

SANDRO LÚCIO SILVA MOREIRA

**ACÚMULO DE BIOMASSA E CARBONO EM CULTIVO DE MACAÚBA
(*Acrocomia aculeata*)**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Aplicada, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

M838a
2019
Moreira, Sandro Lucio Silva, 1989-
Acúmulo de biomassa e carbono em cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) / Sandro Lucio Silva Moreira. – Viçosa, MG, 2019.

xi, 57 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Meteorologia agrícola. 2. Créditos de carbono.
3. Alometria. 4. Biomassa. 5. Sequestro de carbono.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Aplicada. II. Título.

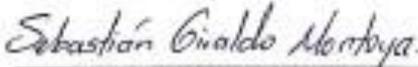
CDD 22. ed. 630.2515

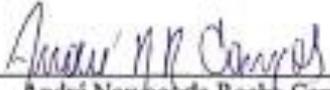
SANDRO LÚCIO SILVA MOREIRA

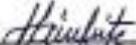
**ACÚMULO DE BIOMASSA E CARBONO
EM CULTIVO DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*)**

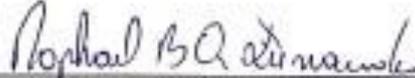
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção
do título de *Doctor Scientiarum*.

APROVADA: 29 de julho de 2019.


Sebastian Giraldo Montoya


André Narvaes da Rocha Campos


Hélio Garcia Leite


Raphael Bragança Alves Fernandes
(Coorientador)


Hewley Maria Acioli Imbuzeiro
(Orientadora)

Ofereço

A todos os amigos que fiz durante a graduação e pós-graduação e que sempre torceram por mim.

Aos meus pais Sebastião Moreira e Maria da Cruz Silva Moreira, ao meu irmão Sérgio e minha sobrinha Maria Fernanda.

Dedico.

“Ao anoitecer, pode vir o choro, mas a alegria vem pela manhã”.

(Salmos 30:5)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por estar sempre presente em minha vida, guiando meus passos e iluminando meus caminhos, contribuindo para que meus sonhos se tornassem realidade.

Agradeço a minha mãe Maria da Cruz, que em todos os momentos de minha vida me apoiou, sendo a peça chave para que eu me tornasse o homem que sou hoje.

Ao meu pai, Sebastião Moreira, que mesmo na dificuldade sempre contribuiu com minha formação profissional.

Agradeço ao meu irmão Sérgio, que sempre esteve presente nessa jornada de minha vida e nunca mediu esforços para contribuir com minha formação, um grande amigo e um exemplo de pessoa, que sempre lutou para alcançar seus objetivos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada.

Agradeço a Laís Santos que desde o início do doutorado esteve presente, me ajudando nos momentos de dificuldade e compartilhando muitas alegrias.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de estudos durante o curso.

À Acrotech Sementes e Reflorestamento pelo suporte técnico e financeiro.

A professora Hewlley, minha orientadora, pela confiança, acolhimento e orientação.

Ao professor Raphael, meu coorientador, que desde o mestrado me acompanha em cada atividade, com grande competência, compromisso e companheirismo.

Aos professores Leonardo Pimentel, Hélio Garcia e Gilberto Sedyama pelo apoio e orientação.

A Gabriela Cristina, pelo apoio e sugestões na escrita do trabalho.

Ao Otto, companheiro de experimento, pelo apoio e amizade.

Aos amigos do Grupo de pesquisa Micromet-UFV, Rian, Heitor, Victor, Gabriel, Bruna e Gisele, pela parceria e contribuição.

A meu amigo Ícaro Delage, pela amizade e companheirismo que trago comigo desde a graduação.

Aos funcionários da estação Experimental de Araçuaia, que não mediram esforços para a boa condução das atividades de campo.

Agradeço aos amigos, Aristides, Paulo, Filipe e Cléverson, amigos que fiz durante o mestrado e que estiveram presentes em todo meu processo de formação acadêmica enquanto estudante da UFV. E aos amigos, Alan e Lucas, que durante o doutorado estiveram sempre presentes, compartilhando muitos momentos felizes.

Agradeço também as pessoas que neste momento fogem à minha memória, mas que, de alguma forma contribuíram, fazendo parte dessa história.

Muito obrigado!

BIOGRAFIA

SANDRO LUCIO SILVA MOREIRA, filho de Sebastião Moreira e Maria da Cruz Silva Moreira, nasceu em 31 de julho de 1989 em Viçosa – Minas Gerais.

No ano 2004 em Viçosa, concluiu o ensino fundamental no Colégio Estadual José Lourenço de Freitas e posteriormente o ensino médio no Colégio Estadual Doutor Raimundo Alves Torres no período de 2005 a 2007.

Em fevereiro de 2008 iniciou a graduação em Agroecologia no Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais – IFSUDESTE-MG, Rio Pomba-MG, local onde iniciou os trabalhos com pesquisa, ensino e extensão, enquanto bolsista do Programa de Educação Tutorial- PET-CAPES- Grupo PET-CIÊNCIAS AGRÁRIAS, concluindo a graduação em fevereiro de 2013.

Em março de 2013 iniciou o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agroecologia da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa em fevereiro de 2015.

Em agosto de 2015 iniciou o doutorado no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa em julho de 2019.

SUMÁRIO

RESUMO	x
ABSTRACT	xii
I. INTRODUÇÃO GERAL	1
II. REFERÊNCIAS	4
CAPÍTULO 1 – Acúmulo de carbono acima e abaixo do solo na biomassa e potencial de geração de créditos de carbono em cultivo de macaúba	6
Resumo.....	7
Abstract	8
1. Introdução	9
2. Material e Métodos	11
2.1. Localização da área de estudo	11
2.2. Seleção de plantas de macaúba cultivadas em viveiro e no campo.....	11
2.3. Coleta destrutiva das palmeiras e obtenção de amostras.....	12
2.3.1. Acima do solo	12
2.3.2. Abaixo do solo	12
2.4. Determinação da massa seca total e nos diferentes compartimentos da planta....	13
2.5. Determinação do teor e acúmulo de carbono nos diferentes compartimentos da planta	13
2.6. Estoque de carbono e geração de créditos de carbono de plantios de macaúbas .	14
3. Resultados e discussão	15
3.1. Dados dendrométricos	15
3.2. Acúmulo de biomassa abaixo e acima do solo nas plantas de macaúba	15
3.3. Teor e acúmulo de carbono na biomassa de plantas de macaúba, abaixo e acima do solo	17
3.4. Estoque de carbono em cultivo de macaúbas	18
3.5. Potencial de geração anual de créditos de carbono com cultivo comercial de macaúba.....	21
4. Conclusões	24
5. Referências	25
CAPÍTULO 2 – Root distribution of cultivated macauba trees	30
Abstract	31
1. Introduction.....	31

2. Materials and methods.....	32
2.1. Study area	32
2.2. Plant selection.....	32
2.3. Root collection	32
3. Results and discussion	33
4. Conclusions	36
5. References	36
CAPÍTULO 3 – Equações alométricas para estimar massa seca e carbono de macaúbas cultivadas	37
Resumo.....	38
Abstract	39
1. Introdução	40
2. Material e Métodos	41
2.1. Local de estudo.....	41
2.2. Medições e seleção de plantas para amostragem destrutiva.....	42
2.3. Mensuração das variáveis independentes antes do abate das plantas.....	44
2.4. Abate das plantas e obtenção da massa seca total e carbono acumulado	44
2.5. Ajuste do modelo alométrico.....	46
3. Resultados e Discussão	46
3.1. Características gerais das macaúbas coletadas destrutivamente	46
3.2. Equações alométricas para massa seca de macaúbas	47
3.3. Equações alométricas para o acúmulo de carbono de macaúbas	50
4. Conclusões	53
5. Referências.....	54
III. CONCLUSÕES GERAIS	57

RESUMO

MOREIRA, Sandro Lucio Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2019. **Acúmulo de biomassa e carbono em cultivo de macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Orientadora: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Leonardo Duarte Pimentel e Raphael Bragança Alves Fernandes.

A macaúba (*Acrocomia aculeata*) é uma palmácea oleaginosa nativa da América tropical com ampla distribuição na flora brasileira, ocorrendo principalmente no bioma Cerrado. Essa palmeira é uma alternativa potencial para fins energéticos e alimentar, surgindo como uma espécie promissora para o plantio em áreas degradadas. Alguns relatos na literatura sugerem seu potencial de sequestrar carbono em áreas de ocorrência natural, porém nenhum estudo comprova tal potencial em cultivos comerciais, onde tanto solo como palmeiras são manejadas visando maior produtividade. Diante deste cenário, o presente estudo avaliou o potencial de acúmulo de carbono na biomassa acima e abaixo do solo de macaúbas cultivadas pelo método destrutivo, com amostragem de indivíduos de diferentes idades. Os dados obtidos permitiram a redação de três capítulos com resultados inéditos que compõem o presente documento. O primeiro capítulo teve como objetivo avaliar o acúmulo de carbono na biomassa acima e abaixo do solo em cultivo comercial de macaúba de diferentes idades, bem como quantificar seu potencial de geração de créditos de carbono. No segundo, o objetivo foi avaliar a distribuição horizontal e vertical do sistema radicular de macaúba de diferentes idades de cultivo. No terceiro, o objetivo foi ajustar modelos alométricos para estimar o acúmulo de massa seca e carbono em macaúbas cultivadas. Os resultados obtidos confirmam o potencial da macaúba de acumular carbono em sua biomassa ao longo do tempo, com o maior acúmulo de carbono presente na biomassa acima do solo em macaúbas cultivadas no campo. As raízes das mudas de macaúba e da palmeira jovem no campo concentram-se no lado da região tuberosa do caule saxofone e são uniformemente distribuídas nas plantas adultas. A profundidade efetiva das raízes aumenta à medida que a planta envelhece e a distância efetiva das raízes coincide com a área de projeção da copa da palmeira. A altura total da palmeira é a variável independente de melhor desempenho no modelo alométrico testado, podendo ser utilizada na estimativa tanto de massa seca como de carbono em macaúbas cultivadas.

Todas essas informações geradas abrem janelas de oportunidades para futuras melhorias no manejo de áreas cultivadas e abre possibilidade de negociações de créditos de carbono no mercado internacional.

ABSTRACT

MOREIRA, Sandro Lucio Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2019. **Biomass and carbon accumulation in macauba (*Acrocomia aculeata*) cultivation.** Advisor: Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro. Co-advisors: Gilberto Chohaku Sedyama, Leonardo Duarte Pimentel and Raphael Bragança Alves Fernandes.

The macauba (*Acrocomia aculeata*) is an oleaginous palm tree native from tropical America with wide distribution in Brazilian flora, mainly in the Cerrado biome. This palm tree is a potential alternative for energy and food purposes, emerging as a promising species for planting in degraded areas. Some literature reports suggest its potential in carbon sequestration in naturally occurring areas, but there is not any study proving such potential in commercial crops at which both soil and palm trees are managed to increase productivity. Given this scenario, this study evaluated the potential of carbon accumulation in above and below ground biomass of macauba trees cultivated by the destructive method, by sampling different aged individuals. The obtained data allowed the writing of this document composed by three chapters with unprecedented results. The first chapter aimed to evaluate carbon accumulation in above and below ground biomass in the commercial cultivation of macauba of different ages, as well as to quantify its potential to generate carbon credits. The second chapter evaluated the horizontal and vertical distribution of macauba root system at different cultivation ages. In the third, the objective was to adjust allometric models in order to estimate dry mass and carbon accumulation in cultivated macauba trees. The results confirmed the potential of macauba to accumulate carbon over time, with the largest accumulation in above ground biomass in the field. The roots of macauba seedlings and young trees in the field are concentrated on the tuberous side of the saxophone stem and are evenly distributed in the adult plants. The effective root depth increases as the plant ages and the effective root distance coincides with the palm tree crown projection area. Total palm height is the independent variable with the best performance in the tested allometric model and can be used to estimate both dry mass and carbon in cultivated macauba trees. Together, these results can further contribute for future improvements in the management of cultivated areas and opens the possibility of trading carbon credits in the international market.

I. INTRODUÇÃO GERAL

O efeito estufa é um processo natural responsável por regular a temperatura do planeta. Parte da energia emitida pela superfície da terra é absorvida pelos gases presentes na atmosfera e parte é irradiada de volta à superfície, mantendo o planeta aquecido. Os principais gases do efeito estufa (GEE) são o CO₂, CH₄, N₂O, clorofluorcarbonos (CFCs) e o vapor d'água. Entre esses, o CO₂ é o que mais contribui, respondendo por cerca de 55 % do efeito estufa, o que é associado à grande quantidade emitida (Carvalho et al., 2010).

Mais recentemente tem aumentado a preocupação com a taxa com que esses gases vêm sendo emitidos. Estudos mostram que a concentração de CO₂ e de outros GEE tem aumentado consideravelmente desde a revolução industrial (NOAA, 2019), intensificando o efeito estufa e, conseqüentemente, causando o aquecimento global. Dentre as principais atividades que emitem CO₂ e outros GEE, destacam-se a queima de combustíveis fósseis e a mudança do uso da terra e agricultura. No Brasil, a mudança de uso da terra e da agricultura são os setores que mais contribuem para a emissão desses gases (Vital, 2018).

As principais mudanças de uso da terra no Brasil correspondem à substituição de florestas por pastagens e outras culturas (SEEG, 2017). Este quadro é o mesmo na América Latina (Boit et al., 2016), o que compromete o estoque de carbono no sistema solo-planta e incrementa as concentrações de CO₂ na atmosfera, além de afetar os padrões de precipitação e temperatura locais e, ou regionais.

Dentre os principais compartimentos que armazenam carbono no planeta - oceânico, geológico, pedológico, biótico e atmosférico (Carvalho et al., 2010), a vegetação possui papel especial pela capacidade fotossintética. Por meio da fotossíntese as plantas são capazes de incorporar na sua biomassa parte do CO₂ atmosférico em forma de compostos de carbono, o que permite que cerca de 50 % dos vegetais seja constituída por esse elemento, sendo a maior parte do carbono presente especialmente na parte aérea em detrimento do sistema radicular (Houghton et al., 2009). Essa é a premissa que fundamenta práticas e iniciativas que buscam mitigar a emissão de gases do efeito estufa a partir da maximização do acúmulo de carbono na vegetação. Neste contexto, estratégias como o incentivo ao plantio de espécies arbóreas tornam-se interessantes.

Recentemente a macaúba (*Acrocomia aculeata*) - uma palmácea oleaginosa nativa da América tropical (Dransfield et al., 2008) e com ampla distribuição na flora brasileira, tem merecido destaque como alternativa com expressivo potencial para fins energéticos, alimentar, ambiental e social (Dias et al. 2011). Se apenas 1% do território brasileiro for cultivado com macaúbas, supõe-se que muitos serão os benefícios ambientais, principalmente em termos de recuperação de áreas degradadas e sequestro de carbono (Mota et al. 2011). Este potencial é associado ao fato de que somente os frutos dessa palmeira são utilizados na produção de biodiesel e outros produtos, ficando o carbono de seus demais compartimentos fixado principalmente em estipe, raízes e folhas (Tolêdo, 2010). O estoque de carbono fixado pela macaúba é considerado maior se comparado com culturas agrícolas de cultivos anuais (Tolêdo, 2010), e a outras espécies arbóreas que têm sua parte aérea completamente colhida de tempos em tempos.

Os benefícios da macaúba no estoque de carbono têm sido considerados mesmo quando em consórcio. A expectativa é que o balanço de carbono em áreas ocupadas somente com animais e pasto passe de negativo para nulo em pastagens com o consórcio com macaúbas (Viana et al., 2011).

Apesar de todas as especulações em torno do potencial da macaúba em sequestrar carbono, poucos são os estudos que comprovam este benefício. A literatura especializada mostra apenas estudos que buscaram quantificar o estoque de carbono no solo em consórcio de macaúbas e pastagem (Leite et al., 2013) e em áreas de ocorrência natural da palmeira (Diniz, 2012).

Poucos são os trabalhos que visam quantificar o estoque de carbono na biomassa de macaúbas acima do solo (estipe, folhas, frutos, entre outros) e abaixo (raízes). O estoque de carbono total de uma população de ocorrência natural no Cerrado, no Distrito Federal, indicou um total de 19,51 t ha⁻¹ acumulado em estipe, raízes e folhas para um stand de 89 plantas por hectare (Ferreira et al., 2013). Em área de regeneração natural de macaúba no município de Jequitibá-MG, o estoque total de carbono foi de 33,85 t ha⁻¹ (Tolêdo, 2010). Embora esses estudos evidenciem o potencial das palmeiras de sequestrar carbono quando em ocorrência natural, nenhum estudo avaliou este aspecto em áreas cultivadas, onde solo e plantas são manejados visando maior produtividade.

Na quantificação da biomassa vegetal podem ser utilizados o método direto (destrutivo) - tido como referência, e o método indireto (não destrutivo). O primeiro método consiste no abate e obtenção da massa total dos diferentes compartimentos da

planta. Por sua vez, o método indireto utiliza-se de estimativas sem a necessidade de abate, a partir do desenvolvimento de modelos alométricos que procuram correlacionar a biomassa vegetal com uma ou mais variáveis de fácil obtenção (*dap* e altura) (Higuchi e Carvalho, 1994). Na presente tese procurou-se avaliar a biomassa pelo método direto, buscando cobrir a lacuna de informações de biomassa e alocação de carbono acima e abaixo do solo em cultivos manejados de macaúbas. Com os dados obtidos buscou-se propor equações alométricas para estimar o acúmulo de biomassa e carbono em macaúbas e avaliar as potencialidades associadas ao carbono acumulado nessas palmeiras.

O objetivo geral que norteou a presente tese foi o de estimar o acúmulo de biomassa e carbono em cultivo comercial de macaúbas em diferentes idades. Como objetivos específicos foram considerados:

- estimar o acúmulo de carbono na biomassa acima e abaixo do solo de macaúbas cultivadas e avaliar o potencial de geração de créditos de carbono nesses cultivos;
- avaliar a distribuição horizontal e vertical do sistema radicular de plantas de macaúba em diferentes idades de cultivo.
- gerar equações alométricas para estimar o acúmulo de massa seca e carbono em macaúbas cultivadas;

II. REFERÊNCIAS

- Boit, A., Sakschewski, B., Boysen, L. et al., 2016. Large-scale impact of climate change vs. land-use change on future biome shifts in Latin America. *Global Change Biology*. 22, 3689–3701. <https://doi.org/10.1111/gcb.13355>
- Carvalho, J.L., Avanzi, J.C., Silva, M.L., et al., 2010. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 34, 277-289. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>
- Dias, H.C.T., Sato, A. Y., Neto, S. N. O., Moraes, T. C., Freire, A., Bento, P. S., 2011. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. *Informe Agropecuário*. 32, 52-60, 2011.
- Diniz, L.T., 2012. Variação espaço-temporal de atributos de qualidade do solo sob macaubeiras nativas no Cerrado. Tese (Doutorado em agronomia). Universidade de Brasília. 112p.
- Dransfield, J., Uhl, N.W., Asmussen, C.B., Baker, W.J., Harley, M.M., Lewis, C.E., 2008. *Genera Palmarum: the evolution and classification of palms*. Richmond, UK: Royal Botanic Gardens, Kew. 732p
- Ferreira, E.A.B., Sá, M.A.C., Junio-Santos, D.G., Meirelles, M.L., Carvalho, A. ., 2013. Estimativa de sequestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. *Anais, 8º Congresso internacional de bioenergia São Paulo – SP*.
- Higuchi, N e Carvalho, A. JR. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: *Anais do Seminário de Emissão x Sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil; 1994; Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: CVRD; 1994. p. 125-145.
- Houghton, R.A., Hall, F., Goetz, S.J., 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*. 114, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>
- Leite, L.F.C., Arruda, F.P., Costa, C.N., Ferreira, J.S.F., Neto, M.R.H., 2013. Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 17, 1257-1263.
- Mota, C.S., Corrêa, T.R., Grossi, J.A.S., Castricini, A., Ribeiro, A.S., 2011. Exploração sustentável da macaúba para a produção de biodiesel: colheita, póscolheita e qualidade dos frutos. *Informe Agropecuário*. 32, 41-51.
- NOAA., 2019. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA Research) - U.S. Department of Commerce. Disponível em: < <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> > acesso em: 13 maio/2019.
- SEEG., 2017. Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estuda- Emissões totais. Disponível em: < http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission > acesso em 12 junho/2019.
- Tolêdo, D.P., 2010. Avaliação técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão manso como alternativa de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, 105p.

- Viana, M.C.M., Silva, E.A., Queiroz, D.S., Paes, J.M.V., Albernaz, W.M., Fraga, G., 2011. Cultivo de macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. Informe Agropecuário. 32, 70-80.
- Vital, M.H.F., 2018. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO₂ e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. BNDES. 24. 167-244.

