resource and Energy Economics*, 35(2), 148-170.
- Galeana-Pizaña, J. M., López-Caloca, A., López-Quiroz, P., Silván-Cárdenas, J. L., & Couturier, S. (2014). Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 179-189.
- Gizachew, B., Astrup, R., Vedeld, P., Zahabu, E. M., & Duguma, L. A. (2017). REDD+ in Africa: contexts and challenges. *Natural Resources Forum*, 41(2), 92-140.

- Goldstein, A., Neyland, E., & Bodnar, E. (2015). *Converging at the crossroads State of forest carbon finance 2015*. Forest Trends' Ecosystem Marketplace. Washington, DC.
- Goodman R.C., Phillips O.L., & Baker T.R. (2014). The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Applications*, 24(4): 680-698.
- IEF, Instituto Estadual de Florestas. *Estado retoma pagamentos do Programa Bolsa Verde*. Disponível em: < <http://www.ief.mg.gov.br/noticias/1/2228-estado-retoma-pagamentos-do-programa-bolsa-verde>>. Acessado em: 07 jan. 2018.
- Investing. Crédito Carbono Futuros - Mar 18 (CFI2H8). Disponível em: < <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 22 dez. 2017.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- Junior, B. M., & Haridasan, M. (2005). Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerrado e um cerrado sensu stricto em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste de Mato Grosso, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 19(4), 913-926.
- Marziliano P.A., Menguzzato G., Scuderi A., Scalise C., Coletta V. (2017). Biomass conversion and expansion factors in Douglas-fir stands of different planting density: variation according to individual growth and prediction equations. *Forest Systems*, 26(1): 1-10.
- Matthews, H. D., Graham, T. L., Keverian, S., Lamontagne, C., Seto, D., & Smith, T. J. (2014). National contributions to observed global warming. *Environmental Research Letters*, 9(1), 014010.
- McGroddy, M. E., Daufresne, T., & Hedin, L. O. (2004). Scaling of C: N: P stoichiometry in forests worldwide: Implications of terrestrial redfield-type ratios. *Ecology*, 85(9), 2390-2401.
- Minas Gerais. *Lei Estadual nº. 17.727, de 13 de agosto de 2008*. Dispõe sobre a concessão de incentivo financeiro a proprietários e posseiros rurais, sob a

denominação de Bolsa Verde, para os fins que especifica, e altera as Leis nºs, v. 13, 2008.

MMA, Ministério do Meio Ambiente (2016). *Planos de Ação para a Prevenção e o Controle do Desmatamento - Documento base: Contexto e análises*. Departamento de Políticas para o Combate ao Desmatamento - DPCD/SMCQ/MMA.

MMA, Ministério do Meio Ambiente (2017). *Acompanhamento e a análise de impacto das políticas públicas*. Disponível em: <<http://redd.mma.gov.br/pt/acompanhamento-e-a-analise-de-impacto-das-politicas-publicas>>. Acesso em: 10 January. 2018.

Morais, V. A., Scolforo, J. R. S., Silva, C. A., Mello, J. M. D., Gomide, L. R., & Oliveira, A. D. D. (2013). Carbon and biomass stocks in a fragment of cerrado in Minas Gerais state, Brazil. *Cerne*, 19(2), 237-245.

Nathan, I., & Pasgaard, M. (2017). Is REDD+ effective, efficient, and equitable? Learning from a REDD+ project in Northern Cambodia. *Geoforum*, 83, 26-38.

Ninan, K. N., & Kontoleon, A. (2016). Valuing forest ecosystem services and disservices—Case study of a protected area in India. *Ecosystem Services*, 20, 1-14.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... & Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988-993.

Picard N, Saint-André L, & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Montpellier. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

Ribeiro Jr. P.J., Diggle P.J. (2001). geoR: A package for Geostatistical Analysis. *R news*, 1(2), 14-18.

Schröter, M., & Remme, R. P. (2016). Spatial prioritisation for conserving ecosystem services: comparing hotspots with heuristic optimisation. *Landscape ecology*, 31(2), 431-450.

- Schumacher, F.X. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *J Agric Res*, 47, 719-734.
- Scolforo, H. F., Scolforo, J. R. S., Mello, C. R., Mello, J. M., & Ferraz Filho, A. C. (2015). Spatial distribution of aboveground carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Savanna, Atlantic Forest and Semi-Arid Woodland. *PloS one*, 10(6), e0128781.
- Scolforo H.F., Scolforo J.R.S., Mello J.M., Mello C.R., & Morais V.A. (2016). Spatial interpolators for improving the mapping of carbon stock of the arboreal vegetation in Brazilian biomes of Atlantic forest and Savanna. *Forest Ecology and Management*, 376, 24-35.
- Soares-Filho, B., Rajão, R., Macedo, M., Carneiro, A., Costa, W., Coe, M., ... & Alencar, A. (2014). Cracking Brazil's forest code. *Science*, 344(6182), 363-364.
- Strassburg, B. B., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., ... & Soares-Filho, B. (2017). Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 0099.
- Tahvonen, O., & Rautiainen, A. (2017). Economics of forest carbon storage and the additionality principle. *Resource and Energy Economics*, 50, 124-134.
- Young, C. E. F., & BAKKER, L. D. (2015). *Incentivos econômicos para serviços ecossistêmicos no Brasil*. Rio de Janeiro: Forest Trends, 33-56.
- Watzlawick, L. F., Caldeira, M. V. W., Viera, M., Schumacher, M. V., Godinho, T. D. O., & Balbinot, R. (2012). Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. *Scientia Forestalis Sci.* v. 40, n. 95, p. 353-362.
- Zang, Z., Zou, X., Zuo, P., Song, Q., Wang, C., & Wang, J. (2017). Impact of landscape patterns on ecological vulnerability and ecosystem service values: An empirical analysis of Yancheng Nature Reserve in China. *Ecological Indicators*, 72, 142-152.