

OTTO HERBERT SCHUHMACHER DIETRICH

**NUTRIÇÃO MINERAL DA CULTURA DA MACAÚBA: CURVA DE CRESCIMENTO
E SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES**

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

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel

Coorientadores: Júlio César Lima Neves
Hermínia Emília Prieto Martinez

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

D566n
2022

Dietrich, Otto Herbert Schuhmacher, 1988-

Nutrição mineral da cultura da macaúba: curva de crescimento e sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes / Otto Herbert Schuhmacher Dietrich. – Viçosa, MG, 2022.

1 tese eletrônica (133 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Agronomia, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.404>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Adubação verde. 2. Macaúba - Nutrição. 3. Nitrogênio. 4. Potássio. 5. Calagem dos solos. 6. Biomassa vegetal. I. Pimentel, Leonardo Duarte, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 631.874

OTTO HERBERT SCHUHMACHER DIETRICH

**NUTRIÇÃO MINERAL DA CULTURA DA MACAÚBA: CURVA DE CRESCIMENTO
E SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES**

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

APROVADA: 13 de dezembro de 2022.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 OTTO HERBERT SCHUHMACHER DIETRICH
Data: 03/07/2023 09:56:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Otto Herbert Schuhmacher Dietrich
Autor

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DUARTE PIMENTEL
Data: 03/07/2023 13:42:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo Duarte Pimentel
Orientador

*Aos meus pais Arno e Ruth Dietrich,
ao meu irmão Walter Dietrich,
à minha esposa Márcia Adriana,
e aos meus filhos Oliver e Hannah Dietrich.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por todo o caminho que me tem conduzido.

À minha família por todo o apoio que sempre me proporcionaram.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Agronomia pela estrutura e oportunidade do curso de doutorado.

Ao professor Leonardo Duarte Pimentel pela orientação, apoio, exemplo profissional e amizade.

Aos professores Júlio César Lima Neves e Herminia Emilia Prieto Martinez pela compreensão e coorientação.

Aos chefes e colegas de trabalho do Instituto Federal do Espírito Santo.

À Acrotech Sementes e Reflorestamento pelo apoio técnico e financeiro.

Ao Sandro pelo grande apoio e amizade.

Aos colegas dos grupos de pesquisa REMAPE e Sorgo, pela colaboração nos trabalhos e compartilhamento de conhecimentos.

Aos funcionários da Estação Experimental de Araponga-MG, pela valiosa ajuda nas atividades de campo.

Aos funcionários do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas e Pós-colheita da Macaúba pela ajuda nas análises químicas.

E a todos que de certa forma colaboraram para a obtenção do título de doutor pelo Programa de Pós-graduação em Fitotecnia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Tudo posso naquele que me fortalece.”
(Filipenses 4.13)

RESUMO

DIETRICH, Otto Herbert Schuhmacher Dietrich, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2022. **Nutrição mineral da cultura da macaúba: curva de crescimento e sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes.** Orientador: Leonardo Duarte Pimentel. Coorientadores: Júlio César Lima Neves e Herminia Emilia Prieto Martinez.

A macaúba é uma palmeira de grande potencial produtivo de óleo, bem como de matéria-prima sustentável para diversos setores industriais. Entretanto, o cultivo racional dessa espécie é recente e muitos fatores agronômicos e tratos culturais encontram-se em fase de estudo e desenvolvimento. Embora a macaúba apresente características de rusticidade e adaptabilidade a áreas com condições adversas de solo e clima, estudos tem demonstrado ser uma cultura responsiva a adubações e de elevadas exigências nutricionais. Assim, contribuindo para a estimativa da demanda nutricional, para o aprimoramento do manejo nutricional e para ajustes na recomendação de adubação para a cultura da macaúba com forte embasamento conceitual e de modo que permita constantes atualizações, conduziu-se três estudos inovadores com objetivos de: avaliar a biomassa seca, o conteúdo e a eficiência de utilização dos nutrientes nos diferentes compartimentos da macaúba ao longo do ciclo de crescimento da cultura; avaliar o efeito temporal de doses de N e K em macaúbas adultas em plena produção e; desenvolver um modelo de recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba com base no balanço nutricional da cultura (FERTICALC-Macaúba). Para o primeiro estudo foram abatidas cinco macaúbas de 3 e 8 meses, 2,1; 5,3 e 9,5 anos, individualizando os compartimentos (copa, estipe, caule saxofone, raiz, cachos e frutos) para determinação da biomassa seca, dos teores, dos conteúdos de nutrientes e do coeficiente de utilização biológico. O acúmulo máximo estimado de biomassa seca foi de 378,52 kg/planta, sendo 50 % e 80 % atingidos aos 7 e 10,6 anos, respectivamente. Houve um incremento no conteúdo dos nutrientes ao longo de ciclo do crescimento da macaúba. Em geral, os teores e os conteúdos dos nutrientes apresentaram padrão de tendências similares, com $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn$. A macaúba possui altos valores de acúmulo de biomassa seca e de conteúdo de nutrientes, demonstrando ser uma cultura de elevada exigência nutricional. No segundo estudo, um experimento foi

conduzido em esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas constituídas de cinco doses anuais de N+K (0, 375, 750, 1.125 e 1.500 g/planta de N+K) e as subparcelas de três anos de avaliação (8º, 9º e 10º ano). A máxima produtividade foi de 40,19 kg/planta com a dose de 1.083,72 g/planta de N+K no 10º ano. A dose média para máxima eficiência econômica foi de 706,74 kg/planta de N+K. Plantas adultas de macaúba em plena produção são responsivas à adubação nitrogenada e potássica. Recomenda-se adubações anuais de $\cong 300$ g/planta de N e $\cong 500$ g/planta de K₂O para obtenção de máxima eficiência econômica na produtividade de frutos de macaúbas adultas em plena produção. E no terceiro estudo, desenvolveu-se o sistema FERTICALC-Macaúba, uma nova alternativa para a recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba baseado em modelagem e no balanço nutricional da cultura desenvolvido com forte embasamento conceitual. O FERTICALC-Macaúba estimou a demanda e o requerimento de nutrientes pela cultura em função do acúmulo de nutrientes na biomassa da macaúba e da produtividade de frutos, bem como o suprimento de nutrientes pelo solo explorado pelas raízes absorventes nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, pela matéria orgânica do solo e pelos resíduos vegetais da cultura. Ao final dos estudos, chegou-se à uma recomendação de adubação baseada na combinação de ensaios de adubação em campo e o modelo de balanço nutricional da cultura da macaúba (FERTICALC-Macaúba) com forte embasamento científico e de modo que permita constantes atualizações.

Palavras-chave: Dissertação. *Acrocomia aculeata*. Demanda de nutrientes. Adubação N+K. Balanço nutricional.

ABSTRACT

DIETRICH, Otto Herbert Schuhmacher Dietrich, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2022. **Mineral nutrition of macaw-palm culture: growth curve and corrective and fertilizer recommendation system.** Advisor: Leonardo Duarte Pimentel. Co-advisers: Júlio César Lima Neves and Herminia Emilia Prieto Martinez.

Macaw-palm is a palm tree with great oil production potential, as well as a sustainable raw material for various industrial sectors. However, the rational cultivation of this species is recent and many agronomic factors and cultural treatments are in the study and development phase. Although macaw-palm has characteristics of rusticity and adaptability to areas with adverse soil and climate conditions, studies have shown that it is a crop responsive to fertilization and high nutritional requirements. Thus, contributing to the estimation of nutritional demand, to the improvement of nutritional management and to adjustments in the fertilizer recommendation for the macaw-palm crop with a strong conceptual basis and in a way that allows constant updates, three innovative studies were conducted with the objectives of: evaluate the dry biomass, content and efficiency of use of nutrients in the different compartments of macaw palm throughout the crop's growth cycle; to evaluate the temporal effect of doses of N and K in adult macaw-palms in full production and; to develop a model for recommending liming and fertilization for the macaw-palm crop based on the crop's nutritional balance (FERTICALC-Macaw-palm). For the first study, five macaw palms aged 3 and 8 months were slaughtered, 2,1; 5.3 and 9.5 years, individualizing the compartments (top, stipe, saxophone stem, root, bunches and fruits) for determination of dry biomass, levels, nutrient contents and coefficient of biological utilization. The estimated maximum accumulation of dry biomass was 378.52 kg plant⁻¹, with 50% and 80% reached at 7 and 10.6 years, respectively. There was an increase in nutrient content throughout the macaw-palm growth cycle. In general, nutrient levels and contents showed a similar pattern of trends, with K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn. Macaw-palm has high values of dry biomass accumulation and nutrient content, proving to be a crop with high nutritional requirements. In the second study, an experiment was conducted in a split-plot design, with the plots consisting of five annual doses of N+K (0, 375, 750, 1,125 and 1,500 g plant⁻¹ of N+K) and the subplots of three evaluation years (8th, 9th and 10th year). The maximum productivity was 40.19 kg plant⁻¹ with a dose of 1,083.72 g plant⁻¹ of N+K in the 10th year. The average dose

for maximum economic efficiency was 706.74 kg plant⁻¹ of N+K. Adult macaw-palm plants in full production are responsive to nitrogen and potassium fertilization. Annual fertilizations of $\cong 300$ g plant⁻¹ of N and $\cong 500$ g plant⁻¹ of K₂O are recommended to obtain maximum economic efficiency in the productivity of adult macaw-palm fruits in full production. And in the third study, the FERTICALC-Macaw-palm system was developed, a new alternative for recommending liming and fertilization for the macaw-palm crop based on modeling and on the nutritional balance of the crop developed with a strong conceptual basis. FERTICALC-Macaw-palm estimated the demand and requirement for nutrients by the crop as a function of the accumulation of nutrients in the macaw-palm biomass and fruit productivity, as well as the supply of nutrients by the soil exploited by the absorbent roots in the layers of 0 – 20 cm and 20 – 40 cm, by soil organic matter and plant residues from the crop. At the end of the studies, a fertilizer recommendation was reached based on the combination of field fertilization trials and the nutritional balance model of the macaúba crop (FERTICALC-Macaw-palm) with a strong conceptual basis and in a way that allows constant updates.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. Nutrient demand. N+K fertilization. Nutritional balance.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CAPÍTULO 1 - BIOMASSA, CONTEÚDO E EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NUTRIENTES AO LONGO DO CICLO DE CRESCIMENTO DE MACAÚBAS CULTIVADAS	18
1. INTRODUÇÃO.....	21
2. MATERIAL E MÉTODOS	23
2.1. Caracterização da área do estudo	23
2.2. Seleção e abate das macaúbas	23
2.3. Acúmulo de biomassa seca	25
2.4. Acúmulo de nutrientes	26
2.5. Eficiência de utilização de nutrientes	27
2.6. Análise estatística	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1. Acúmulo de biomassa seca	28
3.2. Acúmulo de nutrientes	34
3.2.1. Teores de nutrientes.....	34
3.2.2. Acúmulo de macronutrientes.....	37
3.2.3. Acúmulo de micronutrientes	50
3.3. Eficiência de utilização de nutrientes	54
4. CONCLUSÕES.....	57
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
CAPÍTULO 2 - EFEITO DE DOSES DE NITROGÊNIO E POTÁSSIO EM PLANTAS ADULTAS DE MACAÚBA EM PLENA PRODUÇÃO	63
1. INTRODUÇÃO.....	66
2. MATERIAL E MÉTODOS	68
2.1. Caracterização da área do estudo	68
2.2. Histórico do experimento	68
2.3. Delineamento e condução do experimento.....	68
2.4. Características avaliadas	69
2.5. Análise das doses de N e K associadas à produtividade da cultura	71
2.6. Análise estatística	71
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
3.1. Características vegetativas	74

3.2.	Características produtivas.....	77
3.3.	Teores foliares	80
3.5.	Análise das doses de N e K associadas à produtividade da cultura	82
4.	CONCLUSÕES.....	84
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
CAPITULO 3 - SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES PARA A CULTURA DA MACAÚBA COM BASE NO BALANÇO NUTRICIONAL (FERTICALC-Macaúba).....		88
1.	INTRODUÇÃO.....	91
2.	SISTEMA FERTICALC	93
3.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FERTICALC-MACAÚBA	96
3.1.	Subsistema Requerimento.....	96
3.1.1.	Demanda de nutrientes pela biomassa da macaúba	97
3.1.2.	Demanda de nutrientes pela produção de frutos da macaúba	101
3.1.3.	Requerimento total de nutrientes pela macaúba	102
3.2.	Subsistema Suprimento	105
3.2.1.	Recomendação de calagem.....	105
3.2.2.	Recomendação de gessagem.....	109
3.2.3.	Nutrientes supridos pelo solo	110
3.2.4.	Nutrientes supridos pelos resíduos vegetais da cultura	116
4.	SIMULAÇÃO DE USO DO SISTEMA FERTICALC-MACAÚBA	122
4.1.	Subsistema Requerimento.....	122
4.2.	Subsistema Suprimento	124
4.2.1.	Recomendação de calagem.....	124
4.2.2.	Recomendação de gessagem.....	125
4.2.3.	Nutrientes supridos pelo solo e pelos resíduos vegetais da cultura	125
4.3.	Balanço nutricional.....	126
5.	CONCLUSÕES.....	128
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
CONSIDERAÇÕES FINAIS		133

INTRODUÇÃO GERAL

No cenário agrícola mundial o cultivo de oleaginosas possui destaque e vem sendo alavancado pela contínua busca por fontes energéticas limpas e sustentáveis. Essa busca por fontes alternativas de energia mostrou-se ainda mais necessária diante da crise energética global que inclusive ameaça a retomada econômica pós-pandemia. Porém, prioriza-se culturas agroenergéticas que não entrem em conflito com a produção de alimentos, devido ao constante crescimento da população e consequentemente, ao aumento na demanda por alimentos no mundo.

O interesse pela diversificação dessas culturas agroenergéticas gerou oportunidades para cultivo de espécies ainda não domesticadas, como a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.).

A macaúba é uma palmeira oleífera de porte arbóreo pertencente à família Arecaceae, nativa das regiões tropicais do continente americano e considerada a palmeira de maior dispersão no território brasileiro, com ocorrência natural em quatro biomas (Cerrado, Mata Atlântica, Floresta Amazônica e Pantanal) (HENDERSON et al., 1995; DRANSFIELD et al., 2008; MOTOIKE et al., 2013; LIMA et al., 2018).

O elevado potencial para exploração no setor de biocombustíveis e no setor energético em geral (MOTOIKE e KUKI, 2009; LANES et al., 2014; COLOMBO et al., 2018; BIESDORF, 2021) foi o que primeiramente despertou o interesse pela espécie. Porém, a macaúba também tem se mostrado uma promissora fonte de matéria-prima para diversos outros setores industriais (EVARISTO et al., 2016; JOSÉ et al., 2016).

Além do elevado potencial produtivo, a macaúba apresenta características relevantes para uma espécie a ser cultivada, como rusticidade, adaptabilidade a diversos ambientes (MOTTA et al., 2002; TELES et al., 2011; COLOMBO et al., 2017) e capacidade de ocupar áreas marginais, desse modo, agregando diversos benefícios ambientais potenciais, como recuperação pastagens degradadas (FAVARO e MIRANDA, 2013), possibilidade de cultivo em sistemas agrossilvopastoris (DIAS et al., 2011; VIANA et al., 2011; CARDOSO et al., 2017; MOREIRA et al., 2018) e sequestro de carbono (MOTA et al., 2011, MOREIRA et al., 2020), justificando assim ser uma promissora fonte de matéria-prima sustentável.

Embora a macaúba apresente estas características de rusticidade e adaptabilidade a áreas com condições adversas de solo e clima, a ocorrência natural da macaúba em solos eutróficos (MOTTA et al., 2002; TELES et al., 2011) indica

significativas demandas nutricionais pela planta. Em experimentos com macaúbas cultivadas, a planta tem se mostrado responsiva à adubação nas fases de muda, crescimento inicial e início da fase reprodutiva, em especial à adubação nitrogenada e potássica (PIMENTEL et al., 2015; PIMENTEL et al., 2016; SANTOS, 2015; DIETRICH, 2017).

A viabilização do cultivo da macaúba em escala agrícola competitiva tem motivado diversos estudos nas áreas de melhoramento genético (MANFIO et al., 2011; MANFIO et al., 2012), propagação (MOTOIKE et al., 2007), produção de mudas (PIMENTEL et al., 2016), colheita, pós-colheita e processamento (MOTA et al., 2011; GOULART, 2014; EVARISTO et al., 2016; JOSÉ et al., 2016) e, desenvolvimento de sistemas de produção e práticas culturais (VIANA et al., 2011; PIMENTEL et al., 2011).

Dentre as práticas culturais fundamentais para consolidação e sucesso de uma cultura agrícola destaca-se o manejo da adubação. A atual recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba, proposta por Pimentel et al. (2011), mostra-se bem embasada, contudo, o manejo nutricional das culturas agrícolas demanda constantes ajustes e atualizações.

Porém, um correto manejo nutricional para a cultura da macaúba além de visar aplicação de fertilizantes para o melhor desenvolvimento da cultura e obtenção de elevadas produtividades de frutos, também deve buscar eficiência econômica no uso dos fertilizantes, ainda mais diante do atual cenário de elevados custos dos mesmos.

Assim, contribuindo para a estimativa de demanda nutricional, para o aprimoramento do manejo nutricional e para ajustes na recomendação de adubação para a cultura da macaúba com forte embasamento conceitual e de modo que permita constantes atualizações, se propôs o desenvolvimento de três estudos inovadores.

No primeiro estudo foram abatidas cinco plantas de macaúbas de 3 e 8 meses, 2,1; 5,3 e 9,5 anos, individualizando-se os compartimentos (copa, estipe, caule saxofone, raiz, cachos e frutos) com o objetivo de avaliar a biomassa seca, o conteúdo e a eficiência de utilização dos nutrientes nos diferentes compartimentos da planta ao longo do ciclo de crescimento da cultura.

No segundo estudo, um experimento foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas constituídas de cinco doses anuais de N+K (0, 375, 750, 1.125 e 1.500 g/planta de N+K) e as subparcelas de três anos de avaliação (8º, 9º e 10º ano) com o objetivo de avaliar o efeito temporal de doses de N e K em macaúbas adultas em plena produção.

E no terceiro estudo, desenvolveu-se o sistema FERTICALC-Macaúba, uma nova alternativa para a recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba baseado em modelagem e no balanço nutricional da cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIESDORF, E. M. **Caracterização e aproveitamento de biomassa foliar senescida de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021. 90 p.

CARDOSO, A., LAVIOLA, B. G., SANTOS, G. S., DE SOUSA, H. U., DE OLIVEIRA, H. B., VERAS, L. C.; FAVARO, S. P. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry , p. systems. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 573-580, 2017.

COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C.; DIAZ, B. G.; FERRARI, R. A. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. OCL, v. 25, n. 1, p. D108, 2018.

DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y.; OLIVEIRA NETO, S. N.; MORAIS, T. C.; FREIRE, -A.; BENTO, S. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 52-60, 2011.

DIETRICH, O.H. S. **Época de amostragem foliar e efeito de doses de nitrogênio e potássio em plantas adultas de macaúba**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017. 79 p.

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., GROSSI, J. A. S., CARNEIRO, A. D. C. O., PIMENTEL, L. D., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v.85, p.18-24, 2016.

FAVARO, S. P.; MIRANDA, C. H. B. Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria. Embrapa Agroenergia, Documentos 14, p. 38, 2013

GOULART, S.M. **Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2014. 66 p.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. **Field guide to the palms of the Americas**. 1995.

JOSÉ, C., EVARISTO, A. B., MARQUES, G., MARTÍN-RAMOS, P., MARTÍN-GIL, J., GUTIÉRREZ, A. Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 294-304, 2016.

LANES, E. C. M.; COSTA, P. M. A.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, v. 511, n. 7507, p. 31-31, 2014.

LIMA, N. E.; CARVALHO, A. A.; MEEROW, A. W.; MANFRIN, M. H. A review of the palm genus *Acrocomia*: neotropical green gold. *Org Divers Evol* 18(2):151–161. 2018

MANFIO, C. E.; RESENDE, M.D.V.; SANTOS, C.E.M.; MOTIKE, S. Y.; LANZA, M. A.; PAES, J. M. V. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 32-40, 2011.

MANFIO, E. C.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M. D. V.; SANTOS, C. E. M.; SATO, A. Y. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 63-69, 2012.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S.; PIMENTEL, PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal Of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020.

MOREIRA, S.L.S.; PIRES, C.V.; MARCATTI, G.E.; SANTOS, R.H.S.; IMBUZEIRO, H.M.A; FERNANDES, R.B.A. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agric. For. Meteorol.** 256–257, 379–390, 2018.

MOTOIKE, S. Y.; LOPES, F. A.; SÁ JUNIOR, A. Q.; CARVALHO, M.; OLIVEIRA, M. A. R. Processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *Acrocomia*. **Patente: PI0703180-7**. 2007.

MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. The Potential of Macaw Palm (*Acrocomia aculeate*) as Source of Biodiesel in Brazil. **International Review of Chemical Engineering**, v. 1, n. 6, p. 632-635, 2009.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba**: implantação e manejo de cultivos racionais. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 61 p.

MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S., CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita

e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 41-51, 2011.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p. 1023-1031, 2002.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSO NETO, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 20-30, 2011.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C.H. ; MARTINEZ, H. E. P.; MOTOIKE, S. Y.; MANFIO, E. C.; SANTOS, RC. Effect of Nitrogen and Potassium Rates on Early Development of Macaw Palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1671-1680, 2015.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MANFIO, E. C.; ; MOTOIKE, S. Y.; MARTINEZ, H. E. P. Substrate, lime, phosphorus and topdress fertilization in macaw palm seedling production. **Revista Árvore**, v. 40, p. 235-244, 2016.

SANTOS, R. C. **Aspectos nutricionais e resposta da macaúba a adubação com nitrogênio e potássio**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015. 85 p.

TELES, H. F.; PIRES, L. L.; GARCIA, J.; ROSA, J. Q. S.; FARIAS, J. G.; NAVES, R.V. Ambientes de ocorrência natural de macaúba. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v, 41, n. 4, p. 595-601, 2011.

VIANA, M C. M.; SILVA, E.A.; QUEIROZ, D. S.; PAES, M. V.; ALBERNAZ, W. M.; FRAGA, G. Cultivo da macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 70-80, 2011.

CAPÍTULO 1:

BIOMASSA, CONTEÚDO E EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NUTRIENTES AO LONGO DO CICLO DE CRESCIMENTO DE MACAÚBAS CULTIVADAS

Resumo

A macaúba é uma cultura de grande potencial produtivo de óleo, bem como de matéria-prima para vários outros setores industriais. Diversos estudos têm agregado conhecimentos ao manejo desta cultura, contudo, muitos aspectos para ajustes na recomendação de adubação ainda carecem de informações. Assim, contribuindo para a estimativa de demanda nutricional da macaúba, este trabalho teve como objetivo avaliar a biomassa seca, o conteúdo e a eficiência de utilização dos nutrientes nos diferentes compartimentos da macaúba ao longo do ciclo de crescimento da cultura. Foi realizado um inventário florestal de 100 plantas de macaúbas, divididas em cinco classe de idades (3 e 8 meses, 2,1; 5,3 e 9,5 anos). Foram abatidas cinco plantas médias, uma de cada idade, individualizando os diferentes compartimentos das plantas (copa, estipe, caule saxofone, raiz, cachos e frutos), para determinação da biomassa seca, dos teores, dos conteúdos de nutrientes e do coeficiente de utilização biológico (CUB). As biomassas secas totais foram de 0,005; 0,12; 16,84; 116,38 e 275,46 kg/planta para as macaúbas de 3 e 8 meses, 2,1; 5,3 e 9,5 anos, respectivamente. O acúmulo máximo estimado de biomassa seca foi de 378,52 kg/planta, sendo 50 % e 80 % atingidos aos 7 e 10,6 anos, respectivamente. A maioria dos nutrientes apresentaram queda nos teores com o aumento da idade das macaúbas. Houve um incremento no conteúdo dos nutrientes ao longo de ciclo do crescimento da macaúba. Em geral, os teores e os conteúdos dos nutrientes apresentaram padrão de tendências similares, com $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn$. As copas das macaúbas apresentaram maiores teores e conteúdos de macronutrientes, exceto de K nas macaúbas de 5,3 anos e 9,5 anos, que foi o nutriente de maior conteúdo no estipe. Os maiores teores e os conteúdos dos micronutrientes foram observados nas raízes, seguido das copas das macaúbas. Os valores de CUB apresentaram a sequência $P > S > Mg > Ca > K > N$ para macronutrientes, e $Cu > Zn > B > Mn > Fe$ para micronutrientes. A macaúba possui altos valores de acúmulo de biomassa seca e de conteúdo de nutrientes, demonstrando ser uma cultura de elevada exigência nutricional.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*. Macaúbas cultivadas. Acúmulo de biomassa. Conteúdo de nutrientes.

Abstract

Macaw-palm is a crop with great oil production potential, as well as raw material for several other industrial sectors. Several studies have added knowledge to the management of this crop, however, many aspects for adjustments in the fertilization recommendation still lack information. Thus, contributing to the estimation of nutritional demand of macaw-palm, this work aimed to evaluate the dry biomass, content and efficiency of use of nutrients in the different compartments of macaw-palm throughout the crop's growth cycle. A forest inventory of 100 macaw-palm plants was carried out, divided into five age groups (3 and 8 months, 2.1; 5.3 and 9.5 years). Five medium plants were slaughtered, one of each age, individualizing the different compartments of the plants (top, stipe, saxophone stem, root, bunches and fruits), for determination of dry biomass, levels, nutrient contents and utilization coefficient biological (CUB). The total dry biomasses were 0.005; 0.12; 16.84; 116.38 and 275.46 kg plant⁻¹ for macaw-palms aged 3 and 8 months, 2.1; 5.3 and 9.5 years, respectively. The estimated maximum accumulation of dry biomass was 378.52 kg plant⁻¹, with 50% and 80% reached at 7 and 10.6 years, respectively. Most of the nutrients showed a decrease in levels with increasing age of the macaw-palms. There was an increase in nutrient content throughout the macaw-palm growth cycle. In general, nutrient levels and contents showed a similar pattern of trends, with $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn$. The crowns of the macaw-palms had higher levels and contents of macronutrients, except for K in the macaw-palms aged 5.3 years and 9.5 years old, which was the nutrient with the highest content in the stipe. The highest levels and contents of micronutrients were observed in the roots, followed by the tops of macaw-palms. The CUB values showed the sequence $P > S > Mg > Ca > K > N$ for macronutrients, and $Cu > Zn > B > Mn > Fe$ for micronutrients. Macaw-palm has high values of dry biomass accumulation and nutrient content, proving to be a crop with high nutritional requirements.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. Cultivated macaw-palms. Biomass accumulation. Nutrient content.

1. INTRODUÇÃO

No cenário agrícola mundial o cultivo de oleaginosas possui destaque e vem sendo alavancado pela contínua busca por fontes energéticas renováveis, inclusive gerando uma demanda por diversificação dessas culturas, especialmente espécies que não entrem em conflito com a produção de alimentos, surgindo então oportunidades para cultivo de espécies ainda não domesticadas, como a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.).

A macaúba é uma palmeira oleífera de porte arbóreo pertencente à família Arecaceae, com origem na América Tropical e considerada a palmeira de maior dispersão no território brasileiro, com ocorrência natural em quatro biomas (Cerrado, Mata Atlântica, Floresta Amazônica e Pantanal) (HENDERSON et al., 1995; MOTOIKE et al., 2013; LIMA et al., 2018).

O potencial produtivo de óleo desta palmeira foi o que primeiramente despertou o interesse de instituições de pesquisa e do setor empresarial, especialmente para produção de biocombustíveis (MOTOIKE e KUKI, 2009; LANES et al., 2014; COLOMBO et al., 2017). Porém, a macaúba também tem se mostrado uma promissora fonte de matéria-prima para diversos outros setores industriais (EVARISTO et al., 2016; JOSÉ et al., 2016), bem como para mercados futuros de créditos de carbono (EVARISTO et al., 2018, MOREIRA et al., 2020).

Além do elevado potencial produtivo, a macaúba apresenta características relevantes para uma espécie a ser cultivada, como rusticidade, adaptabilidade a diversos ambientes (MOTTA et al., 2002; TELES et al., 2011; COLOMBO et al., 2017), possibilidade de cultivo em sistemas agrossilvopastoris (DIAS et al., 2011; VIANA et al., 2011; CARDOSO et al., 2017; MOREIRA et al., 2018) e viabilidade técnico-econômica (PIMENTEL et al., 2011; EVARISTO et al., 2016), o que coloca esta espécie como uma cultura agrícola promissora.

Mas a macaúba apresenta a limitação de ser uma espécie em fase de domesticação, estando em transição do extrativismo em maciços naturais para o estabelecimento de cultivos racionais. Na última década, grandes avanços nesta etapa de domesticação foram alcançados, inclusive com início de plantios em escala comercial por empresas especializadas do setor energético.

Diversos estudos vêm contribuindo para a viabilização destes cultivos racionais em escala agrícola competitiva, como nas áreas de melhoramento genético, visto a

grande variabilidade genética da cultura (MANFIO et al., 2011; MANFIO et al., 2012), propagação (MOTOIKE et al., 2007), produção de mudas (PIMENTEL et al., 2016), colheita, pós-colheita e processamento (MOTA et al., 2011; GOULART, 2014; EVARISTO et al., 2016; JOSÉ et al., 2016) e desenvolvimento de sistemas de produção e práticas culturais (VIANA et al., 2011; PIMENTEL et al., 2011).

Uma das práticas culturais fundamentais para consolidação e sucesso de uma cultura agrícola é a adubação, que tem como princípio básico elevar o nível de fertilidade do solo até uma condição ótima para o desenvolvimento da cultura (CANTARUTTI et al., 2007). A ocorrência natural da macaúba em solos eutróficos (MOTTA et al., 2002; TELES et al., 2011) sugere que esta espécie é exigente em fertilidade do solo, com significativas demandas nutricionais, e possivelmente, altas doses de adubos. Em experimentos com plantas cultivadas, a macaúba tem-se mostrado responsiva à adubação nas fases de muda, crescimento inicial e início da fase reprodutiva, em especial à adubação nitrogenada e potássica (PIMENTEL et al., 2015; PIMENTEL et al., 2016; SANTOS, 2015; DIETRICH, 2017).

Diversos estudos na área de fertilidade do solo e nutrição mineral da macaúba têm alcançado resultados interessantes e agregado conhecimentos e informações úteis ao manejo nutricional da cultura (PIMENTEL et al., 2015; SANTOS, 2015, DIETRICH, 2017). Contudo, muitos aspectos para ajustes em recomendações de adubação e um correto manejo nutricional desta espécie ainda carecem de informações.

Assim, contribuindo para a estimativa de demanda nutricional da macaúba, este trabalho teve como objetivo avaliar a biomassa, o conteúdo e a eficiência de utilização dos nutrientes nos diferentes compartimentos da macaúba ao longo do ciclo de crescimento da cultura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área do estudo

O estudo foi conduzido com plantas de macaúba de diferentes idades, desde mudas até plantas em idade produtiva. As mudas foram coletadas no viveiro comercial da Empresa Acrotech em João Pinheiro, Minas Gerais, Brasil, a 17°42'40"S e 46°15'45"W, altitude de 607 metros e clima regional A_w (tropical típico), segundo classificação de Köppen-Geiger. As demais plantas de macaúba foram cultivadas na Estação Experimental de Araponga, pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, no município de Araponga, Minas Gerais, Brasil, a 20°39'10"S e 42°32'00"O, altitude de 829 metros e clima regional C_{wb} (subtropical de altitude), segundo classificação de Köppen-Geiger.

2.2. Seleção e abate das macaúbas

Para o estudo buscaram-se plantas em cinco diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, com idades de 3 meses (muda de pré-viveiro), de 8 meses (muda de viveiro), de 2,1 anos (macaúba juvenil), de 5,3 anos (macaúba no início de produção) e de 9,5 anos (macaúba em plena produção) (Figura 1).

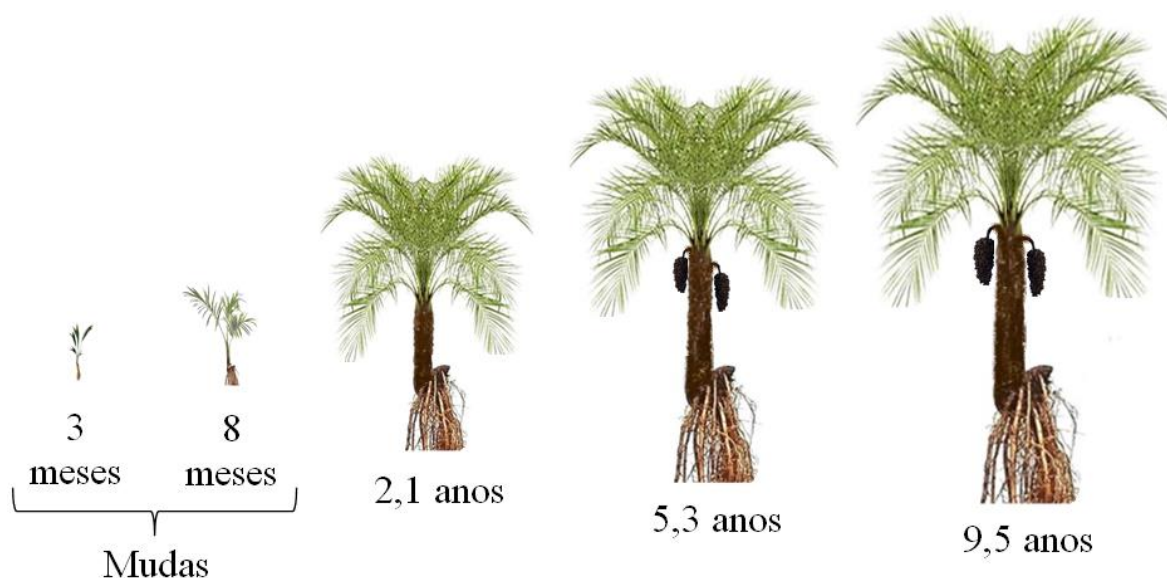


Figura 1. Representação esquemática das macaúbas abatidas no estudo.

As mudas foram produzidas segundo metodologia de Motoike et al. (2007) e Pimentel et al. (2016) e as demais macaúbas cultivadas em espaçamento de 5 m x 5

m, recebendo calagem e adubação segundo as recomendações de Pimentel et al. (2011).

Para a seleção de plantas representativas realizou-se um inventário florestal preliminar com 20 plantas de macaúbas de cada idade. Os parâmetros dendrométricos aplicados no inventário das mudas foram altura da planta e número de folhas, sendo selecionadas três mudas de cada idade (3 e 8 meses). E para as plantas em campo foram avaliadas altura da planta e diâmetro na altura do peito (1,3 m do solo) (dap), sendo selecionada uma planta de cada idade (2,1 anos; 5,3 anos e 9,5 anos) (Figura 2).

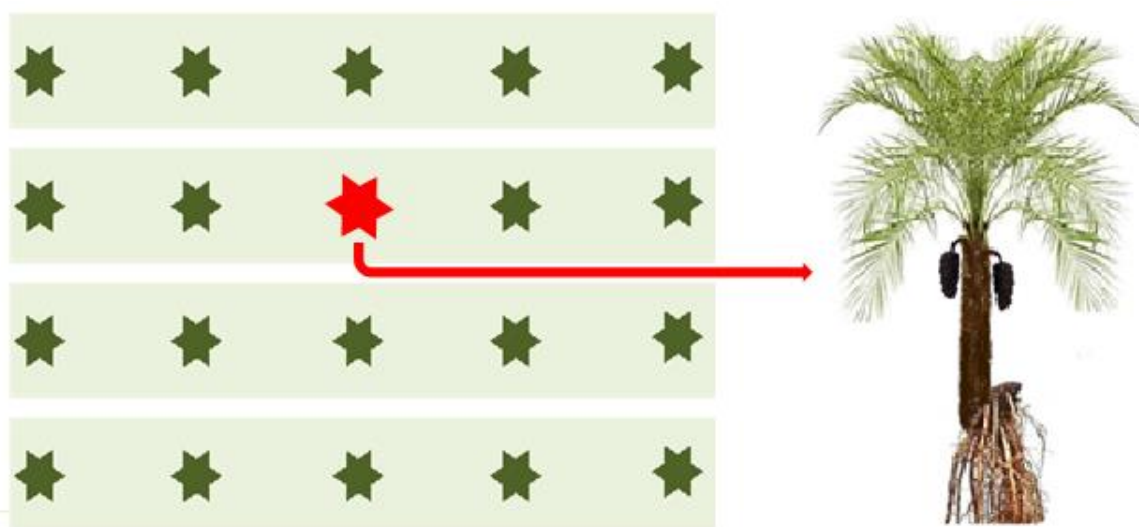


Figura 2. Representação esquemática da seleção de macaúbas abatidas no estudo.

Após a seleção das macaúbas as mesmas foram abatidas para serem realizadas avaliações de massa da matéria fresca (MF) dos diferentes componentes da copa (folha flexa, folíolos, raques, pecíolos e bainhas), do estipe, do caule saxofone, das raízes, dos cachos (espata, raque e ráquilas) e dos frutos (epicarpo, mesocarpo, endocarpo e amêndoa) (Figura 3).

Para a avaliação do sistema radicular das mudas realizou-se a remoção do substrato e lavagem das raízes com água corrente. Para as plantas cultivadas no campo, coletaram-se blocos de solo em diferentes profundidades e distâncias do tronco segundo a técnica do monólito (Bohm, 1979). Maiores detalhes do processo de coleta das raízes em campo são descritos por Moreira et al. (2019).