CAPÍTULO 1

Acúmulo de carbono acima e abaixo do solo na biomassa e potencial de geração de créditos de carbono em cultivo de macaúba

Resumo - A agricultura proporciona diversos serviços ecossistêmicos, dentre os quais destacam-se o sequestro e estoque de carbono na biomassa das plantas. Este potencial de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas tem sido avaliado para culturas comerciais em especial nos cultivos florestais. No Brasil é crescente o interesse pelo cultivo comercial da macaúba (*Acrocomia aculeata*), palmeira nativa das regiões tropicais do continente americano e cujo fruto é matéria prima para a produção de óleos. Entretanto, não há relatos de estudos prévios visando avaliar seu potencial de sequestro de carbono e de geração de renda por meio da venda de créditos de carbono de plantios comerciais de macaúba. Para que a comercialização de créditos de carbono seja efetivada é fundamental que se avalie a capacidade da palmeira em sequestrar e estocar o carbono ao longo do tempo nas áreas cultivadas. Objetivou-se avaliar o acúmulo de carbono na biomassa abaixo e acima do solo em cultivo comercial de macaúba de diferentes idades, bem como quantificar seu potencial de geração de créditos de carbono. Plantas de macaúba foram amostradas em viveiro (mudas de 3 e 8 meses de idade) e em áreas de cultivo (com 1,6; 4,8 e 9 anos de idade) para coleta destrutiva e posterior separação, quantificação e análise de carbono dos compartimentos vegetais. Os dados permitiram estimar a geração de créditos de carbono proporcionado pelo cultivo da macaúba e a expectativa de renda anual gerada. Os resultados indicaram a distribuição diferencial de acúmulo de biomassa e de carbono abaixo e acima do solo nas palmeiras estudadas, com maior concentração de biomassa e carbono acima do solo em macaúbas cultivadas no campo. O estoque de carbono nas macaúbas em produção (9 anos) atingiu $61,6 \text{ t C.ha}^{-1}$, o que corresponde a $226,17 \text{ t CO}_2\text{eq. ha}^{-1}$. A expectativa de geração de créditos de carbono anual considerando o cenário de estimativa para as palmeiras entre 1,6 e 9 anos de cultivo foi de $28,73 \text{ t CO}_2\text{eq. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, valor que pode gerar uma renda bruta anual de € 761,06 por hectare. O cultivo comercial de macaúbas apresenta valores expressivos de sequestro e estocagem de carbono, com promissor potencial de geração de créditos de carbono anual, com impactos positivos na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*, sequestro de carbono, mudanças climáticas, mercado de carbono.

Above-and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits

Abstract - Agriculture provides an array of ecosystem services, including the sequestration and storage of carbon in the biomass of plants. Research has focused on commercial crops, especially tree crops, for their potential to mitigate impacts of climate change. In Brazil interest is growing in the commercial cultivation of macauba (*Acrocomia aculeata*), a palm native to the tropical regions of the American continents with fruit that can be used as the primary ingredient to produce oils and bioenergy. However, we did not find previous studies assessing macauba's carbon sequestration potential nor literature about the income generation potential for commercial macauba producers to sell carbon credits. In order to understand opportunities to commercialize carbon credits of macauba, research was needed on the palm's long-term carbon sequestration and stock capacity. In this study we measured the accumulation of carbon in commercially cultivated macauba's biomass below and above-ground with plants of different ages. An assessment was also conducted on the crop's potential to generate carbon credits. Macauba plants were sampled in a nursery with seedlings aged 3 and 8 months, and with more mature plants established in fields aged 1.6, 4.8, and 9 years. The samples were fully harvested by removal (including roots and above ground structures), followed by separation, quantification and carbon analysis of the different plant biomass components. Data allowed for an estimation of the production of carbon credits and the resulting annual income. Findings indicated a differential distribution of both biomass and carbon below and above-ground in field-cultivated macauba palms. The stock of carbon in the plants aged 9 years reached $61.6 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$ with the corresponding sequestration of $226.17 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$. The expected generation of carbon credits of palms aged 1.6 or 9 years was $28.73 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$ per year, which could result in an annual gross income of € 761.06 per hectare. Significant amounts of carbon storage were found in the above and below-ground biomass, suggesting that macauba has a high potential to generate carbon credits and contribute to mitigating the effects of climate change.

Keywords: *Acromia aculeata*; carbon sequestration; climate changes; carbon market.

1. Introdução

A agricultura propicia diversos serviços ecossistêmicos (Swinton et al., 2007), dentre os quais destacam-se o sequestro e a estocagem de carbono proporcionado pelas plantas. Esse processo físico-químico efetuado por plantas e demais seres clorofilados denomina-se fotossíntese, que permite que parte do CO₂ atmosférico seja capturado e incorporado como compostos de carbono na biomassa abaixo (raízes) e acima do solo (troncos, galhos, folhas e frutos) da ampla maioria das plantas.

Sabe-se que o CO₂ é o gás de maior relevância nas mudanças climáticas globais por representar cerca de 55 % do total dos gases do efeito estufa (Carvalho et al., 2010). Desta forma, florestas desempenham papel fundamental no ciclo global do carbono, por capturar e armazenar na sua biomassa e no solo esse elemento químico ao longo do seu desenvolvimento vegetativo, e com isso, contribuir para a mitigação das emissões de CO₂ (Yan et al., 2018; Abraf, 2010; Houghton, 2005).

Dados recentes indicam que plantas e solos de ecossistemas terrestres são capazes de absorver cerca de 20% das emissões totais de gases do efeito estufa, o que equivale a 9,5 Gt de CO₂ equivalente por ano (Quére et al., 2015). O plantio de espécies arbóreas de regiões tropicais é uma alternativa interessante para esse fim, uma vez que são plantas de crescimento rápido (Derwisch et al., 2009), e possuem maior capacidade de acúmulo de carbono em sua biomassa ao longo do tempo (Pan et al., 2013).

Algumas palmeiras tropicais de interesse comercial podem também contribuir com o sequestro de carbono, como é o caso da macaúba (*Acrocomia aculeata* Jacq.). Essa planta é nativa das regiões tropicais do continente americano (Dransfield et al., 2008) e produz frutos com alto teor de óleo, que podem ser utilizados como matéria-prima para indústrias de diversos setores, como alimentício, cosméticos e higiene pessoal e energia – biodiesel e bioquerosene (Dias et al., 2011; Boeing et al., 2013; Cortez et al., 2014; MME, 2017).

O Brasil é o país de maior ocorrência natural da palmeira macaúba, e muitos são os benefícios ambientais potenciais com o seu plantio, principalmente em termos de recuperação de áreas degradadas e sequestro de carbono (Mota et al., 2011). Como apenas os frutos da palmeira são removidos da área de plantio para uso na indústria, o carbono fixado nas diferentes estruturas vegetais (raízes, estipe e folhas) permanece estocado, sugerindo que o acúmulo de carbono por essas palmeiras seja maior do que culturas agrícolas que são colhidas anualmente (Tolêdo, 2010) ou de outras espécies

arbóreas que são colhidas com maior regularidade por remoção total ou de grande parte de sua biomassa total.

Adicionalmente, para uma espécie como a macaúba pode-se considerar a possibilidade do carbono acumulado em sua biomassa ser negociado no mercado internacional, por meio de projetos de reflorestamento e florestamento, vinculados ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), como previsto no artigo 12 do Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998), em vigor até o ano de 2020. Esses projetos permitem que países desenvolvidos, denominados “países do anexo I” adquiram unidades de crédito de carbono de países em desenvolvimento (países do não anexo I). Nos projetos do MDL, uma tonelada de CO₂ equivalente (CO₂e) corresponde a um certificado de emissão reduzida (RCEs), designação dada ao crédito de carbono. O MDL será substituído pelo Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS) previsto no artigo 6 do acordo de Paris (UNFCCC, 2015), que permite que todos os países membros da Convenção-Quadro das Nações Unidas (UNFCCC) e da União Europeia possam comercializar livremente créditos de carbono sem restrição de negócios com países em desenvolvimento.

O Brasil pretende reduzir em 43% as emissões de gases de efeito estufa até 2030 em função dos níveis estimados em 2005. Uma das iniciativas brasileiras é a recuperação de mais de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e o aumento de 5 milhões de hectares de sistemas integrados de agricultura-pecuária-floresta (ILPF) (INDCs-UNFCCC, 2015). Essas propostas, tomadas nas Conferências das Partes COP 19 e COP 20 (INDCs-UNFCCC, 2015), criaram oportunidade para o crescimento de cultivos florestais como o de macaúba, planta que apresenta rusticidade e grande potencial para ser cultivada em áreas degradadas e em consórcio com outras espécies vegetais (Viana et al., 2011; Moreira et al. 2018).

Para que a comercialização de créditos de carbono de macaúba seja efetivada é fundamental que se estabeleça de forma confiável a capacidade da palmeira em sequestrar e estocar o carbono ao longo do tempo. Até o início desta pesquisa não existiam trabalhos na literatura que demonstrassem a capacidade das macaúbas de sequestrar carbono em áreas cultivadas, existindo algumas publicações para maciços naturais (Tolêdo, 2010; Ferreira et al., 2013). É esperado que plantios comerciais por conta do investimento em melhoramento, fertilização e possibilidade de plantio de mais plantas por área em relação às áreas de ocorrência natural da palmeira, apresentem maior potencial de acúmulo e de carbono. Desta forma, o presente trabalho foi

desenvolvido com o objetivo de avaliar o acúmulo de carbono na biomassa abaixo e acima do solo, em cultivo comercial de macaúba de diferentes idades, bem como quantificar seu potencial de geração de créditos de carbono.

2. Material e Métodos

2.1. Localização da área de estudo

O estudo foi realizado na estação experimental de Araponga, pertencente a Universidade Federal de Viçosa, no município de Araponga, estado de Minas Gerais, Brasil. Sua localização são as coordenadas 20°39'6" S e 42°32'14" W, a 839 m de altitude, em local de temperatura média anual de 18 °C e precipitação média anual de 1.338 mm (Rueda, 2014). O clima da região é o Cwb, conforme classificação de Köppen e Geiger.

As plantas de macaúba são cultivadas em espaçamento de 5 x 5 m e recebem anualmente adubação de manutenção conforme análise de solo e de acordo com recomendações de Pimentel et al. (2011). Não existe irrigação suplementar. Neste estudo foram selecionadas plantas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) pertencentes ao acesso de Minas Gerais, desde a fase de viveiro (mudas de 3 e 8 meses de idade) e plantas cultivadas no campo localizadas na estação experimental descrita acima (1,6; 4,8 e 9 anos de idade). As características químicas e físicas do substrato (muda de 8 meses) e da camada de 0-20 cm de profundidade do solo das áreas de cultivo são apresentadas em Moreira et al. (2019).

2.2. Seleção de plantas de macaúba cultivadas em viveiro e no campo

Mudas no viveiro e plantas no campo com idade de cultivo de 3 e 8 meses (viveiro) e 1,6, 4,8 e 9 anos (campo), foram selecionadas individualmente após medições aleatórias efetuadas no centro das áreas cultivadas e no viveiro de 20 plantas para cada idade. Nessas plantas foram mesuradas a altura total e o diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*). Com os dados de altura total e *dap* em mãos, foi possível calcular os valores médios da altura total, *dap* e área seccional do estipe ($AS=\pi dap^2/40000$).

A área seccional média do estipe foi utilizada para selecionar uma palmeira com 4,8 anos e outra com 9 anos de cultivo. Para seleção das mudas individuais de 3 e 8 meses e da palmeira com 1,6 anos, o critério de seleção foi a altura total média, uma vez que essas plantas não tinham altura necessária para medição do *dap* e posterior cálculo da área seccional média do estipe.

2.3. Coleta destrutiva das palmeiras e obtenção de amostras

2.3.1. Acima do solo

Para as mudas com 3 e 8 meses de idade, foi realizado inicialmente a separação da parte aérea e do sistema radicular de cada indivíduo. Posteriormente, os diferentes compartimentos vegetais presentes na parte aérea foram separados e a massa fresca foi obtida. Subamostras foram recolhidas para a secagem e obtenção da massa seca e teor de carbono.

O corte das plantas de macaúba representativas em campo foi efetuado na base do estipe, sendo separados e pesados todos os compartimentos da planta: folhas (folíolos, raque, pecíolo e bainha); cacho (frutos, raque, ráquias e espata). Subamostras dos componentes vegetais foram recolhidas e secas em laboratório para a obtenção da massa seca e dos teores de carbono.

A amostragem do estipe foi efetuada seccionando o compartimento em cinco partes: base e posições correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% da altura total. Nas cinco posições descritas foram coletados discos transversais de 0,05 m de espessura, que foram inicialmente pesados e posteriormente secos para a obtenção da massa seca e teor de C no estipe.

Os frutos das plantas adultas (4,8 e 9 anos de cultivo) foram quantificados e pesados em campo. Subamostras foram conduzidas para laboratório para secagem e obtenção da massa seca e teor de carbono.

2.3.2. Abaixo do solo

A coleta do sistema radicular das mudas foi realizada por meio da remoção total do substrato e lavagem das raízes com água corrente. Posteriormente, todo material radicular foi seco em estufa a 65 °C para obtenção da massa seca e posterior quantificação do teor de C.

O sistema radicular das palmeiras abatidas em campo foi avaliado por meio do método da escavação e da técnica de monólitos (Bohm, 1979). As raízes foram coletadas levando-se em consideração a área de projeção da copa de cada planta abatida, conforme orientações de Bolte (2004), Nilsen (1995) e Kuhr (1999), com modificações. Detalhes da coleta de amostras de raízes são descritas em Moreira et al. (2019). Na coleta o sistema radicular das plantas de macaúba foi separado em raízes e caule saxofone uma estrutura bulbosa presente em alguns gêneros da família Arecaceae, entre esses o gênero *Acrocomia* (Dransfield et al., 2008). Posteriormente, os componentes do

sistema radicular foram levados para laboratório, lavados em água corrente e secos em estufa a 65 °C até peso constante para a obtenção da massa seca e quantificação do teor de C.

2.4. Determinação da massa seca total e nos diferentes compartimentos da planta

A massa da matéria seca de cada compartimento das macaúbas coletadas destrutivamente foi obtida conforme equação:

$$MS = MF_{total} * 1 - \left(\frac{MFa - MSa}{MFa} \right)$$

em que: MS: massa da matéria seca de cada compartimento da planta; MF total: massa da matéria fresca total de cada compartimento da planta; MFa: massa da matéria fresca das subamostras de cada compartimento da planta; e Msa: massa da matéria seca das subamostras de cada compartimento da planta após secagem em estufa a 65 °C.

O cálculo da massa seca total de cada indivíduo foi obtido pelo somatório dos valores de massa seca de cada compartimento amostrado da palmeira.

Com os dados de acúmulo de biomassa compartimentados e quantificados acima do solo e abaixo do solo para cada planta avaliada estimou-se a relação raiz/parte aérea. Essa relação é recomendada pelo IPCC (2003) no cálculo de créditos de carbono em projetos do MDL, quando dados de raízes não estão disponíveis.

2.5. Determinação do teor e acúmulo de carbono nos diferentes compartimentos da planta

O teor de carbono em cada subcompartimento da palmeira macaúba presente acima do solo (folíolos, raque, pecíolo, bainha, raque, ráquias, frutos, estipe e espata) e abaixo do solo (raiz e caule saxofone) foi avaliado pelo método da calcinação em mufla a 500 °C por 3 h (SSSA, 1996). As subamostras secas de cada compartimento foram moídas em moinho tipo faca, passadas em peneiras de malha de 2 mm e calcinadas, sendo o teor de carbono obtido pela equação: $C = [(AI - AF)/AI]*100]/1,724$, em que C: teor de carbono (dag/kg), AI: massa da amostra antes da calcinação e AF: massa da amostra após a calcinação.

O acúmulo de carbono em cada compartimento das palmeiras foi obtido multiplicando-se o teor de carbono pela massa seca da respectiva estrutura. Já o acúmulo total de carbono na planta foi obtido pelo somatório dos valores de acúmulo de carbono de cada compartimento amostrado da palmeira.

2.6. Estoque de carbono e geração de créditos de carbono de plantios de macaúbas

O estoque de carbono na biomassa das macaúbas por hectare foi obtido pela multiplicação do acúmulo de carbono e o stand de plantas (400 plantas/ha). Para a conversão do estoque de carbono (C_{est}) em CO_2 equivalente por hectare ($CO_2e.ha^{-1}$) - necessária para possíveis negociações de créditos de carbono no mercado internacional, considerou-se a massa atômica do carbono (12 g/mol) e CO_2 (44 g/mol), bem como o potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* - GWP) do dióxido de carbono igual à 1 (IPCC, 2007), conforme a seguinte equação:

$$CO_2e.ha^{-1} = C_{est} * (Ma CO_2/Ma C) * GWP$$

Com os dados de $CO_2e.ha^{-1}$ foi possível estimar a geração de créditos de carbono produzidos por macaúbas cultivadas em toneladas de CO_2 equivalente por hectare ano. Nos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), uma tonelada de CO_2 equivalente corresponde a um certificado de emissão reduzida (RCEs), designação dada ao crédito de carbono. Neste cálculo foi utilizada uma das fórmulas propostas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CDM. UNFCCC, 2015), usada nos cálculos de crédito de carbono em projetos do atual MDL e, em futuro próximo, nos projetos de MDS:

$$\Delta Ct = \frac{Ct2 - Ct1}{t2 - t1} * 1 \text{ ano}$$

em que: ΔCt = mudança no estoque de carbono em árvores entre os tempos $t1$ e $t2$ (tCO_2e); $Ct2$: estoque de carbono em árvores no tempo $t2$ ($t CO_2e$); $Ct1$: estoque de carbono em árvores no tempo $t1$ ($t CO_2e$).

Os tempos de estimativa considerados no cálculo de ΔCt consideraram três cenários de avaliação. O primeiro considerou o intervalo entre os cultivos de macaúbas de 1,6 anos (tempo 1) e de 4,8 anos (tempo 2). O segundo entre os cultivos de 4,8 anos (tempo 1) e de 9 anos (tempo 2). E o terceiro considerou o intervalo entre os cultivos das plantas mais jovem (1,6 anos, tempo 1) e mais adulta (9 anos, tempo 2) avaliadas no campo.

Com os valores de créditos de carbonos calculados foi possível obter uma estimativa de venda de créditos considerando a cotação de € 26,49 por tonelada de CO_2 equivalente removido ou não emitido, correspondente ao dia 12/04/2019 (SENDECO2, 2019).

3. Resultados e discussão

3.1. Dados dendrométricos

Os dados dendrométricos médios das 20 plantas por idade inventariadas são apresentados na tabela abaixo (Tabela 1). Os valores relativamente baixos de desvio padrão para altura total (de 0,02 a 0,99 m) e área seccional do estipe (de 0,0185 m² a 0,0213 m²) indicam a homogeneidade dos indivíduos avaliados e dão confiança à escolha de uma planta média para abate e estimativa de massa seca e teor de C. Este método de amostragem que seleciona apenas uma planta de área seccional média do estipe é recomendado por Satoo, (1973) e foi utilizado por Kiyono et al. (2015) para estimar a biomassa no cultivo de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.).

Tabela 1. Dados dendrométricos médios (n=20) de macaúbas de diferentes idades

Idade	Ambiente	Altura total (m)	dap (1.3 m)	Área Seccional do estipe (m ²)
3 meses	Viveiro	0,19 ± 0,02	---	---
8 meses	Viveiro	0,93 ± 0,02	---	---
1,6 anos	Campo	2,80 ± 0,13	---	---
4,8 anos	Campo	7,10 ± 0,86	0,350 ± 0,03	0,0962 ± 0,0185
9 anos	Campo	10,25 ± 0,99	0,375 ± 0,04	0,1104 ± 0,0213

Valores médios ± desvio padrão

3.2. Acúmulo de biomassa abaixo e acima do solo nas plantas de macaúba

Como esperado o acúmulo de biomassa variou entre as plantas em função da idade e compartimento avaliado (Tabela 2). Nas mudas de três e oito meses de cultivo, o maior acúmulo de biomassa ocorreu abaixo do solo, com valores de 0,00095 kg e 0,099 kg, respectivamente. Nas palmeiras cultivadas no campo o maior acúmulo de biomassa ocorreu acima do solo, sendo que para a planta mais jovem avaliada (1,6 anos), o acúmulo total foi de 16,85 kg de biomassa, destes 60,29% estava presente acima do solo (10,16 kg). Nas palmeiras de 4,8 anos e 9 anos de cultivo o aporte de biomassa acima do solo foi ainda maior em relação a macaúba com 1,6 anos. Na planta de 4,8 anos, 65,41% da biomassa estava presente acima do solo, tendo essa planta apresentado acúmulo total de 116,90 kg de biomassa. Já a palmeira mais velha avaliada (9 anos) apresentou acúmulo de 275,49 kg de biomassa, com 70,69% da biomassa acumulada presente acima do solo (194,76 kg). Esses resultados indicam a distribuição diferencial

de acúmulo de biomassa nos compartimentos das macaúbas com o passar do tempo de cultivo, e que na fase de cultivo em campo (1,6; 4,8 e 9 anos de idade) a maior parte da biomassa encontra-se acima do solo. A relação raiz/parte aérea foi de 1,64 (3 meses) e 1,32 (8 meses) nas mudas e de 0,66 (1,6 anos), 0,53 (4,8 anos) e 0,41 (9 anos) nas plantas no campo.

Tabela 2. Distribuição da biomassa acima e abaixo do solo em macaúbas de diferentes idades

Idade das plantas	Acúmulo de massa seca (kg)				
	3 meses	8 meses	1,6 anos	4,8 anos	9 anos
Biomassa acima do solo	0,00058	0,075	10,16	76,47	194,76
Biomassa abaixo do solo	0,00095	0,099	6,69	40,43	80,73
Biomassa total	0,00152	0,174	16,85	116,90	275,49
Relação raiz/parte aérea (1)	1,64	1,32	0,66	0,53	0,41

(1) Biomassa abaixo do solo (raiz) e biomassa acima do solo (parte aérea)

Valores da relação raiz/parte aérea são utilizados para estimar a biomassa de raízes em ambientes florestais (Por exemplo, Nogueira et al., 2008). Como é destacado por Mokany et al. (2006) o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) indica o uso de valores padrões (*default*) da relação raiz/parte aérea para estimar o estoque de carbono presente na biomassa abaixo do solo, sendo que para florestas primárias tropicais e subtropicais úmidas o valor de 0,24 é recomendado (IPCC, 2003).

Como foi verificado no presente trabalho, os valores da relação raiz/parte aérea de todos os indivíduos analisados foram superiores ao indicado como *default* (0,24) pelo IPCC (2003). Portanto, o uso do valor *default* (0,24) para a palmeira macaúba pode acarretar erros de estimativa do estoque de biomassa e de carbono em possíveis projetos de geração de créditos de carbono em cultivos comerciais da palmeira, uma vez que este estudo indicou que o valor da relação raiz/parte aérea para uma planta no auge de produção (9 anos) foi de 0,41, o que representa mais de 70% de incremento em relação ao valor *default*.

O acúmulo de biomassa em palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) com 12 anos de cultivo foi estimado por [Kiyono et al.\(2015\)](#) em Sarawak, na Malásia. Esses autores encontraram o valor de 650,9 kg de biomassa total acumulada em uma planta, sendo que a maior parte estava presente acima do solo (437,3 kg) e o restante abaixo do solo (213,6 kg). Nota-se um grande incremento na biomassa da palma de óleo no estudo de [Kiyono et al. \(2015\)](#) em relação a macaúba mais velha avaliada (9 anos) no presente estudo, enquanto a macaúba alcançou 275,49 kg de biomassa, a palma de óleo obteve 650,9 kg, valor que chega a ser mais que o dobro obtido para macaúba. Porém, devemos considerar que em termos de área cultivada a palmeira macaúba pode ultrapassar a cultura da palma, visto que o plantio comercial de macaúba pode alcançar até 461 plantas por hectare em sistema de monocultivo ([Motoike et al., 2013](#)), enquanto cultivos da palma de óleo variam de 128 a 200 plantas por hectare ([Boari et al., 2015](#)). Além disso, existe a possibilidade das macaúbas serem cultivadas em sistemas silvipastoris com densidade de 357 plantas por hectare, nesses sistemas o aporte de biomassa e carbono tende a ser maior do que nas áreas de monocultivo da palmeira ([Montoya, 2016](#)).

3.3. Teor e acúmulo de carbono na biomassa de plantas de macaúba, abaixo e acima do solo

Os resultados dos teores de carbono presentes nas plantas de macaúba são apresentados na [Tabela 3](#). O valor médio do teor de C nas macaúbas considerando todos os compartimentos avaliados foi de 53,24% (3 meses), 54,02% (8 meses), 54,90% (1,6 anos), 55,04% (4,8 anos) e 55,93% (9 anos). Os dados sugerem apenas uma pequena diferença entre indivíduos jovens e adultos. Os teores de C encontrados no presente estudo são coerentes com os obtidos por [Tolêdo \(2010\)](#) em área de ocorrência natural de macaúbas no município de Jequitibá (MG), nesse estudo o teor médio de C presente na biomassa da palmeira foi de 54,3%.

Os valores de teores de C encontrados no presente estudo, também são superiores ao recomendado como *default* pelo IPCC, que sugere a utilização do valor médio de 50% de C ([IPCC, 2003](#)) como referência para conversão de dados de biomassa vegetal em C nos projetos de crédito de carbono. Esses resultados também indicam a possibilidade de ocorrer subestimativas nos cálculos de estoque de carbono com o uso do *default* para plantios de macaúbas.

O acúmulo de C nas macaúbas também variou com a idade e com o compartimento da planta analisado, assim como foi verificado para o acúmulo de

biomassa (Tabela 2). Enquanto nas mudas o maior aporte de C foi alocada abaixo do solo 0,00052 kg (3 meses) e 0,054 kg (8 meses), nas plantas cultivadas no campo (1,6; 4,8 e 9 anos) o maior reservatório de C esteve associado a biomassa acima do solo. O acúmulo total de C variou de 0,00081 kg para a muda de três meses a 154,07 kg para a macaúba com 9 anos de idade cultivada no campo (Tabela 3).

Tabela 3. Acúmulo (kg) e teor de carbono na biomassa abaixo e acima do solo em plantas de macaúba

	Idade das Macaúbas				
	3 meses	8 meses	1,6 anos	4,8 anos	9 anos
Teor médio de C (%)	53,24± 2,05	54,02± 1,27	54,90±0,67	55,04±0,66	55,93±0,72
Acúmulo de C na biomassa acima do solo (kg)	0,00029	0,040	5,62	42,19	109,09
Acúmulo de C na biomassa abaixo do solo (kg)	0,00052	0,054	3,63	22,15	44,98
Acúmulo de C total (kg)	0,00081	0,094	9,25	64,34	154,07

± desvio padrão

3.4. Estoque de carbono em cultivo de macaúbas

O estoque de carbono abaixo e acima do solo na biomassa vegetal de macaúbas cultivadas em campo para um stand de 400 plantas por hectare foi crescente com a idade de cultivo: 3,7 t C.ha⁻¹ (1,6 anos), 25,7 t C.ha⁻¹ (4,8 anos) e 61,6 t C.ha⁻¹ (9 anos). Esse incremento com a idade reflete-se nos valores de estoque para CO₂ equivalente: 13,58 t CO₂e.ha⁻¹ (1,6 anos), 94,45 t CO₂e.ha⁻¹ (4,8 anos) e 226,17 t CO₂e.ha⁻¹ (9 anos) (Tabela 4).

No cálculo de estoques de C e CO₂ equivalente por hectare não foram considerados as perdas em termos de CO₂ equivalente advindo das emissões com o uso de calagem, aplicação de fertilizantes nitrogenados e gastos com combustíveis em toda a fase produtiva da cultura da macaúba, dentre outras perdas. Essas perdas foram estimadas por Evaristo et al. (2018) para a cultura da macaúba e consideraram as mudanças no uso da terra (de pastagem para macaúba), operações mecânicas, entrada de

insumos, produção e uso de fertilizantes, pesticidas e combustíveis fósseis (diesel), manejo do solo, emissões indiretas de fertilizantes, dentre outras. O resultado final obtido foi de 181,45 t CO₂e. ha⁻¹ para um ciclo de 30 anos de produção, que coincide com o período comercial recomendado para a cultura. Disto resulta um valor de perdas menor do que o estoque de 226,17 t CO₂e.ha⁻¹ encontrado em nosso estudo para o cultivo de 9 anos da palmeira (Tabela 5). Isso significa que já com 9 anos de cultivo, toda as perdas de CO₂ equivalente referentes ao manejo do sistema por um período de 30 anos já é compensado.

Tabela 4. Estoque de carbono (C) e CO₂ equivalente (CO₂e) em cultivos de macaúbas ao longo dos anos, em Minas Gerais

Idade (anos)	Estoque C (t C.ha ⁻¹)	CO ₂ e (t CO ₂ e.ha ⁻¹)
1,6	3,7	13,58
4,8	25,7	94,45
9	61,6	226,17

Cálculo por hectare considerando stand de 400 plantas ha⁻¹.

O estoque de C abaixo e acima do solo obtido na biomassa de macaúbas com 9 anos de idade (61,6 t C.ha⁻¹) é maior do que os encontrados em vegetação de Cerrado *Sensu stricto* (Paiva et al., 2011; Ribeiro, 2011) e em plantas de macaúba em áreas de ocorrência natural (Tolêdo, 2010; Ferreira et al., 2013). Por outro lado, o cultivo da palmeira aos 9 anos não consegue superar o estoque de C presente na biomassa de plantios de eucalipto de mesma idade (Gatto et al., 2011) e em áreas de Mata Atlântica (Vieira et al., 2011) (Figura 1).

Quando são considerados apenas os dados de acúmulo de C na biomassa acima do solo, o cultivo da macaúba de 9 anos supera áreas de pastagem (Risch et al., 2008; Amézquita et al., 2008) e uma área de regeneração natural na Mata Atlântica (Ribeiro et al., 2010). Para essa mesma variável, o desempenho da macaúba quase se equivale à de uma área de restauração florestal de 21 anos no sul de Minas Gerais na Mata Atlântica (Silva et al., 2015), mas não supera o acúmulo de C na biomassa de uma Floresta Estacional Semidecídica de pelo menos 100 anos sem distúrbios nesse mesmo bioma (Ribeiro et al., 2009).

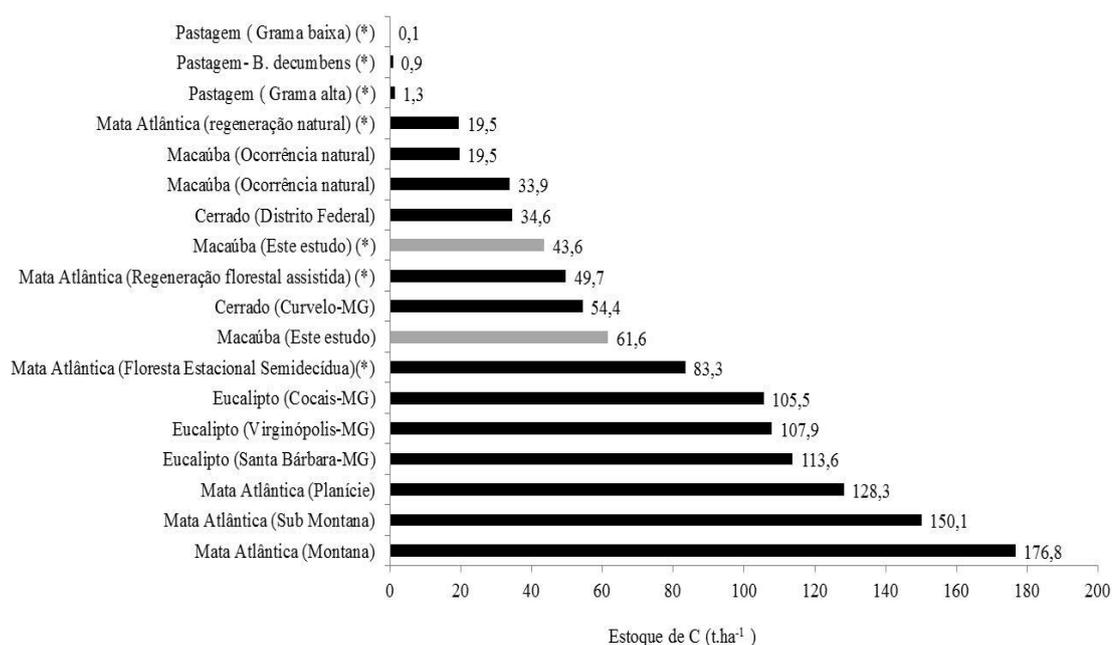


Figura 1. Estoque de carbono na biomassa total (abaixo e acima do solo) em diferentes ecossistemas naturais e cultivados manejados: Mata atlântica Montana, Sub Montana e Planície (Vieira et al., 2011); Mata atlântica- Floresta Estacional Semidecídua (Ribeiro et al., 2009), área de regeneração florestal assistida (Silva et al., 2015) e regeneração natural (Ribeiro et al., 2010); Cultura do eucalipto com 9 anos de cultivo (Gatto et al., 2011); Macaúba com 9 anos de cultivo - este estudo; Vegetação de Cerrado (Ribeiro, 2011; Paiva et al., 2011); Macaúba em ocorrência natural (Tolêdo, 2010, Ferreira et al., 2013); Pastagem grama alta e baixa (Risch et al., 2008) e *Brachiaria decumbens* (Amézquita et al., 2008). (*) Estoque de carbono acumulado apenas na biomassa acima do solo.

O maior acúmulo de C na biomassa de eucaliptos (Gatto et al., 2011) em comparação com a macaúba deve-se ao stand de plantas. Enquanto para macaúba este estudo considerou 400 plantas/ha, para o eucalipto os autores consideraram aproximadamente 1.666 plantas/ha. Assim a análise por planta revela superioridade de acúmulo de C na macaúba (154,0 kg/planta) em relação ao eucalipto (68,2 kg/planta). Além disso, devemos considerar que a cultura do eucalipto passa por cortes periódicos e dependendo do destino da madeira, parte do carbono estocado por essa cultura será reemitido para a atmosfera. Esse menor stand de plantas também justifica o menor aporte de C em macaúbas de ocorrência natural em relação aos sistemas de cultivo. Em áreas naturais as macaúbas apresentam-se aleatoriamente na paisagem, com

consequente menor densidade de plantas por área, quando comparado com o cultivo comercial da palmeira, que de acordo com [Motoike et al. \(2013\)](#) a densidade de plantio pode variar de 400 a 461 plantas/ha. A densidade de plantas de macaúba nas áreas de ocorrência natural comparadas na [Figura 1](#) foi de 144 ([Tolêdo, 2010](#)) e 89 ([Ferreira et al., 2013](#)) plantas/ha, justificando o menor aporte de C nessas áreas.

O fato de o cultivo de macaúba apresentar potencial para superar o armazenamento de C na biomassa em áreas de pastagens e na vegetação nativa de Cerrado pode ser um referencial interessante para iniciativas de recuperação de áreas degradadas neste importante bioma brasileiro. Neste sentido, a macaúba torna-se um interessante componente para sistemas integrados de produção que combinem pastagem e palmeiras, uma possibilidade testada e recomendada por [Montoya \(2016\)](#).

O estoque de C encontrado para a macaúba no presente estudo também pode ser comparável com outras espécies de palmeiras, como a Pinang nut (*Areca catechu* L.) que pode ter estoque de C variando de 22 t C.ha⁻¹ a 38 t C.ha⁻¹ ([Prayogo et al., 2018](#)) e estoque de 22,6 t C.ha⁻¹ em cultivo de 26 anos de idade (*Cocus nucifera*, L.) ([Silva et al., 2014](#)). Valores de 37,8 a 42,1 t C.ha⁻¹ para a biomassa acima do solo em cultivos de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) foram estimados por [Khasanah et al. \(2015\)](#). Esses valores de estoque encontrados para a palma de óleo incluem o C presente na vegetação de sub-bosque, serapilheira e na necromassa nos cultivos estudados.

O cultivo comercial de macaúbas na área em estudo superou em termos de estoque de C, a cultura do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.), planta que vem sendo cotada para ser fonte de matéria prima destinada à produção de biodiesel. Em uma área cultivada com pinhão manso com três anos de idade no município de Viçosa-MG, o estoque de C foi de 4,18 t C.ha⁻¹ ([Torres et al., 2011](#)), incorporando menos carbono do que as macaúbas de 4,8 anos (25,7 t C.ha⁻¹) e 9 anos de cultivo (61,6 t C.ha⁻¹).

3.5. Potencial de geração anual de créditos de carbono com cultivo comercial de macaúba

A expectativa de geração anual de créditos de carbono considerando os cenários de avaliação propostos alcançou valores de 25,27 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ para o primeiro cenário (macaúbas entre 1,6 e 4,8 anos de idade); 31,36 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ no segundo cenário (macaúbas entre 4,8 e 9 anos) e 28,73 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ no terceiro cenário (macaúbas entre 1,6 anos e 9).

Considerando para fins de cálculo o valor de 28,73 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ e a cotação de € 26,49 por toneladas de CO₂ equivalente removido ou não emitido referente ao dia 12/04/2019 (SENDECO₂, 2019), a renda bruta obtida em termos de crédito de carbono seria € 761,06 por hectare ano de macaúba. No entanto, as normas do MDL exigem para projetos de grande escala o mínimo de 16.000 t CO₂e.ano⁻¹ para a comercialização desses créditos. Diante dessa exigência e dos resultados obtidos no presente estudo, tem-se a necessidade de cultivo de pelo menos 560 hectares com macaúbas no espaçamento 5 x 5 m (400 plantas/ha), que poderiam sequestrar 16.088 t CO₂e.ano⁻¹ e obter renda bruta de aproximadamente € 426.171,12 por ano com a comercialização dos créditos. Dessa forma, nota-se uma possível limitação do uso da palmeira no âmbito de projetos de grande escala do atual MDL e, em um futuro próximo, do MDS, que é a exigência de áreas maiores de cultivo, o que poderia limitar a participação de pequenos produtores nesse tipo de mercado. Ainda que este estudo apresente essa limitação, é destacável o potencial de cultivos empresariais ou integrados em cooperativas ou associações para o sequestro de carbono e incremento do sumidouro de CO₂ atmosférico, com adicional possibilidade de renda com a venda de créditos de carbono.

O potencial de sequestro anual de carbono obtido para a cultura da macaúba mostra-se próximo ou até mesmo superior aos verificados na literatura para cultivos comerciais de árvores, como por exemplo, maçã e kiwi na Nova Zelândia, com sequestro líquido de 2,5 a 5 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ (Page et al., 2011) e de *Pinus taeda* (853 plantas/ha) e *Eucalyptus grandis* (629 plantas/ha) com 34 anos de cultivo em Moçambique (Guedes et al., 2018). Neste último caso os autores verificaram um estoque anual de carbono de 7,24 t C.ha⁻¹.ano⁻¹ para o pinus e 8,54 t C.ha⁻¹.ano⁻¹ para o eucalipto, o que corresponde em termos de CO₂ equivalente a um sequestro de 26,57 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹ e 31,34 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente. Merece destaque ainda que o estudo de Guedes et al. (2018) considerou o carbono alocado em compartimentos não analisados no presente estudo, como na serapilheira e no solo até 50 cm de profundidade. Isto indica que o cultivo de macaúba pode apresentar estoque de carbono ainda mais significativo se esses compartimentos forem considerados na quantificação do carbono.

Outro estudo de sequestro de carbono na biomassa acima e abaixo do solo em cultivos de eucaliptos no Camarões indicou acúmulo anual variando com a idade das plantas. Desta forma cultivos mais jovens (0-10 anos - 2054 plantas/ha) sequestraram 14,66 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹; cultivos entre 10-20 anos (985 plantas/ha) armazenaram 22 t CO₂e.ha⁻¹.ano⁻¹; e cultivos mais velhos (> 20 anos - 3370 plantas/ha) acumularam 33 t

$\text{CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ (Noumi et al., 2018).

Como indicado, a cultura do eucalipto é uma das mais estudadas no que se refere ao acúmulo de carbono. Dados brasileiros de potencial de geração de créditos de carbono em florestas de eucalipto podem ser estimados a partir de estudos prévios e superam os verificados em Moçambique (Guedes et al., 2018) e Camarões (Noumi et al., 2018). Neste sentido, o sequestro de carbono de $13,64 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, valor que corresponde a $50,06 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ foi obtido para a cultura do eucalipto em cinco regiões da parte centro-leste do estado de Minas Gerais (Gatto et al., 2011). Outro valor de sequestro de carbono é $10,32 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, obtido na biomassa acima (tronco, copa) e abaixo do solo (raízes) na cultura de eucalipto ao longo de uma rotação de sete anos no estado do Espírito Santo (Reis et al., 1994). Isto permite estimar uma geração anual de créditos de carbono de $37,87 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, o que corresponde a uma renda bruta anual de € 1.003,18 por hectare, considerando os mesmos critérios e cotação adotados previamente.