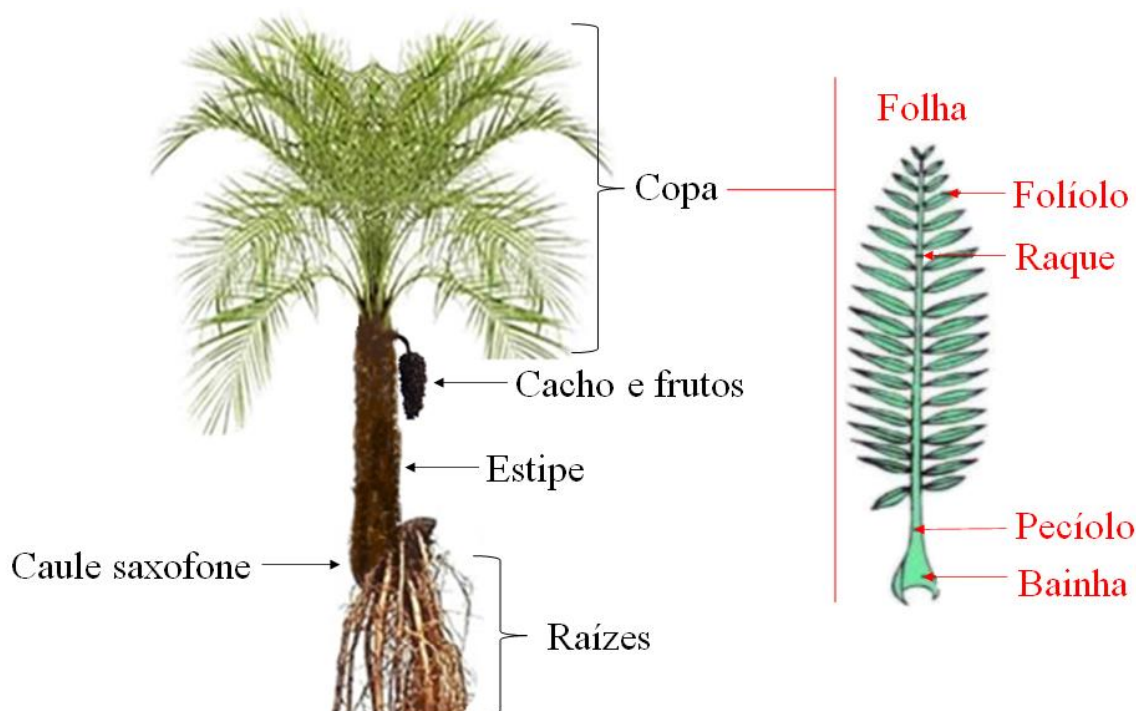


Figura 3. Diferentes compartimentos da macaúba e detalhes da folha. Adaptado de Queiroga et al. (2016)

2.3. Acúmulo de biomassa seca

Para a determinação da massa da matéria seca (MS) foram coletadas amostras dos diferentes compartimentos das plantas e colocadas em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C, durante 72 horas (até atingir peso constante). A massa da matéria seca de cada compartimento foi obtida conforme a equação:

$$MS = MF_{\text{total}} \times \left[1 - \left(\frac{MFa - MSa}{MFa} \right) \right]$$

Em que:

MS = massa da matéria seca de cada compartimento da planta, em kg;

MF_{total} = massa da matéria fresca total de cada compartimento da planta, em kg;

MFa = massa da matéria fresca das amostras de cada compartimento da planta, em kg;

MSa = massa da matéria seca das amostras de cada compartimento da planta, em kg.

A massa da matéria seca total de cada macaúba foi obtida pelo somatório dos valores de massa de matéria seca de cada compartimento da planta.

Para melhor análise e compreensão do acúmulo de biomassa calculou-se a taxa de crescimento absoluto (AGR – Absolute Growth Rate) e a taxa de crescimento relativo (RGR – Relative Growth Rate). A AGR foi obtida pela subtração do peso estimado da massa de matéria seca em um determinado mês pela massa da matéria seca obtida no mês anterior. Pela divisão da taxa de crescimento absoluto, em um determinado mês, pela massa estimada da matéria seca da planta naquele mês, foi determinada a RGR, conforme FAYAD (1998).

2.4. Acúmulo de nutrientes

Para avaliação do conteúdo de nutrientes nos diferentes tecidos vegetais das plantas as amostras anteriormente citadas, após secas, foram moídas em moinho tipo Willey e conduzidas ao Laboratório de Análise de Planta do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Para a determinação dos teores nutricionais, as amostras trituradas foram submetidas à digestão sulfúrica (JACKSON, 1958) para determinação de N, e submetidas à digestão nitroperclórica para determinação das concentrações de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn (JOHNSON E ULRICH, 1959).

O N foi dosado pelo método colorimétrico micro Kjeldahl, sendo o nutriente quantificado por titulometria descrito por Bremner (1965). O P foi determinado colorimetricamente a partir da redução do fosfomolibdato pela vitamina C, conforme descrito por Braga e Defelipo (1974); o K por fotometria de chama; o S, por turbidimetria do sulfato de bário (BLANCHARD et al., 1963), e os demais (Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn) foram quantificados por espectrometria de absorção atômica em chama (AOAC, 1975).

O conteúdo de nutrientes em cada compartimento da macaúba foi calculado multiplicando-se o teor de cada nutriente pela massa da matéria seca do respectivo compartimento, conforme a equação:

$$CN = T \times MS$$

Em que:

CN = conteúdo de nutrientes de cada compartimento da planta, em g;

T = teor de nutriente na parte da planta, em g.kg⁻¹ (macronutrientes) ou mg.kg⁻¹ (micronutrientes);

MS = massa da matéria seca de cada compartimento da planta, em kg.

O conteúdo total de nutrientes de cada macaúba foi obtido pelo somatório dos valores de conteúdo de nutrientes de cada compartimento da planta.

A taxa de acúmulo de cada macronutriente foi estimada pela subtração do conteúdo do nutriente acumulado em um determinado mês pelo conteúdo acumulado no mês anterior.

2.5. Eficiência de utilização de nutrientes

Para a avaliação da taxa de conversão de nutrientes em biomassa ao longo do ciclo de crescimento da macaúba, foi estimado o coeficiente de utilização biológico (CUB) de cada compartimento das plantas, obtido pelo quociente entre a biomassa seca e o conteúdo do nutriente no respectivo compartimento (BARROS et al., 1986), ambos com a mesma unidade, conforme equação:

$$CUB = \frac{MS}{CN}$$

Em que:

CUB = Coeficiente de utilização biológico;

MS = massa da matéria seca de cada compartimento da planta, em kg;

CN = conteúdo de nutrientes de cada compartimento da planta, em g.

2.6. Análise estatística

Os dados foram apresentados em tabelas e gráficos. Assim como submetidos à análise de regressão ajustando modelos sigmoidais disponíveis no software CurveExpert. A escolha do melhor modelo baseou-se na análise do coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados da variável dependente e na análise gráfica do modelo, em busca do melhor ajuste ao comportamento biológico.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Acúmulo de biomassa seca

As plantas de macaúbas avaliadas apresentaram padrão sigmoidal de crescimento (Figura 5), com uma produção de biomassa seca crescente, atingindo 0,005; 0,12; 16,84; 116,38 e 275,46 kg/planta nas plantas com 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos, respectivamente (Tabela 1 e Figura 4). Modelos sigmoidais melhor caracterizam o crescimento e acúmulo de biomassa de plantas lenhosas ao longo do tempo, assim como de seus frutos (PALLARDY, 2008). Montoya et al. (2016) observaram que a curva de crescimento de frutos de macaúba seguiu uma tendência duplamente sigmoidal com quatro estádios.

Tabela 1 - Distribuição da biomassa seca em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

Compartimentos		Idade									
		3 meses		8 meses		2,1 anos		5,3 anos		9,5 anos	
		MS ⁽¹⁾	%	MS	%	MS	%	MS	%	MS	%
Copa	Flecha	0,0005		0,0023		0,60		0,52		0,03	
	Folíolos	0,0017		0,0302		2,48		13,52		28,47	
	Raque	-----	59,88	-----	51,12	1,44	53,26	7,36	35,43	10,56	34,69
	Pecíolo	-----		0,0130		0,89		3,27		7,56	
	Bainhas	0,0009		0,0168		3,57		16,57		48,95	
	Estipe	-----	-----	-----	-----	1,20	7,14	31,88	27,39	75,16	27,29
Abaixo do solo	Caule saxofone	0,0014	27,27	0,0477	39,13	1,78	10,57	12,51	10,75	26,49	9,62
	Raízes	0,0006	12,85	0,0119	9,75	4,89	29,03	27,92	23,99	54,24	19,69
Cacho	Espatas	-----				-----		1,07		4,43	
	Raque	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,86	2,08	1,16	2,44
	Ráquilas	-----		-----		-----		0,48		1,14	
Frutos	Epicarpo	-----		-----		-----		0,16		5,97	
	Mesocarpo	-----		-----		-----		0,09		3,94	
	Endocarpo	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,16	0,36	6,04	6,28
	Amêndoa	-----		-----		-----		0,01		1,33	
Biomassa total		0,0050	100	0,12	100	16,84	100	116,38	100	275,46	100

⁽¹⁾ Massa seca (kg/planta)

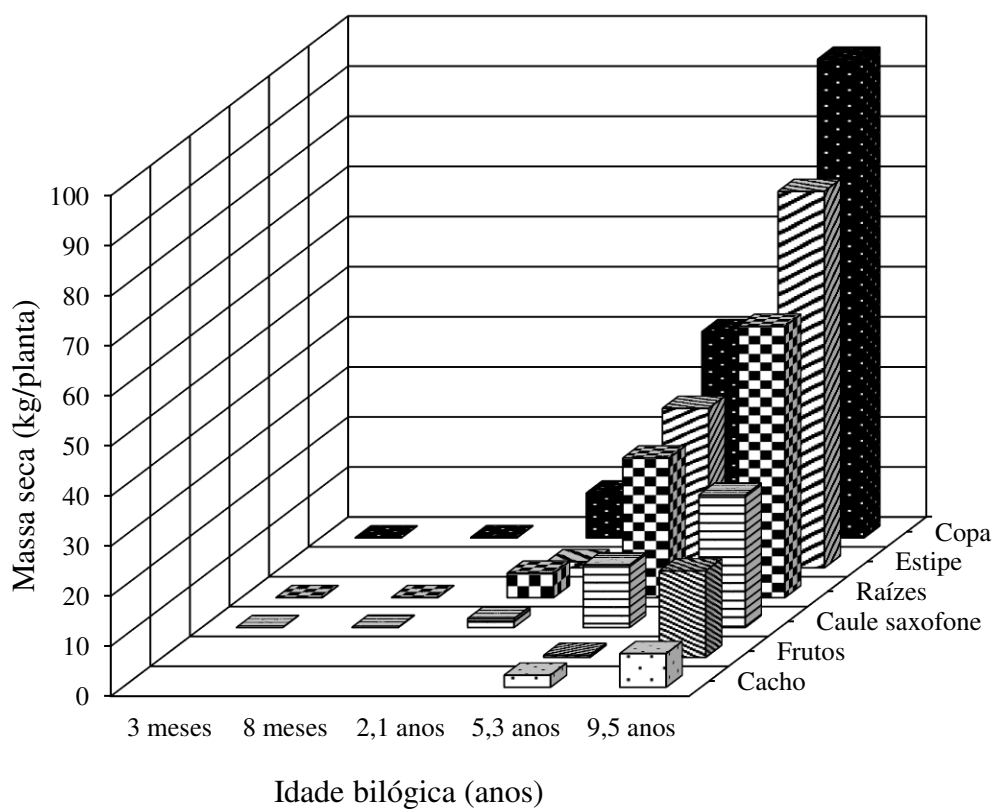


Figura 4. Representação gráfica da distribuição da biomassa seca em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

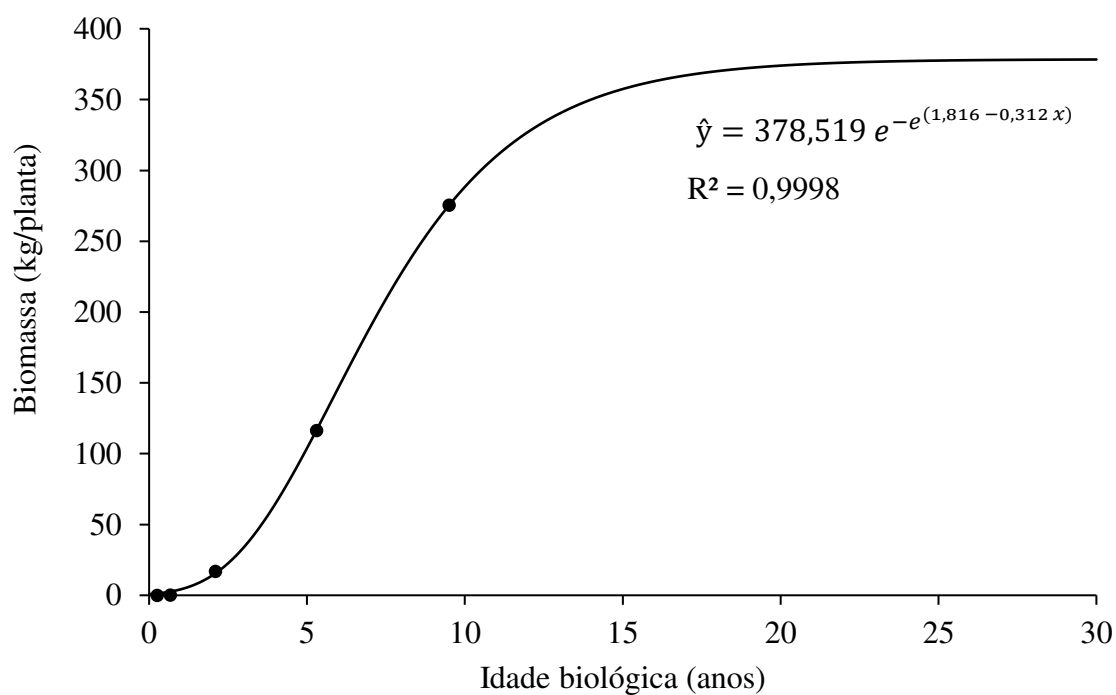


Figura 5. Acúmulo de biomassa seca da macaúba em função da idade biológica.

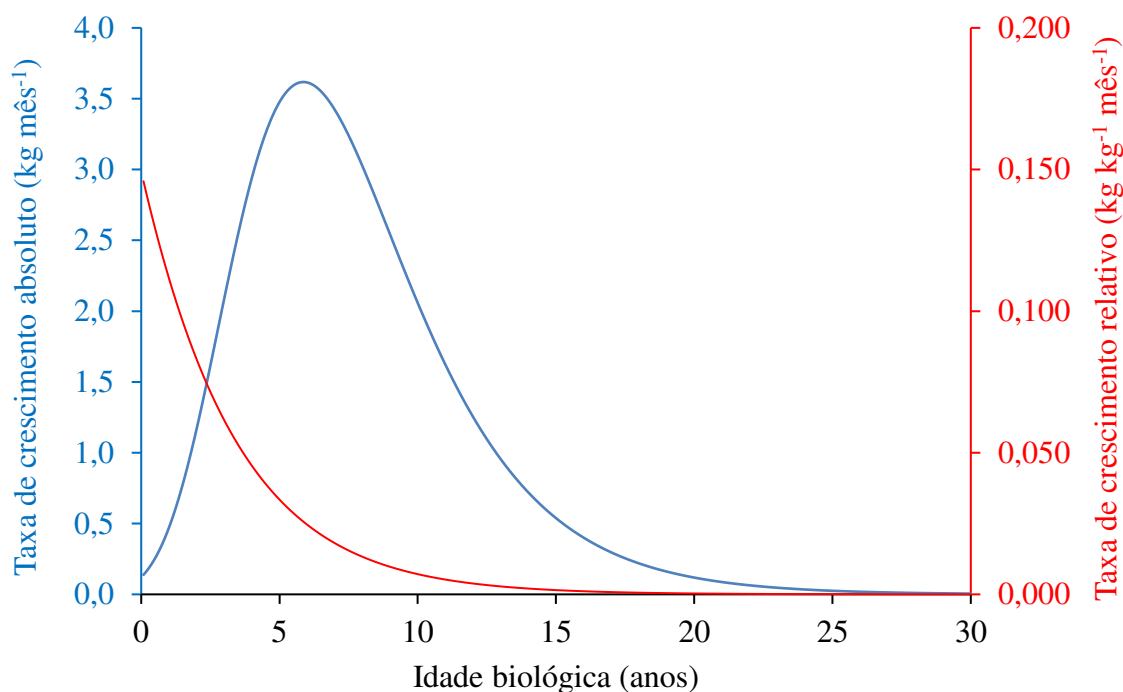


Figura 6. Taxa de Crescimento Absoluto (AGR) e Taxa de Crescimento Relativo (RGR) da macaúba em função da idade biológica.

O valor estimado de máximo acúmulo de biomassa seca pela macaúba foi de 378,51 kg/planta (Figura 5), valor bem próximo encontrado por Santos (2015), de 377,38 kg/planta. Ferreira et al. (2013) observaram 467 kg/planta de biomassa fresca, mostrando-se bastante abaixo da planta de 9,5 anos de idade abatida no presente estudo, que apresentou massa fresca acima de 900 kg/planta. Porém ambos os estudos foram desenvolvidos com plantas adultas em ambientes de ocorrência natural (plantas não cultivadas), enquanto no presente estudo avaliaram-se plantas de diferentes idades cultivadas de forma intensiva, provenientes de mudas de material genético selecionado, de áreas com preparo do solo, adubações e tratos culturais adequados, buscando assim atingir maiores produtividades.

Estima-se que a macaúba atinja 50 % (189,25 kg/planta) e 80 % (302,81 kg/planta) de sua biomassa seca total aos 7 e 10,6 anos de idade, respectivamente. Observou-se ainda um acúmulo de biomassa seca significativo até em torno dos 15 anos de idade da macaúba, já atingindo valores estimados de biomassa seca acima de 350 kg/planta (Figura 5), apresentando ainda uma taxa de crescimento relativo de 0,002 kg kg⁻¹ mês⁻¹ (Figura 6).

De maneira geral, as palmeiras apresentam um crescimento inicial lento, com baixo acúmulo de biomassa nos primeiros anos de cultivo. O dendezeiro (*Elaeis guineenses*) têm um acúmulo de matéria seca lento até o terceiro e quarto ano, tornando-se mais intenso a partir do quinto ano (Viégas, 1993). Para macaúba, Pimentel et al. (2015) observaram crescimento lento até o segundo ano de cultivo. Comportamento similar pôde-se observar com as plantas de macaúbas do presente estudo (Figura 5).

Até aproximadamente o sexto ano de idade (5,9 anos), a macaúba apresenta uma taxa crescimento absoluto estimado crescente, chegando a atingir nesta idade um acúmulo de $3,62 \text{ kg mês}^{-1}$ de biomassa seca, seguido de um posterior decréscimo (Figura 6). Provavelmente devido ao menor incremento de biomassa nos órgãos vegetativos, principalmente da copa das macaúbas (folha flecha, folíolos, raques, pecíolos e bainhas), e do desenvolvimento dos órgãos não fotossintetizantes, como o estipe e cachos de frutos. Tais informações são de importância na definição das etapas de maior requerimento nutricional da cultura, para evitar condições de deficiência nutricional e desperdícios de adubos.

Por outro lado, a taxa de crescimento relativo estimado da macaúba, em função do tempo, sempre se mostrou com valores em queda, indicando diminuição no incremento de massa de matéria seca por unidade de massa de matéria seca contida na planta ao longo do tempo. Os valores foram de 0,14; 0,12; 0,08; 0,03 e 0,01 $\text{kg kg}^{-1} \text{ mês}^{-1}$ nas plantas com 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos, respectivamente (Figura 6).

Entre a macaúba de 5,3 e 9,5 anos apesar da diferença de massa seca total, saindo de 116,38 kg/planta para 275,46 kg/planta, observar-se certa estabilidade no percentual de massa seca dos compartimentos das plantas, principalmente massa seca da copa ($\cong 35 \%$), do estipe ($\cong 27 \%$) e do caule saxofone ($\cong 10 \%$). A maior diferença percentual mostra-se em relação aos frutos, com grande incremento na planta de 9,5 anos (6,28 %) em detrimento da planta de 5,3 anos (0,36 %) (Tabela 1 e Figura 4), caracterizando a transição entre o período inicial de produção para uma fase de produção mais estável, porém ainda crescente.

Analisando a partição de biomassa nos diferentes compartimentos da macaúba de 9,5 anos de idade, observa-se que a copa apresentou a maior biomassa seca, de 95,56 kg/planta (34,69 %), em seguida tem-se o estipe com 75,16 kg/planta (27,29 %), as raízes com 54,24 kg/planta (19,69 %), o caule saxofone com 26,49 kg/planta

(9,62 %), os frutos com 17,29 kg/planta (6,28 %) e os cachos com 6,73 kg/planta (2,44 %) (Tabela 1 e Figura 4).

Santos (2015) observou maior acúmulo de biomassa no estipe da macaúba (67,29 %), seguido de partes senescentes (14,97 %), raízes (9,68 %) e folhas (5,56 %). Nas macaúbas avaliadas por Ferreira et al. (2013), as folhas também representaram apenas 5 % da biomassa total, enquanto neste estudo a biomassa da copa foi de aproximadamente 35 %. Os valores das raízes também se mostraram discrepantes dos observados neste trabalho, com apenas 8 %, ficando abaixo da metade da proporção média das macaúbas avaliadas no presente estudo.

A partição de biomassa nos diferentes compartimentos das macaúbas cultivadas empregadas no presente estudo mostra-se mais equilibrada quando comparada a observada em outras palmáceas também em condições de cultivo, apesar da diferença de tamanho e, consequentemente de biomassa seca total. Silva et al. (2014), avaliando a biomassa apenas da parte aérea do coqueiro, encontraram 231,10 kg/planta de biomassa seca, com o estipe, a copa e os cachos e frutos representando 52,65 %, 39,33 % e 8,02 %, respectivamente. Viégas (1993), avaliando também apenas a parte aérea do dendezeiro, observou 396,7 kg/planta de biomassa seca, com a copa sendo o compartimento com maior biomassa, com 42,6 %, seguido do estipe, com 40,7 %, numa planta de 8 anos. Olivier et al. (2017), avaliando dendezeiros de 10 anos de idade, observaram biomassa seca da parte aérea entre 245 e 339 kg/planta, com o estipe representando dois terços e a copa um terço da biomassa. E Kiyono et al. (2015) observaram um total de 650,9 kg/planta em dendezeiro, com as folhas representando 30,51 %, o estipe 25,15 %, as raízes 30,54 % e o “tronco subterrâneo” apenas 2,29 %, totalizando 67,18 % da biomassa acima do solo e 32,82 % abaixo do solo. Comportamento semelhante do observado no presente estudo, porém com maior participação do caule saxofone e menor participação das raízes na biomassa seca das macaúbas de campo.

Os compartimentos subterrâneos das macaúbas, o caule saxofone e as raízes, foram responsáveis por elevado percentual da biomassa seca total das macaúbas. O caule saxofone é um sistema subterrâneo curvo e bulboso presente em alguns gêneros de palmáceas, entre eles *Acrocomia* (DRANSFIELD et al., 2008). Na macaúba este compartimento representa uma importante estrutura de adaptação capaz de armazenar reservas (água e amido) e fornecer proteção ao meristema

caulinar, permitindo crescimento contínuo de órgãos aéreos mesmo em ambientes não favoráveis e secos (SOUZA et al., 2016).

Nas mudas de 3 meses e 8 meses, a biomassa seca do caule saxofone representou 27,27 % e 39,13 % da biomassa seca total, respectivamente, mostrando-se acima da biomassa das raízes de ambas idades (com 12,85 % e 9,75 %, respectivamente) (Tabela 1 e Figura 4). Enquanto nas macaúbas de 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos observou-se maiores acúmulos de biomassa nas raízes em detrimento do caule saxofone, mesmo apresentando valores decrescentes com o aumento da idade (29,03 %, 23,99 % e 19,69 % da biomassa seca total, respectivamente), enquanto o caule saxofone apresentou um percentual estável ($\cong$ 10 %) (Tabela 1 e Figura 4).

As diferenças na distribuição percentual das raízes nas cinco macaúbas em estudo podem estar relacionadas com características específicas do sistema radicular da espécie. Moreira et al. (2019) observaram que o sistema radicular da macaúba apresenta características de ganho de profundidade efetiva com aumento da idade das plantas e a distância efetiva das raízes coincide com a área de projeção da copa. Porém, as raízes das mudas de macaúba e as macaúbas jovens no campo apresentam maior concentração na região tuberosa do caule saxofone, com posterior distribuição uniforme nas plantas adultas.

Referente aos frutos, vale ressaltar que os 17,29 kg/planta de massa seca dos frutos da macaúba de 9,5 anos são provenientes de 41,22 kg/planta de frutos frescos colhidos de cinco cachos, três deles ainda verdes no momento do abate da planta, o que indica maior potencial de crescimento e acúmulo de biomassa nos frutos, mostrando-se próximo da produtividade estimada por Motoike e Kuki (2009) e Fernández-Coppel et al. (2018), de 20 a 24 t ha⁻¹ano⁻¹. Santos (2015) observou apenas 4,33 kg de massa de matéria seca de frutos em macaúbas não cultivadas.

Durante o período em que os frutos se desenvolvem, podem representar fortes drenos de nutrientes e fotoassimilados devido ao pleno crescimento e acúmulo de biomassa. Lembrando que a frutificação da macaúba é supra anual, compreendendo um período aproximado de 14 meses desde a emissão da inflorescência até a abscisão dos frutos (MONTTOYA et al., 2016), sendo comum observar na mesma planta, simultaneamente, frutos maduros, emissão de inflorescência e cachos com frutos em desenvolvimento inicial referentes à próxima safra. Nesses momentos a macaúba pode necessitar retranslocar nutrientes de outros compartimentos para

atender a demanda dos frutos, uma vez que a taxa de absorção de nutrientes do solo pode não ser suficiente para atender à demanda de nutrientes.

3.2. Acúmulo de nutrientes

Entre as principais funções dos nutrientes minerais destacam-se como constituintes das estruturas orgânicas e estão associados ao metabolismo das plantas, como ativadores enzimáticos, carreadores e osmorreguladores. Além disso, os nutrientes minerais têm substancial importância para a agricultura, por estarem envolvidos nas etapas de crescimento e desenvolvimento dos vegetais, com relação direta e indireta com o metabolismo do carbono (fotossíntese e respiração), que por sua vez, pode resultar em maior ou menor acúmulo de biomassa (LARCHER, 2006).

A alocação dos conteúdos de nutrientes depende da distribuição da biomassa e dos teores nutricionais nos diferentes tecidos vegetais das plantas.

3.2.1. Teores de nutrientes

De maneira geral, os teores dos nutrientes diminuíram com o aumento da idade das macaúbas, exceto nos cachos e frutos, que se mostraram similares entre os colhidos na planta de 5,3 anos e na planta de 9,5 anos de idade (Tabela 2).

A tendência de redução dos teores de nutrientes com o aumento da idade das plantas de macaúba também foi observada por Santos (2015) e Dietrich (2017), podendo estar relacionado com o fenômeno de diluição e queda dos teores de nutrientes devido ao crescimento e mudança de fase fenológica das plantas (JARREL e BEVERLY, 1981).

Quando comparado os teores foliares de mudas (Pimentel, 2012); de macaúbas jovens (PIRES et al., 2013; PIMENTEL et al., 2015) e de macaúbas adultas (TELES et al. 2008; SANTOS, 2015; DIETRICH, 2017) em outros ambientes constatou-se o mesmo padrão de comportamento, uma tendência de redução da maioria dos teores de nutrientes, confirmando a hipótese de ocorrência de diluição dos nutrientes nos tecidos vegetais com o aumento da idade das macaúbas.

Tabela 2. Teores de nutrientes em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

Compartimentos		N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B	
		g/kg							mg/kg				
		Muda pré-viveiro (3 meses)											
Copa	Flecha	20,87	2,87	21,69	7,04	2,40	1,85	4,97	58,34	22,62	35,67	59,34	
	Folículos + bainha	12,83	1,04	15,53	15,04	3,77	2,06	20,94	79,28	19,54	52,46	81,96	
Abaixo do solo	Caule saxofone	7,73	2,02	17,28	6,30	2,76	1,20	2,81	62,48	10,93	9,99	29,15	
	Raízes	9,27	1,22	18,27	3,91	2,82	1,52	5,68	156,59	13,92	19,75	54,43	
Muda viveiro (8 meses)													
Copa	Flecha	22,41	3,12	18,36	5,79	1,79	2,19	21,87	102,90	28,88	23,88	53,14	
	Folículos + pecíolo	12,21	1,10	8,91	14,95	2,21	3,47	16,50	271,71	16,61	93,73	49,55	
	Bainhas	5,72	0,76	8,19	7,92	2,21	0,87	17,05	316,03	10,04	28,30	37,08	
Abaixo do solo	Caule saxofone	6,18	1,56	12,35	3,14	1,33	0,93	20,90	158,64	11,75	5,91	11,73	
	Raízes	7,73	1,58	18,79	3,53	1,72	1,98	103,92	2300,27	18,02	38,75	24,07	
Planta 2,1 anos													
Copa	Flecha	17,00	1,35	13,01	3,29	1,50	1,52	6,62	83,72	14,14	41,94	6,87	
	Folículos	16,02	1,01	6,66	7,39	1,94	2,11	12,26	870,16	9,36	109,68	16,09	
	Raque + pecíolo	4,13	0,33	4,11	5,80	2,11	0,73	10,02	614,31	3,49	137,65	14,02	
	Bainhas	4,22	0,43	4,03	6,30	2,52	0,91	17,03	1018,87	6,00	45,37	14,86	
	Estipe	7,39	0,71	6,91	6,29	2,38	1,29	24,80	314,09	24,57	17,50	9,20	
Abaixo do solo	Caule saxofone	6,49	0,47	12,77	2,72	1,32	1,15	11,46	456,79	17,75	8,65	10,16	
	Raízes	10,12	0,56	5,36	2,72	1,94	1,51	112,61	3193,66	35,06	39,14	35,80	
Planta 5,3 anos													
Copa	Flecha	21,64	2,30	14,35	3,40	1,51	1,94	7,03	188,29	26,16	15,35	12,65	
	Folículos	16,65	1,38	10,46	5,78	1,54	2,13	8,25	477,55	12,56	21,46	16,66	
	Raque	4,71	0,68	6,88	4,63	1,50	1,12	4,69	109,97	6,74	17,49	15,36	
	Pecíolo	4,32	0,64	6,72	4,65	1,50	1,11	4,21	107,36	6,26	17,51	15,44	
	Bainhas	4,11	0,56	6,76	7,26	2,57	1,04	2,35	109,53	3,61	17,94	15,11	
	Estipe	15,27	2,32	14,50	6,02	3,43	2,33	9,00	256,59	55,09	7,16	11,48	
Abaixo do solo	Caule saxofone	6,49	0,47	12,77	2,72	1,32	1,15	11,46	456,79	17,75	8,65	10,16	
	Raízes	5,30	0,50	9,30	2,03	1,88	1,35	21,00	961,00	20,80	8,70	46,20	
Cacho	Espata	6,03	0,44	9,66	2,13	1,29	0,58	3,26	138,82	8,51	6,95	29,71	
	Raque	6,96	1,43	22,88	2,40	1,16	0,88	3,20	70,34	7,40	6,49	25,06	
	Ráquilas	7,73	0,82	21,50	1,67	1,13	0,86	3,09	157,14	3,46	5,00	22,99	
Frutos	Epicarpo	7,96	0,96	7,70	1,76	1,37	0,83	5,65	67,06	20,01	5,02	8,44	
	Mesocarpo	7,73	0,99	8,41	2,64	1,51	0,77	5,36	346,23	16,13	7,26	11,95	
	Endocarpo	4,64	0,77	6,95	0,29	0,33	0,55	5,72	8,13	1,18	1,34	5,54	
	Amêndoa	25,05	4,26	6,08	2,04	2,23	3,22	7,46	100,14	41,12	25,76	26,21	
Planta 9,5 anos													
Copa	Flecha	26,28	3,23	13,03	5,14	2,87	2,05	8,34	107,08	27,19	20,28	13,92	
	Folículos	15,14	0,96	4,90	6,65	1,81	1,13	3,08	592,84	8,06	29,65	9,55	
	Raque	4,26	0,41	3,58	5,67	2,00	0,70	2,64	274,79	5,12	55,87	8,57	
	Pecíolo	4,26	0,41	3,58	5,67	2,00	0,70	2,64	274,79	5,12	55,87	8,57	
	Bainhas	3,83	0,36	3,18	7,05	2,94	0,51	2,85	383,56	4,09	45,52	10,66	
	Estipe	11,05	1,56	9,96	3,42	3,50	1,69	7,56	413,19	28,36	10,47	9,53	
Abaixo do solo	Caule saxofone	6,65	0,48	9,30	3,24	1,19	1,26	13,69	248,88	23,79	7,81	7,40	
	Raízes	5,82	0,48	8,45	2,13	1,92	1,52	21,12	1138,17	20,58	9,45	51,50	
Cacho	Espata	5,10	0,34	2,44	4,90	2,54	0,70	4,61	401,10	15,40	18,36	14,80	
	Raque	6,18	0,95	22,34	2,97	3,94	0,92	4,00	225,46	6,30	27,48	8,51	
	Ráquilas	8,66	0,96	14,82	3,76	3,61	1,07	4,28	532,35	7,74	27,08	13,05	
Frutos	Epicarpo	6,34	0,62	10,14	1,00	0,88	0,78	5,75	42,67	9,34	3,02	8,11	
	Mesocarpo	8,31	1,05	9,89	3,85	1,50	1,03	6,57	303,26	15,09	7,31	9,22	
	Endocarpo	3,45	0,27	3,54	0,40	0,31	0,29	6,16	153,33	2,24	2,67	7,92	
	Amêndoa	19,53	4,30	4,84	1,42	1,91	7,39	7,77	53,34	29,13	19,64	10,17	

De maneira geral, os teores de nutrientes seguiram uma tendência sequencial decrescente de $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn$, entretanto nas macaúbas de 5,3 anos e 9,5 anos os teores de N apresentaram-se acima de K, mostrando-se bem próximo das sequências observadas para macaúba por Santos (2015) ($N > K > Ca > S > Mg > P > Fe > Mn > Zn > Cu$), Ferreira et al. (2013) ($N > K > Ca > Mg > S > P > Zn > Mn > B > Cu$), Pimentel et al. (2015) ($N > K > Ca > S > P > Mg > Fe > B > Mn > Zn > Cu$) e Pires et al. (2013) ($N > K > S > P > Fe$). Assim como observado em outras palmáceas, como o dendezeiro ($N > K > Ca > Mg > P > S$) (VIÉGAS, 1993; OLIVIER, et al. 2022).

Em estudo com plantas cultivadas, Pimentel et al. (2015) relacionaram o melhor desenvolvimento vegetativo de macaúbas com dois anos de idade com os seguintes teores foliares: 30,70; 1,67; 13,64; 4,94; 1,48 e 2,26 g kg⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente, 3,67 g kg⁻¹ de Cl e 39,28; 4,00; 11,33; 126,89; 30,22 mg kg⁻¹ de B, Cu, Zn, Fe e Mn, respectivamente. Os teores foliares de N e K relatados por Pimentel et al. (2015) mostraram-se acima do observado nas macaúbas deste estudo, principalmente os teores de N, mesmo quando comparados de forma mais específica com a macaúba de 2,1 anos de idade, seja com o teores médios da copa (9,10 g/planta de N e 6,38 g/planta de K), apenas dos folíolos (16,65 g/planta de N e 6,66 g/planta de K) ou somente os folíolos da segunda e/ou terceira folha expandida da macaúba (22,80 g/planta de N e 9,75 g/planta de K), similar ao coletado por Pimentel et al. (2015). A possível explicação para essa diferença nos teores dos dois nutrientes pode estar relacionada com as análises foliares serem provenientes de macaúbas submetidas à estudo com doses crescentes de N e K realizado por Pimentel et al. (2015). Adicionalmente, pode sinalizar uma alta capacidade de absorção de K pela macaúba quando disponível em abundância no solo.

Desconsiderando os teores de nutrientes encontrados nos frutos, a copa, seguida do estipe, foram os compartimentos das plantas que apresentaram os maiores teores dos macronutrientes, exceto para K na muda de 8 meses, que apresentou maior teor do nutriente nas raízes. Os maiores teores de P, K, Mg e S das plantas de 5,3 anos e de Mg na planta de 9,5 anos foram obtidos no estipe das plantas (Tabela 2).

A ocorrência dos maiores teores de nutrientes nos tecidos vegetais das copas das macaúbas pode ser devido ao fato da maioria das células vivas das árvores serem encontradas nas folhas, que apresentam sua fisiologia afetada diretamente pela

quantidade de nutrientes, muitos deles envolvidos no processo fotossintético (MARSCHNER, 2012; PALLARDY, 2008).

Além disso, pode-se destacar a frequente ocorrência de maiores teores de N nos tecidos da folha flecha e dos folíolos, e de K nos tecidos do caule saxofone e das raízes, em detrimento um do outro nutriente (Tabela 2). No dendezeiro, os maiores teores de N, P e Mg foram encontrados nos órgãos fotossintetizantes, enquanto o K apresentou seu maior teor na raque, pecíolo, estipe (OLIVIER et al., 2017).

Nos tecidos foliares, o N é encontrado em abundância nas moléculas de Rubisco e clorofila, além de ser um constituinte dos aminoácidos, proteínas, ácidos nucléicos, enzimas, co-enzimas, fosfolipídios e hormônios, sendo amplamente necessário para o crescimento das plantas. PIRES et al. (2013) observaram que teores de N reduziram-se a medida que as folhas de macaúba envelheceram, correlacionando esse declínio com a diminuição das taxas de fotossíntese líquida.

3.2.2. Acúmulo de macronutrientes

Os conteúdos observados dos nutrientes apresentaram incremento ao longo do ciclo de crescimento da cultura. Em relação à partição dos conteúdos dos nutrientes na composição dos tecidos vegetais da macaúba, os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) representaram 99,55 %, 98,57 %, 93,74 %, 98,02 % e 97,27 % de todo o conteúdo de nutrientes minerais das macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos de idade, respectivamente (Figura 7).