Dados de produção obtidos em cultivo de eucalipto de dois ($26,70 \text{ t ha}^{-1}$ de biomassa) e oito ($232,93 \text{ t ha}^{-1}$ de biomassa) anos no Rio Grande do Sul (Schumacher et al., 2011) permitem estimar um sequestro de $13,35$ e $116,46 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$, o que corresponde a $48,99 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$ (2 anos) e $427,41 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}$ (8 anos). Dessa forma, a expectativa de geração anual de créditos de carbono estimada considerando o período de medição entre 2 e 8 anos de cultivo é de $63,07 \text{ t CO}_2\text{e}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, com potencial de renda bruta anual de € 1.670,72 por hectare. A justificativa para a maior quantidade de carbono estocado anualmente neste estudo deve-se ao stand de plantas. Enquanto no presente estudo eram 400 plantas de macaúba por hectare, nas áreas de eucalipto o stand era 5 a 6 vezes maior, com 2.645 plantas/ha (2 anos) e 2.375 plantas/ha (8 anos).

Diante do exposto, é evidente o potencial da cultura da macaúba em estocar carbono ao longo do seu desenvolvimento, pois essa palmeira supera a quantidade de C estocado por área e por planta em relação a muitas outras culturas. Cultivos de macaúba mostram-se mais eficientes em termos de estoque de C por planta (kg/planta) em relação à cultura do eucalipto e frutíferas como o kiwi e maçã, apresentando também maior estocagem em relação outras espécies de palmeiras cultivadas, como a pinang nut e o coqueiro. Em comparação à palma de óleo - palmeira de ampla área cultivada na região tropical, a macaúba apresenta menor capacidade de estoque de C por planta, mas maior acúmulo de C por área cultivada (plantas/ha).

É importante destacar também que nossa estimativa levou em consideração plantas de macaúba com até 9 anos de cultivo e que novos estudos que possam quantificar o potencial dessas palmeiras em estocar carbono em plantios com idades superiores devem ser avaliados, visto que a vida útil de um cultivo manejado da palmeira pode atingir até 30 anos.

4. Conclusões

1. Macaúbas cultivadas apresentam grande potencial de sequestro e estocagem de carbono na biomassa acima e abaixo do solo. O cultivo da palmeira com 9 anos de idade é capaz de estocar 226,17 t CO₂e. ha⁻¹.
2. O maior acúmulo de biomassa e carbono em plantas de macaúbas cultivadas no campo está presente acima do solo.
3. O valor da relação raiz/parte aérea para uma planta de macaúba no auge de produção (9 anos) foi de 0,41, o que representa mais de 70% de incremento em relação ao valor *default* (0,24), recomendado pelo IPCC para florestas primárias tropicais e subtropicais úmidas.
4. É promissor o potencial de geração de créditos de carbono anual para o plantio comercial de macaúbas. Considerando o cenário de estimativa entre o plantio mais jovem avaliado (1,6 anos) e o plantio com macaúbas em fase de produção (9 anos) a expectativa de geração de créditos de carbono anual é de 28,73 t CO₂e. ha⁻¹.

5. Referências

- Abraf, 2010. Anuário estatístico da ABRAF 2010 ano base 2009/ABRAF-Brasília, 140 p.
- Amézquita, M.C., Murgueitio, E., Ibrahim, M., Ramírez, B., 2008. Carbon sequestration in pasture and silvo-pastoral systems under conservation management in four ecosystems of tropical América. In: FAO/CTIC Conservation Agriculture Carbon Offset Consultation (2008). Proceedings. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, IT.1-11 p.
- Boari, A.J., Cordeiro, A.C.C., Menezes, A.J., 2015. Integração de Palma de óleo na fase pré-produtiva com culturas alimentares. Nota Técnica, Embrapa. 3 p. <https://www.embrapa.br/documents/1354300/5883227/Cultivos+intercalares+com+palma+de+%C3%B3leo+na+Amaz%C3%B4nia/6cb7ae77-926e-424a-b4b5-e3bae73dbb18>
- Boeing., Embraer., Fapesp., Unicamp., 2013. Flight path to Aviation Biofuels in Brazil: Action Plan, 60 p. <http://www.fapesp.br/publicacoes/flightpath-to-aviation-biofuels-in-brazil-action-plan.pdf>
- Bohm, W., 1979. Methods of studying root systems. 1 ed. Springer-Verlag, Berlim. 188 p. DOI: [10.1007/978-3-642-67282-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8)
- Bolte, A., Rahmann, T., Kuhr, M., Pogoda, P., Murach, D., Gadow, K.C., 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.), Plant Soil .264, 1–11. DOI: [10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3](https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3)
- Carvalho, J.L., Avanzi, J.C., Silva, M.L., Mello, C.R., Pellegrino, C.E., 2010. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 34, 277-289. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000200001>
- CDM-UNFCCC., 2015. The Clean Development Mechanism-United Nations Framework Convention on Climate Change. Estimation of carbon stocks and change in carbon stocks of trees and shrubs in A/R CDM project activities. Disponível em < <https://cdm.unfccc.int/methodologies/ARmethodologies/tools/ar-am-tool-14-v4.2.pdf>> acesso em 29/03/2018.
- Cortez, L.A.B., Nassar, A. M., Cantarella, H., Nogueira, L.A.H., Moraes, M.A.F.D., Leal, R.L.V., Franco, T.T., Schhardt, U., 2014. Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: A flightpath to aviation biofuels in Brazil, Blucher, São Paulo. 272 p.
- Derwisch, S., Schwendenmann, L., Olschewski, R., Holscher, D., 2009. Estimation and economic evaluation of aboveground carbon storage of *Tectona grandis* plantations in Western Panama. New Forests. 37, 227-240. <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9119-2>
- Dias, H.C.T., Sato, A.Y., Neto, S.N.O., Morais, T.C., Freire, A., Bento, P.S., 2011. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. Inf. Agropec. 32, 52-60.
- Dransfield, J., Uhl, N.W., Asmussen, C.B., Baker, W.J., Harley, M.M., Lewis, C.E., 2008. Genera Palmarum: the evolution and classification of palms. Richmond, UK: Royal Botanic Gardens, Kew. 732 p.

- Evaristo, A.B., Coppel, I.A.B., Guimarães, A.C., Gil, J.M., Pimentel, L.D., Grossi, J.A.S., Garcia, L.M.N., Ramos, P.M., 2018. Simulation of macaúba palm cultivation: na energy-balance and greenhouse gas emissions analysis. *Carbon Management*, 9, 243-254. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1463783>
- Ferreira, E.A.B., Sá, M.A.C., Junio-Santos, D.G., Meirelles, M.L., Carvalho, A.M., 2013. Estimativa de sequestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. *Anais, 8º Congresso internacional de bioenergia São Paulo – SP*. 6 p. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113290/1/189-EloisaFerreira-137.pdf>
- Gatto, A., De Barros, N.F., Novais, R.F., Silva, I.R., Leite, H.G., Villani, E.M.A., 2010. Estoques de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do estado de Minas Gerais. *Revista Árvore*. 35, 895-905. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>
- Guedes, B.S., Olsson, B.A., Egnell, G., Siteo, A.A., Karlun., 2018. Plantations of Pinus and Eucalyptus replacing degraded mountain miombo woodlands in Mozambique significantly increase carbon sequestration. *Globa Ecology and Conservation*. 14, e00401. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00401>
- Houghton, R.A., 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Glob Change Biol*. 11:945–958. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00955.x>
- INDCs-UNFCCC, 2015. Intended nationally determined contribution- United Nations Framework Convention on Climate Change. 10 p. https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BR_AZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf
- IPCC, 2007 - The Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Errata*. Disponível em < <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-errata.pdf>> Acesso em: 29/03/2018.
- IPCC, 2003 - The Intergovernmental Panel on Climate Change. *Good Practice Guidance for Land-Use Change and Forestry*. Geneva. Disponível em < https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf> Acesso em: 09/01/2019.
- Khasanah, N., Noordwijk, V., Ningsih, H., 2015. Aboveground carbon stocks in oil palm plantations and the threshold for carbon-neutral vegetation conversion on mineral soils. *Cogent Environmental Science*. 1, 1119964. <https://doi.org/10.1080/23311843.2015.1119964>
- Kiyono, Y., Monda, Y., Toriyama, J., Chaddy, A., Gog, K.J., Melling, L., 2015. Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bulletin of FFPRI*. 14, 147 – 158. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/436/documents/436-4.pdf>
- Kuhr, V.M., 1999. *Grobwurzelsystemarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung*. Dissertation Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen. p.136.
- MME, 2017 - Ministério de Minas e Energia. *Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) Bioquerosene: Proposta de Agentes da Cadeia Aeronáutica do Brasil sobre a Consulta Pública MME nº 26 de 15/02/2017*, p.10.

<http://www.mme.gov.br/documents/10584/7948694/AGENTES+DA+CADEIA+AERONAUTICA+NO+BRASIL+-+Consulta++P%C3%BAblica++Renovabio.pdf/46cc4348-ecec-4558-b8d01f19c9ede845;jsessionid=80DD49E2B66A6D0FC56ECF8C527F12AA.srv154>

Mokany, K., Raison, R.J., Prokushkin, N.A., 2006. Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*. 12, 84-96. [doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x)

Montoya, S.G., 2016. Ecofisiologia e produtividade de *Brachiaria decumbens* em sistema silvopastoril com macaúba. Tese, Universidade Federal de Viçosa, p.102.

Moreira, S.L.S., Imbuzeiro, M.H.A., Dietrich, O.H.S., Henriques, E., Flores, M.E.P., Pimentel, L.D., Fernandes, R.B.A., 2019. Root distribution of cultivates macaúba tress. *Industrial Crops and Products*. 137, 646-651. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.064>

Moreira, S.L.S., Pires, C.V., Marcatti, G.E., Santos, R.H.S., Imbuzeiro, H.M.A., Fernandes, R.B.A., 2018. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. *Agric. For. Meteorol.* 256–257, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.026>

Mota, C.S; Corrêa, T.R; Grossi, J.A.S; Castricini, A; Ribeiro, A.S., 2011. Exploração sustentável da macaúba para a produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. *Informe Agropecuário*. 32, 41-51.

Motoike, S.Y., Carvalho, M., Pimentel, L.D., Kuki, K.N., Paes, J.M.V., Dias, H.C.T., Sato, A.Y., 2013. A Cultura da Macaúba- implantação e manejo de cultivos racionais. Viçosa, MG: Ed. UFV. p.61.

Nielsen, C.C.N., 1995. Detailed instructions for root architecture assessments with the Rootarch method. *Arboretum, Royal Vet. and Agriculture University, Int. Rep. No. 7*, Hoersholm (DK), p.12.

Noumi, V.N; Zapfack, L; Hamadou, M.R., Djongmo, V.A., Witanou, N., Nyeck, B., Ngossomo, J.D., Mbobda, R.B.T., Mapongmetsem., P.M., 2018. Floristic diversity, carbon storage and ecological services of eucalyptus agrosystems in Cameroon. *Agroforest Syst.* 92, 239-250. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0130-5>

Nogueira, E.M., Fearnside, P.M., Nelson, B.W., Barbosa, R.I., Keizer, E.W.H., 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*, 256, 1853-1867. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.022>

Page, G., Kelly, T., Minor, M., Cameron, E., 2011. Modeling Carbon Footprints of Organic Orchard Production Systems to Address Carbon Trading: An Approach Based on Life Cycle Assessment. *Hort Science*. 46, 324-327. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.2.324>

Paiva, A.O., Rezende, A.V., Pereira, R.S., 2011. Estoque de carbono em Cerrado Sensu stricto do Distrito Federal. *Revista Árvore*. 35,527-538.

Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., et al., 2011. Large and persistent carbons sink in the world's forests. *Science*. 333, 988–993. DOI: [10.1126/science.1201609](https://doi.org/10.1126/science.1201609)

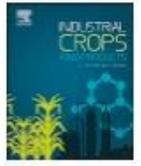
- Pimentel, L.D., Bruckner, C.H., Martinez, H.E.P., et al., 2011. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. *Inf. Agropec*, 32, 20-30.
- Prayogo, C., Sari, R.R., Asmara, D.H., Rahayu, S., Hairiah, K., 2018. Allometric Equation for Pinang (*Areca catechu*) Biomassa and C Stocks. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 40, 381-389. DOI: <http://doi.org/10.17503/agrivita.v40i3.1124>
- Quéré C.L., Moriarty, R., Andrew, R.M., et al., 2015. Global carbon budget 2014. *Earth Syst Sci Data*. 7:47–85. <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
- Reis, G.G.; Valente, O.F.; Fernandes, H.A.C., 1994. Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: Seminário emissão x sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil, 1994, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CVRD. 155-195.
- Ribeiro, S.C., 2011. Estoque de biomassa e carbono em Cerrado e em plantio comercial de eucalipto no estado de Minas Gerais. Tese, Universidade Federal de Viçosa. p.71.
- Ribeiro, S.C., Jacovine, L.A.G., Soares, C.P.B., Martins, S.V., Souza, A.L., Nardelli, A.M.B., 2009. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. *Revista Árvore*. 33,917-926. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622009000500014>
- Ribeiro, S.C., Jacovine, L.A.G., Soares, C.P.B., Martins, S.V., Nardelli, A.M.B., Souza, A.L., 2010. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da zona da mata mineira. *Revista Árvore*. 34, 495-504. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622010000300013>
- Risch, A.C., Jurgensen, M.F., Dumroese, D.S.P., Wildi, O., Schütz, M., 2008. Long-term development of above- and below-ground carbon stocks following land-use change in subalpine ecosystems of the Swiss National Park. *Canadian Journal of Forest Research*. 38, 1590-1602. <https://doi.org/10.1139/X08-014>
- Rueda, R.A.P., 2014. Avaliação de germoplasma para melhoramento e a conservação da macaúba. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p.58.
- Satou, T., 1973. Matter production of terrestrial plant community Ia -Forest-. *Kyoritsu Shuppan*, Tokyo, p.108.
- Schumacher, M.V., Witschoreck, R., Calil, F.N., 2011. Biomassa em povoamentos de eucalyptus spp. de pequenas propriedades rurais em vera cruz, RS. *Ciência Florestal*. 21, 17-22. <http://dx.doi.org/10.5902/198050982743>
- SENDECO₂-Sistema Europeo de Negociación de CO₂- Disponível em <<http://www.sendeco2.com/es/>> acesso em 12/04/2019.
- Silva, H.F., Ribeiro, S.C., Botelho, S.A., Faria, R.A.V.B., Teixeira, M.B.R., Mello, J.M., 2015. Estimativa do estoque de carbono por métodos indiretos em área de restauração florestal em Minas Gerais. 43, 943-953. DOI: <dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.18>
- Silva, J.J., Dias, T.J., Rolim, H.O., Lima, L.R., Júnior, E.B.P., 2014. Biomassa aérea e estimativa do carbono orgânico em Agrossistema do coqueiro (*Cocus nucifera*, L.) anão verde irrigado. *Revista Verde*. 9, 01-07.
- SSSA, 1996. Book: Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods, SSSA Book

Series 5.3.

- Swintona, S.M.; Lupia, F.; Robertson, G.P.; Hamilton, S.K. 2007. Ecosystem services and agriculture: Cultivating agricultural ecosystems for diverse benefits. *Ecological Economics*, 64:245-252. [Doi:10.1016/j.ecolecon.2007.09.020](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.020)
- Tolêdo, D.P., 2010. Avaliação técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativa de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, p.105.
- Torres, C.M.M.E., Jacovine, L.A.G., Toledo, D.P., Soares, C.P.B., Ribeiro, S.C., Martins, M.C., 2011. Biomass and carbon stock in *Jatropha curcas* L. *Cerne*. 17, 353-359. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602011000300009>
- UNFCCC, 1998 - United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto Protocol. 21 p. Disponível em < <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> Acesso em 27/03/2018.
- UNFCCC, 2015 - United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris Agreement. 27 p. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Viana, M.C.M., Silva, E.A., Queiroz, D.S., et al., 2011. Cultivo de macaúba em sistemas agrossilvipastoris. *Inf. Agropec*. 32, 70-80.
- Vieira, S.A., Alves, L.F., Neto, P.J.D., Martins, S.C., Veiga, L.G., Scaranello, M.A., Picollo, M.C., Camargo, P.B., Carmo, J.B., Neto, E.S., Santos, F.A.M., Joly, C.A., Martinelli, L.A., 2011. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. *Ecology and Evolution*. 1, 421-434. [doi: 10.1002/ece3.41](https://doi.org/10.1002/ece3.41)
- Yan, G., Xing, Y., Wang, J., Li, Z., Wang, L., Wang, Q., Xu, L., Zhang, Z., Zhang, J., Dong, X., Shan, W., Guo, L., Han, S., 2018. Sequestration of atmospheric CO₂ in boreal forest carbon pools in northeastern China: Effects of nitrogen deposition. *Agricultural and Forest Meteorology*. 248, 70-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.015>

CAPÍTULO 2

(Artigo publicado no periódico Industrial Crops and Products, v. 137, p.647-651, 2019).



Root distribution of cultivated macauba trees

Sandro Lucio Silva Moreira^a, Hewlley Maria Acicli Imbuzeiro^a,
Otto Herbert Schuhmacher Dietrich^b, Emiliano Henriques^b, Milton Edgar Pereira Flores^a,
Leonardo Duarte Pimentel^b, Raphael Bragança Alves Fernandes^{c,*}

^a Agricultural Engineering Department, Universidade Federal de Viçosa (UFV), 36570-900, Viçosa, MG, Brazil

^b Plant Science Department, UFV, Brazil

^c Soil Science Department, UFV, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Acrocomia aculeata Mart.
Palm trees
Root system distribution

ABSTRACT

Macauba (*Acrocomia aculeata* Mart.) is a palm tree native to tropical regions in the Americas. This species has been the subject of several studies in the last decade because of its high yields and potential as a new global source of vegetable oil. However, the root system of this plant species has not yet been described. An evaluation of the root distribution in the soil is essential to improving crop productivity. Moreover, the root distribution pattern directly affects the cultivation practices of future plantations because it is strongly associated with crop nutrition, water use, and plant anchorage in the soil. Thus, the objective of this study was to promote the first evaluation of the horizontal and vertical distribution of the root system of macauba trees of different ages. The effective (> 80% of the roots) depth and distance from the stem of the root system of macauba trees grown for 1.6, 4.8, and 9.0 years were evaluated using the excavation method and the monolith technique, with the collection of soil and root samples in the crown projected area. The root distribution of macauba seedlings cultivated for 3 and 8 months in nurseries was also evaluated. The total root mass of all evaluated plants was measured. The results indicated that the root mass increased with as the age of the plant increased, and varied from 0.0006 kg in seedlings (3 months) to 80.73 kg in adult plants (9 years). The effective depth of the root system also increased with as the age of the plant increase, reaching 0.4 m (1.6 years), 0.6 m (4.8 years), and 1.0 m (9.0 years). The effective distance of the roots from the plant stem coincided with the crown projection area. An important and unprecedented identified characteristic of young macauba plants was that their root system is concentrated in the direction of the tuberous region of a saxophone stem. The effective depth of macauba roots increases with as the age of the plant increase and the effective distance of the macauba roots coincides with the crown projection area. These features are relevant to crop production, as they can be used for fertilization and irrigation purposes.

1. Introduction

Macauba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart) is a palm species native to the tropical regions of the American continent (Dransfield et al., 2008) and is found across the entire Brazilian territory, except for the southern region (Mota et al., 2011). This plant species is an alternative to the cultivation of oil palm (*Elaeis guineensis*) (Pimentel et al., 2011a; Motoike et al., 2013), which supplies most of the global demand for vegetable oil and is the crop with the fastest growing cultivation area worldwide (Levermann and Souza, 2014). Despite high yields, the cultivation of oil palm contributes to the deforestation of large areas of tropical forests, which are rich in biodiversity and serve as carbon sinks (Vijay et al., 2016). For this reason, the environmental impact of

macauba plantations shows relatively smaller potential impact because this palm is typical of savanna regions.

The advantages of macauba over other species are its oil composition and yield, which are similar to those of the oil palm. These characteristics and a lower water requirement arouse interest in plant exploitation worldwide (Pimentel et al., 2011a; Motoike et al., 2013).

The oil obtained from macauba fruit can be used in the pharmaceutical, food, and cosmetic industries and is a source of raw material for producing biodiesel (Dias et al., 2011). Biodiesel stands out as a renewable fuel and has a lower environmental impact than petroleum products. A number of studies have assessed the possibility of using macauba oil to produce biokerosene, a fuel used in aviation (Boeing and Fapesp, 2013; Cortez et al., 2014; MME, 2017).

* Corresponding author.

E-mail address: raphael@ufv.br (R.B.A. Fernandes).

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.064>

Received 25 October 2018; Received in revised form 17 May 2019; Accepted 20 May 2019

0926-6690/ © 2019 Published by Elsevier B.V.

2. Materials and methods

S.L.S. Moreira, et al.

Industrial Crops & Products 137 (2019) 646–651

Several studies were the basis for increasing the productive potential of macauba on a commercial scale, including aspects related to reproductive biology (Scariot et al., 1991), anatomy and the histology of seeds (Moura et al., 2010), seedlings (Ribeiro et al., 2012) and fruits (Castro et al., 2017), ecophysiological aspects (Pires et al., 2013), genetics and plant breeding (Abreu et al., 2011; Lopes et al., 2018), plant propagation (Granja et al., 2018), harvesting and post-harvest procedures (Evaristo et al., 2016; Costa et al., 2017); oil production potential (Colombo et al., 2018), and oil extraction processes (Silva e Andrade, 2013). These studies are relevant to efforts to reduce the extractive exploitation of this palm, which is still common in the Americas. In addition, macauba plants can be cultivated together with other crops and may be used in reclamation of degraded area projects and agroforestry systems aimed at increasing farmer income per cultivated area (Viana et al., 2011; Montoya, 2016; Moreira et al., 2018).

The majority of studies on macauba were published in the last decade, reflecting the recent global interest in this palm. The results of these studies have attracted agricultural entrepreneurs and indicated the need for future work to focus on increasing yield. From this perspective, this study aimed to evaluate the root distribution of macauba, a key and fundamental aspect of crop management. The root distribution pattern affects the cultivation of future plantations because it is directly associated with crop nutrition, water use, and plant anchorage in the soil.

Studies of root distribution of palms are scarce, and frequently related to the effects of irrigation systems (Bhat and Sujatha, 2008; Ramos et al., 2009; Lopes et al., 2014) or soil management (Yahya et al., 2010). A complete study of root distribution and architecture was carried out by Jourdan and Rey (1997) on oil palm, but no studies have been identified in the specialized literature aimed at evaluating the distribution of the root system of macauba, and the present study appears to be unprecedented and may help improve the productive potential of this crop.

The effective depth and distance of the root system are usually evaluated in studies on the root system distribution. These variables delimited the volume of soil in which at least 80% of the plant roots was concentrated (Klar, 1991; Bernardo et al., 2006). The definition of such indicators is relevant and essential to better managing crop fertilization and irrigation, which is vital to the scope and success of crop production. Furthermore, the knowledge of root distribution in depth (vertical) and distance from the stem (horizontal) is relevant to modeling studies because root distribution data are often used as parameters in models that seek to simulate processes that occur in the soil-plant-atmosphere continuum. In addition, more accurate data from the root system of cultivated crops are necessary for calculating the carbon stock stored in the soil biomass.

The objective of this study was to evaluate the horizontal and vertical distribution of the root system of macauba trees of different ages.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study was carried out at the Araçonga Experimental Farm of the Federal University of Viçosa in the municipality of Araçonga (20°39'6" S and 42°32'14" W; altitude, 839 m), in the state of Minas Gerais, Brazil, with annual average temperature of 18 °C and average rainfall of 1338 mm (Rueda, 2014).

The study site, comprising approximately 10 ha is cultivated with macauba plants. The palms have been grown in 5 × 5 m spacing and received annual fertilization according to the soil analysis and the recommendations of Pimentel et al. (2011b). There was no complementary irrigation in the experimental area. The soil is classified as a dystrophic Yellow Red Latosol, according to the Brazilian Soil Classification System. The soil chemical and physical attributes (0–20 cm) are presented in Table 1.

Table 1

Soil chemical and physical characterization of the substrate (8 months) and experimental area (1.6, 4.8 and 9 years).

	Macauba ages			
	8 months	1.6 years	4.8 years	9 years
pH (H ₂ O)	6.76	4.47	4.62	5.34
P (mg dm ⁻³)	89.0	3.7	8.1	7.6
K (mg dm ⁻³)	247	33	79	138
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3.71	1.99	3.54	5.36
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1.00	0.32	0.70	1.09
Al (cmol _c dm ⁻³)	0.00	0.78	0.29	0.00
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	0.8	11.1	10.9	8.20
SB (cmol _c dm ⁻³)	5.34	2.39	4.44	6.80
CEC (t) (cmol _c dm ⁻³)	5.34	3.17	4.73	6.80
CEC (T) (cmol _c dm ⁻³)	6.14	13.49	15.34	15.00
V (%)	87.0	17.7	28.9	45.3
m (%)	0.0	24.6	6.1	0.0
Sandy (%)	53	39	34	38
Silt (%)	4	10	5	4
Clay (%)	43	51	61	58
Textural class	Sandy clay	Clay	Clay	Clay

SB: sum of exchangeable bases; CEC: cation exchange capacity effective (t) and at pH 7.0 (T); V (%): base saturation; m (%): aluminum saturation. Soil characterization according to Teixeira et al. (2017). The substrate of 3 months was insufficient for determining its characterization.

The root distribution of the macauba in the field was assessed by selecting areas containing plants cultivated for 1.6, 4.8, and 9.0 years. In addition, two palm seedlings of 3 and 8 months were evaluated. The substrate used for 8 month seedlings was also characterized (Table 1). This older seedling had reached the age deemed sufficient for transplanting to the field.

2.2. Plant selection

Individual macauba plants, representative of 4.8 and 9 years old, were selected for cutting down after a preliminary forest inventory which was carried out on 20 plants of different ages in the center of each plantation area. The following dendrometric parameters were measured: diameter at chest height (1.3 m from the soil) (DCH), crown projection diameter (CPD), and total plant height (TPH). The data obtained for each age area allowed for calculating the mean values of DCH, CPD, TPH and basal area (BA = π (DCH)²/4).

The mean basal area was used as a criterion for selecting 4.8 and 9 years olds palms that would be cut down in the field. Only one plant of each age was cut down because of the high labor demand, time, and resources necessary to perform more replicates. Nevertheless, the results are relevant because this study is the first to evaluate the distribution of the macauba root system in the field.

Palms 1.6 years old in the field, and the two seedlings (three and eight months), were selected, taking the mean height as a yardstick, because these plants did not reach the requisite height for DCH measuring (1.3 m).

The mean dendrometric data obtained for the 20 plants per age in the inventory procedure are presented in Table 2. Next, a single representative plant with similar dimensions to those mean values was selected in the field to be cut down.

2.3. Root collection

After cutting down the selected palms (1.6, 4.8 and 9 years) in the field, the root system was evaluated by the soil excavation method. The root system was collected within the limits of the crown projection area of each cut-down palm following the guidelines of Bolte et al. (2004); Nielsen (1995), and Kuhr (1999) with modifications. The root collection procedures considered the division of crown projection area into

647

2.1. Study area

2.2. Plant selection

2.3. Root collection

3. Results and discussion

Table 2
Dendrometric data from the previous inventory of macauba plants used to select the representative palm to be cut down for analysis in this study.

Age	Total plant height	Crown projection diameter	Diameter at chest height (1.3 m)	Basal area
	(m)	(m)	(m)	(m ²)
3 months	0.19 ± 0.02	—	—	—
8 months	0.93 ± 0.02	0.72 ± 0.03	—	—
1.6 years	2.80 ± 0.13	4.00 ± 0.22	—	—
4.8 years	7.10 ± 0.86	5.43 ± 0.40	0.350 ± 0.03	0.0962 ± 0.0185
9 years	10.25 ± 0.99	6.25 ± 0.34	0.375 ± 0.04	0.1104 ± 0.0213

Mean values ± standard deviation (N = 20).

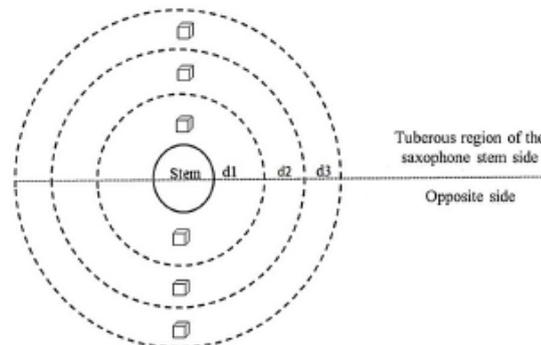


Fig. 1. Sampling representation of macauba root horizontal collection in two sides of the stem.

dimensional vertical and horizontal sections using concentric rings with the stem in the center.

During the root collection, we observed the adhered roots grew predominantly in the side of the tuberous region of saxophone stem. This macauba characteristic has not been described in the literature but was used to define our root collection procedure. Then, each plant was divided into two sides: the tuberous region of the saxophone stem and the opposite one (Fig. 1). The saxophone stem in macauba has been recently described by Souza et al. (2017). For the vertical dimension analyses, soil blocks were sampled in the center of five predefined sections at different depths (0–0.2 m, 0.2–0.4 m, 0.4–0.6 m, 0.6–1.0 m, and 1.0–1.4 m). For the horizontal dimension analyses, soil blocks were sampled in the center of three centering rings delimited within the border of the crown projection area, which was divided into three equal sections (d1, d2, and d3) (Fig. 1).

Soil blocks for the vertical and horizontal root analyses were sampled using the monolith technique (Bohm, 1979). Soil samples were collected in a box (0.0027951 m³) with internal dimensions of 0.12 m (width) × 0.11 (height) × 0.21 m (length).

The soil blocks collected were manually disaggregated, and the roots separated from the soil by sieving. The roots were taken to a laboratory, washed with water, and oven-dried at 65 °C. The root dry mass obtained in each block was used to calculate the total roots on each of the two sides of the plant saxophone stem. Next, root density (kg m⁻³) was estimated at each vertical (depth) and horizontal (distance) section.

The adhered roots of the saxophone stem of macauba (1.6, 4.8 and 9.0 years) were washed and photos were taken to characterize the root distribution compared to the tuberous region of saxophone stem. These roots were dried for mass estimation.

The total root mass considered the total roots collected in the soil and the roots adhered to the saxophone stem. Only the roots collected in the soil were considered in the evaluation of the differential distribution of roots in the soil according to the position of the tuberous region of the saxophone stem.

These data were used to calculate the effective depth and effective distance of the roots from the stem. These values corresponded to the soil volume that contained at least 80% of the plant roots (Klar, 1991; Bernardo et al., 2006). As mentioned above, only the roots collected in the soil blocks were considered in these calculations.

The evaluation of the root system of seedlings (3 and 8 months) was carried out in the nursery after total substrate removal and root washing with tap water. The entire root system was photographed and collected to obtain the root dry mass. Another seedling from 4 to 12 months were selected specifically to certify the preferential root growth from the tuberous region of the saxophone stem. Their root system was washed and photos were taken to record this preferential growth.

3. Results and discussion

There is a consensus that the root system of palm trees is fasciculate, with roots emerging homogeneously and radially from the plant stem (Jourdan and Rey, 1997; Jourdan et al., 2000). However, when looking in the field, this characteristic was not found in macauba in its early stages, because of the influence of the saxophone stem structure described by Souza et al. (2017).

The distribution of the adhered roots of macauba is shown in Fig. 2. In the initial nursery stage, all roots were directed to the tuberous region side (Fig. 2a and b). At the age of 1.6 years (Fig. 2c), the predominance of the adhered roots in the direction of the tuberous region is evident, confirming the field observations. In plants aged 4.8 (Fig. 2d) and 9.0 years (Fig. 2e), the difference in the root system distribution was smaller, and the adhered roots tend to be equally distributed in older plants.

The total root mass, including the roots present in the soil and adhered to the saxophone stem structure, increased with the plant age (Table 3), varying from 0.0006 kg for seedlings (3 months) to 80.728 kg for 9-year-old plants. According to our data, root production (in kg) as a function of macauba age (years) is linear up to 9 years and can be estimated by the equation $\hat{Y} = -5.5456 + 9.5405 x$ ($R^2 = 0.996$).

The estimated below-ground biomass of 9-year-old macauba (80.728 kg) was less than the root mass of 12-year-old oil palm trees (213.6 kg per plant) in Malaysia (Kiyono et al., 2015). This result is explained by the greater size of the oil palm in comparison to the macauba palm. This was evident from the comparison of values of DCH (0.38 m) and CPD (6.25 m) of 9-year-old macauba to the oil palm trees (0.71 m and 12.6 m).

In addition to the diversity of products provided by macauba, this palm can also store below-ground carbon. For 9-year-old plants with a population density of 400 plants ha⁻¹, the carbon stock potential is 16.15 ton ha⁻¹, considering an average of 50% of C in the plant biomass. This carbon stock may be higher in commercial crops where a population density up to 460 plants ha⁻¹ is used. The below-ground carbon stock determined in the present study is similar to that found for oil palm in southeast Asia (Yuen, 2015). We reviewed 448 studies with oil palm plantations and found the carbon stock in the palm tree root system varied from 3 to 22 ton ha⁻¹ of C. The high variability in carbon stock is related to the different methodologies used and different

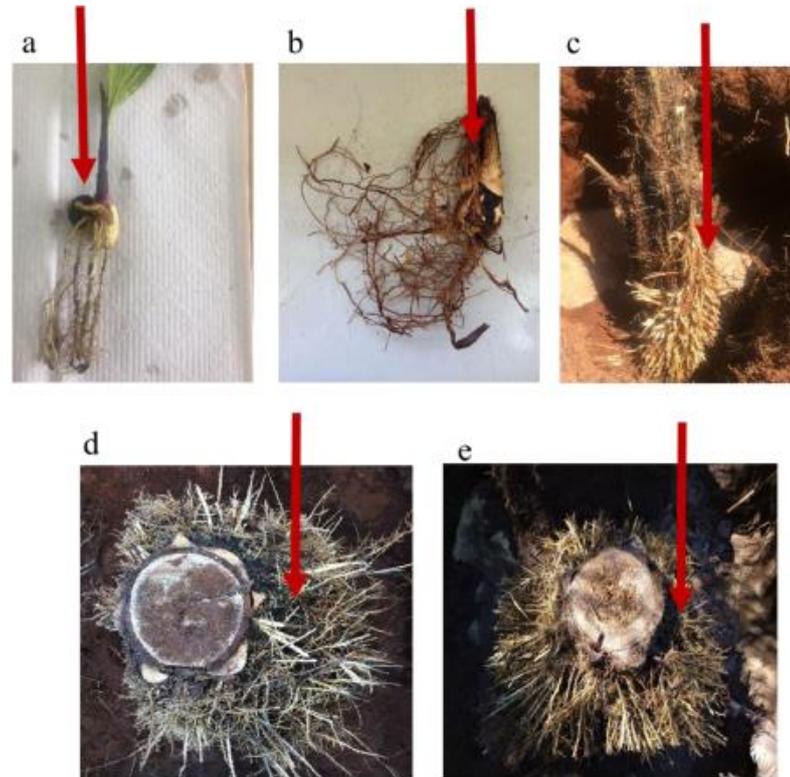


Fig. 2. Representation of adhered roots of macauba palms of different ages, showing the side of the tuberous region of saxophone stem (red arrow): 3-month (a) and 8-month (b) seedlings; and 1.6-year (c), 4.8-year (d), and 9.0-year (e) adult plants.

Table 3
Root biomass of macauba plants of different ages.

Macauba age	Macauba root system (kg)			Total
	Soil roots ^a	Adhered roots to the saxophone stem	Saxophone stem	
3 months	–	0.0002	0.0004	0.0006
8 months	–	0.0166	0.081	0.0977
1.6 years	4.4380	0.450	1.780	6.688
4.8 years	22.7150	5.201	12.510	40.426
9 years	43.5520	10.689	26.487	80.728

^a Soil roots evaluated up to 1.4 m depth.

population densities and ages.

The effective depth and effective distance of the macauba roots from the palm stem are presented in Table 4. These two variables increased as expected with the increase in plant age. In all plants, the effective distance of the roots from the stem was coincident with the crown projection area, indicating the radial spreading of the root system and the proper use of CPD value in the macauba radicular studies.

Measuring the effective depth and effective distance is essential to crop irrigation and fertilization procedures (Bernardo et al., 2006). However, from the practical point of view, fertilization is carried out on the soil surface and within the crown projection area. The importance of knowing the root density in the most superficial layers should also be taken into consideration. In the present study, the majority of the roots are found in the first soil layer (0–0.2 m): 50.9% (1.6 years), 35.6% (4.8

Table 4
Effective depth and effective distance of macauba roots from the stem within the palm crown projection area.

Macauba age (years)	Effective depth ^a (m)	Effective distance ^a from palm stem (m)
1.6	0.40	2.00
4.8	0.60	2.71
9	1.00	3.12

^a Effective depth and effective distance corresponded to the volume of soil that concentrated at least 80% of the plant roots.

years), and 18.5% (9 years), which should be taken into account when planning crop fertilization. In 4-year-old dwarf coconut palm (*Cocos nucifera*) grown under three localized irrigation systems in a Brazilian Argisol, most roots were located at a depth of 0.2–0.6 m (56%) regardless of the irrigation system adopted, and 21% of the roots were found in the 0–0.2 m soil layer (Cintra et al., 2005).

The root density (kg m^{-3}) of macauba at different depths and distances from the stem are shown in Fig. 3. The roots of 1.6-year-old plants grew preferentially from the side of the tuberous region of saxophone stem. This side of the plant concentrated 79% of the roots (Fig. 3a), and root distribution was more uniform in the three depth sections evaluated. This result is relevant and should be considered when managing fertilization and irrigation and suggests that, in the first years of crop cultivation, higher doses of nutrients and water should be applied to the plant side with higher root density.

The 4.8-year-old plants presented roots not concentrated on the

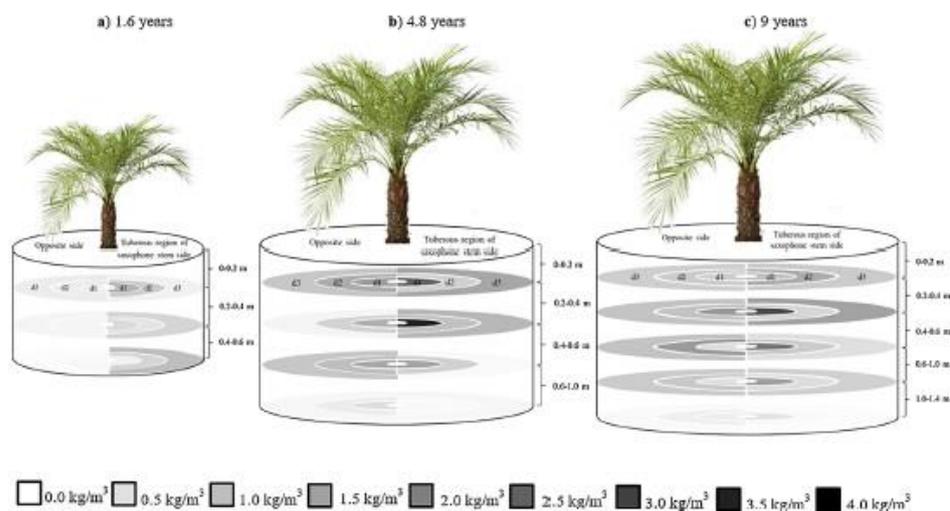


Fig. 3. Root density (kg m^{-3}) of macauba trees aged 1.6 (a), 4.8 (b), and 9 years (c). Distances (d1, d2, d3) from the stem: 1.6 years (0–0.67; 0.67–1.34; 1.34–2 m); 4.8 years (0–0.9; 0.9–1.8; 1.8–2.71 m); and 9 years (0–1.04 m; 1.04–2.08; 2.08–3.12 m).



Fig. 4. Details of the higher root density of macauba seedlings (from 4 to 12 months) coincident to the side with fewer leaves. Red arrows indicate the position of the tuberous region of the saxophone stem which concentrated the adhered roots.

tuberous region of saxophone stem side (Fig. 3b). Roots became more equally distributed across the crown projection area as the years progressed. The tuberous region side comprised 56% of the roots, and 69% of the macauba roots were attached to the first third of the crown projection area (d1) of this site. The root system of 9-year-old macaubas was uniformly distributed, and 50% of the roots grew in the direction of the tuberous region side (Fig. 3c). However, 63% of the roots were located in the first third of the crown projection area on the tuberous region side (d1), while on the other plant side the root distribution was more similar.

The greater root growth in the direction of the tuberous region side during plant development in the field is an unprecedented observation and may support future studies and practices of macauba management, fertilization, and irrigation. Studies addressing fertilization and irrigation of highest root density plant side may be carried out with the aim of improving the productive potential of this palm, obviously taking appropriate care to avoid the adverse effects of chemotropism. Another

interesting question for future studies is whether the uniform growth verified in 9-year-old macauba trees was the result of the progress of time over the years and the crop grown, or if the fertilizer distribution in all the crown projection area promoted root development on the opposite side of the tuberous region. Moreover, further studies are necessary to monitor the development of the saxophone stem during cultivation in the field, since this structure was only studied during the early stages of macauba seedlings in a greenhouse study (Souza et al., 2017).