A copa das macaúbas foi o compartimento que apresentou os maiores conteúdos de macronutrientes, exceto de K nas macaúbas de 5,3 e 9,5 anos. Nessas idades o maior conteúdo de K foi observado no estipe das plantas (Tabela 3). Com o aumento da idade e tamanho das plantas de macaúba além do acréscimo de biomassa seca observou-se mudanças nas proporções dos diferentes compartimentos das plantas, e consequentemente o conteúdo de nutrientes acompanha esse comportamento (Tabela 3). Contudo a copa e o estipe, que compõem a parte aérea das macaúbas, continuam sendo os compartimentos com maiores biomassas de matéria seca, com 34,69 % e 27,29 % da biomassa seca total da macaúba de 9,5 anos, respectivamente (Tabela 1). E mesmo havendo o fenômeno de diluição e queda dos teores dos nutrientes nos tecidos vegetais ao longo do tempo, apresentaram os maiores conteúdos de macronutrientes (Tabela 3).

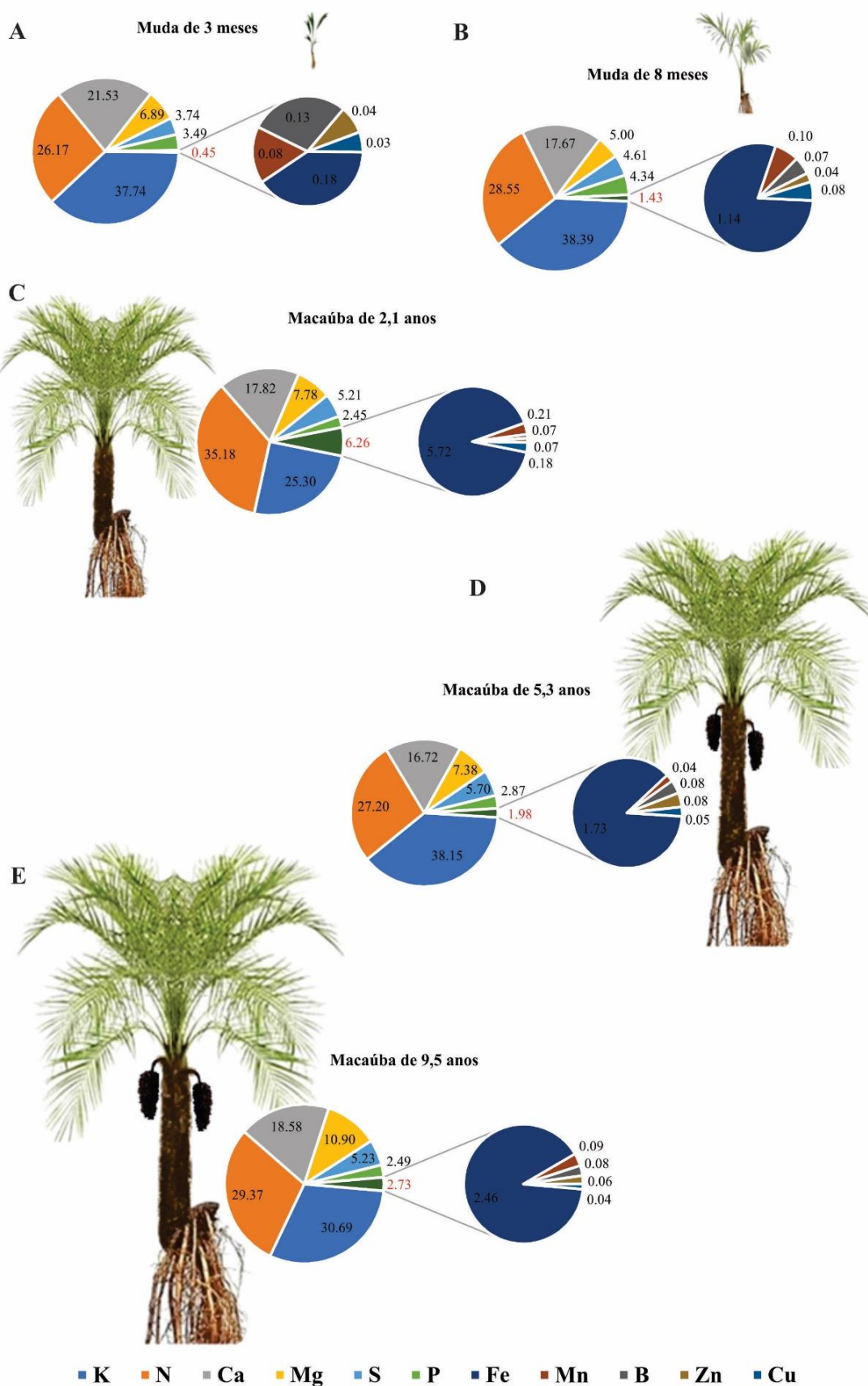


Figura 7. Representação gráfica da distribuição percentual de macro e micronutrientes em macaúba de diferentes idades biológica.

Tabela 3. Conteúdo de macronutrientes em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

Compartimentos		N		P		K		Ca		Mg		S	
		g/planta	%	g/planta	%	g/planta	%	g/planta	%	g/planta	%	g/planta	%
Muda pré-viveiro (3 meses)													
Copa	Flecha	0,010		0,001		0,010		0,003		0,001		0,001	
	Folíolos	0,021	71,84	0,002	54,70	0,026	58,22	0,022	76,96	0,006	63,84	0,003	68,77
	Bainhas	0,011		0,001		0,013		0,011		0,003		0,002	
Abaixo do solo	Caule saxofone	0,011	17,99	0,003	35,26	0,023	27,89	0,009	17,83	0,004	24,41	0,002	19,56
	Raízes	0,006	10,17	0,001	10,03	0,012	13,89	0,003	5,21	0,002	11,75	0,001	11,67
Muda viveiro (8 meses)													
Copa	Flecha	0,051		0,007		0,042		0,013		0,004		0,005	
	Folíolos	0,413		0,039		0,352		0,288		0,056		0,072	
	Pecíolo	0,190	65,80	0,019	45,76	0,169	46,57	0,096	72,60	0,022	57,67	0,025	62,81
	Bainhas	0,090		0,014		0,146		0,111		0,033		0,013	
Abaixo do solo	Caule saxofone	0,295	26,07	0,074	43,31	0,590	38,75	0,150	21,41	0,064	32,02	0,044	24,30
	Raízes	0,092	8,12	0,019	10,93	0,223	14,68	0,042	5,99	0,020	10,31	0,024	12,89
Planta 2,1 anos													
Copa	Flecha	6,963		0,553		5,329		1,348		0,614		0,623	
	Folíolos	45,124		2,933		20,013		15,168		4,680		5,429	
	Raque	6,234	53,17	0,514	58,54	7,208	49,73	7,469	64,82	2,778	55,68	1,059	51,00
	Pecíolo	3,585		0,287		3,543		5,050		1,770		0,612	
	Bainhas	13,837		1,528		14,871		17,754		7,692		3,032	
Abaixo do solo	Estipe	8,793	6,17	0,838	8,44	8,186	7,99	7,479	10,36	2,823	8,97	1,555	7,37
	Caule saxofone	11,552	8,11	0,843	8,48	22,725	22,18	4,842	6,71	2,356	7,48	2,047	9,71
	Raízes	46,362	32,55	2,437	24,54	20,598	20,10	13,076	18,11	8,777	27,87	6,733	31,93
Planta 5,3 anos													
Copa	Flecha	11,279		1,199		7,480		1,772		0,787		1,011	
	Folíolos	236,167		19,731		152,217		73,804		20,529		30,064	
	Raque	34,864	43,89	5,179	42,05	52,997	29,45	32,990	47,29	10,878	35,00	8,231	34,35
	Pecíolo	14,440		2,221		23,169		14,911		4,862		3,601	
	Bainhas	68,594		8,537		107,935		118,454		41,963		16,953	
Abaixo do solo	Estipe	217,570	26,14	25,719	29,33	423,463	36,27	127,185	24,86	62,631	27,74	45,172	25,92
	Caule saxofone	59,921	7,20	8,381	9,56	155,370	13,31	63,049	12,32	22,267	9,86	23,143	13,28
	Raízes	170,370	20,47	14,199	16,19	201,273	17,24	73,712	14,41	58,491	25,91	43,988	25,24
Cacho	Espata	6,481		0,473		10,382		2,289		1,386		0,623	
	Raque	5,995	1,94	1,232	2,39	19,708	3,46	2,067	1,01	0,999	1,30	0,758	1,03
	Ráquias	3,701		0,393		10,295		0,800		0,541		0,412	
Frutos	Epicarpo	1,250		0,151		1,210		0,276		0,215		0,130	
	Mesocarpo	0,691		0,088		0,753		0,236		0,135		0,069	
	Endocarpo	0,749	0,36	0,124	0,47	1,122	0,27	0,047	0,11	0,053	0,19	0,089	0,19
	Amêndoa	0,307		0,052		0,074		0,025		0,027		0,039	
Planta 9,5 anos													
Copa	Flecha	0,867		0,107		0,430		0,170		0,095		0,068	
	Folíolos	460,594		28,722		154,601		182,349		51,207		33,048	
	Raque	44,061	41,63	4,225	34,53	38,119	18,07	60,384	61,59	21,795	40,10	7,546	27,53
	Pecíolo	30,368		2,486		19,756		43,704		15,169		5,251	
	Bainhas	189,416		15,559		116,012		392,444		171,060		39,518	
Abaixo do solo	Estipe	390,413	22,41	36,817	24,88	572,566	31,45	153,004	13,88	211,150	32,65	80,462	25,93
	Caule saxofone	162,934	9,35	14,053	9,50	268,316	14,74	98,503	8,93	35,677	5,52	37,531	12,09
	Raízes	306,394	17,59	27,098	18,31	469,918	25,81	117,042	10,62	105,106	16,25	81,202	26,17
Cacho	Espata	22,601		1,507		10,813		21,715		11,256		3,102	
	Raque	7,144	2,27	1,098	2,50	25,825	2,94	3,433	2,67	4,555	3,08	1,064	1,74
	Ráquias	9,872		1,094		16,895		4,286		4,115		1,220	
Frutos	Epicarpo	37,877		3,724		60,588		5,957		5,257		4,675	
	Mesocarpo	32,725		4,141		38,955		15,159		5,919		4,051	
	Endocarpo	20,840	6,75	1,615	10,28	21,359	7,00	2,400	2,31	1,857	2,41	1,736	6,55
	Amêndoa	26,068		5,734		6,455		1,899		2,554		9,858	

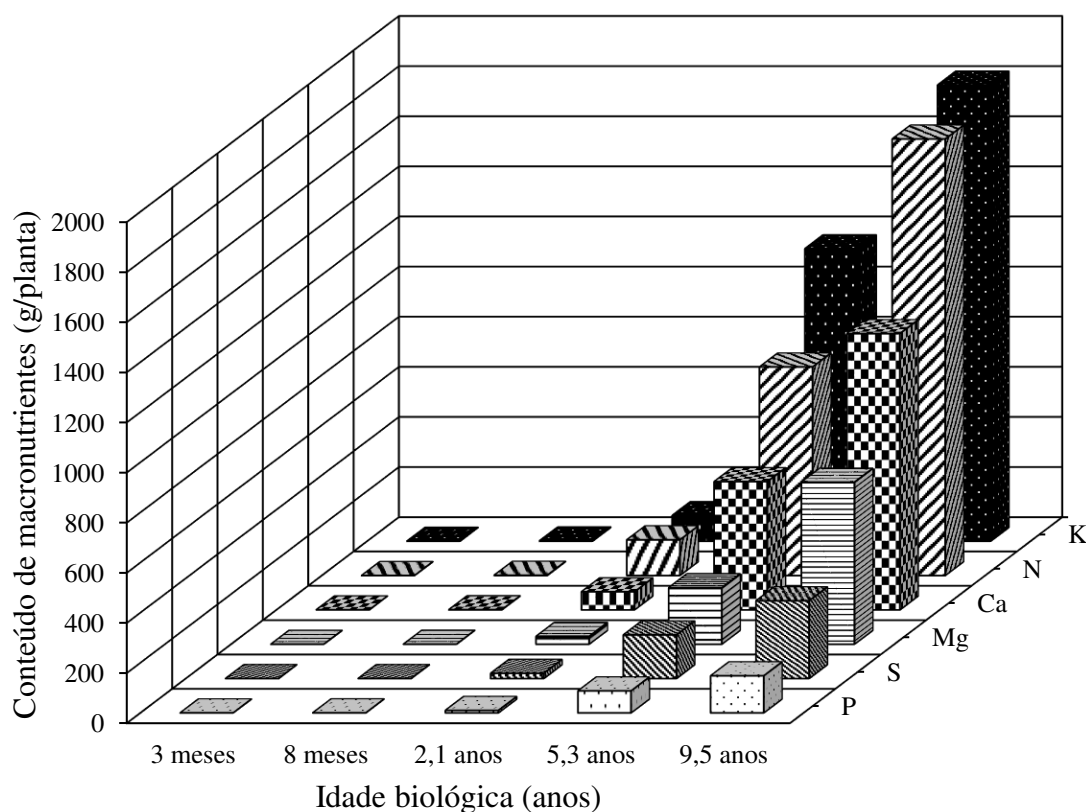


Figura 8. Representação gráfica dos conteúdos de macronutrientes em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

De maneira geral, os acúmulos de macronutrientes observados apresentaram o padrão de sequência $K > N > Ca > Mg > S > P$ (Tabela 3 e Figuras 8 e 9), assim como observado por Viégas (1993) no dendezeiro. Porém, de acordo com os modelos ajustados com os dados observados, estima-se que o conteúdo de N na planta de macaúba supere o de K na transição para uma fase de maior estabilidade do acúmulo de nutrientes (aproximadamente aos 10,42 anos de idade), passando a apresentar a sequência de acúmulo $N > K > Ca > Mg > S > P$ (Figura 9).

K, N e Ca também foram os nutrientes mais acumulados nas macaúbas estudadas por Santos (2015), porém o padrão da tendência de acúmulo diferiu da observada no presente estudo, sendo apresentada a sequência: $K \approx Ca > N > S \approx Mg > P$. As diferenças na ordem de grandeza do acúmulo dos nutrientes na comparação destes estudos podem ter ocorrido devido as macaúbas abatidas no presente estudo tratarem-se de plantas cultivadas. As adubações foram realizadas seguindo as recomendações de Pimentel et al. (2011), com consideráveis doses anuais de N, P e K. Além disso, entre os tratos culturais praticados temos as podas das folhas em fase

de senescência e a colheita dos frutos com a derrubada dos cachos, resultando em menores partes senescidas aderidas à planta, e conseqüentemente menor influência da dinâmica de acúmulo de nutrientes nestas.

O conteúdo de K foi equivalente à 37,74 %, 38,39 %, 25,30 %, 38,15 % e 30,69 % do acúmulo total de nutrientes nas macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9 anos de idade, respectivamente (Figura 7), ficando abaixo apenas do conteúdo de N na planta de 2,1 anos.

De forma decrescente, observou-se a alocação de K no estipe (31,45 %), seguido das raízes (25,81 %), copa (18,07 %), caule saxofone (14,74 %), frutos (7 %) e cacho (2,94 %) na macaúba de 9,5 anos. Em dendezeiros, o estipe apresentou conteúdo de K de aproximadamente 70% do nutriente da parte aérea vegetativa (DUBOS et al., 2011; OLIVIER et al., 2017). Notadamente, o estipe se mostrou como um compartimento estratégico de reserva de nutrientes, particularmente de K.

O K mostrou-se o macronutriente absorvido de forma mais precoce pela macaúba, com taxa de acúmulo crescente somente até os 4,08 anos de idade, com o máximo acúmulo estimado de 1,909 kg/planta, inferior apenas ao conteúdo estimado de N (Figuras 9, 10 e 13). O K é um cátion monovalente de alta mobilidade na planta, sendo o mais abundante no citoplasma da célula vegetal. O K tem funções diversas no metabolismo da planta, como participação na síntese de carboidratos, açúcares, proteínas e lipídeos, além de estar envolvido nos processos de fotossíntese e respiração. Atua como ativador enzimático, proporcionando maior resistência das plantas aos ataques de insetos e patógenos, além de aumentar a eficiência no uso da água pelas plantas (MARSCHNER, 2012). Apesar disso, esse elemento não faz parte das estruturas do vegetal. Macaúbas com deficiência de K apresentam crescimento reduzido, folhas velhas com necrose nos bordos e clorose generalizada, baixo vigor e aspecto de murcha (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

Em relação ao N, o seu conteúdo foi correspondente à 26,17 %, 28,55 %, 35,18 %, 27,20 % e 29,37 % do acúmulo total de nutrientes de macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos de idade, respectivamente (Figura 7), com a macaúba de 9,5 anos apresentando maior o acúmulo de N na copa (41,63 %), seguido do estipe (22,41 %), raízes (17,59 %), caule saxofone (9,35 %), frutos (6,75 %) e cacho (2,27 %).

A taxa de acúmulo estimado de N é crescente até aproximadamente 5,5 anos de idade da macaúba mostrando-se menos acelerada que a taxa de acúmulo do K, o

que explica o comportamento anteriormente citado (Figuras 9, 10, 11 e 13), já podendo ser observado na macaúba de 9,5 anos conteúdos bastante próximos dos dois nutrientes, com 1,742 kg/planta de N e 1,821 kg/planta de K (Tabela 3). O valor estimado de máximo acúmulo de N, de 2,214 kg/planta (Figura 9 e 11), revela a alta exigência da macaúba pelo nutriente. Na macaúba, a deficiência de N acarreta clorose, iniciando-se o sintoma pelas folhas velhas, crescimento reduzido (poucas folhas), atraso no lançamento de novas folhas e em casos mais severos dificuldade na abertura das folhas novas (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

Considerando um stand de 400 plantas ha^{-1} , o N e o K apresentaram potencial de imobilização estimado de 886 kg ha^{-1} e 764 kg ha^{-1} , respectivamente. Este resultado reflete as elevadas demandas dos dois nutrientes pela cultura da macaúba. Somado a isso, a macaúba vem se mostrando responsiva à adubação nitrogenada e potássica (PIMENTEL et al., 2015; SANTOS, 2015; DIETRICH, 2017), assim como outras palmáceas (coco - SOBRAL e LEAL, 2005; pupunha - ARES et al., 2003).

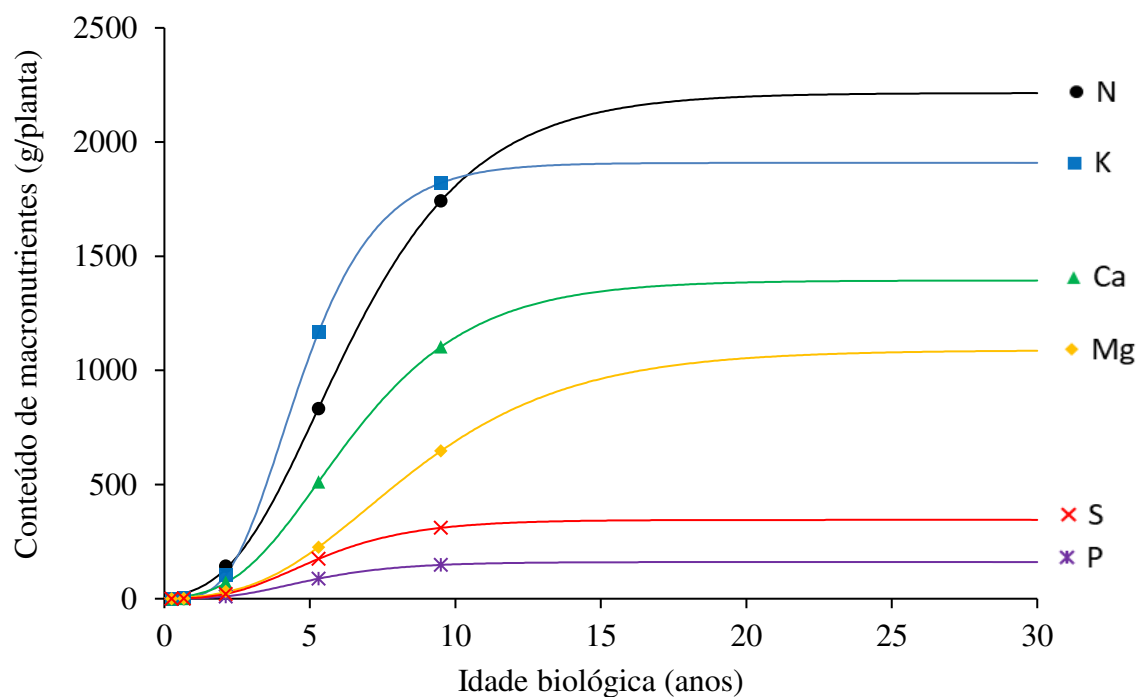


Figura 9. Estimativa de acúmulo de macronutrientes na biomassa seca da macaúba em função da idade biológica.

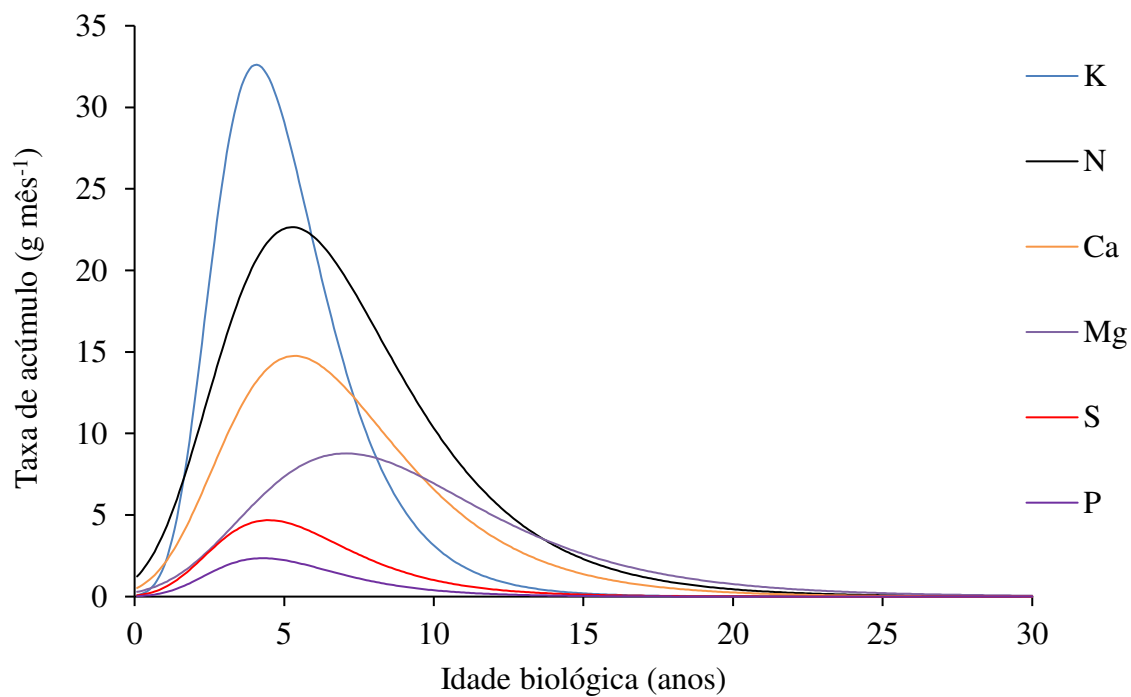


Figura 10. Estimativa das taxas de acúmulo de macronutrientes na biomassa seca da macaúba em função da idade biológica.

Na biomassa das macaúbas o Ca e o Mg apresentaram valores intermediários, com o Ca sendo o terceiro e o Mg o quarto nutriente mais requerido pela macaúba (Figuras 9, 14 e 15).

O Ca representou 21,53 %, 17,67 %, 17,82 %, 16,72 % e 18,58 % do acúmulo total de nutrientes, enquanto o Mg, 6,89 %, 5,00 %, 7,78 %, 7,38 % e 10,90 % do acúmulo total de nutrientes nas macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9 anos de idade, respectivamente para ambos nutrientes (Figura 7).

Em relação à alocação dos conteúdos, observou-se comportamento semelhante para ambos os nutrientes em cada compartimento, apresentando maiores conteúdos na copa (61,59 % e 40,10 %), estipe (13,88 % e 32,65 %), raízes (10,62 % e 16,25 %), caule saxofone (8,93 % e 5,52 %), cacho (2,67 % e 3,08 %) e frutos (2,31 % e 2,41 % para Ca e Mg, respectivamente).

O valor estimado de máximo acúmulo de Ca é de 1,394 kg/planta (Figuras 9 e 14). E a sua taxa de acúmulo estimada mostrou-se um pouco mais tardia, como já esperado, permanecendo crescente até 5,33 anos de idade da macaúba (Figuras 10 e 14).

O Ca tem como principal função, atuar como componente estrutural de macromoléculas, estando relacionado à capacidade de coordenação, por fornecer mais estabilidade nas ligações intermoleculares predominante na parede celular e na membrana plasmática. Além disso, este nutriente atua como ativador de várias enzimas, sendo indispensável para o funcionamento dos meristemas e desenvolvimento das raízes (MARSCHNER, 2012). O Ca possui baixa mobilidade na planta e impossibilidade de redistribuição pelo floema. Macaúbas com deficiência de Ca apresentaram crescimento reduzido, folhas com coloração verde escuro intenso (similar à deficiência de P), crescimento errático com dificuldade de lançar ou abrir folhas novas e má formação das mesmas (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

Na macaúba, o Mg é o macronutriente com a taxa de acúmulo estimada mais lenta, permanecendo crescente até 7,08 anos de idade, podendo atingir um valor da ordem de 1,088 kg/planta (Figuras 9, 10 e 15). O Mg é um cátion absorvido pelas plantas na forma de Mg^{2+} e sua taxa de absorção pode ser reduzida por outros cátions, tais como o K e o NH_4^+ , Ca e Mn, bem como pelo H^+ em função baixo pH. O Mg é constituinte da molécula de clorofila e importante ativador de enzimas relacionados ao metabolismo energético. Atua como “carregador” do fósforo no processo de transferência de energia, na regulação do pH celular e do balanço cátion/ânion

(MARSCHNER, 2012). Macaúbas deficientes em Mg apresentam crescimento reduzido em algumas plantas, crescimento errático, as folhas novas não se desenvolvem e clorose generalizada na planta similar ao N, porém iniciando-se nas folhas novas (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

As estimativas de imobilização de Ca e Mg pela cultura da macaúba, considerando um stand de 400 plantas ha^{-1} , são de 557 kg ha^{-1} e 434 kg ha^{-1} , respectivamente. Apesar dessas exigências nutricionais, geralmente não se utilizam fertilizantes específicos para esses nutrientes, uma vez que as demandas de Ca e Mg podem ser supridas pela disponibilização dos nutrientes no solo e via corretivos e condicionadores de solo.

O S e o P são os macronutrientes com menor acúmulo na biomassa das macaúbas, com o S representando 3,74 %, 4,61 %, 5,21 %, 5,70 % e 5,23 % do acúmulo total de nutrientes, enquanto o P 3,49 %, 4,34 %, 2,45 %, 2,87 % e 2,49 % do acúmulo total de nutrientes nas macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos de idade, respectivamente para ambos nutrientes (Figura 7).

O conteúdo de S apresentou maior alocação na copa (27,53 %), seguida das raízes (26,17 %), estipe (25,93 %), caule saxofone (12,09 %), frutos (6,55 %) e cachos (1,74 %). Enquanto para P, a alocação seguiu, de forma decrescente, na copa (34,53 %), estipe (24,88 %), raízes (18,31 %), caule saxofone (9,50 %), frutos (10,28 %) e cacho (2,50 %).

Os acúmulos de ambos os nutrientes pela macaúba mostraram-se bastante precoces com taxas de acúmulo crescentes até os 4,25 anos para o S e até 4,5 anos de idade para o P, inferiores apenas à taxa do K (Figuras 10, 12, 13 e 16). O valor estimado de máximo acúmulo de S na biomassa seca da macaúba foi de 0,345 kg/planta (Figuras 9 e 16), enquanto o P atingiu valor estimado de no máximo 0,160 kg/planta (Figuras 9 e 12). Com isso, considerando um stand de 400 plantas ha^{-1} , as estimativas de imobilização de S e P pela cultura da macaúba são de 138 kg ha^{-1} e 64 kg ha^{-1} , respectivamente.

Apesar da baixa quantidade acumulada, é importante considerar que a demanda de P nas fases iniciais do cultivo é elevada, visto que este elemento está associado ao crescimento radicular. Soma-se a isso o fato de que esse elemento tem baixa mobilidade no solo e alta adsorção pela fração argila, o que requer altas quantidades do nutriente para estabelecimento dos cultivos. Entre outras funções o P atua nos processos de preservação e transferência de energia, nas etapas da

fotossíntese e respiração. É constituinte de carboidratos, vitaminas, enzimas e fosfolipídios. Além disso, é essencial na divisão celular e, quando ausente, há menor formação de raízes, redução de frutificação e no teor de carboidratos, proteínas e lipídeos (MARSCHNER, 2012). Macaúbas com deficiência de P apresentam crescimento reduzido, folhas com coloração verde escuro intenso; crescimento errático, não conseguindo abrir ou lançar folhas novas, má formação de folhas e redução no número de folíolos (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

O S auxilia na produção de vitaminas e enzimas, além de ser necessário para a formação da clorofila (MARSCHNER, 2012). Folhas novas amareladas e mosqueadas e baixo vigor são sintomas de deficiência de S em macaúba (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

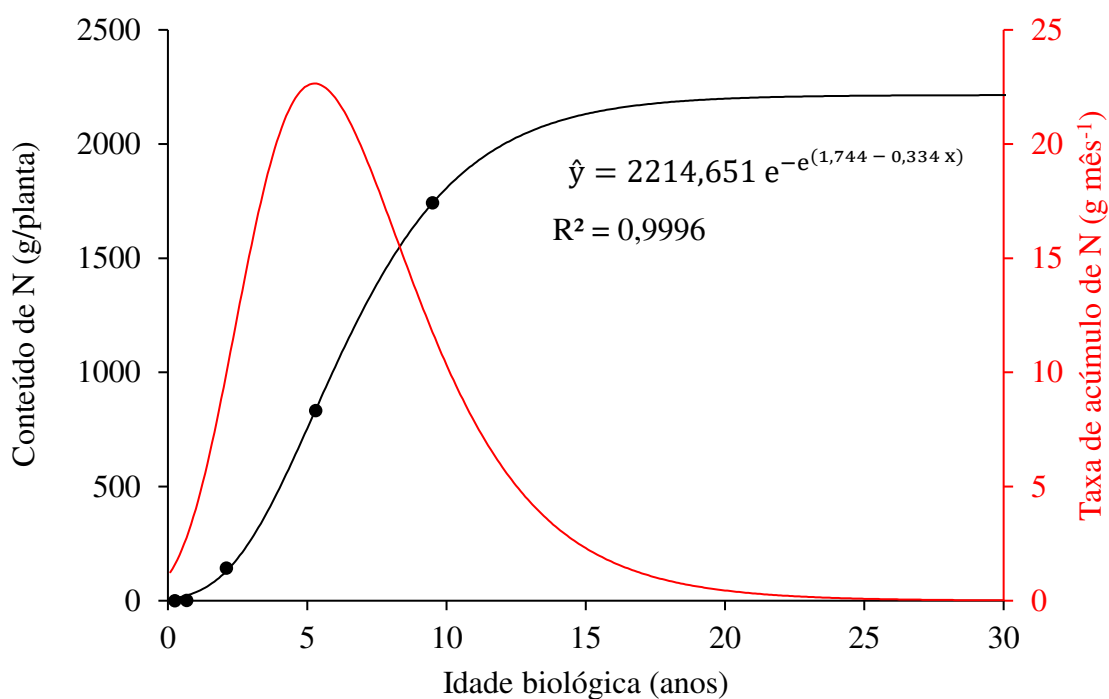


Figura 11. Acúmulo e taxa de acúmulo de N pela macaúba, em função da idade biológica.

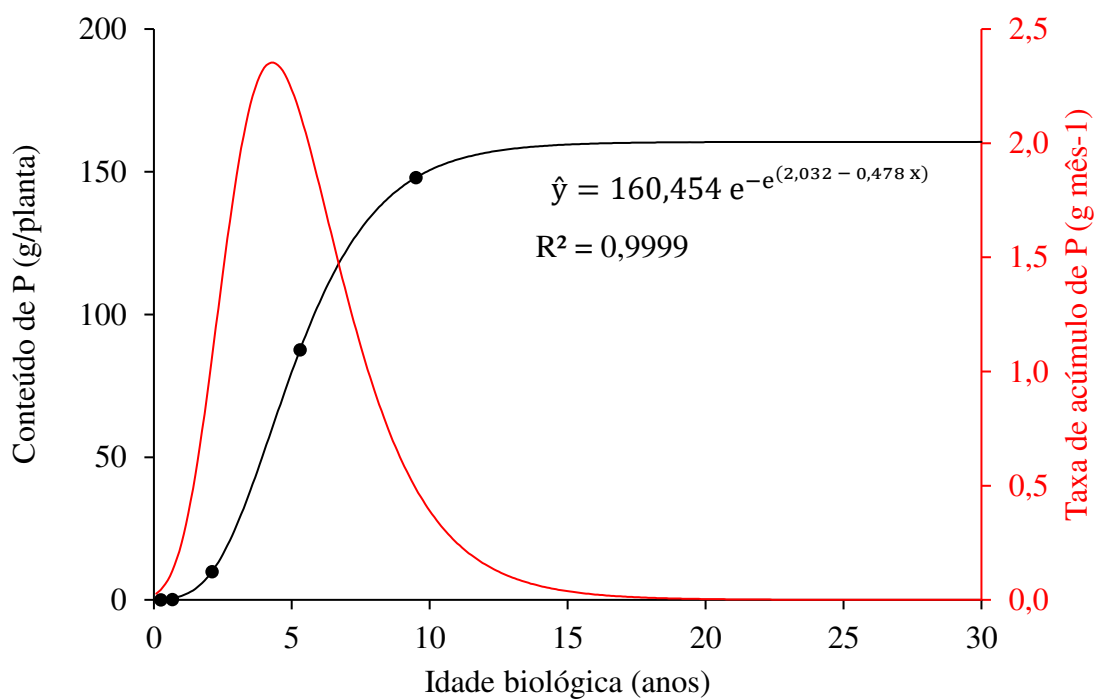


Figura 12. Acúmulo e taxa de acúmulo de P pela macaúba, em função da idade biológica.

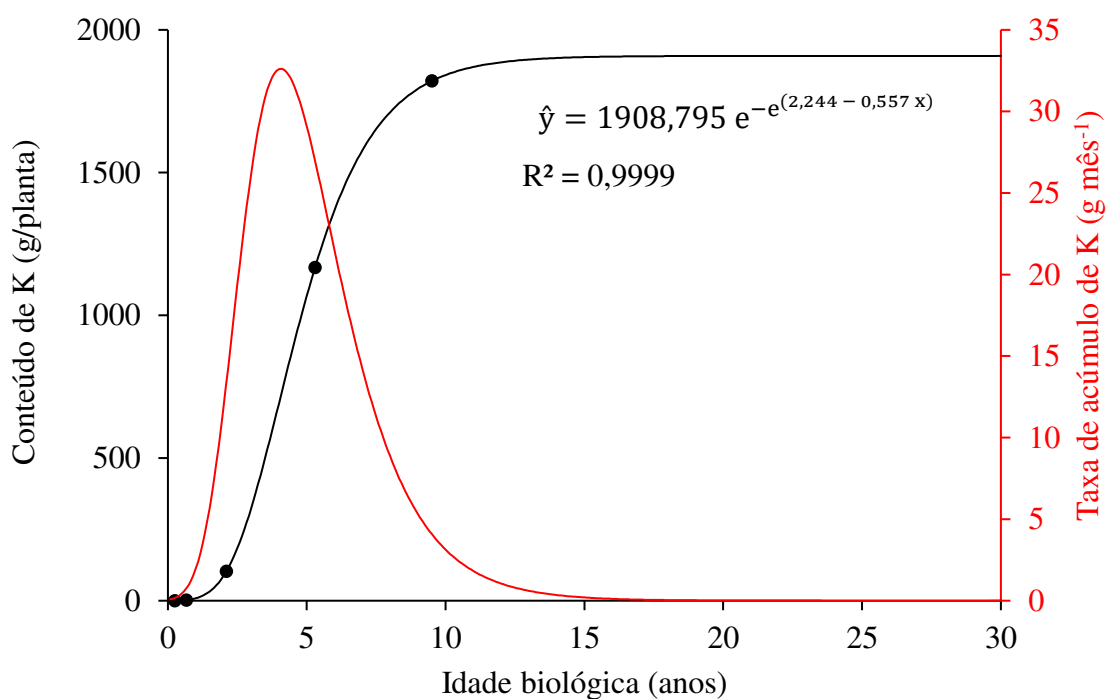


Figura 13. Acúmulo e taxa de acúmulo de K pela macaúba, em função da idade biológica.