The confirmation of the root predominance in the tuberous region side of macauba seedlings and in young palm trees in the field is especially relevant to the planting layout of seedlings in the field. The planting standardization in a specific cardinal direction may help future fertilization and irrigation management. However, determining the tuberous region side can be complicated because macauba seedlings are grown in polyethylene bags and the substrate is not removed for planting. Our observations suggest that the side with relatively fewer seedlings

leaves coincided with the higher root density macauba side (Fig. 4). From this observation, we speculated this is a plant strategy to allow for better plant balance and greater soil anchorage.

4. Conclusions

- 1 The roots of macauba seedlings and young palm trees in the field are concentrated in the tuberous region side and are uniformly distributed in adult plants.
- 2 The effective depth of macauba roots increases as the plant ages and the effective distance of the macauba roots coincides with the crown projection area.

Acknowledgments

This work was supported by the Acrotech Sementes e Reflorestamento, the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq, Brazil), and the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brazil, Finance Code 001).

References

- Abreu, I.S., Carvalho, C.R., Carvalho, G.M.A., Motoike, S.Y., 2011. First karyotype, DNA C-value and AT/GC base composition of macaw palm (*Acrocomia aculeata*, Arecaceae)—a promising plant for biodiesel production. *Aust. J. Bot.* 59, 149–155. <https://doi.org/10.1071/BI10245>.
- Bernardo, S., Soares, A.A., Mantovani, E.C., 2006. Manual de Irrigação, 8. ed. UFV 625 p.
- Bhat, Sujatha, 2008. Root distribution of arecanut (*Areca catechu*) as influenced by drip fertigation in a laterite soil. *Indian J. Agric. Sci.* 78, 803–806.
- Boeing, Embraer, Fapesp, Unicamp, 2013. Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil: Action Plan. 60 p. <http://www.fapesp.br/publicacoes/flightpath-to-aviation-biofuels-in-brazil-action-plan.pdf>.
- Bohm, W., 1979. *Methods of Studying Root Systems*, 1 ed. Springer-Verlag, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-642-67282-8_188 p.
- Bolte, A., Rahmann, T., Kuhr, M., Pogoda, P., Murach, D., Gadow, K.V., 2004. Relationships between tree dimension and coarse root biomass in mixed stands of European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Plant Soil* 264, 1–11. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047777.23344.a3>.
- Castro, C.A., Resende, R.T., Kuki, K.N., Carneiro, V.Q., Marcati, G.E., Cruz, C.D., Motoike, S.Y., 2017. High-performance prediction of macauba fruit biomass for agricultural and industrial purposes using artificial neural networks. *Ind. Crops Prod.* 108, 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.031>.
- Cintra, F.L.D., Portela, J.C., Nogueira, L.C., Gornat, B., 2005. Distribuição de raízes de coqueiro anão verde sob sistemas de irrigação localizada em solo dos Tabuleiros Costeiros. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 17 p.
- Colombo, C.A., Berton, L.H.C., Diaz, B.G., Ferrari, R.A., 2018. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. *OCL* 25, 1–9. <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>.
- Cortez, L.A.B., Nassar, A.M., Cantarella, H., et al., 2014. Roadmap for Sustainable Aviation Biofuels for Brazil: A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil. 272 p. Blucher, São Paulo. <http://pdf.blucher.com.br/3-sa-east-1.amazonaws.com/openaccess/roadmap-aviation/completo.pdf>.
- Costa, A.G., Pinto, F.A.C., Alves-Júnior, B., Motoike, S.Y., Gracia, L.M.N., 2017. Determination of macaw fruit harvest period by biospeckle laser technique. *Afr. J. Agric. Res.* 12, 674–683. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.12039>.
- Dransfield, J., Uhl, N.W., Asmussen, C.B., Baker, W.J., Harley, M.M., Lewis, C.E., 2008. *Genera Palmarum: The Evolution and Classification of Palms*. Royal Botanic Gardens, Richmond, UK Kew. 732 p.
- Dias, H.C.T., Sato, A.Y., Neto, S.N.O., Moraes, T.C., Freire, A., Bento, P.S., 2011. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. *Inf. Agropec.* 32, 52–60.
- Evaristo, A.B., Grossi, J.A.S., Pimentel, L.D., Goulart, S.M., Martins, A.D., Santos, V.L., Motoike, S.Y., 2016. Harvest and post-harvest conditions influencing macauba (*Acrocomia aculeata*) oil quality attributes. *Ind. Crops Prod.* 1, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.052>.
- Granja, M.M.C., Motoike, S.Y., Andrade, A.P.S., Correa, T.R., Picoli, E.A.T., Kuki, K.N., 2018. Explant origin and culture media factors drive the somatic embryogenesis response in *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., an emerging oil crop in the tropics. *Ind. Crops Prod.* 117, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.074>.
- Jourdan, C., Rey, H., 1997. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant Soil* 189, 33–48. <https://doi.org/10.1023/A:1004290024473>.
- Jourdan, C., Michaux-Ferrière, N., Perbal, G., 2000. Root system architecture and gravitropism in the oil palm. *Ann. Bot.* 85, 861–868. <https://doi.org/10.1006/anno.2000.1148>.
- Kiyono, Y., Monda, Y., Toriyama, J., Chaddy, A., Goh, K.J., Melling, L., 2015. Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bull. FPPRI* 14, 147–158. <https://www.fppri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/436/documents/436-4.pdf>.
- Klar, A.E., 1991. Irrigação: frequência e quantidade de aplicação. Nobel, São Paulo 156 p.
- Kuhr, V.M., 1999. *Großwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung*. Dissertation Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie der Georg-August-Universität Göttingen 136 p.
- Levermann, R.A., Souza, P.M., 2014. Óleo de palma: O crescimento da indústria global. *Agroanalysis* 34, 13–15. <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/view/31360/30164>.
- Lopes, A.S., Hernandez, F.B., Alves Júnior, J., Oliveira, G.Q., 2014. Distribution of the root system of peach palm under drip irrigation. *Acta Sci. Agron.* 36, 317–321. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i3.16281>.
- Lopes, A.S., Pacheco, T.G., Nimz, T., Vieira, L.N., Minguel, P.G., Nodari, R.O., Souza, E.M., Pedrosa, F.O., Rogalski, M., 2018. The complete plastome of macaw palm [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.] and extensive molecular analyses of the evolution of plastid genes in Arecaceae. *Planta* 247, 1011–1030. <https://doi.org/10.1007/s00425-018-2841-x>.
- Montoya, S.G., 2016. *Ecofisiologia e produtividade de Bracharia decumbens em sistema silvipastoril com macaúba*. Universidade Federal de Viçosa, Tese 102 p.
- Moreira, S.L.S., Pires, C.V., Marcati, G.E., Santos, R.H.S., Imbuzeiro, H.M.A., Fernandes, R.B.A., 2018. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. *Agric. For. Meteorol.* 256–257, 379–390. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.03.026>.
- Mota, C.S., Corrêa, T.R., Grossi, J.A.S., Gastricini, A., Ribeiro, A.S., 2011. Exploração sustentável da macaúba para a produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. *Inf. Agropec.* 32, 41–51.
- Motoike, S.Y., Carvalho, M., Pimentel, L.D., Kuki, K.N., Paes, J.M.V., Dias, H.C.T., Sato, A.Y., 2013. *A Cultura da Macaúba—implantação e manejo de cultivos racionais*, 1 ed. Editora UFV, Viçosa, MG 61 p.
- MME/Ministério de Minas e Energia, 2017. *Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAFs) Bioquerosene: Proposta de Agentes da Cadeia Aeronáutica do Brasil sobre a Consulta Pública MME nº 26 de 15/02/2017*. 10 p. <http://www.mme.gov.br/documents/10584/7948694/AGENTES+DA+CADEIA+AERONAUTICA+NO+BRASIL+-+Consulta+-+P9/C3948Ablicas+-+Renovabio.pdf/46cc4348-ecce-4558-b8d0-1f79c9ede845?jsessionid=B0DD49E2B66A6D0FC56EBCF8C527F12AA.srv154>.
- Moura, E.F., Ventrella, M.C., Motoike, S.Y., 2010. Anatomy, histochemistry and ultrastructure of seed and somatic embryo of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). *Sci. Agric.* 67, 375–495. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000400004>.
- Nielsen, C.C.N., 1995. Detailed Instructions for Root Architecture Assessments With the Rootarch Method. Royal Vet. and Agriculture University, Arboretum Int. Rep. No. 7, Hoersholm (DK), 12 p.
- Pimentel, L.D., Manfio, C.E., Motoike, S.Y., Paes, J.M.V., Bruckner, C.H., 2011a. Coeficientes técnicos e custos de produção do cultivo da macaúba. *Inf. Agropec.* 32, 61–69.
- Pimentel, L.D., Bruckner, C.H., Martinez, H.E.P., Teixeira, C.M., Motoike, S.Y., Neto, J.C.P., 2011b. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1ª aproximação. *Inf. Agropec.* 32, 20–30.
- Pires, T.P., Souza, E.S., Kuki, K.N., Motoike, S.Y., 2013. Ecophysiological traits of the macaw palm: a contribution towards the domestication of a novel oil crop. *Ind. Crops Prod.* 44, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>.
- Ramos, A., Folegatti, M.V., Bovi, M.L.A., Diotto, A.V., 2009. Distribuição espacial do sistema radicular da pupunheira em função de lâminas de irrigação. *Irrigation* 14, 431–440. <https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n4p431-440>.
- Ribeiro, L.M., Oliveira, D.M.T., Garcia, Q.S., 2012. Structural evaluations of zygotic embryos and seedlings of the macaw palm (*Acrocomia aculeata*, Arecaceae) during in vitro germination. *Trees* 26, 851–863. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0659-2>.
- Rueda, R.A.P., 2014. *Avaliação de germoplasma para melhoramento e a conservação da macaúba*. Tese. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 58 p.
- Scariot, A.O., Lleras, E., Hay, J.D., 1991. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil. *Biotropica* 23, 12–22. <https://doi.org/10.2307/2388683>.
- Silva, G.C.R., Andrade, M.H.C., 2013. Development and simulation of a new oil extraction process from fruit of macauba palm tree. *J. Food Process Eng.* 36, 134–145. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2011.00657.x>.
- Souza, J.N., Ribeiro, L.M., Simões, M.O.M., 2017. Ontogenesis and functions of saxophone stem in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). *Ann. Bot.* 119, 353–365. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw215>.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.C., 2017. Manual de métodos de análise de solo, 3.ed. Embrapa, Brasília 573 p.
- Viana, M.C.M., Silva, E.A., Queiroz, D.S., Paes, J.M.V., Albernaz, W.M., Fraga, G., 2011. Cultivo de macaúba em sistemas agrossilvipastoris. *Inf. Agropec.* 32, 70–80.
- Vijay, V., Pimm, S.L., Jenkins, C.N., Smith, S.J., 2016. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *PLoS One* 11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159668>.
- Yahya, Z., Husin, A., Talib, J., Othman, J., Ahmed, O.H., Jalloh, M.B., 2010. Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in bernam series soil. *Am. J. Appl. Sci.* 7, 343–348. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.343.348>.
- Yuen, J., 2015. *Uncertainty in Above- and Below-ground Carbon Biomass in Major Land-covers in Southeast Asia: Implications for Biomass Carbon Assessments for REDD+ Initiatives*. Thesis. Department of Geography National University of Singapore 164 p.

CAPÍTULO 3

Equações alométricas para estimar massa seca e carbono de macaúbas cultivadas

Resumo - Os acordos internacionais em resposta às mudanças climáticas globais têm gerado oportunidades de comercialização de créditos de carbono no mercado internacional, sendo relevante neste cenário conhecer o acúmulo de massa seca e de carbono de diferentes espécies vegetais. Na estimativa dessas variáveis em espécies arbóreas destaca-se o uso de modelos alométricos que se utilizam de outras variáveis de mais fácil mensuração. Entretanto não estão disponíveis equações alométricas com esta finalidade para a macaúba em cultivos comerciais. Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo gerar equações alométricas para estimar o acúmulo de massa seca e de carbono em macaúbas cultivadas no Brasil. Os dados avaliados foram coletados em mudas de macaúbas com 3 e 8 meses de idade, cultivadas em viveiro; e em palmeiras de 19, 58 e 108 meses, cultivadas em campo, todas provenientes do estado de Minas Gerais, Brasil. As variáveis coletadas nas mudas e plantas no campo foram a idade, altura total, diâmetro da copa, altura da folha viva mais baixa, e o número de folhas total e senescentes. A massa seca total das mudas e plantas foi obtida por meio de amostragem destrutiva da biomassa acima (parte aérea) e abaixo do solo (sistema radicular) de cada indivíduo. O acúmulo de carbono em mudas e plantas foi obtido pela média dos teores de carbono obtidos em laboratório nos diferentes compartimentos vegetais das macaúbas (folhas, estipe, cacho e raízes), multiplicado pela respectiva massa seca. O modelo ($y = \beta_0 x^{\beta_1} + \varepsilon$) é o indicado para relacionar o acúmulo de massa seca e carbono em plantas de macaúba nos primeiros 108 meses de cultivo, sendo recomendada a preferência pelo uso da variável (x) altura total da planta (m) nas equações: ($\hat{y} = 1,292263 x^{2,303480}$) para a estimativa do acúmulo de massa seca e ($\hat{y} = 0,6584424001704 x^{2,343459}$) para o acúmulo de carbono. O teor médio de carbono presente na massa seca das macaúbas variou com o aumento da idade das palmeiras, passando de 53,24% na muda de 3 meses a 55,93% na palmeira de 108 meses no campo, valores esses que superam o fator de 0,50 tradicionalmente utilizado.

Palavras-chave: Modelagem; *Acrocomia aculeata*; estoque de carbono.

Allometric equations to estimate dry mass and carbon of cultivated macaúbas

Abstract - The international agreements in response to global climate change have been generating carbon credits trading opportunities in the international market. In this scenario, it is relevant to understand the dry mass and carbon accumulation of different plants which can be easier estimated using allometric models for tree species. However, allometric equations used for this purpose are not available for macauba under commercial crops. In this sense, this study aimed to generate allometric equations to estimate dry mass and carbon accumulation in macauba trees cultivated in Brazil. The evaluated data were collected in nursery cultivated macauba seedlings of 3 and 8 months old; and in field cultivated palm trees of 19, 58 and 108 months old, all from the state of Minas Gerais, Brazil. The collected variables from seedlings and plants in the field were age, total height, crown diameter, lowest live leaf height, and the number of total and senescent leaves. The total dry mass of seedlings and plants was obtained by destructive sampling of the above (aerial part) and below ground (root system) biomass of each individual. The carbon accumulation in seedlings and plants was found by the multiplication of the average of the carbon contents obtained in laboratory in the different vegetal compartments of macauba trees (leaves, stipe, bunch and roots), by the respective dry mass. The model ($y = \beta_0 x^{\beta_1} + \varepsilon$) is indicated to relate dry mass and carbon accumulation in macaúba plants in the first 108 months of cultivation, and it is recommended to use the variable (x) total plant height (m) in the equations: ($\hat{y} = 1,292263 x^{2,303480}$) for dry mass and ($\hat{y} = 0,6584424001704 x^{2,343459}$) for carbon accumulation estimations. The average carbon content in macauba dry mass varied with its age increase, from 53.24% in the three months old seedling to 55.93% in the 108 months old palm in the field, values that exceed the traditionally used factor of 0.50.

Keywords: Modeling; *Acrocomia aculeata*; carbon stock.

1. Introdução

A estimativa do acúmulo de massa seca e carbono proporcionado por diferentes espécies vegetais é de grande interesse atual, em especial nas discussões que envolvem as mudanças climáticas globais e a oportunidade de comercialização de créditos de carbono associados a projetos do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) (Rutishauser et al., 2013; Cassol et al., 2016; Diédhiou et al., 2017; Rao et al., 2017; Mohamed et al., 2018; Prayogo et al., 2018).

Para a quantificação do estoque de carbono nos diferentes compartimentos da vegetação (serrapilheira, galhos, troncos, folhas, raízes, etc.) é necessário conhecer a biomassa de cada um desses componentes (Salomão et al., 1996). A biomassa é a quantificação da matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal (Silveira et al., 2008), que pode ser expressa em massa fresca ou massa seca (Caldeira, 2003).

Dois métodos de quantificação da biomassa vegetal predominam na literatura. O método direto (destrutivo), considerado como padrão, consiste no abate da planta e obtenção da massa total dos seus diferentes compartimentos. Por suas características é considerado um método trabalhoso e demorado. O método indireto (não destrutivo) proporciona estimativas mais rápidas, sem necessidade de abate de plantas para sua aplicação, consistindo do uso de equações alométricas que correlacionam à biomassa vegetal com uma ou mais variáveis de fácil obtenção no campo (Higuchi e Carvalho, 1994; Ratuchne et al., 2016).

O método indireto tem sido empregado em diferentes estudos para estimar a biomassa vegetal e carbono em diversas espécies de plantas, o que tem facilitado os estudos de estoque de carbono. Nas palmáceas este método tem sido aplicado na cultura da palma de óleo - *Elaeis guineensis* Jacq. (Aholoukpè et al., 2013; Asari et al., 2013; Khasanah et al., 2015), além do babaçu- *Attalea speciosa* C. (Gehring et al., 2011) e pinang nut - *Areca catechu* L. (Prayogo et al., 2018), e ainda em generalizações para diferentes palmeiras (Goodman et al., 2013).

As palmáceas apresentam ampla distribuição em regiões tropicais e subtropicais do mundo (Dransfield et al., 2008). Destacam-se por apresentar grande potencial ecológico e econômico (Eiserhardt et al., 2011), em especial pela presença de óleo, amido, vitaminas e proteínas nos frutos de muitas espécies ou pela possibilidade de extração do palmito (Clement et al., 2005). Diante do exposto, esse grupo de plantas constitui importante fonte de alimentação humana (Lorenzi, 1996), além de algumas espécies produzirem frutos atrativos para a fauna (Faustino e Paula, 2014).

As principais variáveis preditoras nas equações alométricas utilizadas na avaliação da biomassa acumulada em palmeiras são a altura do estipe, a altura total da planta e o diâmetro do caule, sendo os resultados com os dois primeiros parâmetros, de forma isolada ou combinada, são os que frequentemente apresentam os melhores resultados (Gehring et al., 2011; Goodman et al., 2013; Syafinie e Ainuddin, 2013; Silva et al., 2015; Cassol et al., 2016; Prayogo et al., 2018).

O acúmulo de biomassa permite estimar a quantidade de carbono estocado pelas plantas, sendo esta uma informação relevante quando se avalia o papel da vegetação como sumidouro de carbono frente às mudanças climáticas globais. Esse acúmulo já é comprovado em estudos com diferentes espécies de palmeiras (Khasanah et al., 2015; Prayogo et al., 2018). Entretanto, esses estudos de biomassa acumulada e potencial de estoque de carbono não consideram uma importante espécie de palmácea que tem sido foco recente de estudos, a macaúba (*Acrocomia aculeata* Mart.). Esta palmeira é nativa da região tropical das Américas (Dransfield et al., 2008) e apresenta grande potencial de uso econômico, pois seus frutos contém alto teor de óleo, que é fonte de matéria prima para produção de biodiesel (Dias et al., 2011) e de outros produtos. A macaúba apresenta destacada resistência à seca (Motoike et al., 2013; Souza et al., 2017) e sobrevivência em áreas degradadas (Mota et al., 2011), o que lhe confere especiais qualidades nos cenários previstos pelos modelos climáticos de menor disponibilidade hídrica e de degradação dos solos mundiais.

Os únicos registros de quantificação de biomassa e carbono de macaúba encontrados são os de Tolêdo (2010) e Ferreira et al. (2013). No entanto, ambos os estudos foram desenvolvidos em áreas de ocorrência natural e as equações alométricas não foram geradas. Existe, portanto, carência de informações para a cultura, o que pode dificultar estudos futuros de quantificação do potencial de acúmulo de biomassa e carbono proporcionado pela palmeira que, atualmente, tem sua área de produção em expansão. Diante deste cenário, o presente estudo teve como objetivo gerar equações alométricas para estimar o acúmulo de massa seca e carbono em macaúbas de plantio comercial no Brasil.

2. Material e Métodos

2.1. Local de estudo

O estudo foi realizado no município de Araponga, estado de Minas Gerais, Brasil, numa área experimental localizada nas coordenadas 20° 39' 6" S e 42° 32' 14"

W, a 839 m de altitude, com temperatura média anual de 18 °C e precipitação média anual de 1.338 mm (Rueda, 2014).

Em campo as macaúbas são cultivadas em espaçamento 5 m x 5 m e recebem anualmente adubação de manutenção conforme análise de solo e de acordo com a recomendação de Pimentel et al. (2011). Não existe irrigação suplementar. As mudas de macaúba são cultivadas em substrato. As características químicas e físicas do substrato e do solo da área experimental- um Latossolo Vermelha Amarelo distrófico, são apresentadas na Tabela 1.