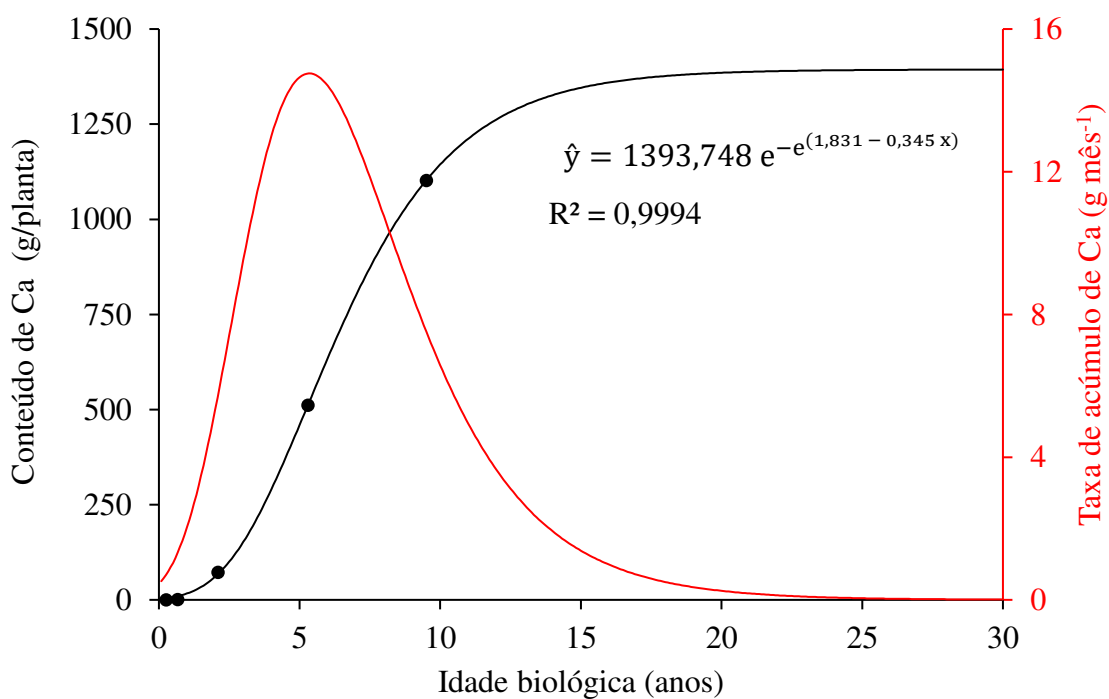


Figura 14. Acúmulo e taxa de acúmulo de Ca pela macaúba, em função da idade biológica.

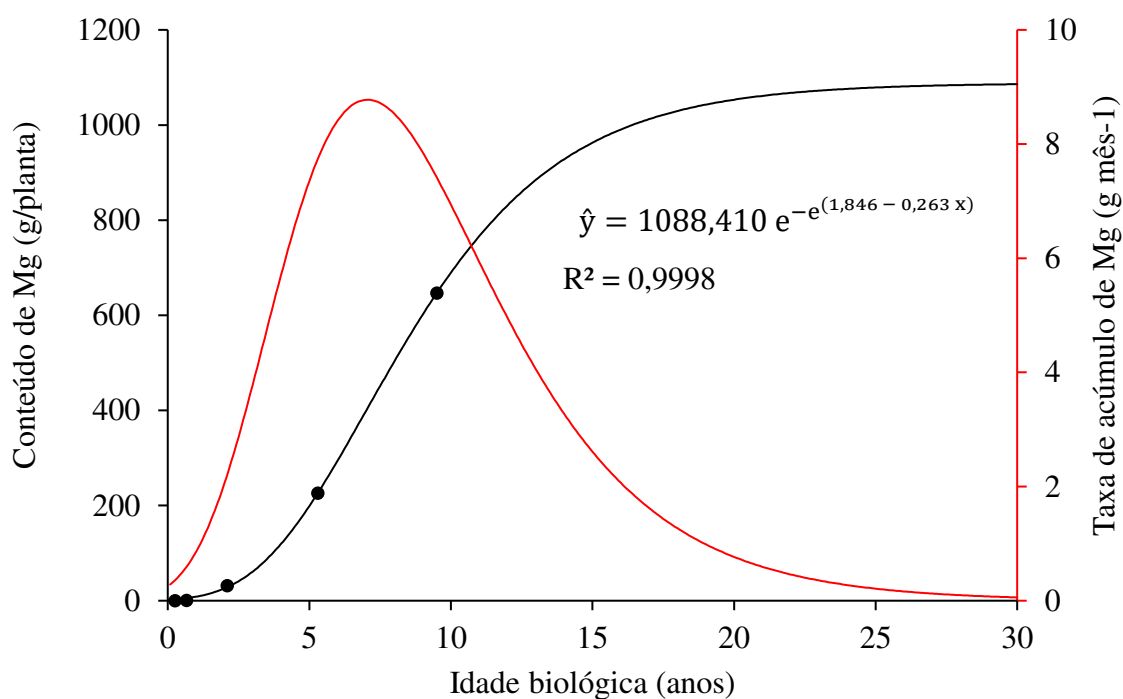


Figura 15. Acúmulo e taxa de acúmulo de Mg pela macaúba, em função da idade biológica.

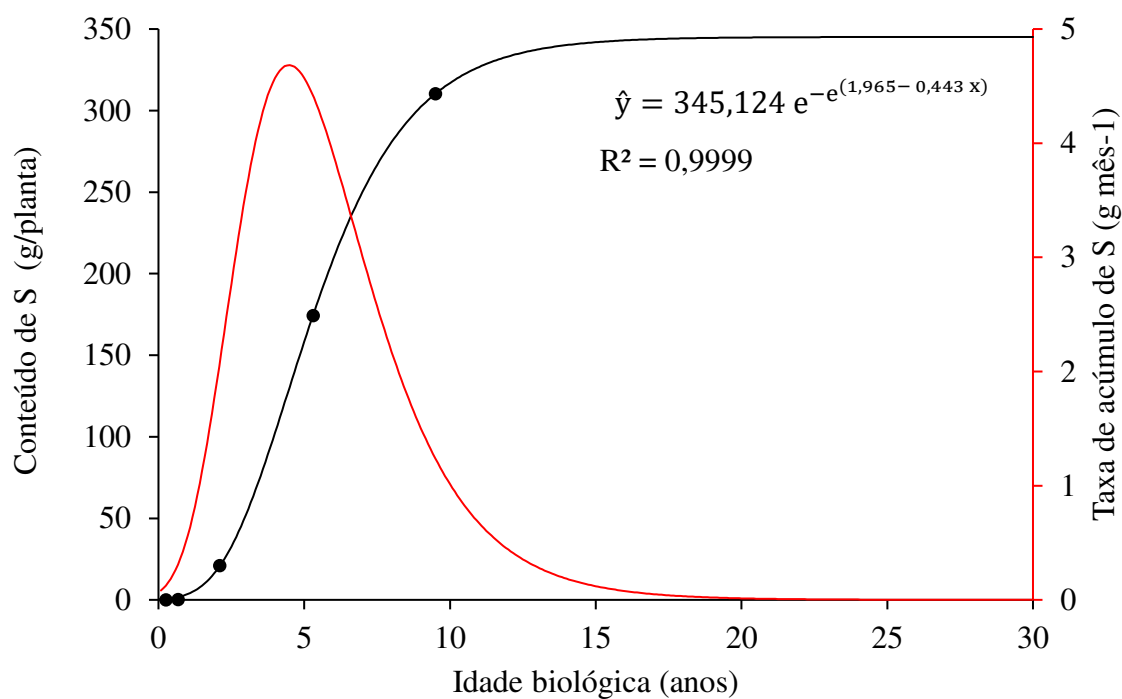


Figura 16. Acúmulo e taxa de acúmulo de S pela macaúba, em função da idade biológica.

3.2.3. Acúmulo de micronutrientes

Além dos macronutrientes supracitados há ainda os micronutrientes, que são elementos minerais igualmente essenciais para o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas, porém requeridos em menor quantidade, sendo responsáveis por apenas 0,45 %, 1,43 %, 6,26 %, 1,98 % e 2,73 % do conteúdo total de nutrientes nas macaúbas de 3 meses, 8 meses, 2,1 anos, 5,3 anos e 9,5 anos de idade, respectivamente (Figura 7).

Dentre os micronutrientes avaliados, o Fe é o micronutriente de maior conteúdo nas macaúbas (Tabela 4 e Figuras 7 e 16). Na macaúba de 9,5 anos o ferro correspondeu à 2,46 % do conteúdo total de nutrientes, representando 90,02 % do total de micronutrientes acumulados. Em seguida temos Mn > B > Zn > Cu, apresentando conteúdos equivalentes à 0,09 % (3,41 % dos micronutrientes), 0,08 % (2,77 % dos micronutrientes), 0,06 % (2,17 % dos micronutrientes) e 0,04 % (1,43 % dos micronutrientes) do conteúdo total de nutrientes, respectivamente. (Figura 7).

A macaúba de 2,1 anos apresentou o maior conteúdo proporcional de Fe nos tecidos vegetais, com 5,72 % de todos nutrientes acumulados na planta, inclusive ficando acima do conteúdo de S (5,21 %) e P (2,45 %) (Figura 7).

Teores elevados de Fe nos tecidos vegetais são característicos das palmáceas (GOH e HARDTER, 2003; WIJEBANDARA e RANASINGHE, 2004). Esse maior requerimento de Fe pode estar relacionado com a elevada capacidade fotossintética da macaúba (PIRES et al., 2013), tanto que as copas das macaúbas, mais especificamente as folhas, apresentaram elevado conteúdo de Fe, inferior apenas ao conteúdo observado nas raízes. Santos (2015) também observou elevado conteúdo de Fe nos tecidos de macaúba.

O Fe atua como precursor para a formação da clorofila e como componentes de enzimas e proteínas (como o citocromo) envolvidas na transferência de elétrons na membrana do tilacoide (reações redox) e sua disponibilidade pode ter uma forte influência na relação PSI/PSII no processo fotossintético (EBERHARD et al., 2008). A macaúba demonstrou elevada sensibilidade à deficiência de Fe, apresentando baixo desenvolvimento, folhas novas com clorose, progredindo para coloração amarelo intenso e posterior senescência da folha, podendo evoluir para morte precoce da planta (PIMENTEL, 2012; MOTOIKE et al., 2013).

Tabela 4. Conteúdo de micronutrientes em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

Compartimentos		Cu		Fe		Zn		Mn		B	
		mg/planta	%	mg/planta	%	mg/planta	%	mg/planta	%	mg/planta	%
Muda pré-viveiro (3 meses)											
Copa	Flecha	0,002		0,028		0,011		0,017		0,028	
	Folíolos	0,033	87,47	0,129	54,50	0,032	71,14	0,083	84,42	0,126	74,43
	Bainhas	0,017		0,066		0,016		0,042		0,063	
Abaixo do solo	Caule saxofone	0,004	6,42	0,085	20,86	0,015	18,03	0,014	8,07	0,040	13,60
	Raízes	0,004	6,11	0,100	24,64	0,009	10,83	0,013	7,51	0,035	11,96
Muda viveiro (8 meses)											
Copa	Flecha	0,050		0,236		0,066		0,055		0,122	
	Folíolos	0,385		4,669		0,395		2,098		1,031	
	Pecíolo	0,154	28,05	1,617	22,68	0,159	49,40	0,766	81,75	0,361	71,31
	Bainhas	0,282		3,727		0,136		0,409		0,589	
Abaixo do solo	Caule saxofone	0,998	32,14	7,574	16,77	0,561	36,61	0,282	6,93	0,560	18,98
	Raízes	1,236	39,81	27,357	60,55	0,214	13,99	0,461	11,32	0,286	9,70
Planta 2,1 anos											
Copa	Flecha	2,711		34,3		5,790		17,176		2,814	
	Folíolos	31,620		1236,7		24,117		223,810		33,551	
	Raque	12,488	15,74	790,2	26,00	4,838	20,91	159,312	74,05	18,520	38,04
	Pecíolo	8,217		439,5		2,614		110,929		11,154	
	Bainhas	60,827		3524,3		25,753		115,848		46,804	
	Estipe	30,478	4,14	412,6	1,78	30,134	9,98	20,772	2,45	11,028	3,72
Abaixo do solo	Caule saxofone	20,399	2,77	813,1	3,51	31,586	10,46	15,400	1,82	18,082	6,10
	Raízes	569,560	77,35	15920,2	68,71	177,006	58,64	183,604	21,68	154,686	52,15
Planta 5,3 anos											
Copa	Flecha	3,664		98,1		13,633		7,998		6,591	
	Folíolos	117,127		6043,7		171,638		272,795		208,947	
	Raque	34,757	12,60	728,3	17,26	49,511	12,52	122,540	57,10	112,798	26,02
	Pecíolo	14,300		338,9		21,144		55,714		50,806	
	Bainhas	38,919		1901,4		58,902		301,311		243,063	
	Estipe	181,529	10,96	7081,0	13,41	764,580	30,40	108,472	8,15	258,955	10,83
Abaixo do solo	Caule saxofone	307,613	18,57	2863,1	5,42	462,358	18,39	181,954	13,66	92,509	3,87
	Raízes	948,728	57,26	33407,0	63,28	950,479	37,80	263,412	19,78	1349,303	56,43
Cacho	Espata	3,504		149,2		9,141		7,470		31,926	
	Raque	2,756	0,47	60,6	0,54	6,370	0,68	5,590	1,16	21,586	2,70
	Ráquilas	1,477		75,2		1,657		2,392		11,006	
Frutos	Epicarpo	0,888		10,5		3,144		0,788		1,325	
	Mesocarpo	0,480		31,0		1,444		0,649		1,069	
	Endocarpo	0,922	0,14	1,3	0,08	0,190	0,21	0,215	0,15	0,893	0,15
	Amêndoa	0,091		1,2		0,503		0,315		0,321	
Planta 9,5 anos											
Copa	Flecha	0,275		3,5		0,897		0,669		0,459	
	Folíolos	87,621		15142,7		214,483		804,395		257,511	
	Raque	26,968	11,26	2682,7	28,79	47,797	18,15	566,918	75,08	84,802	20,11
	Pecíolo	18,304		1981,7		35,675		438,006		60,403	
	Bainhas	127,834		22217,8		339,580		2338,609		499,826	
	Estipe	311,061	13,42	33635,0	23,04	808,408	22,98	387,759	7,02	549,194	12,23
Abaixo do solo	Caule saxofone	439,420	18,95	6451,0	4,42	722,838	20,55	254,277	4,60	195,920	4,36
	Raízes	1169,182	50,43	58761,0	40,26	1096,228	31,16	501,802	9,08	2605,095	58,02
Cacho	Espata	20,430		1777,5		68,225		81,343		65,566	
	Raque	4,618	1,29	260,6	1,81	7,277	2,40	31,767	2,61	9,838	2,01
	Ráquilas	4,874		606,9		8,818		30,866		14,877	
Frutos	Epicarpo	34,331		254,9		55,778		18,045		48,447	
	Mesocarpo	25,879		1195,0		59,463		28,820		36,315	
	Endocarpo	37,205	4,65	925,8	1,68	13,547	4,77	16,103	1,61	47,802	3,25
	Amêndoa	10,364		71,2		38,879		26,213		13,574	

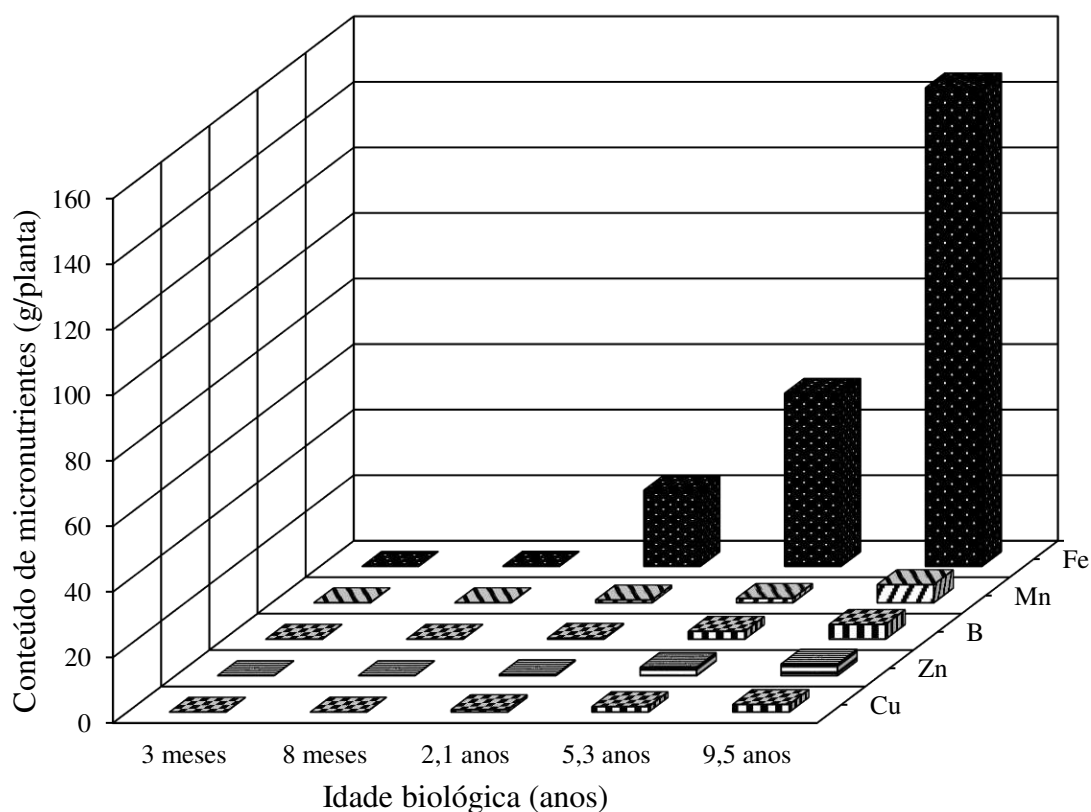


Figura 17. Representação gráfica dos conteúdos de micronutrientes em diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

Entretanto, a ocorrência de elevados teores e, conseqüentemente, de conteúdo de Fe nas raízes das macaúbas pode estar relacionada com a contaminação das amostras, visto a dificuldade de remoção do substrato e do solo, tanto que o menor conteúdo proporcional de Fe foi observado na muda de 3 meses, cultivada em substrato comercial e não em solo como as demais macaúbas. Além disso, solos ácidos, como os das áreas que as plantas foram abatidas, apresentam elevada disponibilidade e, conseqüentemente, absorção de cátions metálicos (Fe, Zn, Mn e Cu) pelas plantas.

De maneira geral, os teores e os conteúdos dos micronutrientes se apresentaram de forma semelhante, sendo observados os maiores valores nas raízes, seguido das copas das macaúbas (Tabelas 2 e 4). Esses maiores teores e conteúdos de micronutrientes observados nas copas das macaúbas foram de Cu, Fe, Zn, Mn e B na muda de 3 meses e de Zn, Mn e B na muda de 8 meses. O Mn foi o único micronutriente observado em maiores teores e conteúdos no mesmo compartimento em todas as idades das macaúbas, sendo na copa (Tabelas 2 e 4).

Além disso, não se pôde relacionar um padrão de tendência de acúmulo de micronutrientes em comum para as diferentes idades das macaúbas. Porém com o aumento da idade das macaúbas a tendência da sequência estabiliza-se, com $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$ (Tabela 4 e Figura 16), mostrando-se semelhante ao observado por Santos (2015) para macaúba, com $\text{Fe} > \text{Zn} \approx \text{Mn} > \text{Cu}$ e por Viégas (1993) para o dendezeiro, com $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Cu}$.

Considerando um stand de 400 plantas ha^{-1} , a cultura da macaúba apresenta potencial de imobilização estimado de 0,948 kg ha^{-1} de Cu, 156 kg ha^{-1} de Fe, 1,450 kg ha^{-1} de Zn e 2,269 kg ha^{-1} de B (Figura 18). Em relação ao Mn, chega-se a 2,210 kg ha^{-1} considerando o conteúdo do micronutriente na planta de 9,5 anos.

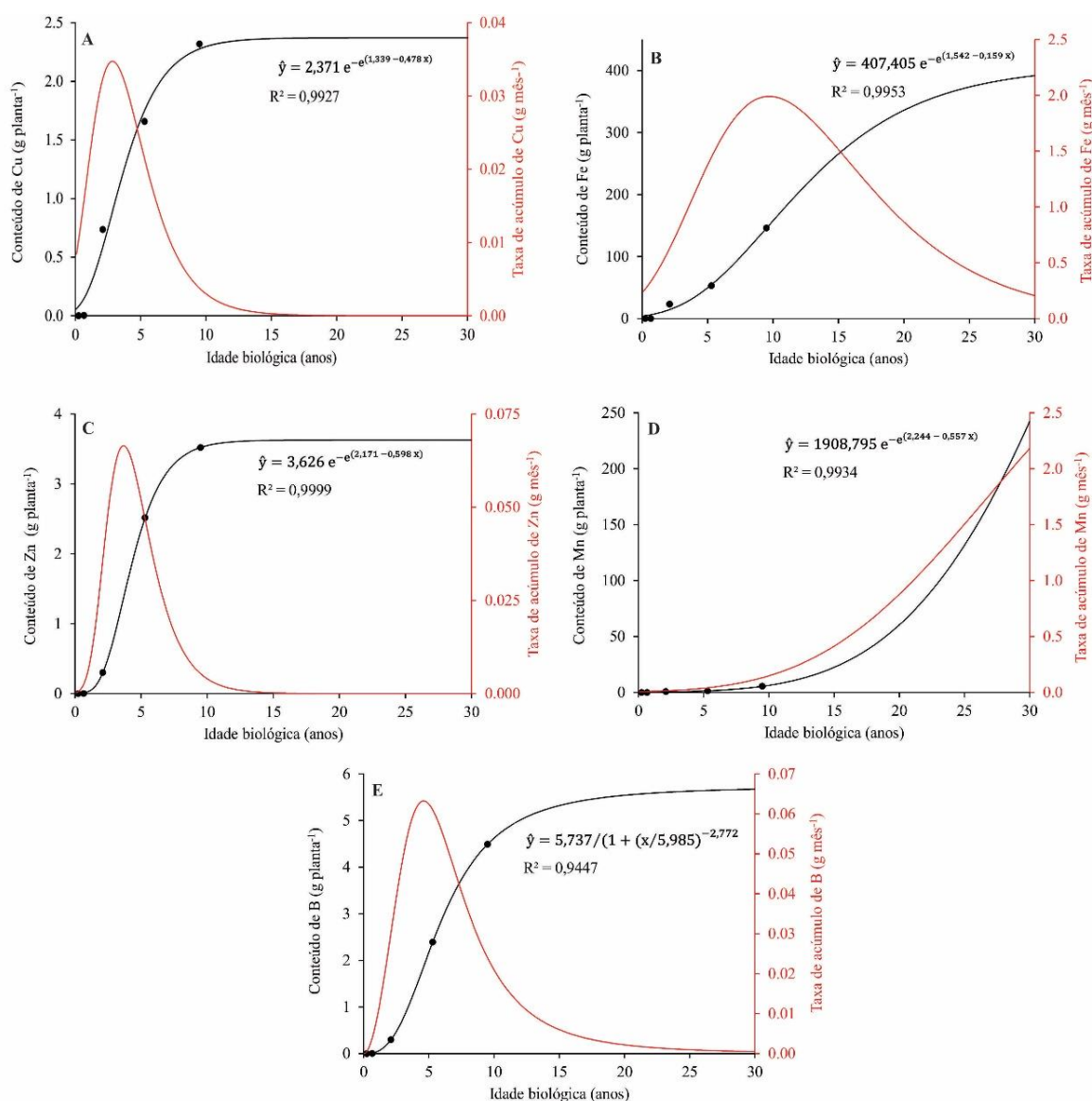


Figura 18. Acúmulo e taxa de acúmulo de Cu (A), Fe (B), Zn (C), Mn (D) e B (E) pela macaúba, em função da idade biológica.

Apesar das diferenças de conteúdo, de imobilização e alocação dos micronutrientes nos diferentes compartimentos das macaúbas, observou-se acúmulo crescente em função da idade das macaúbas (Figuras 17 e 18).

3.3. Eficiência de utilização de nutrientes

O coeficiente de utilização biológico (CUB) é uma maneira agronômica de se expressar a eficiência de conversão de um recurso em biomassa vegetal, no caso, conversão dos nutrientes em biomassa seca de cada compartimento de macaúbas de cinco diferentes idades.

A eficiência de utilização dos nutrientes para produção de biomassa variou em função da idade e dos compartimentos das macaúbas. Os valores do CUB aumentaram em função da idade das macaúbas (Tabelas 5 e 6). Esse comportamento pode ser devido a ocorrência de translocação de nutrientes entre os tecidos vegetais, maior acúmulo de biomassa em compartimentos com menores teores nutricionais e a ocorrência do fenômeno de diluição dos teores nutricionais observado nas macaúbas com o aumento da idade.

De maneira geral, os valores do CUB para macronutrientes decresceram na ordem $P > S > Mg > Ca > N > K$ (Tabela 5), enquanto para micronutrientes seguiram de forma decrescente $Cu > Zn > B > Mn > Fe$ (Tabela 6).

Nos compartimentos vegetativos (copa, estipe, caule saxofone e raízes) os nutrientes P e S apresentaram maior eficiência na conversão em biomassa vegetal (maiores CUB), enquanto os menores valores de CUB foram observados para N e K, com exceção do caule saxofone da macaúba de 5,3 anos e da copa da macaúba de 9,5 anos em que o Ca apresentou o segundo menor valor de CUB, ficando abaixo apenas do K e do N, respectivamente (Tabela 5).

Nos frutos, os valores de CUB dos macronutrientes seguiram, de forma decrescente, $S > P > Mg > Ca > N > K$ na macaúba de 5,3 anos e $P > Mg > S > Ca > N > K$ para a macaúba de 9,5 anos (Tabelas 5).

Isto indica que entre os macronutrientes, o P, S e Mg foram utilizados com maior eficiência pelas plantas na conversão em biomassa dos frutos, enquanto que o Ca, N e K, novamente, foram os nutrientes utilizados com menor eficiência (Tabela 5).

O CUB de P nos frutos apresentando valor abaixo de S, pode ter relação com a maior participação percentual do conteúdo de P nos frutos, com 0,47 % do conteúdo

total do nutriente nas macaúbas de 5,3 anos, apresentando conteúdos acima de S (Tabela 3).

Diante dos resultados observados de CUB nos diferentes compartimentos das macaúbas durante o seu ciclo de crescimento, pode-se inferir melhor o requerimento de nutrientes da cultura da macaúba durante seu crescimento, desenvolvimento e produção.

Tabela 5. Coeficiente de utilização biológica (CUB) de macronutrientes nos diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

	N	P	K	Ca	Mg	S
Compartimentos	kg kg ⁻¹					
Muda pré-viveiro (3 meses)						
Copa	71,2	700,8	60,9	80,7	304,2	520,4
Caule saxofone	129,4	495,0	57,9	158,7	362,3	833,3
Raízes	107,9	819,7	54,7	255,8	354,6	657,9
Muda viveiro (8 meses)						
Copa	83,7	792,5	88,0	122,7	545,2	543,5
Caule saxofone	161,8	641,0	81,0	318,5	751,9	1075,3
Raízes	129,4	632,9	53,2	283,3	581,4	505,1
Planta 2,1 anos						
Copa	118,4	1542,9	176,0	191,7	511,6	834,1
Estipe	136,8	1435,2	147,0	160,9	426,2	774,0
Caule saxofone	154,1	2112,7	78,3	367,6	755,7	869,6
Raízes	105,4	2005,7	237,3	373,8	557,0	726,0
Planta 5,3 anos						
Copa	112,9	1118,5	119,9	170,4	521,8	688,9
Estipe	146,5	1239,4	75,3	250,6	509,0	705,7
Caule saxofone	208,8	1492,5	80,5	198,4	561,8	540,5
Raízes	163,9	1966,4	138,7	378,8	477,3	634,7
Cacho	149,3	1151,5	59,8	468,4	825,1	1346,8
Frutos	140,2	1011,7	133,1	720,4	975,2	1283,2
Planta 9,5 anos						
Copa	131,8	1870,1	290,5	140,7	368,5	1118,6
Estipe	192,5	2041,5	131,3	491,2	356,0	934,1
Caule saxofone	162,6	1884,8	98,7	268,9	742,4	705,7
Raízes	177,0	2001,7	115,4	463,4	516,1	668,0
Cacho	169,8	1818,6	125,7	228,6	337,6	1249,2
Frutos	147,1	1136,2	135,7	680,2	1109,1	850,8

Tabela 6. Coeficiente de utilização biológica (CUB) de macronutrientes nos diferentes compartimentos de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica.

	Cu	Fe	Zn	Mn	B
Compartimentos	kg g ⁻¹				
Muda pré-viveiro (3 meses)					
Copa	57,3	13,5	51,0	21,0	13,8
Caule saxofone	355,9	16,0	91,5	100,1	34,3
Raízes	176,2	6,4	71,8	50,6	18,4
Muda viveiro (8 meses)					
Copa	71,6	6,1	82,4	18,7	29,7
Caule saxofone	47,9	6,3	85,1	169,2	85,3
Raízes	9,6	0,4	55,5	25,8	41,6
Planta 2,1 anos					
Copa	77,4	1,5	142,1	14,3	79,5
Estipe	39,5	2,9	39,9	57,9	109,1
Caule saxofone	87,3	2,2	56,4	115,6	98,4
Raízes	8,6	0,3	27,6	26,6	31,6
Planta 5,3 anos					
Copa	197,5	4,5	131,0	54,2	66,3
Estipe	175,6	4,5	41,7	293,9	123,1
Caule saxofone	40,7	4,4	27,1	68,8	135,2
Raízes	29,4	0,8	29,4	106,0	20,7
Cacho	312,1	8,5	140,7	156,3	37,4
Frutos	176,4	9,5	79,6	213,5	116,5
Planta 9,5 anos					
Copa	366,1	2,3	149,7	23,0	105,8
Estipe	241,6	2,2	93,0	193,8	136,9
Caule saxofone	60,3	4,1	36,6	104,2	135,2
Raízes	46,4	0,9	49,5	108,1	20,8
Cacho	224,8	2,5	79,8	46,7	74,5
Frutos	160,4	7,1	103,1	193,8	118,3

4. CONCLUSÕES

Este é o primeiro estudo envolvendo a avaliação de biomassa, teores, conteúdos e eficiência de utilização de nutrientes ao longo do ciclo de crescimento de macaúbas cultivadas.

A macaúba possui altos valores de acúmulo de biomassa seca e de conteúdo de nutrientes, demonstrando ser uma cultura de elevada exigência nutricional.

A macaúba apresenta padrão sigmoidal de crescimento, com incremento de biomassa seca em todos compartimentos ao longo do ciclo do crescimento da cultura, atingindo acúmulo máximo estimado de 378,52 kg/planta, com maiores acúmulos na copa e no estipe.

O acúmulo de nutrientes aumenta com a idade das macaúbas, assim, o fornecimento de nutrientes via corretivos e fertilizantes deve sempre levar em consideração a idade das plantas.

Os conteúdos de nutrientes nos compartimentos da macaúba apresentam o padrão de sequência $K > N > Ca > Mg > S > P > Fe > Mn > B > Cu > Zn$, com os macronutrientes apresentando os maiores conteúdos nas copas e estipes e os micronutrientes nas raízes e copas das macaúbas.

Os valores de CUB apresentaram a sequência $P > S > Mg > Ca > K > N$ para macronutrientes, e $Cu > Zn > B > Mn > Fe$ para micronutrientes.

Na macaúba, os macronutrientes que apresentaram a maior eficiência de utilização nutricional foram o P e o S.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARES, A.; FALCÃO, N.; YUYAMA, K.; YOST, R. S.; CLEMENT, C. R. Response to fertilization and nutrient deficiency diagnostics in peach palm in Central Amazonia. **Nutr Cycl Agroecosyst.** n. 66, p. 221-32, 2003.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. Official methods of analysis. 12 ed. Washington, 1975. 1094p.
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; CARMO, D. N.; NEVES, J. C. L. Classificação nutricional de sites florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v. 10, p. 112-120, 1986.
- BLANCHARD, R. W.; REHM, G.; CALDWELL, A. C. Sulfur in plant material by digestion with nitric and perchloric acid. Proceedings of the Soil Science Society of America, Madison, v.29, p.71-72, 1963.
- BOHM, W., 1979. **Methods of studying root systems**. 1 ed. Springer-Verlag, Berlin. 1979, 188 p.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de P em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.
- BREMNER, J. M. Total nitrogen. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, p. 1149-1178, 1965.
- CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, p. 769-850, 2007.
- CARDOSO, A., LAVIOLA, B. G., SANTOS, G. S., DE SOUSA, H. U., DE OLIVEIRA, H. B., VERAS, L. C.; FAVARO, S. P. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry , p. systems. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 573-580, 2017.
- DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y.; OLIVEIRA NETO, S. N.; MORAIS, T. C.; FREIRE, -A.; BENTO, S. Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 52-60, 2011.
- DIETRICH, O.H. S. **Época de amostragem foliar e efeito de doses de nitrogênio e potássio em plantas adultas de macaúba**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017. 79 p.
- 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.
- EBERHARD, S.; FINAZZI, G.; WOLLMAN, F.A. The dynamics of photosynthesis. Annual review of genetics, v. 42, p. 463-515, 2008.

EVARISTO, A. B., GROSSI, J. A. S., CARNEIRO, A. D. C. O., PIMENTEL, L. D., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v.85, p.18-24, 2016.

EVARISTO, A. B.; FERNANDEZ-COPPEL, I. A.; GUIMARAES, A. C. ; MARTÍN-GIL, J.; PIMENTEL, L. D.; GROSSI, J. A. S.; RAMOS, P. M. Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis. **Carbon Management**, v. 9, p. 1-12, 2018.

FAYAD, J. A. **Absorção de nutrientes, crescimento e produção do tomateiro cultivado em condições de campo e de estufa**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG: UFV, 1998. 81 f

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.

GOH, K. J.; HÄRDTER, R. General oil palm nutrition. In: FAIRHURST, T.; HARDTER, R. (Eds.). *Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields*. Singapore: Potash & Phosphate Institute and International Potash Institute, p. 191-230, 2003.

GOULART, S.M. **Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2014. 66 p.

HENDERSON, A.; GALEANO, G.; BERNAL, R. **Field guide to the palms of the Americas**. 1995.

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**. New Jersey, PrenticeHall, 1958. 498p.

JARRELL, W. M., BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies, In: **Advance in Agronomy**. ed Brady N. C. (Academic Press, New York, NY), v. 34, p 197–224, 1981.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses**. Los Angeles, University of California, v. 766, p. 32-33, 1959

JOSÉ, C.; EVARISTO, A. B.; MARQUES, G.; MARTÍN-RAMOS, P.; MARTÍN-GIL, J.; GUTIÉRREZ, A. Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 294-304, 2016.

KIYONO, Y.; MONDA, Y.; TORIYAMA, J.; CHADDY, A.; GOG, K. J.; MELLING, L. Destructive sampling method for estimating the biomasses of African oil palm (*Elaeis guineensis*) plantations on tropical peatland. *Bulletin of FFPRI*. 14, 147–158, 2015.

LANES, E. C. M.; COSTA, P. M. A.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, v. 511, n. 7507, p. 31-31, 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006. 550p.

LIMA, N. E.; CARVALHO, A. A.; MEEROW, A. W.; MANFRIN, M. H. A review of the palm genus *Acrocomia*: neotropical green gold. *Org Divers Evol* 18(2):151–161. 2018

MACHADO, W; GUIMARÃES, M. F.; LIRA, F.F.; SANTOS, J. V. F.; TAKAHASHI, L. S. A.; LEAL, A. C.; COELHO, G. T. C. P. Evaluation of two fruit ecotypes (total and sclerocarpa) of macaúba (*Acrocomia aculeata*). **Industrial Crops and Products**, v. 63, p.287–293, 2015.

MANFIO, C. E.; RESENDE, M.D.V.; SANTOS, C.E.M.; MOTIKE, S. Y.; LANZA, M. A.; PAES, J. M. V. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 32-40, 2011.

MANFIO, E. C.; MOTOIKE, S. Y.; RESENDE, M. D. V.; SANTOS, C. E. M.; SATO, A. Y. Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 63-69, 2012.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants** (3 ed.) London: Academic Press, 2012. 651p.

MONTOYA, S. G., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N., COUTO, A. D. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927-938, 2016.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; DIETRICH, O. H. S.; HENRIQUES, E.; FLORES, M. E. P.; PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Root distribution of cultivated macauba trees. **Industrial Crops & Products**, v. 137, p. 646-651, 2019.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S.; PIMENTEL, PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal Of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020.

MOTA, C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S., CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 41-51, 2011.

MOTOIKE, S. Y.; LOPES, F. A.; SÁ JUNIOR, A. Q.; CARVALHO, M.; OLIVEIRA, M. A. R. Processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *Acrocomia*. **Patente: PI0703180-7**. 2007.

MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. The Potential of Macaw Palm (*Acrocomia aculeate*) as Source of Biodiesel in Brazil. **International Review of Chemical Engineering**, v. 1, n. 6, p. 632-635, 2009.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba**: implantação e manejo de cultivos racionais. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 61 p.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p. 1023-1031, 2002.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. 3 Ed. San Diego: Academic Press, 2008. 454 p

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSO NETO, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 20-30, 2011.

PIMENTEL, L. D. **Nutrição Mineral da macaúba: bases para adubação e cultivo**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012. 115 p.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C.H. ; MARTINEZ, H. E. P.; MOTOIKE, S. Y.; MANFIO, E. C.; SANTOS, RC. Effect of Nitrogen and Potassium Rates on Early Development of Macaw Palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1671-1680, 2015.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MANFIO, E. C.; ; MOTOIKE, S. Y.; MARTINEZ, H. E. P. Substrate, lime, phosphorus and topdress fertilization in macaw palm seedling production. **Revista Árvore**, v. 40, p. 235-244, 2016.

PIRES, T. P.; SOUZA, E. S., KUKI, K. N.; MOTOIKE, S.Y. Ecophysiological traits of the macaw palm: A contribution towards the domestication of a novel oil crop. **Industrial Crops and Products**, v. 44, p. 200-210, 2013.

SILVA, J.J., DIAS, T.J., ROLIM, H.O., LIMA, L.R., JÚNIOR, E.B.P. Biomassa aérea e estimativa do carbono orgânico em Agrossistema do coqueiro (*Cocus nucifera*, L.) ano verde irrigado. **Revista Verde**. V. 9, p. 01-07, 2014.

QUEIROGA, V. P.; ALMEIDA, F. A. C.; ALBUQUERQUE, E. M. B; BARROS NETO, J. S.; Tecnologias de Plantio da Macaubeira na Região do Nordeste e Aproveitamento Energético. Campina Grande: AREPB, 2016. 210 p.

SANTOS, R. C. **Aspectos nutricionais e resposta da macaúba a adubação com nitrogênio e potássio**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015. 85 p.