2.2. Medições e seleção de plantas para amostragem destrutiva

Para o estudo foram selecionadas plantas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) pertencentes a acessos de Minas Gerais com 3, 8, 19, 58 e 108 meses de cultivo. As duas primeiras idades referem-se à mudas da palmeira cultivadas em viveiro e as demais cultivadas em campo.

Para a seleção das mudas de 3 e 8 meses que seriam utilizadas previamente foi mensurada a altura total de 20 plantas de cada idade aleatoriamente escolhidas no viveiro para a definição da altura total média. No campo previamente foram selecionadas 20 plantas de cada grupo de macaúbas com idades de 19; 58 e 108 meses de cultivo, sendo mensurado o diâmetro a 1,3 m de altura (*dap*) e altura total de cada palmeira com vara telescópica.

No caso das mudas de 3 e 8 meses, bem como da planta com 19 meses, o critério utilizado para a seleção da palmeira representativa da idade foi a altura total média obtida com as 20 plantas iniciais, uma vez que essas não atingiam 1,3 m, altura exigida para a medição do *dap*.

Para as plantas de 58 e 108 meses de cultivo, o critério de escolha da palmeira representativa e que seria abatida em campo foi a coincidência com o valor da área seccional média do estipe do conjunto de 20 plantas previamente avaliado. A área seccional média do estipe foi calculada segundo a equação: $AS = \pi dap^2 / 40000$.

Apenas uma planta representativa foi abatida por idade, limitação que pode ser justificada pelo alto requerimento de mão de obra, tempo e recursos financeiros para as medições. Ainda assim, os resultados do presente estudo podem ser considerados relevantes, uma vez que essa é a primeira vez que se busca ajustar um modelo alométrico para a estimativa do acúmulo de massa seca e carbono em plantas cultivadas de macaúba, além dos valores relativamente baixos de desvio padrão para altura total

(de 0,02 a 0,99 m) e área seccional do estipe (de 0,0185 m² a 0,0213 m²) (Tabela 2), critérios utilizados para escolha da planta representativa a ser abatida e, também pela consistência observada nos resultados apresentados nos itens subsequentes. Os dados dendrométricos médios das 20 mudas e plantas previamente selecionadas em cada idade são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Caracterização química e física do substrato das mudas de oito meses e do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico das áreas de cultivo

	Substrato (viveiro)		Plantas adultas (campo)	
	8 meses	1,6 anos	4,8 anos	9 anos
pH (H ₂ O)	6,76	4,47	4,62	5,34
P (mg dm ⁻³)	89,0	3,7	8,1	7,6
K (mg dm ⁻³)	247	33	79	138
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,71	1,99	3,54	5,36
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,00	0,32	0,70	1,09
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,78	0,29	0,00
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	0,8	11,1	10,9	8,20
SB (cmol _c dm ⁻³)	5,34	2,39	4,44	6,80
CTC (t) (cmol _c dm ⁻³)	5,34	3,17	4,73	6,80
CCT (T) (cmol _c dm ⁻³)	6,14	13,49	15,34	15,00
V (%)	87,0	17,7	28,9	45,3
m (%)	0,0	24,6	6,1	0,0
Areia (%)	53	39	34	38
Silte (%)	4	10	5	4
Argila (%)	43	51	61	58
Classe textural	Argila arenosa	Argila	Argila	Argila

SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica efetiva (t) e a pH 7,0 (T); V(%): saturação de bases; m(%): saturação por alumínio. Caracterização do solo de acordo com Teixeira et al. (2017). O substrato da planta de 3 meses não apresentou material suficiente para caracterização.

Tabela 2. Dados dendrométricos médios de plantas de diferentes idades utilizados para selecionar a palmeira macaúba representativa a ser coletada destrutivamente

Idade (meses)	Ambiente	Altura total (m)	<i>dap</i> (1.3 m)	Área seccional do estipe (m ²)
3	Viveiro	0,19 (0,02)	---	---
8	Viveiro	0,93 (0,02)	---	---
19	Campo	2,80 (0,13)	---	---
58	Campo	7,10 (0,86)	0,350 (0,03)	0,0962 (0,0185)
108	Campo	10,25 (0,99)	0,375 (0,04)	0,1104 (0,0213)

Valores entre parênteses representam o desvio padrão.

2.3. Mensuração das variáveis independentes antes do abate das plantas

A planta representativa das macaúbas de cada idade foi escolhida com base nos valores médios de altura total (3, 8 e 19 meses) e área seccional do estipe (58 e 108 meses) obtidos com as 20 plantas de cada idade previamente avaliadas (Tabela 2).

Cada planta representativa pré-selecionada foi avaliada quanto à altura total (m), diâmetro de copa (m), altura da folha viva mais baixa - AFVB (m), número total de folhas e número de folhas senescidas (Figura 1). A altura total das macaúbas (distância desde a base do estipe até a máxima curvatura da folha expandida mais alta) foi medida com régua graduada nas mudas e com vara telescópica no campo. O diâmetro de copa foi obtido com o emprego de uma trena graduada. A altura da folha viva mais baixa, que representa a distância entre a superfície do solo e a curvatura máxima da folha expandida mais baixa, foi determinada com uma trena graduada. Na muda de três meses não foi possível medir o diâmetro de copa, AFVB e número de folhas senescidas.

2.4. Abate das plantas e obtenção da massa seca total e carbono acumulado

Após as diferentes medições (Figura 1), cada macaúba representativa foi abatida, sendo a biomassa separada em folhas (folíolos, raque, pecíolo e bainha), estipe (compartimento localizado entre a superfície do solo e o meristema), cacho (frutos, raque do cacho, ráquulas e espatas) e raízes. A coleta de raízes em campo foi efetuada na área de projeção da copa das macaúbas até a profundidade máxima das raízes de 0,6; 1,0 e 1,4 m para as plantas de 19; 58 e 108 meses de cultivo, respectivamente (Moreira et al., 2019).

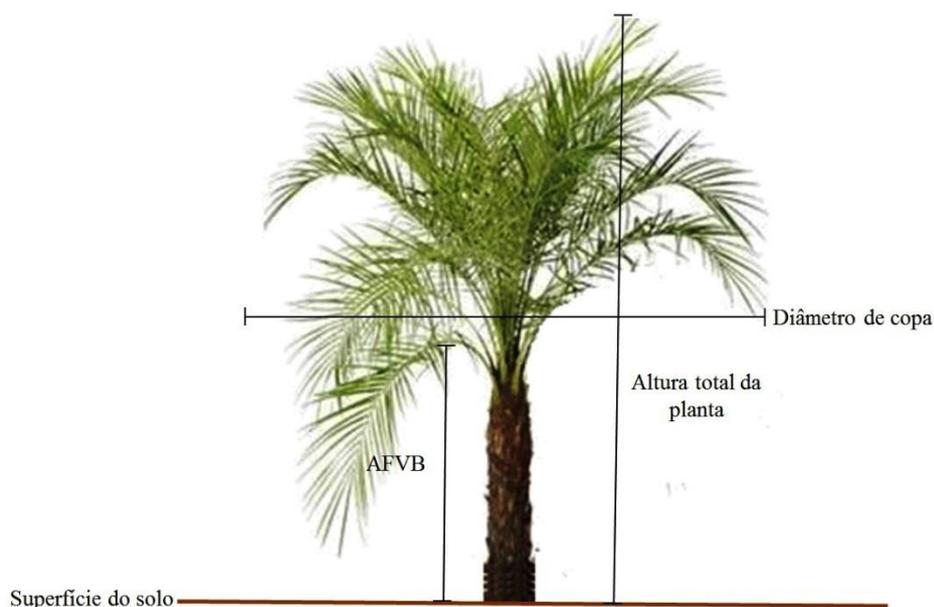


Figura 1. Medições das plantas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) em campo. (AFVB: altura da folha viva mais baixa).

Após a coleta e separação dos diferentes compartimentos, todo o material vegetal foi pesado em campo para a obtenção da massa fresca. Subamostras representativas e de massa conhecida foram enviadas ao laboratório para a obtenção da massa seca, que foi obtida após secagem em estufa de circulação forçada a temperatura de 65 °C até atingir peso constante. Para a determinação de umidade do estipe, subamostras foram coletadas em cinco seções: base e posição correspondente a 25 %, 50 %, 75 % e 100 % em relação à altura deste compartimento. Em cada uma dessas posições foram retirados discos transversais de 0,05 m de espessura, que foram pesados para a obtenção da massa da matéria fresca e, após secagem em estufa, da massa seca.

A massa da matéria seca de cada compartimento foi obtida pela equação: $MS = MF_{total} * 1 - \left(\frac{MFa - MSa}{MFa} \right)$, em que MS: massa seca de cada compartimento da planta; MF total: massa de matéria fresca total de cada compartimento da planta; MFa: massa da matéria fresca das subamostras de cada compartimento da planta; e MSa: massa seca das subamostras de cada compartimento da planta após secagem em estufa a 65°C. A massa seca total de cada indivíduo foi obtida pela soma dos valores de massa seca de cada compartimento amostrado.

O teor de carbono em cada compartimento das plantas de macaúba foi obtido pelo método de calcinação em mufla a 500 °C por três horas (SSSA, 1996). Para isso,

subamostras secas de cada compartimento das palmeiras foram previamente moídas e passadas em peneiras de 2 mm de malha.

O acúmulo de carbono em cada compartimento foi obtido multiplicando-se o teor de carbono pela massa seca da respectiva estrutura. Já o acúmulo total de carbono foi obtido pelo somatório dos valores de acúmulo de carbono em cada compartimento amostrado.

2.5. Ajuste do modelo alométrico

Para o ajuste do modelo alométrico do acúmulo de massa seca ou de carbono em plantas de macaúba foram consideradas individualmente as seguintes variáveis independentes: idade das plantas, altura total, diâmetro de copa, altura da folha viva mais baixa, número total de folhas em cada planta e número de folhas senescidas.

O modelo alométrico ajustado em função das variáveis independentes: idade das plantas, altura total, diâmetro de copa e número total de folhas foi o $y = \beta_0 x^{\beta_1} + \varepsilon$, em que: y = variável a ser estimada; β_i = parâmetros a serem estimados; x = variável independente; ε = erro aleatório, $\varepsilon \sim NID(0, \sigma^2)$. Esse modelo é considerado parcimonioso (Seasholtz e Kowalski, 1993) e atende a preferência por modelos alométricos mais simples. Para as variáveis; altura da folha viva mais baixa e número de folhas senescidas, foi ajustado um modelo linear simples. O ajuste dos modelos foi realizado utilizando o software Curve Expert Basic 1.4 (Hyams, 2010). A seleção da variável independente que melhor se relacionou com a massa seca e o carbono nas equações ajustadas foi realizada com base nos valores dos coeficientes de correlação (r) entre os valores de massa seca ou carbono observados (y) e estimados (\hat{y}), erro padrão de residual ($Sy.x$) e, principalmente na consistência entre valores observados e as curvas ajustadas.

3. Resultados e Discussão

3.1. Características gerais das macaúbas coletadas destrutivamente

Os valores de todas as variáveis mensuradas para cada planta estudada estão na [Tabela 3](#). As macaúbas apresentaram altura total de 0,2 a 10,3 m. A altura da folha viva mais baixa (AFVB), medida usualmente utilizada como variável independente na estimativa da biomassa de palmáceas (Asari et al., 2013; Kiyono et al., 2015), entre 0,3 a 5,5 m. O número total de folhas por planta foi de 4 para a muda de 8

meses, 17 para a planta com 19 meses, 37 na planta de 58 meses e 54 folhas na palmeira de 108 meses de idade, sendo que, desse total, 25,0%, 29,4%, 24,3% e 51,8% das folhas estavam senescidas, respectivamente. Esse aumento do número de folhas senescidas com o aumento da idade das plantas observado, pode ser explicado devido aos acessos de *Acrocomia aculeta* de Minas Gerais, apresentarem folhas indeiscentes, ou seja, as folhas permanecem aderidas a estipe da palmeira à medida que vão envelhecendo. O acúmulo de massa seca nas plantas variou de 0,00152 kg para a muda de três meses a 275,49 kg para a macaúba de 108 meses de idade. O acúmulo de carbono nas macaúbas foi de 0,00081 kg (3 meses), 0,094 kg (8 meses), 9,25 kg (19 meses), 64,34 kg (58 meses) e 154,07 kg (108 meses). O teor médio de carbono em cada planta variou de 53,24% (muda de 3 meses) a 55,93% (planta de 108 meses), coerente com o incremento do teor de carbono com o aumento da idade de cultivo das palmeiras.

Tabela 3. Características gerais das macaúbas de diferentes idades coletadas destrutivamente

	Variáveis obtidas nas plantas coletadas destrutivamente				
Idade (meses)	3	8	19	58	108
Altura total (m)	0,2	0,9	2,8	7,1	10,3
Diâmetro de copa (m)	na ⁽²⁾	0,7	4,0	5,4	6,3
AFVB ⁽³⁾ (m)	na ⁽²⁾	0,3	0,5	2,2	5,5
Nº total de folhas	2 ⁽¹⁾	4	17	37	54
Nº de folhas senescidas	na ⁽²⁾	1	5	9	28
Acúmulo de massa seca (kg)	0,00152	0,174	16,85	116,90	275,49
Acúmulo de carbono (kg)	0,00081	0,094	9,25	64,34	154,07
Teor médio de carbono (%)	53,24	54,02	54,90	55,04	55,93

(1) Número de eófilo; (2) não aplicável; (3) altura da folha viva mais baixa.

3.2. Equações alométricas para massa seca de macaúbas

As equações alométricas obtidas para estimar o acúmulo de massa seca para cada variável independente indicaram que os modelos representaram de forma eficiente à resposta da produção de massa seca em relação às variáveis analisadas (Figura 2). O comportamento das funções obtidas consegue descrever adequadamente a curva exponencial obtida para as variáveis; idade, altura total, diâmetro de copa e número total

de folhas, sendo que para a variável altura da folha viva mais baixa (Figura 2d) e número de folhas senescidas (Figura 2f), a relação foi linear.

De forma geral, todas as variáveis independentes testadas e obtidas em campo apresentaram bom desempenho nos modelos alométricos, com coeficientes de correlação variando de 0,981 a 0,999 e erro padrão residual entre 0,824 e 8,523. O menor desempenho ficou com a variável número de folhas senescidas (Figura 2f), que embora tenha apresentado $r = 0,981$, teve um erro padrão residual de 29,771. O uso da variável independente altura total, resultou em um bom ajuste, com coeficiente de correlação de 0,999 e erro padrão residual de 1,949 (Figura 2b). Essa variável pode ser considerada mais adequada para a estimativa da massa seca em macaúbas, visto ser uma variável de fácil medição em campo e sujeita a menos erros no momento de sua de mensuração.

A maioria dos estudos com espécies de palmeiras tem utilizado as variáveis altura total da planta, altura do estipe e diâmetro do caule para estimar a biomassa acima do solo em modelos alométricos, com melhores resultados sendo obtidos com uso de seus valores individuais ou combinados (Prayogo et al., 2018; Gehring et al., 2011; Goodman et al., 2013; Syafinie e Ainuddin, 2013; Silva et al., 2015; Cassol et al., 2016). O bom desempenho da variável altura total nesses estudos tem sido relacionado ao uso de palmáceas não juvenis, sendo recomendada a análise em separado de indivíduos jovens e adultos para melhorar o ajuste do modelo (Gehring et al., 2011). Entretanto, no presente estudo isto não foi um complicador, e a variável altura total apresentou bom desempenho individual ($r = 0,999$ e $S_{x,y} = 1,949$) (Figura 2b).

As equações alométricas disponíveis na literatura até então para palmeiras foram produzidas a partir de dados de espécies que não incluía a macaúba. Esses mesmos estudos foram conduzidos em povoamentos inequiâneos em áreas de ocorrência natural, ou seja, que não apresentavam padrão de idade. Nesses povoamentos, as relações entre as variáveis preditoras e a massa seca mudam muito entre as espécies. Goodman et al. (2013) indicam que, para a maior parte das espécies de palmeiras, a altura do estipe é a variável preditora de melhor desempenho, embora relatem que modelos que incluem apenas o diâmetro do estipe são adequados para *Euterpe precatória*, *Iriarteia deltoidea* e *Socratea exorrhiza*. Portanto, diferentes variáveis preditoras podem ser consideradas, sendo relevante estabelecer melhor a relação entre a variável predita e as preditoras, o que, no caso das macaúbas, é efetuado pela primeira vez no presente estudo.

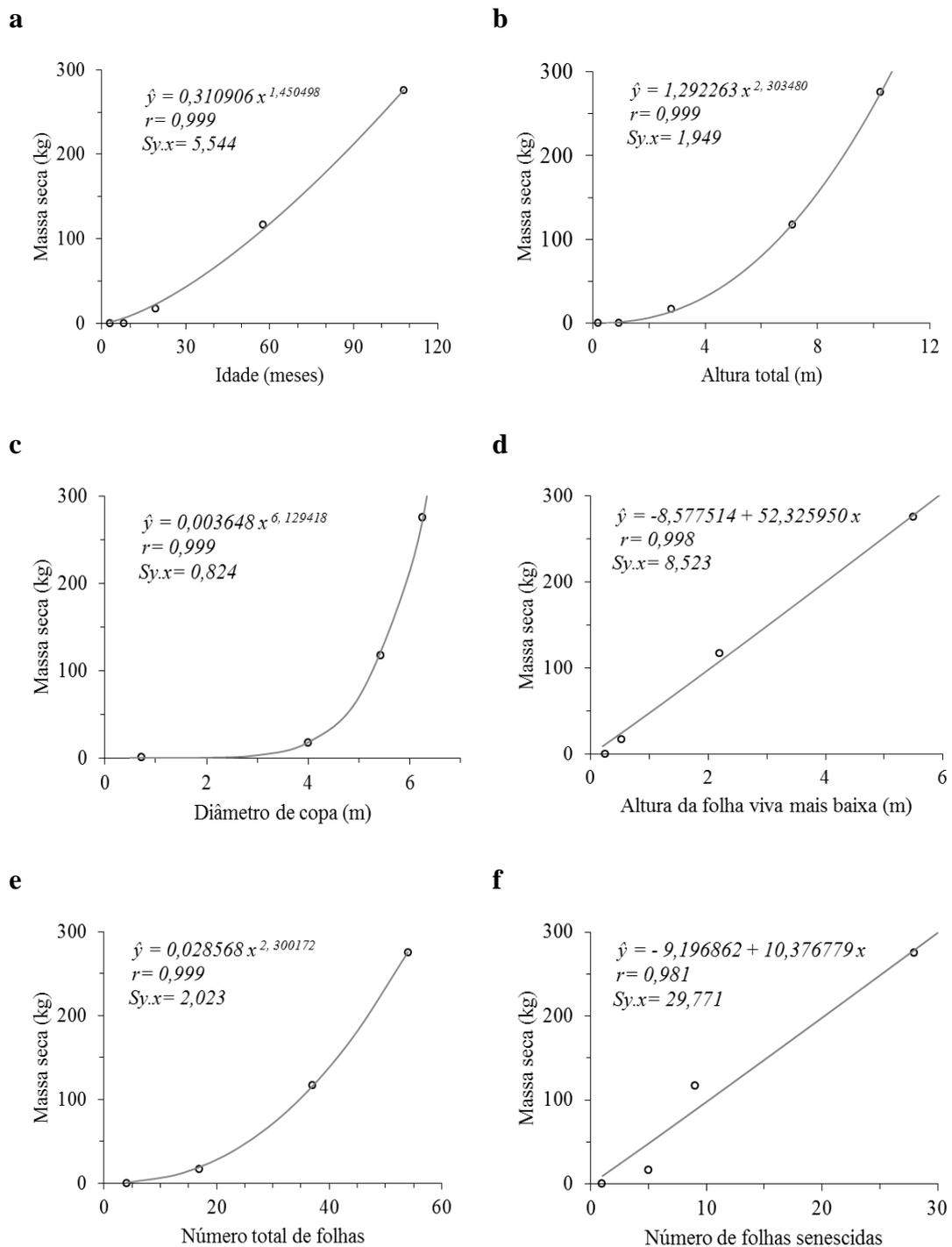


Figura 2. Produção de massa seca de macaúbas em resposta à idade, altura total, diâmetro de copa, altura da folha viva mais baixa, número total de folhas, e número de folhas senescidas. (r = coeficiente de correlação entre os valores de massa seca observados (y) e estimados (\hat{y}); $Sy.x$ = Erro padrão residual).