SILVA, J. J., DIAS, T. J., ROLIM, H. O., LIMA, L. R., JÚNIOR, E. B. P. Biomassa aérea estimativa do carbono orgânico em Agrossistema do coqueiro (*Cocus nucifera*, L.) ano verde irrigado. **Revista Verde**. V. 9, p. 01-07, 2014.

SOBRAL L. F.; LEAL M. L. S. Resposta do coqueiro à adubação com ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio em dois solos do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, p. 85-9, 2005.

SOUZA, J. N.; RIBEIRO, L. M.; SIMÕES, M. O. M. Ontogenesis and functions of saxophone stem in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Annals of Botany**, v. 119, p. 353-365, 2017.

TELES H. F.; RESENDE C. F. A.; LEANDRO W. M.; PIRES L. L.; TAVARES P. V. A.; SANTOS R. A. S. G. Teores de nutrientes em folhas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) em diferentes estádios fenológicos no cerrado goiano. In: Anais do IX Simpósio Nacional do Cerrado; 12-17 out 2008; Brasília. ParlaMundi, Brasília, DF.

TELES, H. F.; PIRES, L. L.; GARCIA, J.; ROSA, J. Q. S.; FARIAS, J. G.; NAVES, R.V. Ambientes de ocorrência natural de macaúba. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v, 41, n. 4, p. 595-601, 2011.

VIÉGAS, I. J. M. **Crescimento do dendezeiro (*Elaeis Gumeensis*, jacq), concentração, conteúdo e exportação de nutrientes nas diferentes partes de plantas com 2 a 8 anos de idade, cultivadas em latossolo amarelo distrófico, Tailândia, Pará**. Dissertação (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1993.

VIÉGAS, I. J. M.; BOTELHO, S. M. Nutrição mineral do dendezeiro. In: VIÉGAS, I J. M.; MULLER, A. A. (Ed). **A cultura do dendezeiro na Amazônia Brasileira**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental/Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p. 229-273, 2000. 374p.

VIANA, M C. M.; SILVA, E.A.; QUEIROZ, D. S.; PAES, M. V.; ALBERNAZ, W. M.; FRAGA, G. Cultivo da macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 70-80, 2011.

WIJEBANDARA, D. M. D. I.; RANASINGHE, C.S. Response of rapid decline affected coconut (*Cocos nucifera* L.) palms to micro-nutrients and common salt. *Cocos*. v. 16: p. 11-21, 2004.

CAPÍTULO 2:

EFEITO DE DOSES DE NITROGÊNIO E POTÁSSIO EM PLANTAS ADULTAS DE MACAÚBA EM PLENA PRODUÇÃO

Resumo

A macaúba é uma promissora fonte sustentável de óleo e matérias-primas para diversos setores industriais. Embora a macaúba apresente características de rusticidade e adaptabilidade a áreas com condições adversas de solo e clima, estudos tem demonstrado ser uma cultura responsiva a adubações e de elevadas exigências nutricionais. Dessa forma, para o aprimoramento do manejo nutricional e ajustes na primeira recomendação de adubação para a cultura da macaúba, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito temporal de doses de N e K em macaúbas adultas em plena produção. O experimento foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas, sendo as parcelas constituídas de cinco doses anuais de N+K (0, 375, 750, 1.125 e 1.500 g/planta de N+K) e as subparcelas de três anos de avaliação (8º, 9º e 10º ano). Foram avaliadas as características vegetativas e produtivas, os teores foliares de N e K e os teores de K no solo. Os dados foram submetidos à análise de variância e regressão e as médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de significância. Observou-se que as doses de N+K proporcionaram incrementos significativos nas características vegetativas e produtivas avaliadas ao longo dos três anos, com exceção da projeção da copa e da massa média do fruto. Houve efeito significativo para a interação entre os fatores doses de N+K e ano de avaliação para a maioria das características. A máxima produtividade média de frutos das três safras foi de 24,37 kg/planta com a dose de 1.121,47 g/planta de N+K e, a maior produtividade foi de 40,19 kg/planta com a dose de 1.083,72 g/planta de N+K no 10º ano. A dose média para máxima eficiência econômica foi de 706,74 g/planta de N+K. Plantas adultas de macaúba em plena produção são responsivas à adubação nitrogenada e potássica. O efeito temporal interfere positivamente no desenvolvimento vegetativo e produtivo da macaúba, com destaque para o incremento produtivo no 10º ano de idade de macaúbas cultivadas. Recomendam-se adubações anuais nas faixas de 280 - 340 g/planta de N e de 460 -560 g/planta de K₂O para obtenção de máxima eficiência econômica na produtividade de frutos de macaúbas adultas cultivadas em plena produção.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*. Adubação N+K. Produtividade. Eficiência.

Abstract

Macaw-palm is a promising sustainable source of oil and raw materials for various industrial sectors. Although macaw-palm has characteristics of rusticity and adaptability to areas with adverse soil and climate conditions, studies have shown that it is a crop responsive to fertilization and high nutritional requirements. Thus, in order to improve nutritional management and adjust the first fertilizer recommendation for the macaw-palm crop, the present study aimed to evaluate the temporal effect of N and K doses on adult macaw-palm trees in full production. The experiment was carried out in a split-plot scheme, with the plots consisting of five annual doses of N+K (0, 375, 750, 1,125 and 1,500 g plant⁻¹ of N+K) and the subplots of three years of evaluation (8th, 9th and 10th grade). Vegetative and productive characteristics, leaf N and K contents and K contents in the soil were evaluated. Data were submitted to analysis of variance and regression and means compared by Tukey test at 5% significance level. It was observed that the N+K doses provided significant increments in the vegetative and productive characteristics evaluated over the three years, with the exception of crown projection and average fruit mass. There was a significant effect for the interaction between N+K doses and year of assessment for most traits. The maximum average fruit productivity of the three harvests was 24.37 kg plant⁻¹ with the dose of 1,121.47 kg plant⁻¹ of N+K, and the highest productivity was 40.19 kg plant⁻¹ with the dose of 1,083.72 g plant⁻¹ of N+K in the 10th year. The average dose for maximum economic efficiency was 706.74 g plant⁻¹ of N+K. Adult macaw-palm plants in full production are responsive to nitrogen and potassium fertilization. The temporal effect positively interferes with the vegetative and productive development of macaw-palms, with emphasis on the productive increase in the 10th year of age of cultivated macaw-palms. Annual fertilizations of $\cong$ 300 g plant⁻¹ of N and $\cong$ 500 g plant⁻¹ of K₂O are recommended to obtain maximum economic efficiency in the productivity of adult macaw-palm fruits in full production.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. N+K fertilization. Productivity. Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

O setor agrícola tem ganhado cada vez mais destaque perante o atendimento à demanda mundial por fontes energéticas limpas e sustentáveis. Essa busca por fontes alternativas de energia mostrou-se ainda mais necessária diante da crise energética global que inclusive ameaça a retomada econômica pós-pandemia. Porém, priorizam-se culturas agroenergéticas que não apresentem competição com a produção de alimentos devido ao constante crescimento da população mundial e consequentemente, ao aumento na demanda por alimentos.

Atualmente, a palma de óleo (*Elaeis guineensis*) é a cultura agrícola que apresenta maior produção de óleo no mundo (SHIDOSHI, 2020). De potencial produtivo similar ao da palma de óleo (*Elaeis guineenses*), a macaúba (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Lodd. Ex Mart.) é uma palmeira nativa das regiões tropicais do continente americano (DRANSFIELD et al., 2008) pertencente à família Arecaceae que vem se mostrando uma promissora fonte óleo, tanto em quantidade como em qualidade (COLOMBO et al., 2018).

Estudos tem mostrado que além de sua alta capacidade de produção de óleo (4 t ha^{-1}) para o setor energético (biodiesel e bioquerosene), a macaúba também possui potencial para atender a demanda de matéria-prima de diversos setores industriais visto a variedade de produtos e coprodutos (CORTEZ et al., 2014; EVARISTO et al., 2016; MONTOYA et al., 2016; ABREU et al., 2017).

A macaúba é uma espécie com potencial de se tornar uma cultura agrícola de cultivos em larga escala sem demandar abertura de novas áreas ou competir com culturas agrícolas já estabelecidas, uma vez que possui alta adaptabilidade a diversas condições ambientais, apresenta rusticidade e capacidade de ocupar áreas marginais (MOTTA et al., 2002), sinalizando grande potencial para ser cultivada em áreas degradadas e atualmente pouco produtiva. Nesse contexto, o cultivo da macaúba ainda pode agregar diversos benefícios ambientais potenciais, como recuperação pastagens degradadas (FAVARO e MIRANDA, 2013), cultivos em sistemas agrossilvipastoris (VIANA et al., 2011; COLOMBO et al., 2018; MOREIRA et al. 2018) e sequestro de carbono (MOTA et al., 2011, MOREIRA et al., 2020), justificando assim ser uma promissora fonte de matéria-prima sustentável.

Embora a macaúba apresente estas características de rusticidade e adaptabilidade a áreas com condições adversas de solo e clima, estudos têm

demonstrado ser uma cultura responsiva a adubações (PIMENTEL et al., 2015; SANTOS, 2015; DIETRICH, 2017) e, como caracterizado no Capítulo 1, de elevadas exigências nutricionais mediante altas produtividade e exportação de nutrientes pela colheita.

Porém, um correto manejo nutricional para a cultura da macaúba além de visar aplicação de fertilizantes para a obtenção de elevadas produtividades de frutos também deve buscar eficiência econômica no uso dos fertilizantes, ainda mais diante do atual cenário de elevados custos dos fertilizantes (impulsionados pela baixa oferta e problemas logísticos).

Dessa forma, para o aprimoramento do manejo nutricional e ajustes na primeira recomendação de adubação para a cultura da macaúba, proposta por Pimentel et al. (2011), sobretudo para a adubação de produção, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito temporal de doses de N e K em macaúbas adultas em plena produção.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área do estudo

O estudo foi conduzido na Estação Experimental de Araponga, pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, no município de Araponga, Minas Gerais, Brasil, a 20°39'10"S e 42°32'00"O, altitude de 829 metros e clima regional C_{wb} (subtropical de altitude), segundo classificação de Köppen-Geiger.

2.2. Histórico do experimento

O estudo foi uma continuidade do experimento montado por Pimentel (2012) e posteriormente conduzido por Santos (2015) e Dietrich (2017). A implantação ocorreu em março de 2009 com mudas de três acessos de macaúba originários de diferentes regiões de Minas Gerais (BGP 7, BGP 9 E BGP 15), adotando um espaçamento de 5x5 m entre plantas (densidade de 400 plantas ha⁻¹). As demais condições de implantação e os tratos culturais iniciais são descritos por Pimentel et al. (2015).

A aplicação dos tratamentos, doses anuais de N+K, iniciou-se na primeira estação chuvosa após o plantio. Pimentel et al. (2015) realizaram avaliações nas macaúbas no 2º ano após o plantio (2011). Santos (2015) conduziu o experimento e realizou avaliações no 3º (2012), 4º (2013) e 5º ano após o plantio (2014). E Dietrich (2017) conduziu o experimento a partir de então, e realizou avaliações no 6º (2015) e 7º ano após o plantio (2016), no início da fase reprodutiva.

2.3. Delineamento e condução do experimento

O experimento foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas no tempo, sendo as parcelas constituídas de cinco doses anuais de N+K e as subparcelas de três anos de avaliação, arranjado em delineamento de blocos casualizados com três repetições. O tratamento principal do experimento, referente à parcela, constituiu-se das doses anuais de 0, 375, 750, 1.125 e 1.500 g/planta de N+K na proporção de 0,42 de N e 0,58 de K. As fontes de N e K utilizadas no experimento foram uréia (45% de N) e o cloreto de potássio (KCl, com 58% de K₂O), respectivamente. As subparcelas constituíram-se de três anos de avaliações, realizadas em 2017, 2018 e 2019, correspondendo ao 8º, 9º e 10º ano após o plantio das macaúbas (idade das macaúbas).

A unidade experimental foi constituída de três plantas de macaúba do mesmo acesso e a parcela de três unidades experimentais, uma de cada acesso, totalizando nove plantas por parcela, 45 plantas por bloco e 135 plantas no total do experimento. As unidades experimentais possuíam como bordadura plantas adultas de macaúba de idade e porte semelhantes, as quais não recebiam as adubações (tratamentos).

A aplicação dos tratamentos da adubação nitrogenada e potássica foi dividida em duas etapas, a primeira aplicada no início da estação chuvosa (novembro) e a segunda próximo do término (fevereiro). Os fertilizantes foram aplicados na superfície do solo sob a projeção da copa das macaúbas.

2.4. Características avaliadas

No estudo foram avaliadas características vegetativas, produtivas, teores de foliares de N e K, e teores de K nas camadas superficial e subsuperficial do solo. As avaliações das características vegetativas foram realizadas no mês de agosto, as coletas de amostras foliares e de solo foram realizadas entre os meses de maio e junho, ambas nos anos de 2017, 2018 e 2019. Enquanto as características produtivas foram avaliadas durante as colheitas das safras 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020.

As características vegetativas avaliadas foram altura de planta (AP), número de folhas (NF), projeção da copa (PC) e diâmetro do estipe à altura do peito (DAP) e diâmetro do coleto (DCO).

Para avaliação da AP utilizou-se uma régua constituída de tubo PVC graduada com intervalos de 10 cm, medindo-se a partir do ápice da folha mais jovem (flecha) até o chão. A contagem do NF realizou-se a partir da primeira folha expandida (folha 1), contando apenas as folhas fotossinteticamente ativas (não secas). Para PC utilizou-se uma trena, realizando duas medidas, de posições opostas, do diâmetro da copa a partir dos extremos das folhas, calculando-se uma projeção média entre as duas medidas. E, o DCO e o DAP foram mensurados com uma suta graduada de uso florestal, junto à base do estipe (coleta) e à 1,3 m de altura, respectivamente, também realizando duas medições de forma similar à característica anterior.

As características produtivas avaliadas foram: número de espigas emitidas (NEE), número de cachos por planta (NCP), massa de frutos por planta (MFP), massa de frutos por cacho (MFC), massa média do fruto (MMF), número de frutos por planta (NFP) e número de frutos por cacho (NFC). Todas as massas corresponderam à matéria fresca.

O NEE foi monitorado durante o florescimento anterior, referente à atual colheita.

Durante a colheita, os cachos foram colhidos e os frutos derritados manualmente. Em seguida, com auxílio de uma balança, pesaram-se os frutos colhidos e uma amostra constituída de 10 frutos por cacho. A MMF foi determinada pela divisão por 10 da massa dos frutos da amostra coletada. O NFP e NFC foram estimados pela divisão entre as MFP e MFC pela MMF, respectivamente.

Para realização das avaliações dos teores de N e K, coletaram-se amostras foliares nas plantas de macaúba entre os meses de maio e junho conforme recomendação de Dietrich (2017). As amostras foliares foram compostas de folíolos da parte mediana da décima folha, dentro do intervalo recomendado por Santos (2015), dispensando os terços apicais e basais dos folíolos, sendo as folhas armazenadas em sacos de papel identificados. Cada unidade experimental constituiu-se de uma amostra foliar, ou seja, a coleta foi realizada nas três plantas, formando uma amostra composta representativa da unidade experimental.

Após a coleta, os folíolos foram secos em estufa de circulação forçada de ar, a 65°C, durante 72 horas, moídas em moinho tipo Willey e então conduzidas ao Laboratório de Análise de Planta do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. Para a determinação dos teores de N e K, as amostras trituradas foram submetidas à digestão sulfúrica (JACKSON, 1958) para determinação de N, e submetidas à digestão nitroperclórica para determinação das concentrações K (JOHNSON E ULRICH, 1959). O N foi quantificado pelo método micro Kjeldahl, sendo o nutriente quantificado por titulometria conforme descrito por Bremner (1965) e o K por fotometria de chama.

Para avaliação dos teores de K no solo, coletaram-se amostras em duas profundidades, na camada superficial (0-20 cm) e na camada subsuperficial do solo (20-40 cm). A amostragem foi realizada sob a projeção da copa das macaúbas formando-se amostras compostas representativas de cada parcela experimental. Posteriormente as amostras foram colocadas para secar à sombra e enviadas para o Laboratório de Rotina de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

2.5. Análise das doses de N e K associadas à produtividade da cultura

Para uma correta análise e definição das doses de N e K associadas à melhor produtividade de frutos da cultura da macaúba utilizaram-se os conceitos de Máxima Eficiência Física (MEF) e Máxima Eficiência Econômica (MEE). Entretanto, diante de dificuldades na análise econômica devido à falta de informações acerca de cotações de preços dos frutos da macaúba decidiu-se adotar como MEE o valor de 90% da MEF.

Logo, para o cálculo das doses de N+K associadas à MEF consideraram-se os máximos valores estimados de produtividade da variável massa de frutos por planta (MFP) e, conseqüentemente, para o cálculo das doses de N+K associadas à MEE considerou-se 90% do máximo valor da MFP.

2.6. Análise estatística

Os dados referentes às características produtivas foram transformados pela equação $X = \sqrt{x + 0,01}$ em razão de não terem seguido distribuição normal.

Em seguida os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e análise de regressão. Posteriormente as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey, ao nível de 5% de significância.

As doses de N+K para obtenção das máximas respostas foram calculadas igualando a zero a primeira derivada das equações de regressão.

As análises foram realizadas com o auxílio dos softwares Genes (CRUZ, 2013) e CurveExpert.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de variância observou-se que as doses de N+K proporcionaram incrementos significativos nas características vegetativas e produtivas avaliadas ao longo dos três anos de avaliação das macaúbas em estudo, com exceção da característica vegetativa projeção da copa das macaúbas (PC) e da característica produtiva massa média do fruto (MMF) (Tabela 1).

Observou-se efeito significativo para a interação entre os fatores doses de N+K e ano de avaliação para a maioria das características avaliadas, como número de folhas (NF), diâmetro do coleto (DCO), número de espatas emitidas (NEE), número de cachos colhidos por planta (NCP), massa de frutos por planta (MFP), massa de frutos por cacho (MFC), número de frutos por planta (NFP), número de frutos por cacho (NFC), o teor foliar de K e os teores de K no solo em ambas profundidades (0-20 e 20-40cm) (Tabela 1).

Para o fator doses de N+K observou-se efeito significativo isolado nas características altura de planta (AP) e diâmetro do estipe à altura do peito (DAP). E para o fator ano de avaliação (8º, 9º e 10º ano após o plantio), observou-se efeito significativo isolado apenas para a característica AP (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância e coeficientes de variação dos atributos altura de planta (AP), número de folhas (NF), projeção da copa (PC), diâmetro do coleto (DC), diâmetro do estipe à altura do peito (DAP), número de espatas emitidas (NEE), número de cachos colhidos por planta (NCP), massa de frutos por planta (MFP), massa de frutos por cacho (MFC), massa média do fruto (MMF), número de frutos por planta (NFP), número de frutos por cacho (NFC), teores foliares de N e K e teores de K no solo em função das doses de N+K ao longo de três anos.

Tratamentos		Características vegetativas					Características produtivas							Teores foliares		K no solo	
		NF	AP	PC	DCO	DAP	NEE	NCP	MFP	MFC	MMF	NFP	NFC	N	K	K _{0-20 cm}	K _{20-40 cm}
									(m)					(kg).....		(g)	(g.kg ⁻¹)....
Dose N+K (g/planta)	0	15,25	6,18	5,28	0,39	0,28	2,41	1,42	5,65	1,73	21	142	42	15,87	4,44	38	18
	375	16,82	7,00	5,59	0,44	0,35	3,52	2,60	16,73	4,09	30	444	107	16,81	5,69	76	25
	750	17,80	7,78	5,61	0,46	0,36	4,56	3,46	21,06	5,67	36	578	153	16,94	6,55	120	45
	1125	18,54	8,05	5,81	0,45	0,37	4,67	3,64	25,62	6,51	39	712	176	17,48	7,11	228	93
	1500	18,72	8,32	5,51	0,46	0,38	4,88	3,38	21,58	5,75	42	539	142	17,57	8,00	218	95
Anos de avaliação	8° (2017)	16,24	6,98 b	5,52	0,42	0,33	3,43	2,17	16,51	5,38	34,11	410	131	17,06	5,25	144	48
	9° (2018)	17,48	7,55 a	5,66	0,47	0,36	3,03	1,90	6,50	2,65	32,30	165	68	17,33	7,46	154	62
	10° (2019)	18,57	7,88 a	5,50	0,43	0,35	5,56	4,64	31,37	6,22	34,66	874	172	16,42	6,36	111	55
Fontes de variação		Quadrados médios.....															
Dose N+K		18,44*	6,88**	0,33 ^{ns}	0,0074 ^{ns}	0,0157*	0,90*	1,01**	11,24*	2,67*	6,66 ^{ns}	316,58*	76,86*	4,19**	16,73**	64.662,1**	12.230,8**
Anos de avaliação		24,84**	3,06**	0,11 ^{ns}	0,0096**	0,0024 ^{ns}	1,96**	3,13**	37,79**	3,65**	0,85 ^{ns}	1.100,29**	107,49**	3,28 ^{ns}	18,33**	7.673,6*	716,2 ^{ns}
Dose N+K x Ano		2,31*	0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,0009*	0,0009 ^{ns}	0,05*	0,06*	0,41*	0,12*	0,92 ^{ns}	12,26*	2,66*	2,41 ^{ns}	0,40*	2.976,7*	564,2*
CV A (%)		11,47	12,89	7,18	10,16	20,99	22,16	23,30	36,68	37,17	26,81	39,13	41,42	4,47	11,97	29,00	29,14
CV B (%)		5,97	2,61	2,71	4,57	6,52	11,77	14,17	17,64	13,47	16,47	18,77	13,33	7,73	7,24	28,96	26,71

(1) Médias seguidas de letras iguais não diferem pelo teste Tukey, a 5% de significância. ^{ns}Não significativo. ** e *Significativo pelo teste F, a 1 e 5% de significância, respectivamente.

3.1. Características vegetativas

As características vegetativas AP e DAP foram afetadas de forma isolada pelas doses de N+K (Tabela 1 e Figura 1A e B), com os valores observados melhor ajustando-se à modelos quadráticos (Tabela 2).

A máxima resposta da macaúba para AP foi de 8,31 m, obtida com a dose estimada de 1.606,40 g/planta de N+K, estando fora do intervalo de doses praticado. Diferente do observado para o DAP que obteve o valor máximo estimado, de 0,38 m, com a dose de 1.272,42 g/planta de N+K (Figuras 1A e B).

Os valores médios de AP para o 9º e 10º ano (7,55 m e 7,88 m, respectivamente) não diferiram entre si, porém mostraram-se acima do 8º ano (6,98 m) (Figura 1A). O fato de ter ocorrido efeito isolado tanto das doses de N+K como do fator ano de avaliação para essa característica vegetativa pode sinalizar a chegada das plantas próximo à um estágio de estabilidade no porte das macaúbas. Conforme descrito no Capítulo 1, estima-se que no 10º ano após o plantio (10,6 anos de idade) a macaúba atinja 80% de sua biomassa seca total, sendo que em torno dos 15 anos de idade a macaúba ainda apresenta um acúmulo significativo de biomassa seca.

Nas macaúbas avaliadas foi observado incremento no NF com o aumento das doses de N+K e com aumento da idade, ajustando-se modelos quadráticos para todos os anos, com contagem máxima estimada de 16,91, 19,49 e 21,42 folhas, respectivamente (Figura 1C e Tabela 2). Esses valores de NF foram obtidos com doses estimadas bastante distantes, de 980,54 g/planta, 1.679,32 g/planta e 3.001,57 g/planta de N+K para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente, ficando as duas últimas fora do intervalo de doses praticado (Figura 1C). Porém, o NF estimado para a dose de 1.500 g/planta de N+K para o 9º e 10º ano se mostraram próximos, com 19,36 e 20,5 folhas, respectivamente.

Para DCO ajustaram-se modelos quadráticos para todos anos de avaliação com diâmetros máximos estimados de 0,46 m, 0,49 m e 0,45 m nas doses estimadas de 1.018,73 g/planta, 1.810,77 g/planta (fora do intervalo de doses praticado) e 1.144,37 g/planta, para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente (Figura 1D e Tabela 2).

A observação de valores estimados de DCO para o 10º ano menores que os estimados para o 9º ano e, em alguns intervalos até para o 8º ano, pode estar relacionada com o fato da macaúba ser uma palmácea que mantém as bainhas das folhas aderidas ao estipe durante longos períodos, mesmo quando podadas, e com o

aumento da idade das macaúbas tornou-se mais precisa a aferição da medida do diâmetro do coleto com a perda dessas bainhas na base do estipe das macaúbas.

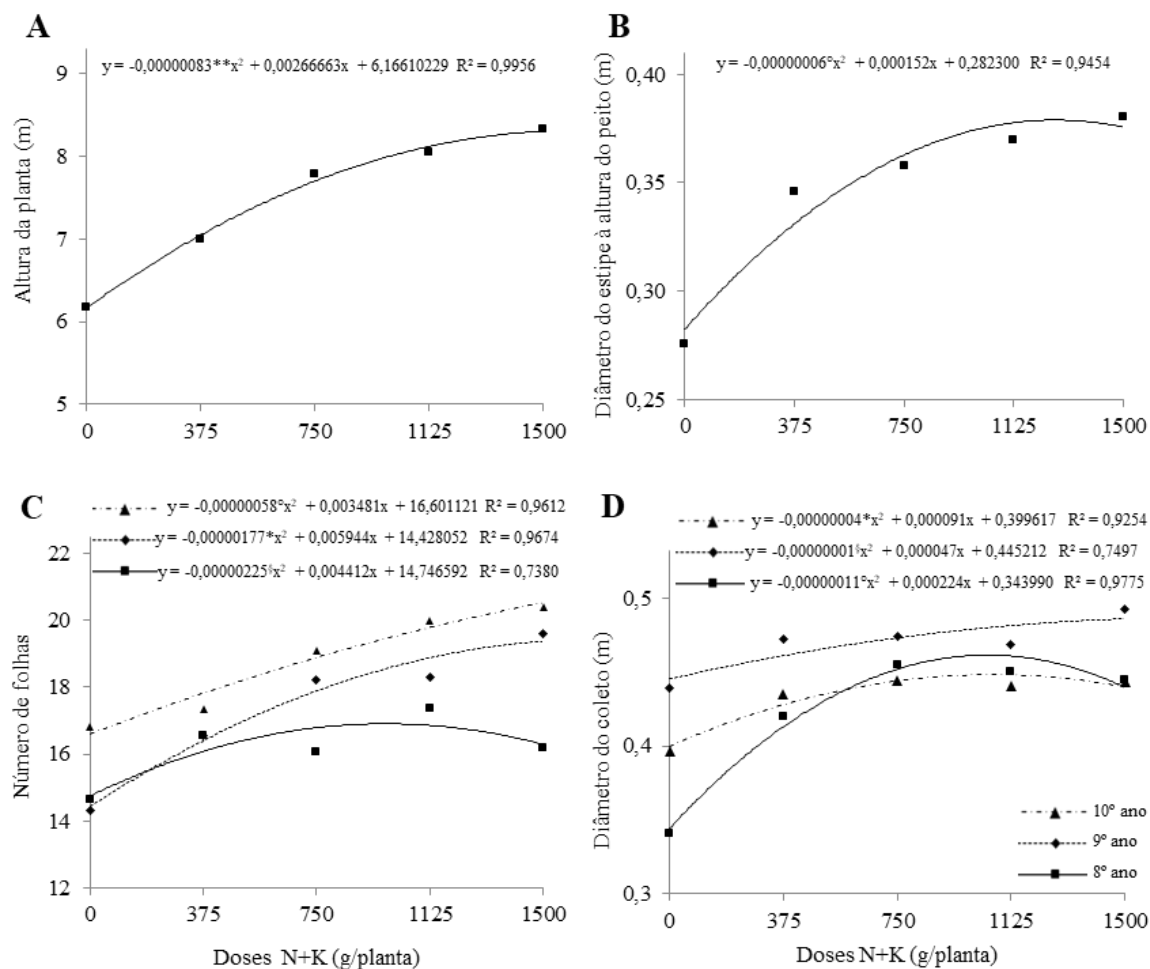


Figura 1. Altura de plantas (A), diâmetro do estipe à altura do peito (B), número de folhas (C) e diâmetro do coleto (D) em função da dose de N+K ao longo de três anos de avaliação. Dados: **, *, ° e §: Significativo a 1, 5, 15 e 25% de significância, respectivamente, pelo teste t.

Tabela 2. Equações de regressão ajustadas e coeficiente de determinação para altura de plantas (AP), número de folhas (NF), diâmetro do estipe à altura do peito (DAP), diâmetro do coleto (DCO), número de espigas emitidas (NEE), número de cachos por planta (NCP), massa de frutos por planta (MFP), massa de frutos por cacho (MFC), número de frutos por planta (NFP), número de frutos por cacho (NFC), teores foliares de N e K e teores de K no solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm em função da dose de N+K ao longo de três anos.

	Variável	Ano	Equações ajustadas	R ²
Características vegetativas	AP		$\hat{y} = -0,00000083^{**}x^2 + 0,00266663x + 6,16610229$	0,9956
	DAP		$\hat{y} = -0,00000006^{\circ}x^2 + 0,00015269x + 0,28230079$	0,9454
	NF	8º ano	$\hat{y} = -0,00000225^{\S}x^2 + 0,00441244x + 14,74659259$	0,7380
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000177^{*}x^2 + 0,00594480x + 14,42805291$	0,9674
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000058^{\circ}x^2 + 0,00348182x + 16,60112169$	0,9612
	DCO	8º ano	$\hat{y} = -0,00000011^{*}x^2 + 0,00022412x + 0,34399074$	0,9775
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000001^{\S}x^2 + 0,00004708x + 0,44521270$	0,7497
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000004^{\circ}x^2 + 0,00009155x + 0,39961720$	0,9255
Características produtivas	NEE	8º ano	$\hat{y} = -0,00000103^{**}x^2 + 0,00345891x + 1,70052910$	0,9990
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000126^{*}x^2 + 0,00377707x + 1,26031746$	0,9793
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000186^{*}x^2 + 0,00387019x + 4,23174603$	0,9657
	NCP	8º ano	$\hat{y} = -0,00000156^{*}x^2 + 0,00370511x + 0,70529101$	0,9856
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000102^{*}x^2 + 0,00294603x + 0,54761905$	0,9556
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000284^{*}x^2 + 0,00544621x + 2,94920635$	0,9784
	MFP	8º ano	$\hat{y} = -0,00001614^{*}x^2 + 0,03585967x + 3,23550952$	0,9887
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000711^{\circ}x^2 + 0,01663447x + 0,02847249$	0,8885
		10º ano	$\hat{y} = -0,00002246^{\circ}x^2 + 0,04868061x + 13,81289259$	0,9331
	MFC	8º ano	$\hat{y} = -0,00000396^{*}x^2 + 0,00939088x + 1,67560816$	0,9764
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000323^{\circ}x^2 + 0,00700589x + 0,12153884$	0,8918
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000344^{\circ}x^2 + 0,00791226x + 3,18591842$	0,9075
	NFP	8º ano	$\hat{y} = -0,00045600^{*}x^2 + 0,97977683x + 60,13144568$	0,9790
		9º ano	$\hat{y} = -0,00019975^{\circ}x^2 + 0,44450013x + 0,20210686$	0,8916
		10º ano	$\hat{y} = -0,00079120^{\circ}x^2 + 1,59567481x + 345,19079133$	0,9273
	NFC	8º ano	$\hat{y} = -0,00011823^{*}x^2 + 0,26206808x + 34,36961089$	0,9639
		9º ano	$\hat{y} = -0,00009026^{\circ}x^2 + 0,18981818x + 2,19878311$	0,8902
		10º ano	$\hat{y} = -0,00012823^{\circ}x^2 + 0,26790775x + 79,68366031$	0,9335
Teor foliar	N		$\hat{y} = -0,00000067^{*}x^2 + 0,00209071x + 15,93026984$	0,9599
	K	8º ano	$\hat{y} = 0,00185985^{*}x + 3,85777778$	0,9463
		9º ano	$\hat{y} = -0,00000071^{*}x^2 + 0,00361765x + 5,35085714$	0,9766
		10º ano	$\hat{y} = -0,00000103^{*}x^2 + 0,00398193x + 4,24133333$	0,9827
Teor de K no solo	K 0-20 cm	8º ano	$\hat{y} = 0,17288889^{*}x + 14,06666667$	0,8806
		9º ano	$\hat{y} = -0,00006925^{\circ}x^2 + 0,24938413x + 25,32380952$	0,9101
		10º ano	$\hat{y} = 0,09173333^{**}x + 41,86666667$	0,9664
	K 20-40 cm	8º ano	$\hat{y} = 0,00001067^{\circ}x^2 + 0,02888889x + 17,26666667$	0,9393
		9º ano	$\hat{y} = 0,06986667^{\circ}x + 9,33333333$	0,7636
		10º ano	$\hat{y} = 0,00001795^{**}x^2 + 0,03654603x + 12,91428571$	0,9968

Dados: **, *, ° e §: Significativo a 1, 5, 15 e 25% de significância, respectivamente, pelo teste t.

3.2. Características produtivas

Em relação às características produtivas, observou-se semelhança no desdobramento da interação entre os fatores doses de N+K e anos de avaliação para seis das sete características avaliadas, com melhores ajustes a modelos quadráticos em todas as curvas dose-resposta (Figura 2 e Tabela 2). Acredita-se que essa semelhança possa ser explicada em parte pela conexão direta entre as mesmas, uma vez que englobam as fases de florescimento (Figura 2A) e colheita dos frutos das macaúbas (Figuras 2B, C, D, E e F).

Outro aspecto importante foi a obtenção das máximas respostas estimadas para as características produtivas dentro do intervalo de doses de N+K praticado, com exceção de apenas de NEE e NCP referentes ao 8º ano (Figura 2), permitindo assim ajustes das doses de recomendação de adubação nitrogenada e potássica para a cultura com maior segurança.

Em relação às safras, os melhores resultados estimados para as características produtivas em relação às doses de N+K foram observadas nas avaliações do 10º ano após o plantio (safra 2019/2020). Enquanto as menores respostas estimadas são sempre do 9º ano (safra 2018/2019), safra intermediária avaliada neste estudo. Os resultados da safra do 9º ano mostraram-se abaixo da safra do 8º ano (safra 2017/2018), frustrando a expectativa de índices produtivos crescentes com a idade das macaúbas.

Maiores detalhes da avaliação da produtividade de frutos das três safras avaliadas neste estudo são apresentados no item intitulado “Análise das doses de N e K associadas à produtividade da cultura”.

Para NEE e o NCP, a máxima resposta estimada foi de 6,24 espatas e 5,56 cachos, ambos no 10º ano, obtidos nas doses de 1.040,37 g/planta e 958,84 g/planta de N+K, respectivamente. Nas safras anteriores o máximo estimado foi 4,60 e 4,09 espatas e 2,90 e 2,67 cachos para o 8º e 9º ano, respectivamente (Figuras 2A e B).

Esse maior número de cachos colhidos na safra do 10º ano, em detrimento das demais safras, acabou acarretando um efeito de maior partição da produção de frutos de macaúba por unidade de cacho. Assim, as diferenças entre os valores das características produtivas mostraram-se menores para MFC e NFC, principalmente entre as safras do 8º e 10º ano (Figuras 2D e F).

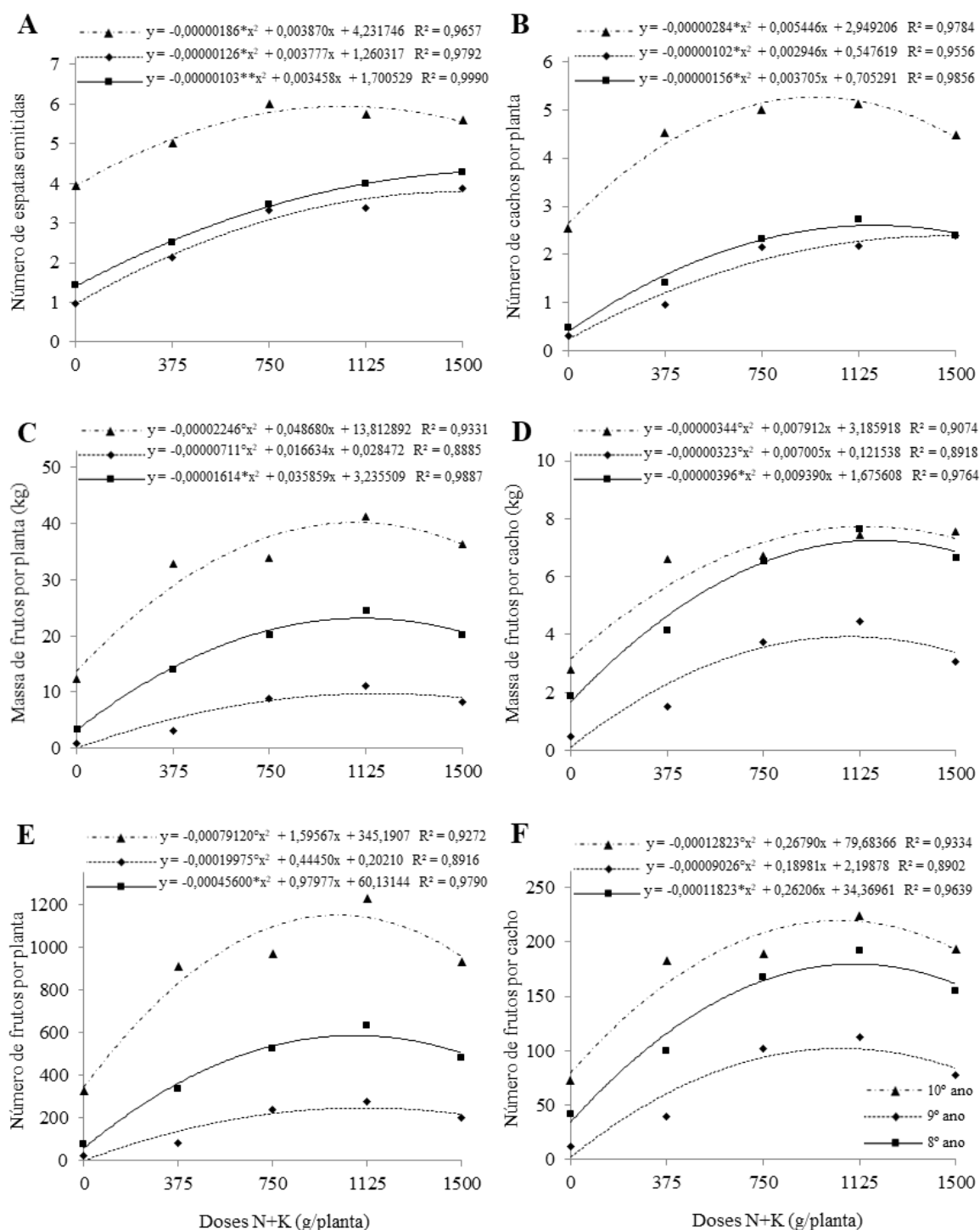


Figura 2. Desdobramento da interação entre doses de N+K e anos de avaliação, quanto a: número de espigas emitidas (A), número de cachos colhidos por planta (B), massa de frutos por planta (C), massa de frutos por cacho (D), número de frutos por planta (E) e número de frutos por cacho (F).

Dados: **, * e %: Significativo a 1, 5 e 15 % de significância, respectivamente, pelo teste t.

Para a MFC os valores estimados são de 7,24 kg cacho⁻¹, 3,92 kg cacho⁻¹ e 7,73 kg cacho⁻¹ nas doses estimadas de 1.185,72 g/planta, 1.084,50 g/planta e 1.150,04 g/planta, para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente (Figura 2D). E em relação ao NFC os valores estimados são de 179,59 frutos cacho⁻¹, 102 frutos cacho⁻¹ e 219,62 frutos cacho⁻¹ nas doses estimadas de 1.108,30 g/planta, 1.051,51 g/planta e 1.044,64 g/planta, para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente (Figura 2F).

Mesmo com perspectivas de aumento da produtividade com o avanço da idade das macaúbas, observou-se neste estudo a importância da avaliação de no mínimo duas safras seguidas para melhor conhecimento acerca do potencial produtivo da cultura e/ou da resposta da macaúba à adubações, diante das irregularidades de produção e possível ocorrência de bienalidade de produção para a cultura, também observado por Barbosa (2021).

Uma possível explicação para a irregularidade de produção da macaúba tem sido atribuída a ocorrência de abortamento de frutos jovens, o que pode ter ocorrido pelo fato dos cachos do 9º ano apresentarem-se menores (menor MFC) que das demais safras com maiores produções (8º e 10º ano), independentemente da dose de N+K. Alguns autores atribuem o abortamento de frutos à possíveis limitações dos polinizadores (SCARIOT et al. 1995) e/ou fatores genéticos (SIMIQUELI et al. 2018), porém o assunto ainda demanda maior entendimento.

Contudo, a observação de menor NEE referentes ao 9º ano (safra 2018/2019) em detrimento dos NEE das demais safras com maiores produções (8º e 10º ano), sinaliza que o abortamento de frutos pode não ser causa isolada da irregularidade de produção entre as safras do estudo, mas que a emissão de espigas pode estar diretamente relacionada a esse fato, uma vez que é fundamental para definição do potencial produtivo da safra.

Assim, surge a hipótese de que a safra do 8º ano pode ter interferido negativamente no potencial produtivo da safra do 9º ano, corroborando com Barbosa (2021), que observou que a produção de cachos de um ano correlaciona-se negativamente com a produção de cachos do ano seguinte.

3.3. Teores foliares

O teor de N nas folhas das macaúbas apresentou melhor ajuste ao modelo quadrático com máximo teor estimado de 17,56 g kg⁻¹, obtido na dose estimada de 1.560,23 g/planta de N+K, dose pouco acima do intervalo de doses praticado (Figura 3^a e Tabela 2).

Para os teores foliares de K, após estudo do desdobramento da interação entre os fatores doses de N+K e ano de avaliação, observou-se melhor ajuste de modelo linear crescente para o 8º ano e quadráticos para o 9º e 10º ano após o plantio (Figura 3B e Tabela 2). Dessa forma, os teores foliares de K estimados na dose de 1.500 g/planta de N+K foram de 6,65 g kg⁻¹, 9,18 g kg⁻¹ e 7,90 g kg⁻¹ para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente.

Os maiores teores de K nas folhas das macaúbas foram observados no 9º ano após o plantio, ano com a menor produtividade de frutos (safra 2018/2019), e consequentemente, menor dreno potencial de nutrientes pelos frutos.

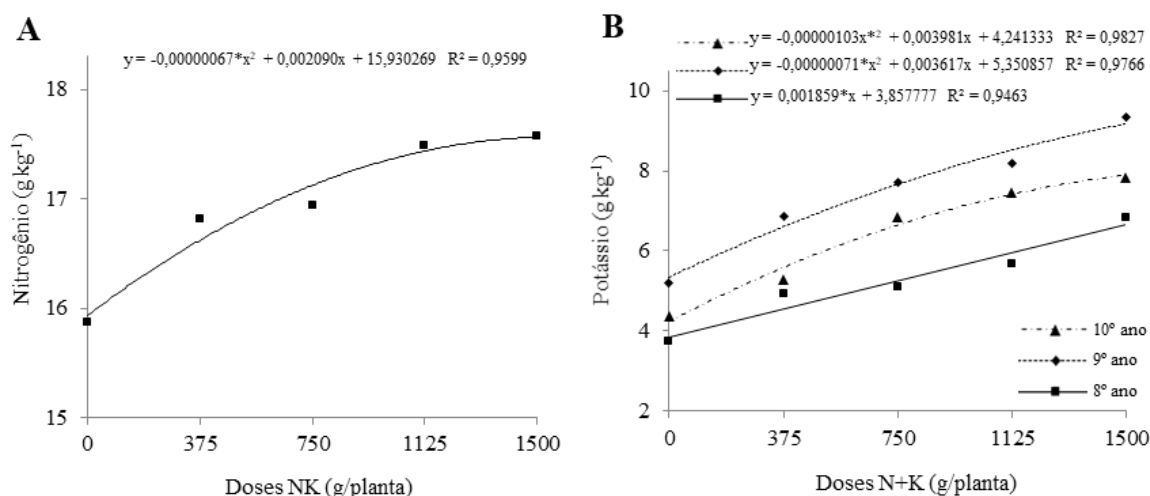


Figura 3. Desdobramento da interação entre doses de N+K e anos de avaliação, quanto aos teores foliares de nitrogênio (A) e potássio (B). **, * e °: Significativo a 1, 5 e 15 % de significância, respectivamente, pelo teste t.

3.4. Teores de K no solo

De modo geral, os incrementos nas características avaliadas neste experimento em resposta às doses de N+K aplicadas ao longo dos três anos de avaliações mostraram-se coerentes com a baixa disponibilidade de K no solo da área experimental, que pode ser observada na dose 0 g/planta de N+K (tratamento testemunha), seja na camada superficial (0-20 cm), com média de 38 mg dm⁻³, ou subsuperficial (20-40 cm), com média de 18 mg dm⁻³. Somado a isso, a macaúba tem se mostrado uma cultura de elevada exigência nutricional mediante os elevados valores de acúmulo de biomassa seca e de imobilização e exportação de nutrientes (SANTOS, 2015; PIMENTEL et al., 2015; Dietrich, 2017, Capítulo 1).

Os teores de K no solo na camada superficial (0-20 cm) apresentaram melhores ajustes à modelos lineares crescentes para o 8º e 10º ano, com incremento de 17,29 mg dm⁻³ e 9,17 mg dm⁻³, respectivamente, para cada 100 g/planta da dose de N+K adicionados. Para o 9º ano obteve-se melhor ajuste ao modelo quadrático (Figura 4A e Tabela 2).

Na camada subsuperficial (20-40 cm) os teores de K no solo apresentaram melhores ajustes à modelos lineares crescentes para o 9º e 10º ano. Para o 8º ano obteve-se melhor ajuste ao modelo quadrático (Figura 4B e Tabela 2).

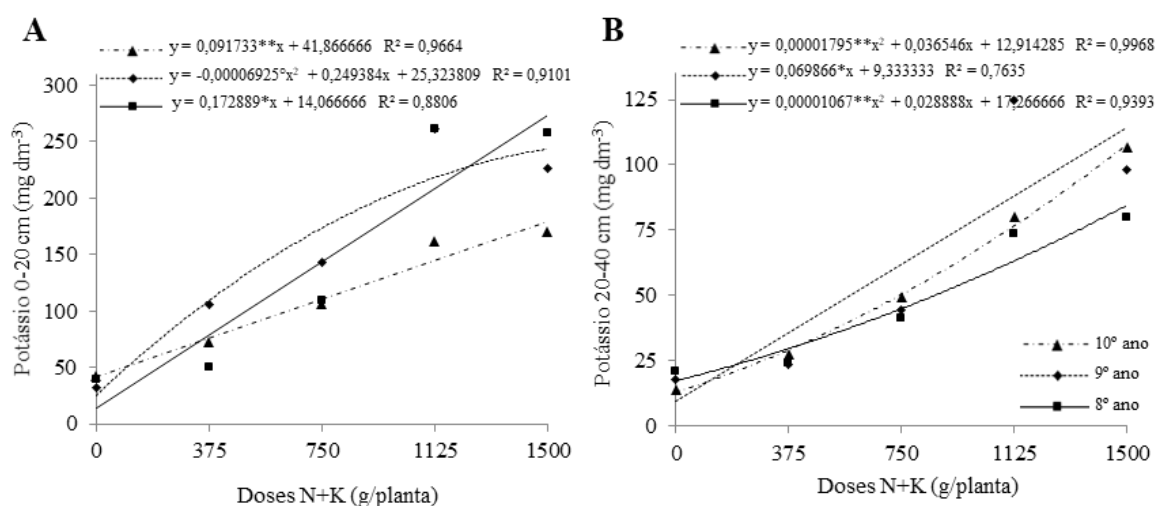


Figura 4. Desdobramento da interação entre doses de N+K e os anos de avaliação, quanto aos teores de K no solo nas camadas superficial (0-20 cm) (A) e subsuperficial (20-40 cm) (B). Dados: **, *

e °: Significativo a 1, 5 e 15 % de significância, respectivamente, pelo teste t.

Assim, os teores estimados de K no solo na dose de 1.500 g/planta de N+K foram de 273,40 mg dm⁻³, 249,84 mg dm⁻³ e 179,47 mg dm⁻³ na camada superficial (0-20 cm) e, de 84,61 mg dm⁻³, 114,13 mg dm⁻³ e 108,12 mg dm⁻³ na camada subsuperficial (20-40 cm), para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente (Figuras 4A e B).

Segundo Moreira et al. (2019), a profundidade efetiva das raízes (PER) pode atingir 1 m em plantas adultas, no entanto, a maioria das raízes encontram-se localizadas na camada superficial do solo (0-20 cm). E analisando de forma mais específica a camada superficial do solo (0-20 cm) (Figura 4A), pode-se observar menores teores estimados de K para o 10º ano após o plantio em comparação com os anos anteriores (Figuras 4A e B). Esta tendência pode estar relacionada com a maior produtividade de frutos nesta safra (2019/2020), e consequentemente, maior demanda potencial e extração de nutrientes pelas macaúbas.

3.5. Análise das doses de N e K associadas à produtividade da cultura

Incrementos de produtividades em respostas às doses de N+K foram observados em todas as safras (Figura 2). As maiores produtividades de frutos, ou máxima eficiência física (MEF), foram de 23,15 kg/planta, 9,76 kg/planta e 40,19 kg/planta, nas safras do 8º (safra 2017/2018), 9º (safra 2018/2019) e 10º ano após o plantio (safra 2019/2020) (Figura 2C e Tabela 3), respectivamente.

As doses de N+K associadas às MEF mostraram-se próximas, variando de 1.083,72 g/planta (10º ano) a 1.169,79 g/planta (9º ano). E a produtividade média das três safras foi de 24,37 kg/planta com a dose de 1.121,47 kg/planta de N+K (Tabela 3).

Tabela 3. Doses estimadas de N+K, N e K (K e K₂O) associadas à máxima eficiência física (MEF) da produtividade de frutos ao longo de três safras (8º, 9º e 10º ano após plantio).

Ano de avaliação (Safr)	ȳ MEF	Dose N+K	Dose N	Dose K	
				(K)	(K ₂ O)
	kg/planta	 g/planta			
8º ano	23,15	1110,89	466,58	644,32	773,18
9º ano	9,76	1169,79	491,31	678,48	814,18
10º ano	40,19	1083,72	455,16	628,56	754,27
Média	24.37	1121.47	471.02	650.45	780.54

As produtividades de frutos obtidas nas doses de máxima eficiência econômica (MEE) foram de 20,84 kg/planta, 8,78 kg/planta, 36,17 kg/planta, nas safras do 8º, 9º e 10º ano após o plantio, respectivamente, resultando numa produtividade média de 21,93 kg/planta (Tabela 4).

As doses de N+K relacionadas às MEE foram de 732,14 kg/planta, 799,33 kg/planta e 660,72 kg/planta de N+K, nas safras do 8º, 9º e 10º ano após o plantio, respectivamente, com uma dose média de 730,72 kg/planta de N+K (Tabela 4).

A diferença entre as doses de N+K para se chegar às MEF e MEE foram de 34,09%, 31,67% e 39,03%, para o 8º, 9º e 10º ano, respectivamente, alcançando assim uma economia média próxima de 35% na aplicação dos nutrientes ao solo.

A produtividade média observada na safra do 10º ano, em torno 40 kg/planta de frutos (16 t ha⁻¹ considerando 400 plantas ha⁻¹), mostrou-se razoável perante as estimativas de produtividade de frutos para a cultura da macaúba encontradas em outros estudos (CETEC, 1983; PIMENTEL et al., 2011).

Em comparação com a 1ª Aproximação da Recomendação de adubação e calagem para a cultura da macaúba (PIMENTEL et al., 2011), as doses de N associadas à MEE (com dose média de 306,90 g/planta) mostraram-se próximas da dose recomendada. E em relação às doses de K, as relacionadas à MEE (com dose média de 508,58 g/planta de K₂O) mostraram-se próximas da recomendação para o 8º ano após o plantio das macaúbas (500 g/planta de K₂O considerando disponibilidade média de K no solo), enquanto as relacionadas à MEF (com dose média de 780,54 g/planta de K₂O) se aproximaram da recomendação para o 10º após plantio (700 g/planta de K₂O considerando disponibilidade média de K no solo).

Tabela 4. Doses estimadas de N+K, N e K (K e K₂O) associadas à máxima eficiência econômica (MEE) da produtividade de frutos ao longo de três safras (8º, 9º e 10º ano após plantio).

Ano de avaliação (Safr)	ȳ MEE	Dose N+K	Dose N	Dose K	
	kg/planta			(K)	(K ₂ O)
			 g/planta		
8º ano	20,84	732,14	307,50	424,64	509,57
9º ano	8,78	799,33	335,72	463,61	556,33
10º ano	36,17	660,70	277,49	383,21	459,85
Média	21,93	730,72	306,90	423,82	508,58

4. CONCLUSÕES

Plantas adultas de macaúba em plena produção são responsivas à adubação nitrogenada e potássica.

O efeito temporal interfere positivamente no desenvolvimento vegetativo e na produção da macaúba, com destaque para o incremento produtivo no décimo ano de idade de macaúbas cultivadas.

Recomendam-se adubações anuais nas faixas de 280 - 340 g/planta de N e de 460 -560 g/planta de K_2O para obtenção de máxima eficiência econômica na produtividade de frutos de macaúbas adultas cultivadas em plena produção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, W. C. D.; MOURA, C. V.; COSTA, J.; MOURA, E. M. D. Strontium and nickel heterogeneous catalysts for biodiesel production from macaw oil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2017.

BARBOSA, M. A. M. **Ecofisiologia, frutificação e produtividade da macaúba**: um estudo sobre a influência de fatores ambientais e práticas agrícolas. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021. 145 p.

BREMNER, J. M. Total nitrogen. In: BLACK, C. A. Methods of soil analysis. Madison, **American Society of Agronomy**, p. 1149-1178, 1965.

Centro Tecnológico de Minas Gerais / Ministério Indústria e Comércio (CETEC-MG). **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais (VI)**: Estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais. Belo Horizonte: Relatório Final Convênio STI-MIC-CETEC. 1983. 152 p.

COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C.; DIAZ, B. G.; FERRARI, R. A. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. OCL, v. 25, n. 1, p. D108, 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. **Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: A flightpath to aviation biofuels in Brazil**, Blucher, São Paulo. 2014. 272 p.

CRUZ, C.D. **GENES** - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. Acta Scientiarum. Agronomy, v.35, p.271-276, 2013.

DIETRICH, O.H. S. **Época de amostragem foliar e efeito de doses de nitrogênio e potássio em plantas adultas de macaúba**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2017. 79 p.

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., GROSSI, J. A. S., CARNEIRO, A. D. C. O., PIMENTEL, L. D., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v.85, p.18-24, 2016.

FAVARO, S. P.; MIRANDA, C.H. B. Aproveitamento de espécies nativas e seus coprodutos no contexto de biorrefinaria. Embrapa Agroenergia, Documentos 14, p. 38, 2013

JACKSON, M.L. **Soil chemical analysis**. New Jersey, PrenticeHall, 1958. 498p.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses**. Los Angeles, University of California, v. 766, p. 32-33, 1959.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; SILVERT, C.; DIETRICH, O. H. S.; PIMENTEL, PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. **Journal Of Cleaner Production**, v. 265, p. 121628, 2020.

MOREIRA, S.L.S.; PIRES, C.V.; MARCATTI, G.E.; SANTOS, R.H.S.; IMBUZEIRO, H.M.A; FERNANDES, R.B.A. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agric. For. Meteorol.** 256–257, 379–390, 2018.

MONTOYA, S. G., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N., COUTO, A. D. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927-938, 2016.

MOTA C. S.; CORRÊA, T. R.; GROSSI, J. A. S., CASTRICINI, A.; RIBEIRO, A. S. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 41-51, 2011.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p. 1023-1031, 2002.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSO NETO, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 20-30, 2011.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H. ; MARTINEZ, H. E. P.; MOTOIKE, S. Y.; MANFIO, E. C.; SANTOS, RC. Effect of Nitrogen and Potassium Rates on Early Development of Macaw Palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1671-1680, 2015.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MANFIO, E. C.; MOTOIKE, S. Y.; MARTINEZ, H. E. P. Substrate, lime, phosphorus and topdress fertilization in macaw palm seedling production. **Revista Árvore**, v. 40, p. 235-244, 2016.

SANTOS, R. C. **Aspectos nutricionais e resposta da macaúba a adubação com nitrogênio e potássio**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015. 85 p.

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata*: patterns and consequences. **Biotropica**, v. 27, n. 2, p. 168, 1995.

SHIDOSHI, C. J. Palm Oil (Dênde): the great commercial growth of oleaginous in Brazil. – **Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 2, p. 01-18, 2020.

SIMIQUELI, G. F. et al. Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 652–659, 2018.

VIANA, M C. M.; SILVA, E.A.; QUEIROZ, D. S.; PAES, M. V.; ALBERNAZ, W. M.; FRAGA, G. Cultivo da macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 70-80, 2011.

CAPÍTULO 3:

SISTEMA DE RECOMENDAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES PARA A CULTURA DA MACAÚBA COM BASE NO BALANÇO NUTRICIONAL (FERTICALC-Macaúba)

Resumo

A macaúba é uma palmeira de grande potencial agrícola para produção de óleo e de diversas outras matérias-primas. Entretanto, o cultivo racional da macaúba é recente e muitos fatores agronômicos e tratos culturais encontram-se em fase de estudo e desenvolvimento. Dentre os fatores que interferem no desenvolvimento e produção da cultura, o manejo nutricional mostra-se decisivo para obtenção dos rendimentos produtivos desejados. Portanto, propõe-se que a atualização da recomendação de adubação da macaúba seja realizada com forte embasamento conceitual e de modo que permita constantes atualizações e ajustes, mediante o desenvolvimento e utilização de sistemas para recomendação de adubação baseados em modelos matemáticos. Assim, o estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba com base no balanço nutricional da cultura (FERTICALC-Macaúba). Para a realização do balanço nutricional da cultura dividiu-se o sistema FERTICALC-Macaúba em dois subsistemas: o subsistema requerimento que contemplou a demanda de nutrientes para o acúmulo de biomassa seca da planta e os valores da demanda de nutrientes para a produção de frutos, com um acréscimo de uma dose do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola à longo prazo, e o subsistema suprimento, que se refere aos nutrientes disponibilizados pelo solo, pela matéria orgânica do solo (MOS) e pelos resíduos vegetais da cultura. O FERTICALC-Macaúba é uma nova alternativa para a recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba baseado em modelagem e no balanço nutricional da cultura desenvolvido com forte embasamento conceitual. O FERTICALC-Macaúba estimou a demanda e o requerimento de nutrientes pela cultura em função do acúmulo de nutrientes na biomassa da macaúba e da produtividade de frutos, bem como o suprimento de nutrientes pelo solo explorado pelas raízes absorventes nas camadas de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, pela matéria orgânica do solo e pelos resíduos vegetais da cultura. O desenvolvimento do sistema FERTICALC-Macaúba permitiu observar que a matéria orgânica do solo é uma importante fonte de N, assim como os resíduos vegetais da cultura para os nutrientes em geral.

Palavras-chave: *Acrocomia aculeata*. Modelagem. Demanda de nutrientes. Suprimento de nutrientes. Balanço nutricional.

Abstract

Macaw-palm is a palm tree with great agricultural potential for the production of oil and various other raw materials. However, the rational cultivation of macaw-palm is recent and many agronomic factors and cultural treatments are in the study and development phase. Among the factors that interfere with the development and production of the crop, nutritional management is decisive for obtaining the desired productive yields. Therefore, it is proposed that the macaw-palm fertilization recommendation be updated with a strong conceptual basis and in a way that allows constant updates and adjustments, through the development and use of systems for fertilizer recommendation based on mathematical models. Thus, the study aimed to develop a model for recommending liming and fertilization for the macaw-palm crop based on the nutritional balance of the crop (FERTICALC-Macaw-palm). In order to carry out the nutritional balance of the crop, the FERTICALC-Macaw-palm system was divided into two subsystems: the requirement subsystem that contemplated the demand for nutrients for the accumulation of dry biomass of the plant and the values of the demand for nutrients for fruit production, with an addition of a nutrient dose to maintain the sustainability of the farm in the long term, and the supply subsystem, which refers to the nutrients made available by the soil, by soil organic matter (SOM) and by crop plant residues. FERTICALC-Macaw-palm is a new alternative for recommending liming and fertilization for the macaw-palm crop based on modeling and on the nutritional balance of the crop developed with a strong conceptual basis. FERTICALC-Macaw-palm estimated the demand and requirement for nutrients by the crop as a function of the accumulation of nutrients in the macaw-palm biomass and fruit productivity, as well as the supply of nutrients by the soil exploited by the absorbent roots in the layers of 0 – 20 cm and 20 – 40 cm, by soil organic matter and plant residues from the crop. The development of the FERTICALC-Macaw-palm system made it possible to observe that soil organic matter is an important source of N, as well as crop residues for nutrients in general.

Keywords: *Acrocomia aculeata*. Modeling. Nutrient demand. Nutrient supply. Nutritional balance.

1. INTRODUÇÃO

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) é uma palmeira de porte arbóreo de grande dispersão natural no Brasil e com elevado potencial para exploração no setor de biocombustíveis e no setor energético em geral (MOTOIKE e KUKI, 2009; LANES et al., 2014; COLOMBO et al., 2018; BIESDORF, 2021), bem como de matéria-prima para diversas outras cadeias industriais (EVARISTO et al., 2016; JOSÉ et al., 2016).

No entanto, o cultivo racional da macaúba é recente, com poucas lavouras em fase de plena produção. Nos últimos anos grandes avanços no manejo da cultura foram alcançados, porém muitos fatores agronômicos e tratos culturais encontram-se em fase de estudo e desenvolvimento.

Dentre os fatores que interferem no crescimento, desenvolvimento e produção da cultura, o manejo nutricional mostra-se decisivo para obtenção dos rendimentos produtivos desejados, uma vez que a macaúba tem se mostrado ser uma cultura de elevada exigência nutricional mediante altos valores de acúmulo de biomassa seca e imobilização e exportação de nutrientes pelos frutos (SANTOS, 2015; PIMENTEL et al., 2015; MOREIRA et al., 2019; Capítulo 1).

A atual recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba, proposta por Pimentel et al. (2011), mostra-se bem embasada, contudo, o manejo nutricional das culturas agrícolas demanda constantes ajustes e atualizações.

Além disso, recomendações de adubação com tabelas fixas apresentam limitações devido levar em consideração apenas faixas de disponibilidades de nutrientes apresentados nas análises de solo, desprezando o potencial de liberação de nutrientes pelos resíduos vegetais da cultura e outros fatores que interferem diretamente no requerimento da cultura como a imobilização de nutrientes na biomassa da planta e a expectativa de produtividade.

O elevado custo dos fertilizantes também tem estimulado o desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas que visam maior eficiência e mitigação de perdas dos fertilizantes. A definição de doses adequadas de fertilizantes para a cultura da macaúba pode significar não apenas aumento na produtividade de frutos, mas também queda no desperdício de fertilizantes.

Portanto, propõe-se que a atualização da recomendação de adubação da macaúba seja realizada com forte embasamento conceitual e de modo que permita

constantes atualizações e ajustes, mediante o desenvolvimento e utilização de sistemas para recomendação de adubação baseados em modelos matemáticos (TOMÉ JÚNIOR e NOVAIS, 2000; TOMÉ JÚNIOR, 2004).

Esta alternativa de recomendação de calagem e adubação baseia-se no modelo de balanço nutricional, que permite determinar a dose do nutriente a ser adicionado na forma de fertilizante por meio da diferença entre a demanda de nutrientes pela cultura e a oferta de nutrientes pelo solo, também considerando uma demanda do nutriente no solo para manter a sustentabilidade da exploração agrícola à longo prazo.

Sistemas de recomendação de calagem e adubação baseados em modelagem e no balanço nutricional da cultura mostram-se eficientes e são empregados em diversas culturas como eucalipto (BARROS et al.; 1995), arroz (RAFFAELI, 2000), milho (CARVALHO, 2000), tomate (MELLO, 2000), cana-de-açúcar (FREIRE, 2001), coco (ROSA, 2002), algodão (POSSAMAI, 2003), teca (OLIVEIRA, 2003), banana (OLIVEIRA et al., 2005), soja (SANTOS et al., 2008), abacaxi (SILVA et al., 2009), laranja (STAHRINGER, 2013), dendê (GAMARRA, 2013), batata (RAMÍREZ, 2015), cenoura (DEZORDI et al., 2015), dentre outras.

Assim, este estudo teve como objetivo desenvolver um sistema de recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba baseado em modelagem e no balanço nutricional da cultura (FERTICALC-Macaúba).

2. SISTEMA FERTICALC

O sistema FERTICALC está fundamentado nos princípios do balanço nutricional, que permite determinar a dose do nutriente a ser adicionado na forma de fertilizante por meio da diferença entre a demanda de nutrientes pela cultura e a oferta de nutrientes pelo solo, também considerando uma demanda do nutriente no solo para manter a sustentabilidade da exploração agrícola à longo prazo.

Tomé Jr e Novais (2000) define de forma genérica o sistema FERTICALC através da seguinte equação:

$$\text{Nut}_{\text{fert}} = ((\text{Nut}_{\text{planta}} - \text{Nut}_{\text{solo}}) + \text{Nut}_{\text{sust}}) / \text{Ef} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que:

Nut_{fert} = nutriente a ser adicionado na forma de fertilizantes;

$\text{Nut}_{\text{planta}}$ = demanda de nutrientes pela cultura;

Nut_{solo} = oferta de nutrientes pelo solo;

Nut_{sust} = demanda do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola;

Ef = índice de eficiência de absorção pela cultura do nutriente aplicado como fertilizante.

Para a realização do balanço nutricional da cultura divide-se o sistema FERTICALC em dois subsistemas: o subsistema requerimento que contempla a demanda de nutrientes pela planta para seu crescimento, desenvolvimento e produção e o subsistema suprimento, que se refere aos nutrientes disponibilizados pelo solo, pela matéria orgânica do solo (MOS) e pelos resíduos vegetais da cultura.

Um fluxograma simplificado do FERTICALC-Macaúba pode ser observado na figura 1.

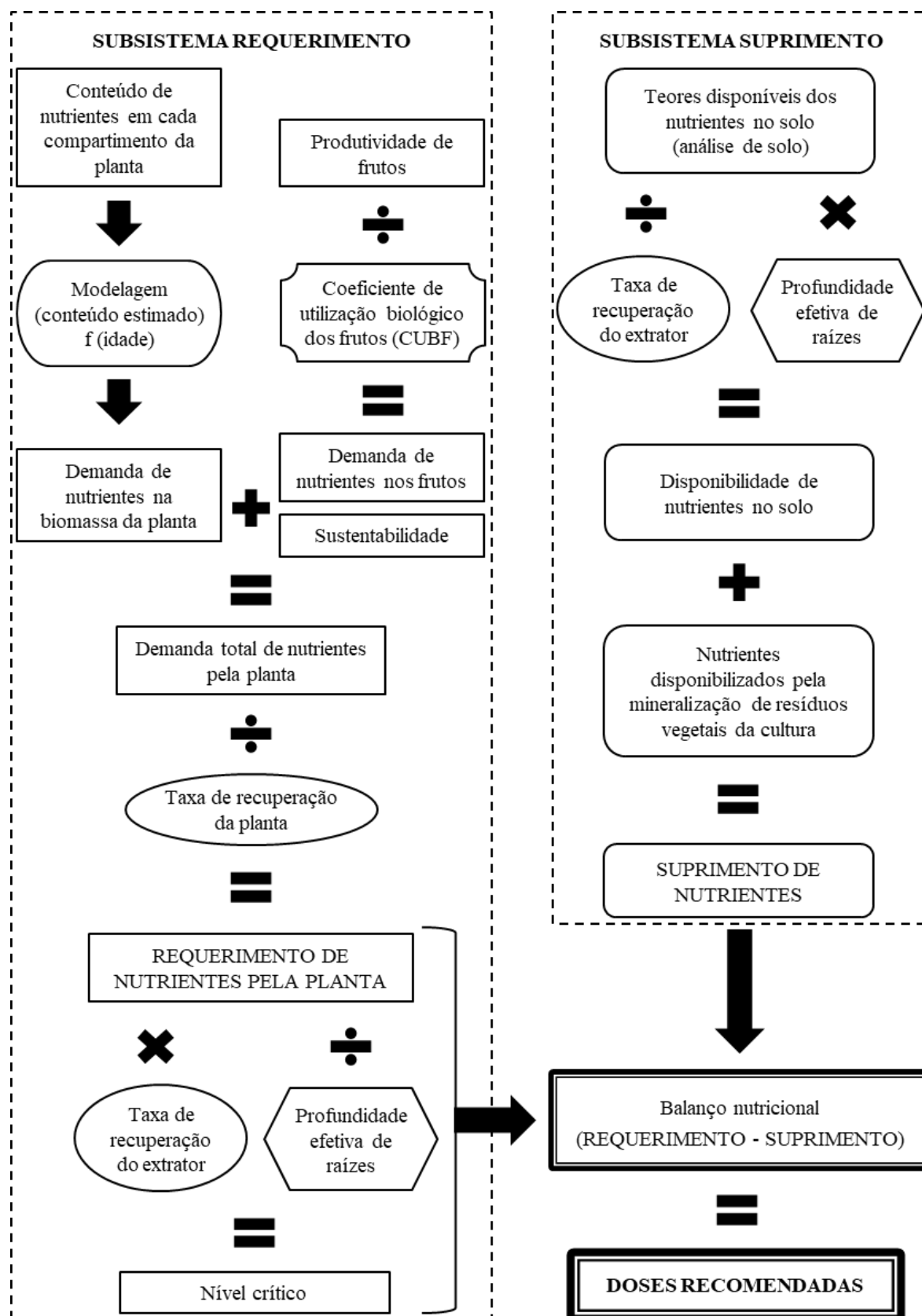


Figura 1 – Fluxograma das etapas que compõem o FERTICALC-Macaúba.

No subsistema requerimento são calculados os valores da demanda de nutrientes para o acúmulo de biomassa seca em cada compartimento da planta e os valores da demanda de nutrientes para a produção de frutos, com opção de acréscimo de uma dose do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola à longo prazo, também chamada de dose de segurança.

Com a soma dessas demandas obtêm-se a demanda total de nutrientes pela planta (dt_Nut), e em seguida, levando-se em consideração a taxa de recuperação da planta dos fertilizantes aplicados (tr_{pl_Nut}), obtêm-se então o requerimento de nutrientes pela planta.

Os valores de níveis críticos dos nutrientes no solo requeridos pela planta podem ser obtidos a partir da divisão do requerimento de nutrientes pela taxa de recuperação pelo extrator (tr_{ext}) e posterior multiplicação pelo volume de solo explorado de forma efetiva pelo sistema radicular da macaúba.

No subsistema suprimento é analisado a disponibilidade de nutrientes no solo acessível ao sistema radicular da planta, através do conhecimento do volume de solo explorado pelas raízes absorventes, levando em consideração as taxas de recuperação pelo extrator (tr_{ext}) de cada nutriente.

Além disso, para os valores de suprimento de nutrientes também é somado o potencial de disponibilização de nutrientes pela mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) e dos resíduos vegetais da cultura ao longo do tempo.

3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA FERTICALC-MACAÚBA

Para o desenvolvimento do sistema de balanço nutricional da macaúba foi realizado uma busca por informações à cerca da demanda nutricional da espécie e das possíveis fontes de nutrientes para a cultura (SANTOS, 2015; PIMENTEL et al., 2011; BIESDORF, 2021; Capítulo 1). Assim como as metodologias para o desenvolvimento do sistema já realizado para outras culturas agrícolas (BARROS et al., 1995; RAFFAELI, 2000; CARVALHO, 2000; MELLO, 2000; FREIRE, 2001; ROSA, 2002; POSSAMAI, 2003; OLIVEIRA, 2003; OLIVEIRA et al., 2005; SANTOS et al., 2008; SILVA et al. 2009; STAHRINGER, 2013; GAMARRA, 2013; RAMÍREZ, 2015; DEZORDI et al., 2015).

Esses dados viabilizaram o desenvolvimento desse modelo de recomendação de adubação e calagem para a cultura da macaúba com base no balanço nutricional, o FERTICALC-Macaúba.

As tabelas e gráficos apresentados no decorrer do desenvolvimento do sistema FERTICALC-Macaúba apresentam dados e estimativas relacionados ao requerimento e ao suprimento de nutrientes ao longo de trinta anos, período estimado do ciclo de produção da cultura da macaúba.

3.1. Subsistema Requerimento

Para se estimar o requerimento de nutrientes pela cultura da macaúba primeiramente foi necessário buscar dados na literatura relacionados ao acúmulo de biomassa seca e de nutrientes nas plantas e nos frutos ao longo do ciclo de vida da cultura. No Capítulo 1, em estudo sobre o acúmulo de biomassa seca, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes por macaúbas cultivadas observou-se que a espécie apresenta padrão sigmoidal de crescimento, com incremento de biomassa seca em todos compartimentos ao longo do ciclo do crescimento da cultura (Figura 2).

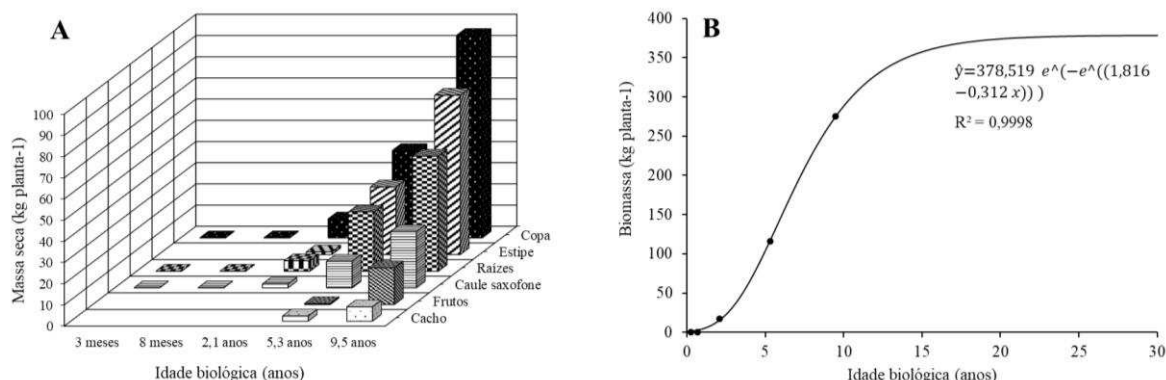


Figura 2. Acúmulo e distribuição observada de biomassa seca em diferentes compartimentos (A) e acúmulo estimado de biomassa seca total de macaúbas cultivadas, em função da idade biológica (B) (Fonte: Capítulo 1).

O conhecimento acerca do acúmulo de biomassa seca, da partição nos diferentes compartimentos da planta e das taxas de acúmulos de biomassa além de direcionar ajustes no modelo de recomendação de adubação e calagem também auxilia no manejo da adubação da macaúba, apontado momentos de maior ou menor exigência nutricional ao longo do ciclo da cultura, e assim, otimizando o crescimento e produção de frutos, e evitando desperdício de fertilizantes.

3.1.1. Demanda de nutrientes pela biomassa da macaúba

A macaúba possui altos valores de acúmulo de biomassa seca e de conteúdo de nutrientes, demonstrando ser uma cultura de elevada exigência nutricional (SANTOS, 2015; PIMENTEL et al., 2015; MOREIRA et al., 2019; Capítulo 1) (Figura 2 e 3).