Os modelos obtidos com as variáveis independentes testadas revelam que o acúmulo de massa seca de macaúbas cultivadas (*Acrocomia aculeata*) pertencentes a acessos de Minas Gerais, pode ser estimado de forma confiável (Figura 2). No entanto, deve-se destacar que o uso da variável idade das plantas como preditora - considerada como sítio específica, torna o modelo válido apenas para as condições de solo e clima da área em que foi realizado o estudo. No caso das demais variáveis (altura total, diâmetro de copa, altura da folha viva mais baixa e número total de folhas) - que apresentam maior grau de universalidade, é permitida a extrapolação dos modelos, uma vez que as mesmas incorporam o efeito de crescimento das plantas, permitindo que a relação entre essas e o acúmulo de massa seca sejam utilizados em outras regiões. Das variáveis independentes avaliadas, o número de folhas senescidas foi de pior desempenho (Figura 2f), de forma que seu uso para estimar o acúmulo de massa seca em plantas de macaúba deve ser evitado.

3.3. Equações alométricas para o acúmulo de carbono de macaúbas

De forma semelhante aos resultados obtidos para a estimativa da massa seca, os modelos também se mostraram eficientes para estimar o acúmulo de carbono em plantas cultivadas de macaúba (Figura 3). Todas as funções obtidas a partir das variáveis independentes testadas conseguiram descrever adequadamente ($r = 0,999$) o crescimento exponencial do acúmulo de carbono, salvo para as variáveis altura da folha viva mais baixa (Figura 3d) e número de folhas senescidas (Figura 3f), que apresentaram relação linear.

Todas as variáveis testadas apresentaram bons ajustes, com destaque para a altura total (Figura 3b), que além do seu bom desempenho no modelo alométrico ($r = 0,999$ e $S_{x,y} = 1,211$), sua mensuração é menos trabalhosa e está sujeita a menores erros no momento de mensuração. As variáveis idade e número de folhas senescidas devem ser evitadas para estimar o acúmulo de carbono, visto a idade (Figura 3a) se restringir as condições de solo e clima da área em que foi realizado o estudo e o número de folhas senescidas (Figura 3f), apresentar erro residual elevado ($S_{y,x} = 16,587$).

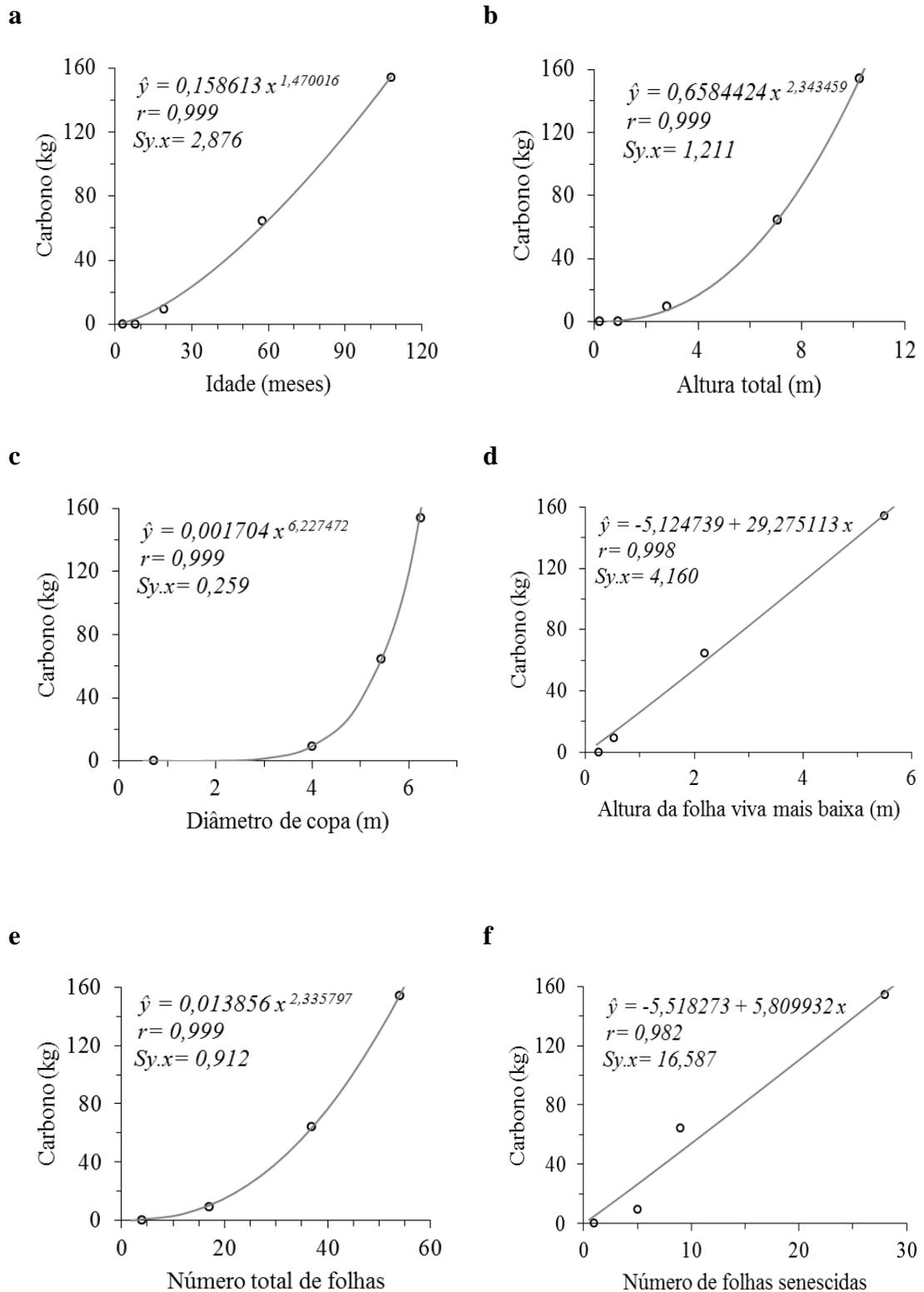


Figura 3. Acúmulo de carbono de macaúbas em resposta à idade, altura total, diâmetro de copa, altura da folha viva mais baixa, número total de folhas, e número de folhas senescentes. (r = coeficiente de correlação entre os valores de carbono observados (y) e estimados (\hat{y}); $Sy.x$ = Erro padrão residual).

O *dap* foi considerada a melhor variável independente (R^2 0,946 e $S_{y.x}$ 12,09) por [Miranda et al. \(2012\)](#) no modelo ($c=b_0+b_1dap+b_2dap^2hf$) para estimar o estoque individual de carbono em *Euterpe oleracea* Mart. Por sua vez, os modelos ajustados por [Miranda et al. \(2011\)](#) como de melhor desempenho para estimar o carbono em um conjunto de árvores de reflorestamento foram os que utilizaram variáveis combinadas de *dap*, idade e altura, atingindo-se um $R^2 = 0,957$ e $S_{y.x} = 31,19$. Variáveis combinadas também foram utilizadas por [Yulianti et al. \(2010\)](#) para estimar o estoque de carbono em cultivo de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.), sendo a equação de melhor ajuste ($R^2 = 0,99$) a que fez uso de valores de *dap* combinados com a altura total da planta.

Na literatura predominam modelos alométricos de predição de massa seca e carbono para palmáceas que consideram *dap* em *Euterpe oleracea* ([Miranda et al., 2012](#)), altura total e altura do estipe para *Attalea speciosa* C. ([Gehring et al., 2011](#)), altura total ([Khalid e Anderson, 1999](#)) ou a combinação de variáveis *dap* e altura total para *Elaeis Elaeis guineenses* Jacq. ([Yulianti et al., 2010](#)) e altura total ou combinação da altura total com o *dap* para *Areca catechu* L. ([Prayogo et al., 2018](#)). Como não existiam dados disponíveis para macaúbas cultivadas, o presente estudo partiu do princípio da importância da avaliação do uso de novas variáveis independentes para a estimativa do acúmulo de massa seca e carbono em plantas de macaúba. A partir dos resultados obtidos, o uso da variável diâmetro de copa e número total de folhas, também destacaram-se tanto na estimativa do acúmulo de massa seca ([Figuras 2c e 2e](#)) como de carbono ([Figuras 3c e 3e](#)).

A determinação do diâmetro de copa, apesar de ser de fácil mensuração no campo com o uso de uma trena, pode apresentar erros no momento das medições, porém devemos considerar outras formas de mensuração dessa variável, como a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e o uso de Drones, técnicas que podem agilizar o processo de medição e ser mais confiáveis. Desta forma, o uso da variável altura total é recomendado para a estimativa do acúmulo de massa seca e carbono de macaúbas, uma vez que é sujeita a menores fontes de erros no momento de mensuração do que a variável diâmetro de copa, e sendo a idade sítio específica; número total de folhas de mensuração nem sempre fácil; a altura da folha viva mais baixa e o número de folhas senescidas, podem apresentar erros elevados.

Outro destaque dos resultados obtidos foi possível graças à determinação do carbono nas diferentes estruturas vegetais da macaúba em laboratório. Trata-se do

percentual de carbono acumulado na biomassa dessa palmeira. A maior parte dos estudos considera um fator de conversão de 0,50, ou seja, partem do pressuposto de que 50 % da massa seca acumulada da planta é constituída por C (Brown et al., 1986; IPCC, 2003). Os dados obtidos indicam que o teor de C presente na massa seca das macaúbas varia com a idade ficando entre 53,24 % e 55,93%, correspondendo à planta mais jovem e mais adulta avaliadas, respectivamente (Tabela 4). Desta forma, a utilização do tradicional fator 0,50 subestima o acúmulo de carbono em macaúbas.

4. Conclusões

1. O modelo ($y = \beta_0 x^{\beta_1} + \varepsilon$) é o indicado para relacionar o acúmulo de massa seca e carbono em plantas de macaúba nos primeiros 108 meses de cultivo, sendo recomendada a preferência pelo uso da variável (x) altura total da planta nas equações: ($\hat{y} = 1,292263 x^{2,303480}$) para a estimativa do acúmulo de massa seca e ($\hat{y} = 0,6584424001704 x^{2,343459}$) para o acúmulo de carbono.
2. O teor médio de carbono presente na massa seca das macaúbas variou com o aumento da idade das palmeiras, passando de 53,24% na muda de 3 meses a 55,93% na palmeira de 108 meses no campo, valores esses que superam o fator de 0,50 tradicionalmente utilizado.

5. Referências

- Aholoukpè, H., Dubos, B., Flori, A., Deleporte, P., Amadji, G., Chotte, J.L., Blavet, D., 2013. Estimating aboveground biomass of oil palm: Allometric equation for estimating frond biomass. *Forest Ecology and Management*, 292, 122-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.11.027>
- Asari N., Suratman, M.N., Jaafar, J., Khalid, M.M., 2013. Estimation of aboveground bio-mass for oil palm plantations using allometric equations. In: 4th International Conference on Biology, Environment and Chemistry. Singapore, IPCBEE. [DOI: 10.7763/IPCBEE.2013.V58.22](https://doi.org/10.7763/IPCBEE.2013.V58.22)
- Brown, S., Lugo, A.E., Chapman, J., 1986. Biomass of tropical tree plantations and implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 390-394. <https://doi.org/10.1139/x86-067>
- Caldeira, M.V.W., 2003. Determinação de biomassa e nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista Montana em General Carneiro, Paraná. Tese - Universidade Federal do Paraná. 194.p.
- Cassol, H.L.G., Melo, L.C., Mendes, F.S., Fonseca, R., Saquetta, C.R., 2016. Redução de emissões de CO₂ pela produção de biocombustíveis a partir de óleo de dendê na Amazônia brasileira. *Floresta*, 46, 135-144. [DOI: 10.5380/rev.v46i1.41516](https://doi.org/10.5380/rev.v46i1.41516)
- Clement, C.R., Lleras Pérez, E., van Leeuwen, J., 2005. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. *Agrociencias*, 9, 67-71.
- Dias, H.C.T., Sato, A.Y., Neto, S.N.O., et al., 2011. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. *Inf. Agropec.* 32, 52-60.
- Diédhiou, I., Diallo, D., Mbengue, A.A., Hernandez, R.R., Bayala, R., Diémé, R., Diédhiou, P.M., Sène, A., 2017. Allometric equations and carbon stocks in tree biomass of *Jatropha curcas* L. in Senegal's Peanut Basin. *Global Ecology and Conservation*, 9, 61-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2016.11.007>
- Dransfield, J., Uhl, N.W., Asmussen, C.B., Baker, W.J., Harley, M.M., Lewis, C.E., 2008. *Genera Palmarum: the evolution and classification of palms*. Richmond, UK: Royal Botanic Gardens, Kew. 732p.
- Eiserhardt, W.L., Svenning, J.C., Kissling, W.D., Balslev, H., 2011. Geographical ecology of the palms (*Arecaceae*): determinants of diversity and distributions across spatial scales. *Ann. Bot.* 108, 1391-1416. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr146>
- Faustino, C.L., Paula, H.H., 2014. Dispersão de frutos de palmeiras em duas tipologias vegetais na Amazônia Sul-Occidental. *Advances in Forestry Science*, 1, 35-38. <http://www.periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/1274>
- Ferreira, E.A.B., Sá, M.A.C., Junio-Santos, D.G., et al., 2013. Estimativa de sequestro de carbono numa população espontânea de palmeiras macaúba. *Anais, 8º Congresso internacional de bioenergia São Paulo – SP*. 6p. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113290/1/189-EloisaFerreira-137.pdf>
- Gehring, C., Zelarayán, M.L.C., Almeida, R.B., Morais, F.H.R., 2011. Allometry of the babassu palm growing on a slash-and-brun agroecosystem of the eastern periphery of Amazonia. *Acta Amazonica*, 41, 127-134. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672011000100015>
- Goodman, R.C., Phillips, O.L., del Castillo, Torres D., Freitas, L., Cortese, S.T., Monteagudo, A., Baker, T.R., 2013. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, 310, 994-1004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>

- Higuchi N, Carvalho, A.J.R., 1994. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Anais do Seminário de Emissão x Sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil. Rio de Janeiro: CVRD, 125-145.
- Hyams, D.G., 2010. CurveExpert software, version 1.4. Available at: <http://www.curveexpert.net>.
- IPCC. The Intergovernmental Panel on Climate Change., 2003. *Good Practice Guidance for Land-Use Change and Forestry*. Geneva. Disponível em < https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf> Acesso em: 09/01/2019.
- Khasanah, N., van Noordwijk, M., Ningsih, H., 2015. Aboveground carbon stocks in oil palm plantations and the threshold for carbon-neutral vegetation conversion on mineral soils. *Cogent Environmental Science*, 1, 1119964. <http://doi.org/10.1080/23311843.2015.1119964>
- Khalid, H.Z.ZZ and Anderson, J.M ., 1999. Quantification of oil palm biomass and nutrient value in a mature plantation; above-ground biomass. *Journal of Oil Palm Research*. 2, 23 -32.
- Kiyono, Y., Monda, Y., Toriyama, J., et al., 2015. Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bulletin of FFPRI*. 14, 147 – 158. <https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/436/documents/436-4.pdf>
- Lorenzi, H., 1996. *Palmeiras no Brasil: nativas e exóticas*. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 303p.
- Miranda, D.L.C., Melo, A.C.G., Saquetta, C.R., 2011. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamento de restauração. *Revista Árvore*, 35, 679-689. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000400012>
- Miranda, D.L.C., Saquetta, C.R., Costa, L.G.S., Corte, A.P.D., 2012. Biomassa e carbono em *Euterpe oleracea* Mart., na ilha do Marajó-PA. *Floresta e Ambiente*, 19, 336-343. <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2012.039>
- Mohamed, M.B.N., Rao, G.R., Keerthika, A., Gupta, D.K., Shukla, A.K., 2018. Allometric Relationships for Biomass and Carbon Estimation of Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) Plantations in Dryland of Hyderabad, Telangana. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*, 9, 037-043. <http://DOI.ORG/10.23910/IJBSM/2018.9.1.3C0526a>
- Moreira, S.L.S., Imbuzeiro, M.H.A., Dietrich, O.H.S., Henriques, E., Flores, M.E.P., Pimentel, L.D., Fernandes, R.B.A., 2019. Root distribution of cultivates macauba tress. *Industrial Crops and Products*. 137, 646-651. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.064>
- Mota, C.S., Corrêa, T.R., Grossi, J.A.S., Castricini, A., Ribeiro, A.S., 2011. Exploração sustentável da macaúba para a produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. *Inf. Agropec*. 32, 41-51.
- Motoike, S.Y., Carvalho, M., Pimentel, L.D., Kuki, K.N., Paes, J.M.V., Dias, H.C.T., Sato, A.Y., 2013. *A Cultura da Macaúba- implantação e manejo de cultivos racionais*. 1 ed, Editora UFV, Viçosa, MG, 61p.
- Pimentel, L.D., Bruckner, C.H., Martinez, H.E.P., et al., 2011. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. *Inf. Agropec*, 32, 20-30.
- Prayogo, C., Sari, R.R., Asmara, D.H., Rahayu, S., Hairiah, K., 2018. Allometric Equation for Pinang (*Areca catechu*) Biomassa and C Stocks. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 40, 381-389. DOI: <http://doi.org/10.17503/agrivita.v40i3.1124>

- Rao, G.R., Raju, B.M.K., Reddy, P.S., Kumar, P.S., 2017. Developing Allometric Equations for Prediction of Total Standing Biomass of *Pongamia pinnata* L.: an important Biodiesel Plant. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 76, 320-324. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/41595>
- Ratuchne, L.C., Koehler, H.S., Watzlawick, L.F., Sanquetta, C.R., Schamme, P.A., Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais., 2016. *Floresta e Ambiente*, 23, 450-462. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.131515>
- Rueda, R.A.P., 2014. Avaliação de germoplasma para melhoramento e a conservação da macaúba. Tese, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 58p.
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Ruffin, K., Hergoualc'h, K., Verchot, L., 2013. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.013>
- Salomão, R.P., Nepstad, D.C., VIEIRA, I.C.G., 1996. Como a biomassa de florestas tropicais influi no efeito estufa? *Ciência Hoje*, 21, 38-47.
- Seasholtz, M.B., & Kowalski, B. 1993. The parsimony principle applied to multivariate calibration. *Analytica Chimica Acta*, 277(2), 165-177. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(93\)80430-S](https://doi.org/10.1016/0003-2670(93)80430-S)
- Silva, F., Rempei, S., Takuya, K., Moriyoshi, I., Niro, H., Norbert, K., 2015. Allometric equations for estimating biomass of *Euterpe precatória*, the most abundant palm species in the Amazon. *Forests*, 6, 450-463. [doi:10.3390/f6020450](https://doi.org/10.3390/f6020450)
- Silveira, P., Koehler, H.S., Sanquetta, C.R., Arce, J. E., 2008. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. *Floresta*, 38, 185-206. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rev.v38i1.11038>
- Souza, J.N., Ribeiro, L.M., Simões, M.O.M., 2017. Ontogenesis and functions of saxophone stem in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). *Annals of Botany*, 119, 353-365. [doi:10.1093/aob/mcw215](https://doi.org/10.1093/aob/mcw215)
- SSSA., 1996. Book: *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*, SSSA Book Series 5.3.
- Syafinie, A.M and Ainuddin, A.N., 2013. Biomass and carbon estimation of *Eugeissona tristis*. *Sains Malaysiana*, 42, 1461-1466.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 573p.
- Tolêdo, D.P., 2010. Avaliação técnica, econômica e ambiental de macaúba e de pinhão-manso como alternativa de agregação de renda na cadeia produtiva de biodiesel. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 105p.
- Yulianti, N., Sabiham, S., Ardiansyah, M., Murtilaksono, K., Sutarta, E.S., Darmosarkoro, W., 2010. Allometric equation of oil palm: an estimation approach of biomass carbon stock in tropical peatland. In *International Symposium and Workshop on tropical Peatland Management*, Palangkaraya, Indonesia, 159-162.

III. CONCLUSÕES GERAIS

1. O cultivo da palmeira macaúba apresenta grande capacidade de sequestro e estocagem de carbono na biomassa abaixo e acima do solo, com potencial de geração de 226,17 t CO₂e.ha⁻¹ brutos aos nove anos de cultivo.
2. As raízes da macaúba na fase de viveiro e nos anos iniciais em campo concentram-se na direção da região tuberosa do caule saxofone e a profundidade efetiva das raízes aumenta à medida que a planta envelhece. A distância efetiva das raízes em relação ao estipe coincide com a área de projeção da copa da palmeira macaúba.
3. O acúmulo de massa seca e carbono em macaúbas (*Acrocomia aculeta*) pertencentes a acessos de Minas Gerais podem ser estimados a partir de dados de altura total (m) em macaúbas com até nove anos de cultivo nas equações alométricas ($\hat{y} = 1,292263 x^{2,303480}$) para massa seca e ($\hat{y} = 0,6584424001704 x^{2,343459}$) para o acúmulo de carbono.