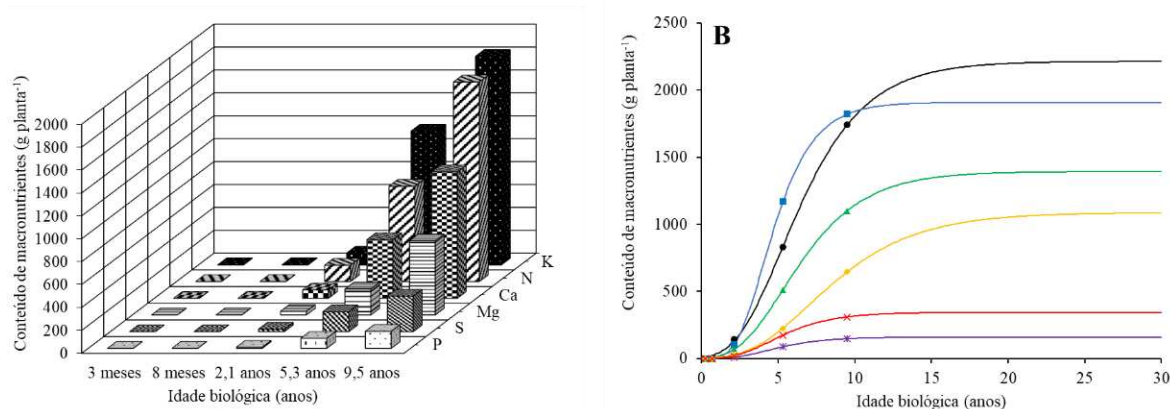


Figura 3. Acúmulo observado e estimado de macronutrientes na biomassa seca da macaúba, em função da idade biológica (Fonte: Capítulo 1).

As demandas de nutrientes para o acúmulo de biomassa seca pela cultura da macaúba foram estimadas por modelagem a partir de equações ajustados no Capítulo 1 a partir de dados observados de acúmulo de biomassa seca, teores nutricionais e conteúdo de nutrientes nos diferentes compartimentos (copa, estipe, raízes, cacho e frutos) de macaúbas cultivadas de cinco diferentes idades (Figuras 3, 4 e Tabela 1).

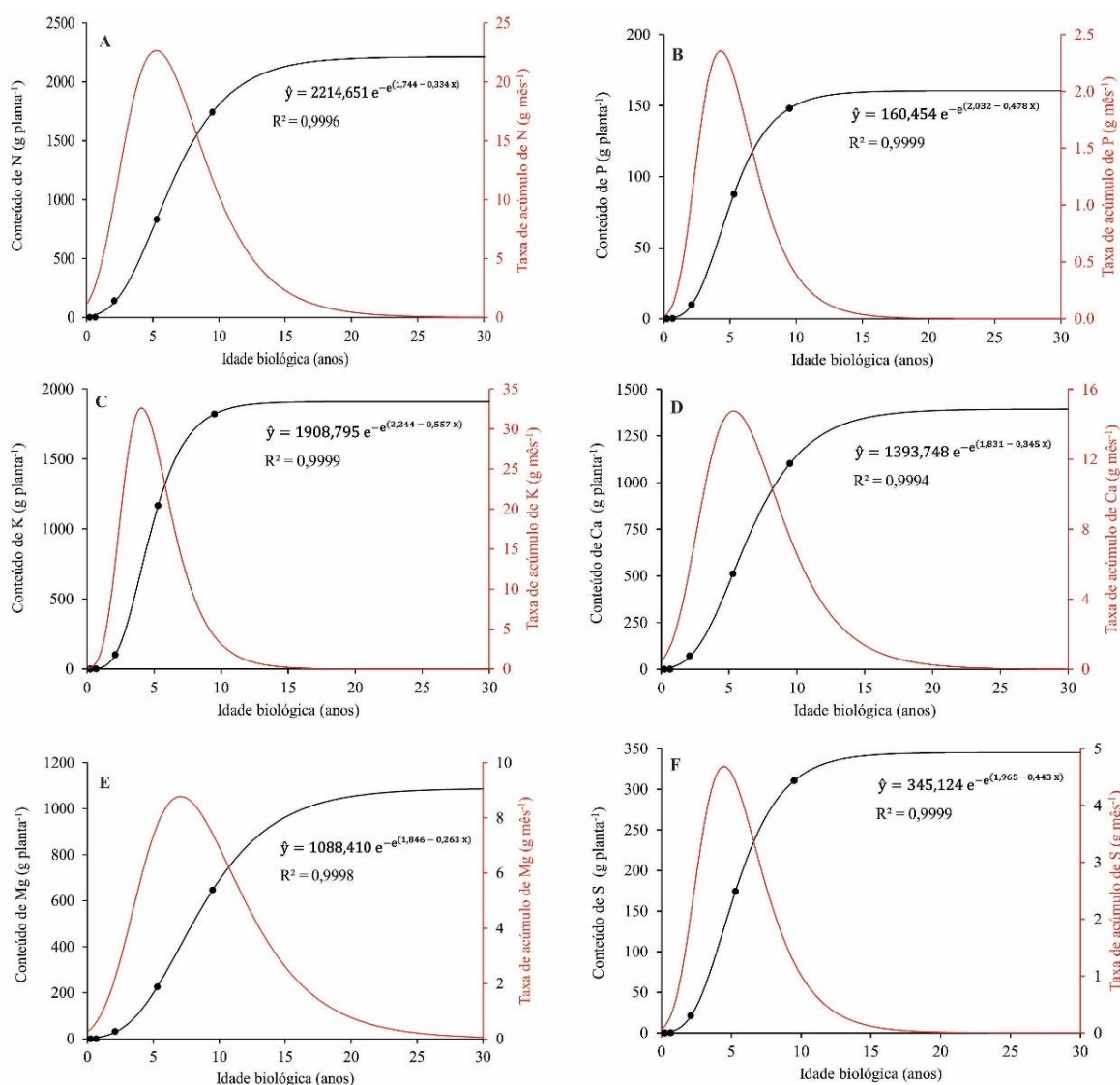


Figura 4. Acúmulo e taxa de acúmulo de macronutrientes pela macaúba, em função da idade biológica (Fonte: Capítulo 1).

Tabela 1. Equações para estimativa do acúmulo de macronutrientes pela macaúba, em função da idade biológica.

Nutriente	Equação	R ²	
N	Cont_N = 2214,651 e ^{-e^(1,744-0,334 t)}	0,999	(Eq. 2)
P	Cont_P = 160,454 e ^{-e^(2,032-0,478 t)}	0,999	(Eq. 3)
K	Cont_K = 1908,795 e ^{-e^(2,244-0,557 t)}	0,999	(Eq. 4)
Ca	Cont_Ca = 1393,748 e ^{-e^(1,831-0,345 t)}	0,999	(Eq. 5)
Mg	Cont_Mg = 1088,410 e ^{-e^(1,846-0,263 t)}	0,999	(Eq. 6)
S	Cont_S = 345,124 e ^{-e^(1,965-0,443 t)}	0,999	(Eq. 7)

(Fonte: Capítulo 1)

As estimativas de conteúdos de nutrientes apresentam demandas na biomassa da macaúba na seguinte sequência: N > K > Ca > Mg > S > P (Figuras 3 e 4). Sendo que apenas após a idade de 10,42 anos que o conteúdo de N supera o conteúdo de K, passando então a ser o nutriente com maior quantidade acumulada pela macaúba, podendo ser explicado pela taxa de absorção de N menos acelerada que a de K (Figuras 3B, 4A e 4C) (Capítulo 1).

As quantidades estimadas de nutrientes extraídos em função da idade são apresentadas de forma individual para cada macaúba, em g/planta (Tabela 2), e para um stand de 400 plantas ha⁻¹, em kg ha⁻¹ (Tabela 3).

Diante das quantidades estimadas de nutrientes extraídos pela macaúba em função da idade (Tabelas 2 e 3), estima-se a demanda anual de nutrientes pela biomassa com a diferença entre a demanda atual de nutrientes e a demanda de nutrientes estimada para o ano anterior, conforme equação descrita abaixo:

$$d_{\text{bio_Nut}} = d_{\text{bioA_Nut}} - d_{\text{bioAA_Nut}} \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

$d_{\text{bio_Nut}}$ = demanda anual de nutriente pela biomassa da planta, em kg ha⁻¹ e g ha⁻¹ para macro e micronutrientes, respectivamente

$d_{\text{bioA_Nut}}$ = demanda atual de nutriente pela biomassa da planta, em kg ha⁻¹ e g ha⁻¹ para macro e micronutrientes, respectivamente

$d_{\text{bioAA_Nut}}$ = demanda de nutriente pela biomassa da planta do ano anterior, em kg ha⁻¹ e g ha⁻¹ para macro e micronutrientes, respectivamente

Tabela 2. Quantidade estimada de nutrientes extraídos por macaúbas cultivadas, em função da idade.

Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg	S
	g/planta					
0	22,76	0,63	2,86	9,79	5,35	1,70
1	69,15	3,88	32,01	33,84	15,24	8,77
2	184,87	15,99	183,64	100,23	40,90	32,63
3	373,94	38,42	499,40	216,21	87,35	75,87
4	619,37	66,17	885,67	372,59	156,54	130,44
5	889,06	92,67	1229,62	547,73	245,13	184,75
6	1151,80	114,18	1483,82	719,49	346,03	231,02
7	1386,51	129,95	1652,41	872,75	451,04	266,69
8	1583,51	140,80	1757,46	1000,60	552,96	292,46
9	1741,60	147,97	1820,60	1102,28	646,71	310,30
10	1864,46	152,60	1857,78	1180,46	729,45	322,34
11	1957,76	155,54	1879,41	1239,13	800,18	330,31
12	2027,45	157,39	1891,91	1282,42	859,19	335,53
13	2078,89	158,55	1899,11	1313,98	907,49	338,93
14	2116,53	159,27	1903,24	1336,79	946,45	341,14
15	2143,92	159,72	1905,61	1353,18	977,54	342,56
16	2163,75	160,00	1906,97	1364,91	1002,13	343,47
17	2178,07	160,17	1907,75	1373,27	1021,46	344,06
18	2188,39	160,28	1908,20	1379,22	1036,57	344,44
19	2195,81	160,35	1908,45	1383,45	1048,33	344,69
20	2201,14	160,39	1908,60	1386,45	1057,47	344,84
21	2204,96	160,41	1908,68	1388,57	1064,54	344,94
22	2207,71	160,43	1908,73	1390,08	1070,02	345,01
23	2209,67	160,44	1908,76	1391,15	1074,24	345,05
24	2211,08	160,44	1908,77	1391,91	1077,50	345,08
25	2212,10	160,45	1908,78	1392,45	1080,02	345,09
26	2212,82	160,45	1908,79	1392,83	1081,95	345,10
27	2213,34	160,45	1908,79	1393,10	1083,44	345,11
28	2213,71	160,45	1908,79	1393,29	1084,59	345,12
29	2213,98	160,45	1908,79	1393,42	1085,47	345,12
30	2214,17	160,45	1908,79	1393,52	1086,15	345,12

Tabela 3. Quantidade estimada de nutrientes extraídos por macaúbas cultivadas em stand 400 plantas ha⁻¹, em função da idade.

Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
0	9,10	0,25	1,14	3,92	2,14	0,68
1	27,66	1,55	12,81	13,54	6,10	3,51
2	73,95	6,39	73,46	40,09	16,36	13,05
3	149,58	15,37	199,76	86,48	34,94	30,35
4	247,75	26,47	354,27	149,04	62,62	52,18
5	355,62	37,07	491,85	219,09	98,05	73,90
6	460,72	45,67	593,53	287,80	138,41	92,41
7	554,60	51,98	660,97	349,10	180,42	106,68
8	633,40	56,32	702,98	400,24	221,18	116,98
9	696,64	59,19	728,24	440,91	258,68	124,12
10	745,78	61,04	743,11	472,18	291,78	128,93
11	783,10	62,22	751,76	495,65	320,07	132,12
12	810,98	62,96	756,76	512,97	343,67	134,21
13	831,55	63,42	759,64	525,59	362,99	135,57
14	846,61	63,71	761,30	534,72	378,58	136,45
15	857,57	63,89	762,24	541,27	391,02	137,02
16	865,50	64,00	762,79	545,96	400,85	137,39
17	871,23	64,07	763,10	549,31	408,58	137,63
18	875,35	64,11	763,28	551,69	414,63	137,78
19	878,32	64,14	763,38	553,38	419,33	137,87
20	880,45	64,15	763,44	554,58	422,99	137,94
21	881,98	64,16	763,47	555,43	425,82	137,98
22	883,08	64,17	763,49	556,03	428,01	138,00
23	883,87	64,18	763,50	556,46	429,70	138,02
24	884,43	64,18	763,51	556,76	431,00	138,03
25	884,84	64,18	763,51	556,98	432,01	138,04
26	885,13	64,18	763,52	557,13	432,78	138,04
27	885,34	64,18	763,52	557,24	433,38	138,04
28	885,48	64,18	763,52	557,31	433,84	138,05
29	885,59	64,18	763,52	557,37	434,19	138,05
30	885,67	64,18	763,52	557,41	434,46	138,05

3.1.2. Demanda de nutrientes pela produção de frutos da macaúba

A demanda de nutrientes pelos frutos da macaúba resulta do quociente entre uma determinada expectativa de produtividade de frutos e o coeficiente de utilização biológico dos frutos (CUBF) referente a cada nutriente, determinado no Capítulo 1 a partir do conteúdo de nutrientes de cada componente dos frutos da macaúba (epicarpo, mesocarpo, endocarpo e amêndoa) (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4. Coeficiente de utilização biológica (CUB) nutrientes dos frutos de macaúba.

N	P	K	Ca	Mg	S
..... kg kg ⁻¹					
147,1	1136,2	135,7	680,2	1109,1	850,8

Tabela 5. Exportação de nutrientes pelos frutos de macaúba.

N	P	K	Ca	Mg	S
..... kg t ⁻¹					
6,80	0,88	7,37	1,47	0,90	1,18

3.1.3. Requerimento total de nutrientes pela macaúba

A demanda total de nutrientes pela macaúba (dt_Nut) é resultante da soma da demanda de nutrientes pela biomassa da planta (d_{bio_Nut}) com a demanda de nutrientes pela produção de frutos (d_{frut_Nut}). Porém, como já mencionado, é comum nos sistemas FERTICALC se adicionar uma dose do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola a longo prazo (demanda de sustentabilidade), mais especificamente para os nutrientes P e K.

Dessa forma, os valores das demandas de sustentabilidade dos nutrientes P (d_{sust_P}) e K (d_{sust_K}) devem ser somados às demandas da planta, anteriormente calculadas, para obtenção da demanda total dos nutrientes (dt_Nut), conforme equação descrita a seguir:

$$dt_Nut = d_{bio_Nut} + d_{frut_Nut} + d_{sust_Nut} \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

dt_Nut = demanda total de nutriente pela planta, em kg ha⁻¹;

d_{bio_Nut} = demanda de nutriente pela biomassa da planta, em kg ha⁻¹;

d_{frut_Nut} = demanda de nutriente pelos frutos, em kg ha⁻¹;

d_{sust_Nut} = demanda do nutriente para manter a sustentabilidade da exploração agrícola (P ou K), em kg ha⁻¹.

No entanto, para se chegar ao requerimento total dos nutrientes pela macaúba (RT_Nut) deve-se levar em consideração a taxa de recuperação pela planta do nutriente aplicado na forma de fertilizante (tr_{pl_Nut}), uma vez que nem todo nutriente aplicado na forma de fertilizante é absorvido pela planta (Equação 10). Isto ocorre por

uma série de fatores de perdas, como adsorção pelo solo, e acarreta a necessidade dessa correção dos valores das demandas dos nutrientes.

$$RT_{Nut} = dt_{Nut} / tr_{pl_Nut} \quad (Eq. 10)$$

Em que:

RT_{Nut} = requerimento total do nutriente, em $kg\ ha^{-1}$;

dt_{Nut} = demanda total de nutriente pela planta, em $kg\ ha^{-1}$;

tr_{pl_Nut} = taxa de recuperação pela planta do nutriente aplicado, em %.

As taxas de recuperação pela planta dos nutrientes aplicado ao solo na forma de fertilizantes (tr_{pl_Nut}) são calculadas da seguinte forma:

$$tr_{pl_Nut} = (NutAPCF - NutAPCnF) / QNutA \quad (Eq. 11)$$

Em que:

tr_{pl_Nut} = taxa de recuperação pela planta do nutriente aplicado, em %;

$NutAPCF$ = nutriente absorvido pela cultura fertilizada, em $kg\ ha^{-1}$;

$NutAPCnF$ = nutriente absorvido pela cultura não fertilizada, em $kg\ ha^{-1}$;

$QNutA$ = quantidade do nutriente aplicado, em $kg\ ha^{-1}$.

Taxas de recuperação pela planta dos nutrientes aplicados ao solo na forma de fertilizantes (tr_{pl_Nut}) específicos para a cultura da macaúba ainda não foram estimadas, com isso foram adotados os valores das tr_{pl_Nut} implementados por Stahringer (2013) no FERTICALC-Laranja, que considerou vários fatores que afetam as taxas de recuperação de nutrientes pela planta, buscando obter valores mais próximos da realidade (Tabela 6).

Tabela 6. Taxas de recuperação pela planta dos nutrientes aplicados ao solo via fertilizante (tr_{pl_Nut}), em porcentagem, para macronutrientes.

Nutriente	Equação	R ²	
N	$tr_{pl_N}^{1/} = 0,623955 e^{-0,0028 DN (Parc./100)}$ $\forall 30 \leq DN \leq 240 \text{ kg ha de N}$	-	(Eq. 12)
P	$tr_{pl_P}^{2/} = (0,04508^{***} e^{0,0347 P\text{-rem}})$ $\forall 2,58 \leq P\text{-rem} \leq 40,18$ Sendo $F_c = 1$ para adubação a lanço e $F_c = (4,2 - 0,04 P\text{-rem})$ para adubação no sulco	0,837	(Eq. 13)
K	$tr_{pl_K}^{2/} = 0,816955 e^{-0,0015 DK (Parc./100)}$ $\forall 30 \leq DK \leq 220 \text{ kg ha de K}_2\text{O}$	-	(Eq. 14)
Ca	$tr_{pl_Ca}^{3/} = 0,48 - 0,0002^{**} DCa$ $\forall 30 \leq DCa \leq 1000 \text{ kg ha de Ca}$	0,886	(Eq. 15)
Mg	$tr_{pl_Mg}^{3/} = 0,68 - 0,0004^{**} DMg$ $\forall 21 \leq DMg \leq 700 \text{ kg ha de Ca}$	0,891	(Eq. 16)
S	$tr_{pl_S}^{2/} = 0,38508 e^{0,0101 P\text{-rem}}$ $\forall 2 \leq P\text{-rem} \leq 55$	-	(Eq. 17)

^{1/} Boaretto et al., 2007; Mattos Jr et al., 2003b; Quiñones et al., 2003; Feigenbaum et. al., 1987. ^{2/} Adaptado de Santos et al., 2008. ^{3/} Adaptado de Freire, 2001. DN = dose de N. DK = dose de K. DCa = dose de Ca. DMg = dose de Mg. Parc. = parcela em %. P-rem = teor de P da solução de equilíbrio, determinado após a agitação por uma hora de TFSA com CaCl₂ 10 mmol/L, contendo 60 mg/L de P, na relação solo: solução 1:10 (Alvarez V. et al., 2000).**, *** Significativo a 1 e 0,1 % (Fonte: Stahringer, 2013)

Para N, P, Ca e Mg foram ajustadas equações que relacionam as taxas de recuperação da planta (tr_{pl_Nut}) com as doses dos nutrientes aplicados via fertilizantes no solo, mas como as doses recomendadas ainda não são conhecidas adotou-se o requerimento total de nutrientes (RT_{Nut}) como a referida dose.

Nos cálculos das taxas de recuperação pela planta de N (tr_{pl_N}) e K (tr_{pl_K}) foram considerados aplicações dos fertilizantes em duas parcelas. O parcelamento dos fertilizantes nitrogenados e potássicos permite a aplicação de menores quantidades e conseqüentemente diminui perdas e aumenta a taxa de recuperação dos nutrientes pela planta (tr_{pl_Nut}).

A taxa de recuperação pela planta de N (tr_{pl_N}) foi corrigida por um coeficiente com variação conforme a escolha do fertilizante nitrogenado, por exemplo, para nitrato de amônio e sulfato de amônio aplicou-se o coeficiente de valor 1, e para ureia o coeficiente aplicado foi de valor 1,5.

Para as taxas de recuperação pela planta de P (tr_{pl-P}) e S (tr_{pl-S}) foi necessário levar em consideração o efeito que a capacidade tampão do solo exerce sobre a absorção destes nutrientes pela planta. E para estimar o efeito desta capacidade tampão do solo foi utilizado os valores de P-rem (Tabela 6).

De forma mais específica, a taxa de recuperação pela planta de P (tr_{pl-P}) foi calculada por uma equação ajustada por Santos et al. (2008), onde se considera a aplicação de uma fonte solúvel de fosfato. Primeiramente a equação foi feita para aplicação de P a lanço, mas posteriormente foi ajustada por um fator de correção para ser usada na fertilização em sulco ($F_c = 4,2 - 0,04 \text{ P-rem}$), buscando maior eficiência dos fertilizantes (Tabela 6).

Para os nutrientes Ca e Mg, considerou-se que a calagem é suficiente para atender a demanda destes nutrientes pela cultura. No entanto, para Ca ainda pode haver a contribuição no suprimento do nutriente via gessagem, quando necessário.

3.2. Sistema Suprimento

O subsistema suprimento do FERTICALC-Macaúba englobou os nutrientes provenientes do solo, da matéria orgânica do solo (MOS) e dos resíduos vegetais da cultura. E para o suprimento Ca e Mg também se considerou as práticas de calagem e gessagem.

3.2.1. Recomendação de calagem

A calagem tem como objetivos elevar o pH do solo para uma faixa que permita boa disponibilidade para todos os nutrientes e servir como fonte de Ca e Mg para a cultura agrícola. Uma calagem adequada acarreta a redução da acidez do solo e da toxidez de Al^{3+} e Mn^{2+} , eleva a saturação de bases do solo e aumenta a atividade microbiana favorecendo a liberação de nutrientes (N, P, S e B), mediante elevação da mineralização da matéria orgânica do solo (MOS).

3.2.1.1. Necessidade de calagem

A necessidade de calagem (NC) pode ser calculada empregando a exigência da cultura em Ca^{2+} e Mg^{2+} e sua tolerância ao Al^{3+} ou pelo método de saturação por bases. Inclusive recomenda-se calcular pelos dois métodos para uma melhor decisão.

O método da neutralização da acidez trocável (Al^{3+}) e da elevação dos teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} trocáveis baseia-se na exigência da cultura em Ca^{2+} e Mg^{2+} (X) e sua tolerância ao Al^{3+} (m_t). No cálculo da NC também é considerado a capacidade tampão do solo (Y) conforme pode ser observado na equação abaixo:

$$\text{NC} = Y [\text{Al}^{3+} - (m_t \times t/100)] + [X - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})] \quad (\text{Eq. 18})$$

Em que:

Y = coeficiente em função da capacidade tampão da acidez do solo definido de acordo com a textura do solo;

Al^{3+} = acidez trocável, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

m_t = máxima saturação por Al^{3+} tolerada para cultura, em %; ($m_t \approx 20\%$ para a macaúba);

t = CTC efetiva, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

X = valor adequado de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($X \approx 3$ para a macaúba).

O valor do coeficiente Y varia de acordo com a capacidade tampão da acidez do solo e pode ser estimado pelo teor de argila ou valor do P-rem (Tabela 7).

Tabela 7. Valores de Y em função do teor de argila e do P remanescente (P-rem)

Argila (%)	Y	P-rem (mg/L)		Y
		0 - 4	4 - 10	
0 - 15	0 - 1	4 - 10	10 - 19	4 - 3,5
15 - 35	1 - 2	19 - 30	30 - 44	3,5 - 2,9
35 - 60	2 - 3	44 - 60		2,9 - 2
60 - 100	3 - 4			2 - 1,2
				1,2 - 0,5
				0,5 - 0

Fonte: Adaptado de Alvarez V. e Ribeiro (1999).

O método da saturação por bases leva em consideração a diferença entre a saturação por bases desejada para a cultura (V_e) e a saturação por bases atual do solo (V_a). conforme descrito na equação abaixo:

$$\text{NC} = T (V_e - V_a)/100 \quad (\text{Eq. 19})$$

Em que:

T = CTC a pH 7 (CTC potencial), em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

V_e = saturação por bases desejada para cultura, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ($V_e = 60\%$ para a macaúba).

V_a = saturação por bases atual do solo, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Estudos específicos de calagem com a cultura da macaúba são escassos. Pimentel et al. (2016) estudaram a calagem no preparo de substrato para mudas, entretanto, experimentos em campo com macaúbas adultas cultivadas ainda estão em andamento. Motta et al. (2002) observaram que a ocorrência natural de macaúba em Minas Gerais está associada a solos eutróficos, com pH médio em torno de 5,5, saturação por bases (V%) em torno de 59 % e soma dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} acima de $2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Na recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba de Pimentel et al. (2011) os valores estimados de $m_t = 20\%$, $X = 3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $V = 60\%$ mostram-se bem embasadas e serão mantidos diante das exigências de Ca e Mg estimadas para a cultura no Capítulo 1 e da observação de bons resultados de crescimento, desenvolvimento e produção de macaúbas cultivadas em áreas experimentais e fazendas comerciais que receberam calagem seguindo tal recomendação.

Em relação à tomada de decisão para a escolha entre os valores de necessidade de calagem (NC) calculadas pelos dois métodos é recomendado proceder conforme descrito por Alvarez V. e Pereira (2005), onde define-se a menor (NC_{men}) e a maior necessidade de calagem (NC_{mai}) recomendada entre os dois métodos, determina-se a NC com limite inferior limitado pelo requerimento de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ da cultura (NC_X) de forma que a NC_{men} deve ser maior ou igual à NC_X e caso seja menor deve-se escolher a NC_{mai} . E por fim determina-se a NC com limite superior limitado pela CTC a pH 7 (T) (NC_T) de forma que a NC_{mai} deve ser menor que a NC_T , e caso a seja maior ou igual escolhe-se NC_T .

3.2.1.2. Quantidade e forma de aplicação de calcário

O cálculo da necessidade de calagem (NC) determina a quantidade de CaCO_3 , ou calcário com PRNT = 100% (em t ha^{-1}), a ser aplicada em área total (100% da superfície coberta) e profundidade de correção na camada de 0 a 20 cm.

Porém características do calcário e da forma de aplicação podem variar. A superfície do terreno a ser coberta na calagem (SC) e a profundidade que o calcário é incorporado (PF) pode ser alterado de acordo com características da área e o manejo adotado na lavoura de macaúba, como por exemplo a aplicação sem incorporação ao solo (Figura 5A) ou de maneira localizada, como em faixas (Figura 5B).

Desse modo, a quantidade de calcário (QC) deve ser ajustada em função da SC, da PF e do poder relativo de neutralização total do calcário (PRNT) adquirido para a calagem, conforme pode ser observado na equação abaixo:

$$QC = NC (SC/100) (PF/20) (100/PRNT) \quad (\text{Eq. 20})$$

Em que:

QC = quantidade de calcário, em t ha⁻¹;

NC = necessidade de calagem, em t ha⁻¹;

SC = superfície do terreno a ser coberta na calagem, em %;

PF = profundidade que o calcário será incorporado, em cm;

PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado, em %.

Em relação às recomendações de aplicação, a calagem deve ser realizada dois a três meses antes do plantio, sendo o ideal realizar em área total com incorporação, operação que não será mais possível após o plantio das macaúbas. Após a cultura implantada a necessidade de calagem deve ter monitoramento periódico por análises químicas de solo e, quando necessária, deve ser realizada sem incorporação do calcário ao solo, nesse caso a recomendação é considerar a PF de incorporação de 10 cm.

Cuidados no momento do cálculo da QC pode evitar problemas na lavoura com doses abaixo do necessário, ou, principalmente com supercalagem, uma vez que são feitos ajustes na dose de calcário proporcionalmente ao tamanho da área, à superfície alvo da aplicação, à profundidade de incorporação e às características do calcário.



Figura 5 – Calagem em área total (A) e calagem direcionada (B), ambas sem incorporação, em lavouras formadas.

3.2.2. Recomendação de gessagem

O gesso agrícola é considerado um condicionador de solo e não um corretivo, uma vez que é composto basicamente de sulfato de cálcio diidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que não altera significativamente o pH do solo, como ocorre com a aplicação de calcário que é composto por carbonatos.

As funções da gessagem são fornecer S e Ca^{2+} e carrear bases (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+}) para camadas da subsuperfície do solo após a reação com o SO_4^{2-} (KSO_4 , CaSO_4 , MgSO_4 e AlSO_4), uma vez que com a neutralidade adquirida passam a ter grande mobilidade no perfil do solo. A neutralização do Al^{3+} , a formação de complexos menos tóxicos para as plantas (AlSO_4) e seu deslocamento para camadas mais profundas acarreta benefícios como o aprofundamento do sistema radicular e consequentemente maior volume de solo explorado pelas plantas para absorção de nutrientes e água. E para a cultura da macaúba os benefícios da gessagem mostram-se bastante aplicáveis mediante características do sistema radicular da espécie (MOREIRA et al., 2019).

A necessidade de gessagem (NG) deve ser baseado nos resultados da análise química de solo da camada subsuperficial (20 – 40 cm). O uso de gesso agrícola é recomendado quando essa camada apresentar teor de Ca^{2+} inferior ou igual a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou teor de Al^{3+} maior que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou saturação por Al^{3+} (m) maior que 30%.

A recomendação de gessagem pode ser feita com base na textura do solo ou com base na determinação da necessidade de calagem (NC). A recomendação com base na textura do solo pode ser feita por meio da equação 21 ou diretamente pelos valores expressos na tabela 8, com a NG em função do teor de argila (%) ou de P-rem (mg L^{-1}).

$$\text{NG} = 0,00034 - 0,002445 \text{ Arg}^{0,5} + 0,0338886 \text{ Arg} - 0,00176366 \text{ Arg}^{1,5} \quad (\text{Eq. 21})$$

Em que:

NG = necessidade de gessagem, em t ha^{-1} ;

Arg = teor de argila, em %;

Tabela 8. Necessidade de gesso (NG) em função do teor de argila e do P remanescente (P-rem) da camada subsuperficial de 20 cm de espessura (20 – 40 cm)

Argila (%)	NG	P-rem (mg/L)	NG
		0 – 4	1,680 – 1,333
0 - 15	0 – 0,4	4 – 10	1,333 – 1,013
15 - 35	0,4 – 0,8	10 – 19	1,013 – 0,720
35 - 60	0,8 – 1,2	19 – 30	0,720 – 0,453
60 - 100	1,2 – 1,6	30 – 44	0,453 – 0,213
		44 - 60	0,213 – 0

Fonte: Adaptado de Alvarez V. et. al. (1999).

Já a recomendação de gessagem com base na determinação da NC deve ser com uma dose de 30% da NC calculada para a camada subsuperficial (20-40 cm):

$$NG = 0,30 \text{ NC} \quad (\text{Eq. 22})$$

A gessagem pode ser realizada junto ou após a calagem e não altera a quantidade de calcário a ser aplicada. Mas atenção, a quantidade de gesso (QG) pode ser diferente da NG quando não aplicado em toda a superfície do terreno, gerando a necessidade de a dose ser ajustada similarmente ao procedimento de cálculo da quantidade de calcário (QC). Uma gessagem excessiva pode acarretar uma intensa lixiviação de cátions a profundidades além do alcance do sistema radicular das plantas.

3.2.3. Nutrientes supridos pelo solo

O suprimento de nutrientes pelo solo ($spNut_{\text{solo}}$) leva em consideração os teores disponíveis dos nutrientes no solo, o volume de solo explorado pelas raízes absorventes da planta e as taxas de recuperação dos nutrientes pelos seus respectivos extratores.

No FERTICALC-Macaúba o volume de solo sob exploração do sistema radicular da macaúba foi determinado seguindo observações e estimativas da área de abrangência, da profundidade efetiva das raízes (PER), da densidade radicular e da biomassa seca das raízes.

Moreira et al. (2019) avaliaram a distribuição do sistema radicular em macaúbas cultivadas e observaram que a distância efetiva das raízes coincide com a área de projeção da copa e a profundidade efetiva das raízes (PER) aumenta com a idade (Figura 6).

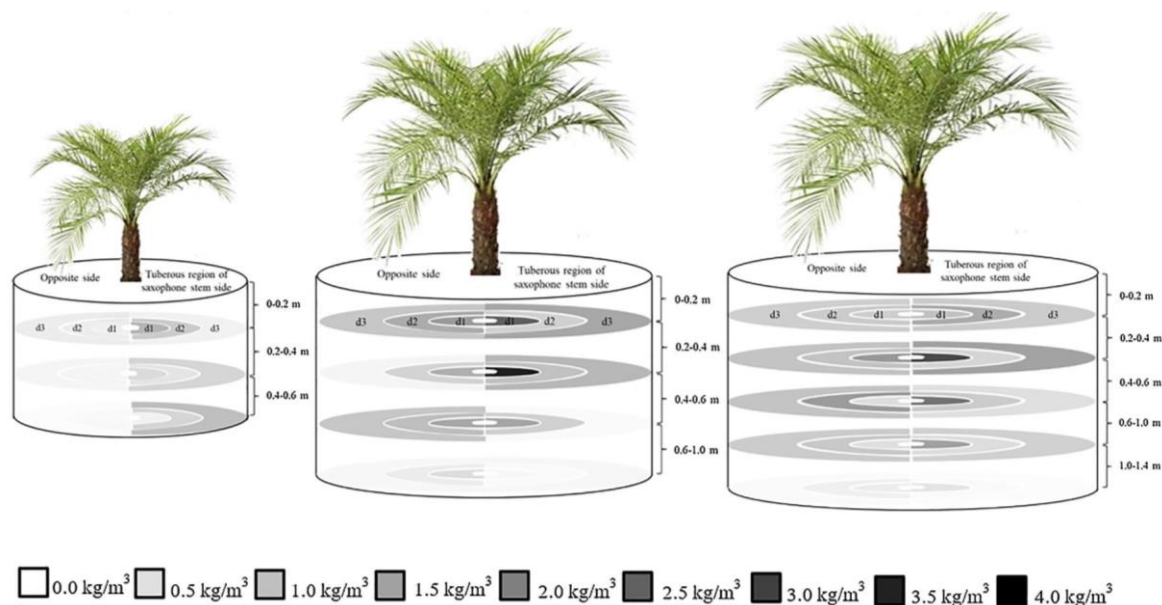


Figura 6. Densidade radicular de macaúbas cultivadas com 1,6; 4,8 e 9 anos após o plantio, respectivamente (Fonte: Moreira et al., 2019).

Adicionalmente, Moreira et al. (2019) constataram que a macaúba apresentou uma distribuição de raízes concentradas na região tuberosa do lado do caule saxofone, porém com uma tendência de uniformização na distribuição das raízes nas plantas mais velhas (Figuras 6 e 7). Essa peculiaridade do sistema radicular da macaúba, distinta de outras palmáceas cultivadas, mostrou-se relevante por impactar diretamente a distribuição radicular ao redor da planta nos primeiros anos de cultivo.



Figura 7. Sistema radicular de macaúbas cultivadas com indicação da localização do caule saxofone (Fonte: Moreira et al., 2019).

A profundidade efetiva das raízes (PER) da macaúba pode atingir 1 m em plantas adultas, contudo, a maioria das raízes se encontravam localizadas na camada superficial do solo (0-20 cm) (MOREIRA et al., 2019).

Assim, buscando um melhor embasamento para a determinação da área de abrangência efetiva das raízes, da profundidade efetiva das raízes (PER) e consequentemente do volume de solo explorado pelas raízes absorventes também foi

analisado a densidade radicular (MOREIRA et al., 2019) (Figura 6) e as estimativas de acúmulo de biomassa seca das raízes nas diferentes camadas do solo (Figura 8).

Dessa forma, para o desenvolvimento do FERTICALC-Macaúba foram consideradas as camadas de 0 - 20 cm e de 20 - 40 cm de profundidade, com aumento progressivo da área de abrangência efetiva e da profundidade efetiva das raízes (PER) e consequentemente do volume de solo explorado pelas raízes em função da idade das macaúbas (Tabela 9).

A profundidade efetiva das raízes (PER) adotada no FERTICALC- Macaúba, de até 40 cm, coincide com sistemas de balanço nutricional desenvolvidos para outras culturas arbóreas como teca (OLIVEIRA, 2003), laranja (STAHRRINGER, 2013), assim como para o dendezeiro (GAMARRA, 2013), mesmo sendo uma palmácea de maior porte que a macaúba.

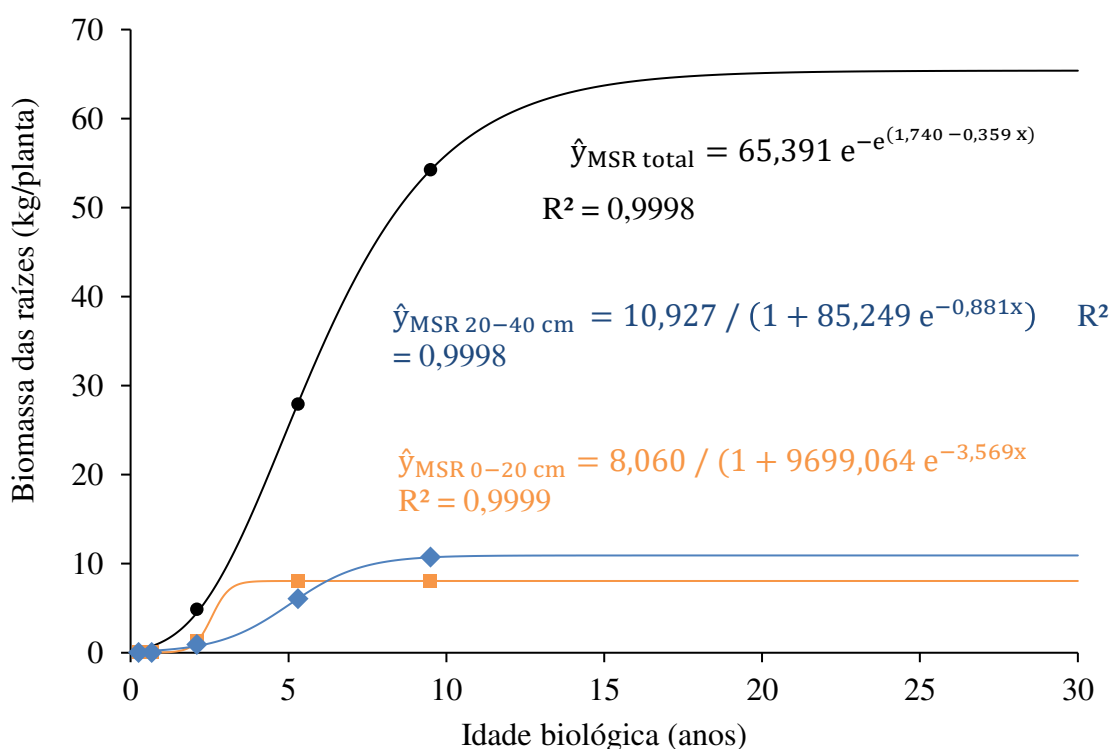


Figura 8. Acúmulo de biomassa seca das raízes presentes nas camadas de 0 - 20 cm, 20 - 40 cm de profundidade e do sistema radicular total da macaúba, em função da idade biológica (Adaptado do Capítulo 1)

Tabela 9. Valores estimados de abrangência das raízes e volume de solo explorado pelas raízes absorventes da macaúba, em função da idade.

Idade (anos)	Abrangência estimada das raízes absorventes			Volume de solo explorado		
	Área estimada		Profundidade efetiva	Camada de 0 - 20 cm	Camada de 20- 40 cm	Total
	%	m² ha ⁻¹				
				 m³ ha ⁻¹		
1	5	500	0,2	100	0	100
2	12	1200	0,3	240	120	360
3	25	2500	0,4	500	500	1000
4	40	4000	0,4	800	800	1600
5	55	5500	0,4	1100	1100	2200
6	70	7000	0,4	1400	1400	2800
7	80	8000	0,4	1600	1600	3200
8	90	9000	0,4	1800	1800	3600
≥ 9	100	10000	0,4	2000	2000	4000

Além disso, são nas camadas superficiais do solo que são encontrados os maiores percentuais das raízes absorventes e onde há possibilidade de manejo agrícola, como preparo do solo, irrigação, calagem, gessagem e adubação.

Portanto o suprimento de nutrientes pelo solo no sistema FERTICALC-Macaúba é resultante da soma do suprimento dos nutrientes da camada superficial do solo de 0 - 20 cm com o suprimento da camada subsuperficial de 20 - 40 cm, conforme equação descrita abaixo.

$$\text{spNut}_{\text{solo}} = \text{spNut}_{\text{solo } 0-20} + \text{spNut}_{\text{solo } 20-40} \quad (\text{Eq. 23})$$

Em que:

$\text{spNut}_{\text{solo}}$ = suprimento de nutrientes pelo solo, em kg ha⁻¹;

$\text{spNut}_{\text{solo } 0-20}$ = suprimento de nutrientes pela camada de 0 – 20 cm, em kg ha⁻¹;

$\text{spNut}_{\text{solo } 20-40}$ = suprimento de nutrientes pela camada de 20 – 40 cm, em kg ha⁻¹.

Outro fator importante a ser considerado na determinação do suprimento de nutrientes pelo solo é a taxa de recuperação do nutriente aplicado ao solo pelos respectivos extratores utilizados nas análises químicas de solo (tr_{ext}). No FERTICALC-Macaúba as equações para determinar os valores de tr_{ext} são as mesmas adotadas por Stahringer (2013) no FERTICALC-Laranja (Tabela 10).

Tabela 10. Taxas de recuperação pelos extratores dos macronutrientes aplicados ao solo (tr_{ext}).

Nutriente	Extrator	Equação	R ²
P	Mehlich-1	$tr_{ext} = 0,0672821 + 0,0121615^{**}P\text{-rem}$	0,681 (Eq. 24)
	Resina	$tr_{ext} = 0,419^{***}P\text{-rem}^{0,128099}$	0,694 (Eq. 25)
K	Mehlich-1	$tr_{ext} = 0,655 + 0,0068^{**}P\text{-rem}$ $\forall 1 \leq P\text{-rem} \leq 30$	0,744 (Eq. 26)
	Mehlich-3	$tr_{ext} = 0,9863 - 0,00364^{***}Arg$	0,763 (Eq. 27)
	Resina	$tr_{ext} = 0,6619 + 0,014355^{*}P\text{-rem} - 0,000293^{*}P\text{-rem}^2$ $\forall 1 \leq P\text{-rem} \leq 30$	0,754 (Eq. 28)
Ca	KCl 1 mol L ⁻¹	$tr_{ext} = 0,766102$	- -
Mg	KCl 1 mol L ⁻¹	$tr_{ext} = 0,798972$	- -
S	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ em HOAc	$tr_{ext} = 0,04 + 0,0057^{**}P\text{-rem}$	0,955 (Eq. 29)

A unidade da tr_{ext} é mg dm⁻³ / mg dm⁻³. Arg. = teor de argila, em %. P-rem = teor de P da solução de equilíbrio, determinado após a agitação por uma hora de TFSA com CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, na relação solo:solução 1:10 (Alvarez V. et al., 2000). °, *, ** e *** Significativo a 10, 5, 1 e 0,1 %, respectivamente. (Fonte: Stahringer, 2013)

As equações para determinar as tr_{ext} de P, K e S levam em consideração a influência da capacidade tampão do solo sobre a disponibilidade dos nutrientes, usando-se como estimador desta característica o P-rem ou o teor de argila (Tabela 10). Para os demais nutrientes as tr_{ext} apresentam valores fixos, por suas disponibilidades serem pouco afetadas pela capacidade tampão do solo (Tabela 10).

Em relação à Ca e Mg, têm-se valores estimados de tr_{ext} para o extrator KCL 1 mol L⁻¹, podendo estes valores ser usados também para o método de resina, já que ambos extraem as formas trocáveis desses nutrientes.

Assim, o suprimento de nutrientes de cada camada do solo (0 – 20 cm e 20 – 40 cm) considerada pelo FERTICALC-Macaúba foi obtido pelo quociente entre os teores de nutrientes nas análises químicas de solo da respectiva camada e as taxas de recuperação dos nutrientes pelos extratores (tr_{ext}), com posterior multiplicação pelo volume de solo explorado pelas raízes naquela respectiva camada de solo (Equações 30 e 31).

$$spNut_{\text{solo } 0-20} = (teorNut_{\text{solo } 0-20} / tr_{ext}) Vol_{\text{solo } 0-20} \quad (\text{Eq. 30})$$

$$spNut_{\text{solo } 20-40} = (teorNut_{\text{solo } 20-40} / tr_{ext}) Vol_{\text{solo } 20-40} \quad (\text{Eq. 31})$$

Em que:

$spNut_{\text{solo } 0-20}$ = suprimento de nutrientes pela camada de 0 – 20 cm, em kg ha⁻¹;

$spNut_{solo\ 20-40}$ = suprimento de nutrientes pela camada de 20 – 40 cm, em $kg\ ha^{-1}$;

tr_{ext} = taxa de recuperação pelo extrator;

$teorNut_{solo\ 0-20}$ = teor de nutrientes na camada de 0 - 20 cm;

$teorNut_{solo\ 20-40}$ = teor de nutrientes na camada de 20 - 40 cm;

$Vol_{solo\ 0-20}$ = volume de solo explorado pelas raízes na camada de 0 - 20 cm;

$Vol_{solo\ 20-40}$ = volume de solo explorado pelas raízes na camada de 20 - 40 cm.

3.2.3.1. N suprido pela matéria orgânica do solo (MOS)

O suprimento de N pode ocorrer tanto pelos resíduos vegetais da cultura como pela mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) (Equação 32).

$$spN = spN_{res} + spN_{MOS} \quad (Eq. 32)$$

Em que:

spN = suprimento total de N, em $kg\ ha^{-1}$;

spN_{res} = N suprido pelos resíduos vegetais, em $kg\ ha^{-1}$;

spN_{MOS} = N suprido pela matéria orgânica do solo, em $kg\ ha^{-1}$.

Para calcular o N disponibilizado pela matéria orgânica do solo (MOS) no sistema FERTICALC-Macaúba utilizou-se o método desenvolvido por Stanford e Smith (1972), adaptado para condições de solos tropicais com base no trabalho de Gonçalves et al. (2001), conforme equação descrita abaixo:

$$spN_{MOS} = (1\ 000\ 000\ PER\ ((MOS/100/1,724)/10)\ 0,04)\ (1 - e^{(-0,031\ t)}) \quad (Eq. 33)$$

Em que,

spN_{MOS} = suprimento de N pela mineralização da MOS, em $kg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$;

1 000 000 = valor que multiplicado pela PER, em dm, permite obter o volume de solo por hectare em $dm^3\ ha^{-1}$;

PER = profundidade efetiva das raízes, em dm;

MOS = teor de MOS, em $dag\ dm^{-3}$;

100 = valor que ao dividir a MOS, em $dag\ dm^{-3}$, permite obter a MOS $kg\ dm^{-3}$;

1,724 = valor utilizado para estimar o teor de compostos orgânicos do solo a partir da MOS, considerando que esta possui 58 % de C;

10 = valor utilizado para estimar o N orgânico, considerando que na MOS a relação C/N = 10 obtida por Kiehl (1979) para os mesmos solos utilizados por Gonçalves et al. (2001);

0,04 = N potencialmente mineralizável da MOS, estimado por Gonçalves et al. (2001) para 16 solos de ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo;

e = base dos logaritmos neperianos;

0,031 = constante de mineralização de N média para 16 solos de ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo estimada por Gonçalves et al. (2001), a partir da equação de Stanford e Smith (1972).

t = tempo em semanas que a cultura absorve N no ano. Para a cultura da macaúba foram consideradas 52 semanas.

Caso o teor de MOS esteja expresso em dag kg^{-1} é necessário levar em consideração a densidade de solo na equação 33.

3.2.4. Nutrientes supridos pelos resíduos vegetais da cultura

No subsistema suprimento, além de se estimar o suprimento de nutrientes pelo solo explorado pelas raízes absorventes, incluindo a matéria orgânica do solo, também é estimado o potencial de liberação de nutrientes pelos resíduos vegetais da cultura (Equação 34).

$$\text{spNut} = \text{spNut}_{\text{solo}} + \text{spNut}_{\text{res}} \quad (\text{Eq. 34})$$

Em que:

spNut = suprimento total de macronutrientes (exceto N), em kg ha^{-1} ;

spNut_{solo} = macronutriente suprido pelo solo, em kg ha^{-1} ;

spNut_{res} = macronutriente suprido pelos resíduos vegetais, em kg ha^{-1} .

Em relação ao contexto dos resíduos vegetais da macaúba, primeiramente se buscou informações sobre o manejo da cultura. Os tratos culturais da cultura da macaúba encontram-se em fase de estudo e desenvolvimento, contudo, em áreas cultivadas têm-se realizado a poda das folhas senescentes, uma vez que permanecem aderidas ao estipe mesmo depois de totalmente secas (Figura 9A).

O objetivo da poda primeiramente é eliminar as folhas senescidas para facilitar a colheita e prevenir possíveis fontes de inóculos de pragas e doenças (MOTOIKE et al., 2013). Porém a biomassa das folhas senescidas da macaúba mostrou aptidão como fonte natural de restituição/reciclagem de nutrientes (BIESDORF, 2021).

Portanto, para o FERTICALC-Macaúba os resíduos vegetais considerados foram as folhas senescidas podadas e depositadas nas linhas de plantio junto às macaúbas (Figura 9B, C e D).

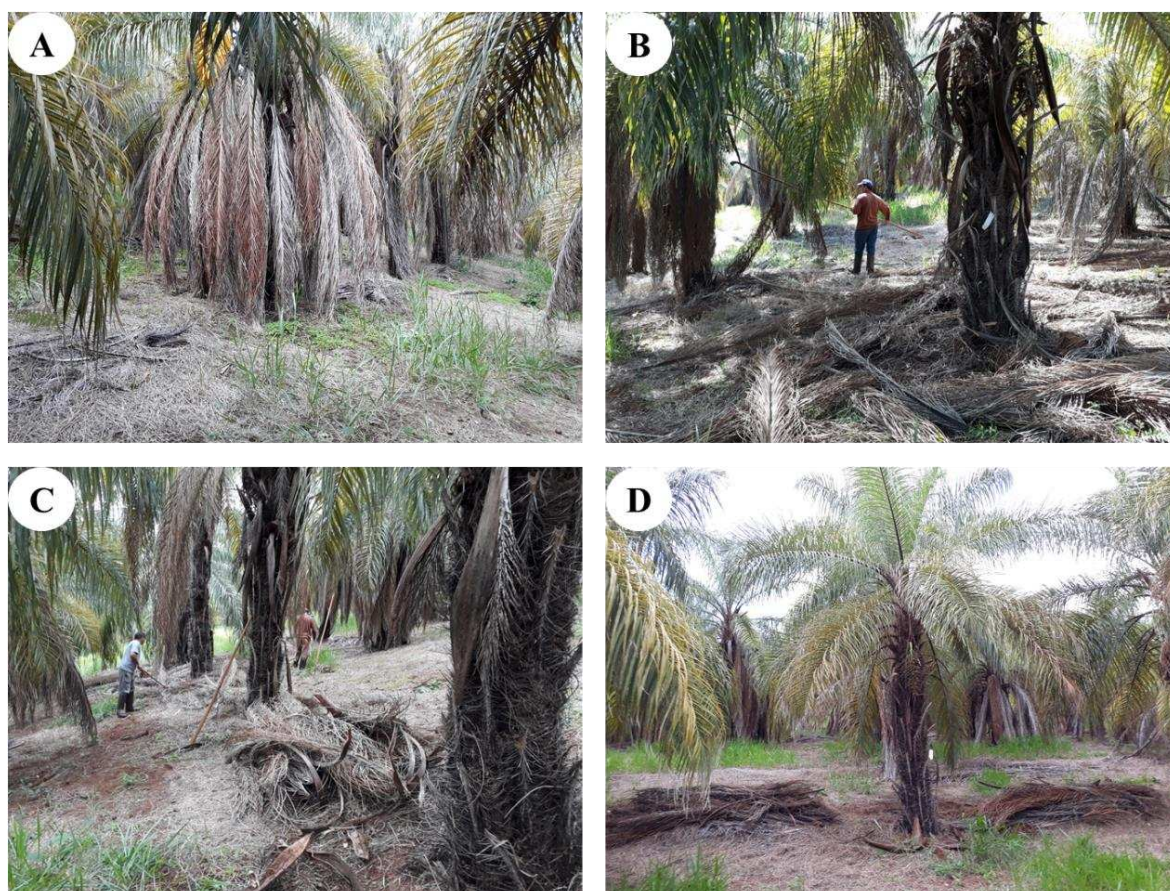


Figura 9 – Lavoura de macaúbas com folhas senescidas aderidas ao estipe das plantas (A); Operação de poda das folhas senescidas (B); Enleiramento das folhas senescidas podadas (C) e lavoura de macaúba com folhas senescidas podadas dispostas em leiras nas linhas junto às macaúbas (D).

A deposição de biomassa foliar foi calculada a partir da estimativa do número de folhas podadas em função da idade e da biomassa seca de folhas senescidas (adaptado do Capítulo 1).

O suprimento dos nutrientes pelos resíduos vegetais foi estimado a partir das quantidades de nutrientes depositados, acumulados e liberados no *litter* anualmente pela cultura da macaúba conforme equações abaixo:

$$\text{spNut}_{\text{res}} = \text{Nut}_{\text{lib litter}} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$\text{Nut}_{\text{lib litter}} = \text{Nut}_{\text{litter}} - \text{Nut}_{\text{rem litter}} \quad (\text{Eq. 36})$$

$$\text{Nut}_{\text{litter}} = \text{Nut}_{\text{dep litter}} + \text{Nut}_{\text{acum litter}} \quad (\text{Eq. 37})$$

$$\text{Nut}_{\text{acum litter}} = \text{Nut}_{\text{litter}} - \text{Nut}_{\text{lib litter}} \quad (\text{Eq. 38})$$

Em que:

$\text{spNut}_{\text{res}}$ = suprimento nutrientes pelos resíduos vegetais, em kg ha^{-1}

$\text{Nut}_{\text{lib litter}}$ = nutrientes liberados pelo *litter*, em g ha^{-1}

$\text{Nut}_{\text{litter}}$ = nutrientes no *litter*, em g ha^{-1}

$\text{Nut}_{\text{rem litter}}$ = nutrientes remanescentes no *litter*, em g ha^{-1}

$\text{Nut}_{\text{dep litter}}$ = nutrientes depositados no *litter*, em kg ha^{-1}

$\text{Nut}_{\text{acum litter}}$ = nutrientes acumulados no *litter* no ano anterior, em kg ha^{-1}

Biesdorf (2021), por meio do método de utilização de *litter bags*, adaptado de Bocock e Gilbert (1957), ajustou equações para os valores remanescentes de nutrientes da biomassa de folhas de macaúba podadas e determinou as constantes de liberação de nutrientes, sendo de $0,0018 \text{ dia}^{-1}$ para N, $0,0029 \text{ dia}^{-1}$ para P, $0,0023 \text{ dia}^{-1}$ para K, $0,0008 \text{ dia}^{-1}$ para Ca, $0,0008 \text{ dia}^{-1}$ para Mg e $0,0013 \text{ dia}^{-1}$ para S (Tabela 11).

Tabela 11. Equações para estimar valores remanescentes de macronutrientes da biomassa foliar senescida de macaúba em função do tempo, em g kg^{-1} .

Nutriente	Equação	R ²	
N	$\text{NutN}_{\text{rem litter}} = \text{NutN}_{\text{litter}} e^{-0,0018 t}$	0,80	(Eq. 39)
P	$\text{NutP}_{\text{rem litter}} = \text{NutP}_{\text{litter}} e^{-0,0029 t}$	0,82	(Eq. 40)
K	$\text{NutK}_{\text{rem litter}} = \text{NutK}_{\text{litter}} e^{-0,0023 t}$	0,86	(Eq. 41)
Ca	$\text{NutCa}_{\text{rem litter}} = \text{NutCa}_{\text{litter}} e^{-0,0008 t}$	0,80	(Eq. 42)
Mg	$\text{NutMg}_{\text{rem litter}} = \text{NutMg}_{\text{litter}} e^{-0,0008 t}$	0,69	(Eq. 43)
S	$\text{NutS}_{\text{rem litter}} = \text{NutS}_{\text{litter}} e^{-0,0013 t}$	0,64	(Eq. 44)

$\text{Nut}_{\text{rem litter}}$ = valores remanescentes de nutrientes no *litter*, em g ha^{-1} ; $\text{Nut}_{\text{litter}}$ = nutrientes no *litter*, em g ha^{-1}
(Fonte: Biesdorf, 2021)

Vale ressaltar que o suprimento de nutrientes pelos resíduos vegetais é um processo contínuo e dinâmico, onde os valores dos nutrientes remanescentes no *litter* ($Nut_{rem\ litter}$) tornam-se os nutrientes acumulados no *litter* levados em consideração nos cálculos do suprimento de nutrientes pelos resíduos vegetais ($spNut_{res}$) do ano seguinte (Tabela 12).

Tabela 12. Quantidade de macronutrientes depositados no litter, acumulado e liberado anualmente pela cultura da macaúba.

Idade (anos)	N			P			K			Ca			Mg			S		
	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.
..... kg ha ⁻¹																		
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1,57	-	-	0,12	-	-	0,64	-	-	2,17	-	-	0,41	-	-	0,40	-	-
3	4,62	0,82	0,75	0,35	0,04	0,08	1,88	0,28	0,36	6,38	1,63	0,54	1,19	0,30	0,10	1,17	0,25	0,15
4	9,08	2,85	2,59	0,69	0,14	0,26	3,71	0,95	1,22	12,55	6,00	2,00	2,34	1,12	0,37	2,30	0,89	0,53
5	14,71	6,24	5,69	1,12	0,29	0,54	6,00	2,03	2,62	20,32	13,91	4,64	3,79	2,60	0,87	3,72	2,00	1,19
6	21,01	10,96	9,99	1,60	0,50	0,92	8,57	3,51	4,52	29,02	25,66	8,56	5,42	4,79	1,60	5,32	3,58	2,14
7	27,27	16,72	15,24	2,08	0,74	1,36	11,12	5,28	6,80	37,66	41,00	13,68	7,03	7,65	2,55	6,90	5,57	3,32
8	27,27	23,01	20,98	2,08	0,99	1,83	11,12	7,17	9,24	37,66	58,98	19,68	7,03	11,01	3,67	6,90	7,81	4,66
9	27,90	26,30	23,98	2,13	1,08	1,99	11,38	7,99	10,30	38,55	72,47	24,18	7,20	13,53	4,51	7,06	9,21	5,50
10	27,90	28,35	25,85	2,13	1,13	2,08	11,38	8,47	10,91	38,55	83,24	27,78	7,20	15,54	5,19	7,06	10,19	6,08
11	27,90	29,43	26,83	2,13	1,15	2,11	11,38	8,67	11,18	38,55	91,31	30,47	7,20	17,05	5,69	7,06	10,81	6,45
12	27,90	29,99	27,34	2,13	1,15	2,12	11,38	8,76	11,29	38,55	97,37	32,49	7,20	18,18	6,07	7,06	11,19	6,68
13	27,90	30,28	27,61	2,13	1,15	2,13	11,38	8,80	11,35	38,55	101,91	34,01	7,20	19,02	6,35	7,06	11,43	6,82
14	27,90	30,44	27,75	2,13	1,16	2,13	11,38	8,82	11,37	38,55	105,31	35,14	7,20	19,66	6,56	7,06	11,58	6,91
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		

Tabela 12. Continuação

Idade (anos)	N			P			K			Ca			Mg			S		
	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.	Dep. no <i>litter</i>	Acum.	Lib.
kg ha ⁻¹																		
15		30,52	27,82		1,16	2,13		8,83	11,38		107,86	35,99		20,14	6,72		11,67	6,97
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
16		30,56	27,86		1,16	2,13		8,83	11,38		109,78	36,63		20,49	6,84		11,73	7,00
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
17		30,58	27,88		1,16	2,13		8,83	11,38		111,21	37,11		20,76	6,93		11,77	7,02
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
18		30,59	27,89		1,16	2,13		8,83	11,38		112,29	37,47		20,96	6,99		11,79	7,04
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
19		30,60	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		113,10	37,74		21,11	7,05		11,81	7,05
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
20		30,60	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		113,70	37,94		21,23	7,08		11,82	7,05
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
21		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		114,15	38,09		21,31	7,11		11,82	7,05
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
22		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		114,49	38,21		21,37	7,13		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
23		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		114,75	38,29		21,42	7,15		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
24		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		114,94	38,35		21,46	7,16		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
25		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,08	38,40		21,48	7,17		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
26		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,19	38,44		21,50	7,18		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
27		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,27	38,47		21,52	7,18		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
28		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,33	38,49		21,53	7,18		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
29		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,38	38,50		21,54	7,19		11,83	7,06
	27,90			2,13			11,38			38,55			7,20			7,06		
30		30,61	27,90		1,16	2,13		8,83	11,38		115,41	38,51		21,54	7,19		11,83	7,06

4. SIMULAÇÃO DE USO DO SISTEMA FERTICALC-MACAÚBA

A simulação do FERTICALC-Macaúba foi realizada com base em uma análise de solo proveniente da Estação Experimental de Araponga, pertencente ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, no município de Araponga, na Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil, com 800 metros de altitude e clima regional C_{wb} (subtropical de altitude), segundo classificação de Köppen-Geiger.

Tabela 13. Resultados da análise química de solo da lavoura de macaúba no município de Araponga-MG.

Prof.	pH em H_2O	P mg dm^{-3}	K mg dm^{-3}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al cmol _c dm^{-3}	SB	t	T	V ... % ...	m	MO dag dm^{-3}	P-rem mg L^{-1}
0-20 cm	5,1	3,2	39	2,13	0,64	0,39	11,3	2,87	3,26	14,17	20,3	12	2,79	15,8
20-40 cm	4,94	1,4	19	1,09	0,34	0,48	9,4	1,48	1,96	10,88	13,6	24,5	1,86	11,2

O cenário produtivo escolhido foi de uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, momento com expectativa de transição entre uma produção crescente e uma estabilização na produção de frutos, adotando um stand de 400 plantas ha^{-1} e uma expectativa de produtividade de 40 t $ha^{-1} ano^{-1}$ de frutos de macaúba (equivalente à 16,8 t $ha^{-1} ano^{-1}$ de massa seca de frutos).

4.1. Subsistema Requerimento

A partir das equações descritas no item 3.1.1 foram estimadas as quantidades de nutrientes extraídos e imobilizados na biomassa seca das plantas de macaúba em função da idade (Tabelas 1 e 2), com a demanda anual de nutrientes pela biomassa da macaúba sendo calculada conforme equação 8.

Em relação à demanda de nutrientes pelos frutos foram calculados a partir da expectativa de produtividade de 40 t $ha^{-1} ano^{-1}$ de frutos de macaúba (equivalente à 16,8 t $ha^{-1} ano^{-1}$ de massa seca de frutos) e do coeficiente de utilização biológico do fruto (CUBF) apresentados na tabela 4 no item 3.1.2.

E para a estimativa da demanda total de nutrientes pela macaúba (dt_{Nut}) foi realizado a adição das demandas de nutrientes pela biomassa da planta e pela produção de frutos, além da demanda de sustentabilidade para P e K (Equação 9).

As demandas estimadas foram apresentadas de forma individual para cada macaúba, em g/planta (Tabela 14), e para um stand de 400 plantas ha⁻¹, em kg ha⁻¹ (Tabela 15).

Tabela 14. Demanda de nutrientes da macaúba no nono ano de cultivo com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	S
	 g/planta.....					
Biomassa	122,86	4,63	37,18	78,17	82,74	12,03
Frutos	285,50	36,96	309,42	61,75	37,87	49,37
Sustentabilidade		36,96	309,42			
Total	408,36	78,56	656,02	139,92	120,61	61,40

Tabela 15. Demanda de nutrientes de uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	S
	 kg ha ⁻¹					
Biomassa	49,14	1,85	14,87	31,27	33,10	4,81
Frutos	114,20	14,79	123,77	24,70	15,15	19,75
Sustentabilidade	-	14,79	123,77	-	-	-
Total	163,34	31,42	262,41	55,97	48,24	24,56

Na tabela 16 são apresentadas as taxas de recuperação pela planta dos nutrientes aplicados ao solo via fertilizante (tr_{pl_Nut}) calculadas a partir das equações apresentadas na tabela 6.

Tabela 16. Taxa de recuperação pela planta do nutriente aplicado ao solo via fertilizante (tr_{pl_Nut}), em porcentagem, em uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos) e um P-rem = 15,8 mg L⁻¹.

N	P	K	Ca	Mg	S
..... %					
49,64	27,83	81,05	46,88	66,07	45,17

Em síntese, através do quociente entre a demanda total de nutrientes (dt_Nut) e a taxa de recuperação pelas plantas (tr_{pl_Nut}) (Equação 10) chegou-se ao requerimento total de nutrientes para uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo

e com expectativa de produtividade de 40 t de frutos (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos) (Tabela 17).

Tabela 17. Requerimento total de nutrientes de uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

N		P		K		Ca		Mg		S	
g/planta kg ha ⁻¹		g/planta kg ha ⁻¹		g/planta kg ha ⁻¹		g/planta kg ha ⁻¹		g/planta kg ha ⁻¹		g/planta kg ha ⁻¹	
822,62	329,05	282,27	112,91	809,36	323,74	298,46	119,38	182,55	73,02	135,93	54,37

4.2. Sistema Suprimento

4.2.1. Recomendação de calagem

Mediante ponderações de Alvarez V. e Pereira (2005), descritas no item 4.1.1, optou-se pela necessidade de calagem (NC) calculada por meio do método de saturação por bases conforme demonstrado abaixo:

$$NC = T (V_e - V_a)/100 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$NC = 14,17 (60 - 20,3)/100$$

$$NC = 5,63 \text{ t ha}^{-1}$$

A quantidade de calcário (QC) foi ajustada em função da aplicação do corretivo em 100% da superfície da área, sem incorporação ao solo (considerando a profundidade de incorporação de 10 cm) e utilizando calcário com poder reativo de neutralização total (PRNT) de 85% e teores de CaO e MgO de 38 % e 12 %, respectivamente, conforme cálculo abaixo:

$$QC = NC (SC/100) (PF/20) (100/PRNT) \quad (\text{Eq. 20})$$

$$QC = 5,63 (100/100) (10/20) (100/85)$$

$$QC = 3,31 \text{ t ha}^{-1}$$

A partir da quantidade de calcário (QC) recomendada para a lavoura (3,31 t ha⁻¹) e das características do calcário a ser aplicado (38 % de CaO e 12 % MgO) foi estimado o suprimento de Ca e Mg da seguinte forma:

$$\text{Ca}_{\text{Calagem}} = \text{QC} (\text{T}_{\text{CaO}}/100) 0,7147 * 1000$$

$$\text{Ca}_{\text{Calagem}} = 3,31 (38/100) 0,7147 * 1000$$

$$\text{Ca}_{\text{Calagem}} = 898,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de Ca}$$

$$\text{Mg}_{\text{Calagem}} = \text{QC} (\text{T}_{\text{MgO}}/100) 0,6030 * 1000$$

$$\text{Mg}_{\text{Calagem}} = 3,31 (12/100) 0,6030 * 1000$$

$$\text{Mg}_{\text{Calagem}} = 239,51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de Mg}$$

4.2.2. Recomendação de gessagem

Como na análise química de solo da camada de 20-40 cm (Tabela 13) da área não apresenta teor de Ca^{2+} inferior ou igual a $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, teor de Al^{3+} maior que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou saturação por Al^{3+} (m) maior que 30 %, não se recomenda gessagem para a lavoura.

4.2.3. Nutrientes supridos pelo solo e pelos resíduos vegetais da cultura

Para o cálculo do suprimento de nutrientes pelo solo ($\text{spNut}_{\text{solo}}$) (Tabela 18) foi levado em consideração os teores disponíveis dos nutrientes na análise química do solo (Tabela 13), o volume de solo explorado pela planta no nono ano de cultivo (Tabela 9) e as taxas de recuperação dos nutrientes pelos seus respectivos extratores (tr_{ext}) obtidos pelas equações relacionadas na tabela 10.

Tabela 18. Suprimento de nutrientes pelo solo de uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Nutriente	Extrator	Teores		Taxa de recuperação do extrator mg dm ⁻³ / mg dm ⁻³	Suprimento		
		0-20 cm	20-40 cm		0-20 cm	20-40 cm	Total
		 mg dm ⁻³			 kg ha ⁻¹		
N					103,6	69,1	172,7
P	Mehlich-1	3,2	1,4	0,26	24,7	10,8	35,5
K	Mehlich-1	39,0	19,0	0,76	102,2	49,8	152,0
Ca	KCl 1 mol L ⁻¹	426	218	0,77	1112,1	569,1	1681,2
Mg	KCl 1 mol L ⁻¹	76,8	40,8	0,80	192,2	102,1	294,4
S	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ em HOAc	-	-	0,13	-	-	-

O FERTICALC-Macaúba estimou o suprimento total de nutrientes com a soma dos nutrientes provenientes do solo explorado pelas raízes absorventes da macaúba, da matéria orgânica do solo (MOS) e dos resíduos vegetais da cultura (Tabelas 18 e 19). A calagem constituiu-se como uma das fontes de suprimento Ca e Mg para a cultura da macaúba.

Tabela 19. Suprimento total de nutrientes para uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Nutrientes		N	P	K	Ca	Mg	S
		 kg ha ⁻¹					
Suprimento	Solo	172,73	35,46	152,04	1681,24	294,38	-
	Resíduos vegetais	25,85	2,08	10,91	27,78	5,19	6,08
	Calagem	-	-	-	898,95	239,51	-
	Total	198,58	37,54	162,95	2607,97	539,07	6,08

4.3. Balanço nutricional

Para a realização do balanço nutricional pelo FERTICALC-Macaúba foram levantados os valores do requerimento total de nutrientes pelas macaúbas (Tabela 17) e do suprimento total de nutrientes (Tabela 19). E pela diferença entre esses valores chegou-se às doses nutrientes a serem aplicados na forma de fertilizantes para a lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, com stand de 400 plantas ha⁻¹ e uma expectativa de produção de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (equivalente à 16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos) (Tabela 20).

Tabela 20. Balanço nutricional de uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	S
	 kg ha ⁻¹					
Requerimento	329,05	112,91	323,74	119,38	73,02	54,37
Suprimento	198,58	37,54	162,95	2607,97	539,07	6,08
Balanço nutricional	130,47	75,37	160,79	-2488,58	-466,06	48,29

K, N e P apresentaram as maiores doses recomendadas a serem aplicados na forma de fertilizantes. E para maior praticidade na conversão em fertilizantes as doses recomendadas para P e K também foram expressas em P₂O₅ e K₂O, respectivamente (Tabela 21).

Tabela 21. Recomendação de N, P₂O₅ e K₂O para uma lavoura de macaúba no nono ano de cultivo, adotando um stand de 400 plantas ha⁻¹ com expectativa de produtividade de 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ de frutos de macaúba (16,8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de massa seca de frutos).

Doses	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
kg ha ⁻¹	130	173	193
g/planta	326	433	482

Em relação ao balanço nutricional dos demais nutrientes, o suprimento de Ca e Mg pelos resíduos vegetais da cultura e principalmente pela calagem mostraram-se suficientes para o requerimento da cultura da macaúba neste cenário (Tabela 20).

Para o S obteve-se apenas o suprimento referente aos resíduos vegetais da cultura devido a análise química de solo não ter contemplado o nutriente (Tabelas 18 e 19). Contudo, geralmente a demanda de S é suprida pelo solo, pela aplicação de gesso agrícola, quando necessário, e pelo uso de fertilizantes com sulfato em sua composição, como por exemplo com o superfosfato simples usado para suprimento da demanda de P.

5. CONCLUSÕES

O FERTICALC-Macaúba é uma nova alternativa para a recomendação de calagem e adubação para a cultura da macaúba.

O FERTICALC-Macaúba é um sistema de recomendação de calagem e adubação baseado em modelagem e no balanço nutricional da cultura desenvolvido com forte embasamento conceitual.

O FERTICALC-Macaúba estimou a demanda e o requerimento de nutrientes pela cultura em função do acúmulo de nutrientes na biomassa da planta e da produtividade de frutos.

O FERTICALC-Macaúba estimou o suprimento de nutrientes pelo solo explorado pelas raízes absorventes, pela matéria orgânica do solo e pelos resíduos vegetais da cultura.

O desenvolvimento do sistema FERTICALC-Macaúba permitiu observar que a matéria orgânica do solo é uma importante fonte de N, assim como os resíduos vegetais da cultura para os nutrientes em geral.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS L. E. & OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **B. Inf. SBCS**, 25:27-32, 2000.
- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G., (Eds.) CFSEMG. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa, MG. 1999. 359 p.: il. (5^{ta} Aproximação)
- ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In ALVAREZ V., V. H.; RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G., (Eds.) CFSEMG. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Viçosa, MG. 1999. 359 p.: il. (5^{ta} Aproximação)
- BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; TEIXEIRA, J. L.; FERNADES FILHO, E. I, NUTRICAL 2.0 – Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**, 16 (1): 129-131, 1995
- BIESDORF, E. M. **Caracterização e aproveitamento de biomassa foliar senescida de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius)**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021. 90 p.
- BOARETTO, R. M.; MATTOS JR, D.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen-15 uptake and distribution in two citrus species. *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science*. 156-159, 2010.
- BOARETTO, R.M., MURAOKA, T.; GINÉ, M.F.; BOARETTO; A.E. Absorption of foliar sprayed boron and its translocation in the citrus plants when applied at different phonological phases. In: XU, F.; GOLDBACH, H. E.; BROWN, P. H.; BELL, R. W.; FUJIWARA, T.; HUNT, C. D.; GOLDBERG, S. SHI, L. (Eds.). *Advances in Plant and Animal Boron Nutrition*. p. 125–131. Dordrecht, 2007.
- BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. The disappearance of leaf litter under diferente woodland conditions. **Plant and Soil**, v. 9, p. 179-185, 1957.
- CARVALHO, F.T. **Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do milho**. (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000. 93p.
- COLOMBO, C. A.; BERTON, L. H. C.; DIAZ, B. G.; FERRARI, R. A. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. *OCL*, v. 25, n. 1, p. D108, 2018.

EVARISTO, A. B., GROSSI, J. A. S., CARNEIRO, A. D. C. O., PIMENTEL, L. D., MOTOIKE, S. Y., KUKI, K. N. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v.85, p.18-24, 2016.

FEIGENBAUM, S., BIELORAI, H.; ERNER, Y.; DASBERG, S. The fate of ¹⁵N labeled nitrogen applied to mature citrus trees. **Plant Soil**. 97:179–187, 1987.50

FREIRE, F. J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001. 87p.

GAMARRA, Y. P. **Modelo de recomendação de adubação e calagem para a cultura de dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) com base em balanço nutricional**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013, 52 p.

GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 25(3): 601-616, 2001.

JOSÉ, C.; EVARISTO, A. B.; MARQUES, G.; MARTÍN-RAMOS, P.; MARTÍN-GIL, J.; GUTIÉRREZ, A. Chemical composition and thermal behavior of the pulp and kernel oils from macauba palm (*Acrocomia aculeata*) fruit. **Industrial Crops and Products**, v. 84, p. 294-304, 2016.

KIEHL, E. J. Manual de Edafologia. Relações solo-planta. Agronômica Ceres. São Paulo, 1979. 264 p.

LANES, E. C. M.; COSTA, P. M. A.; MOTOIKE, S. Y. Alternative fuels: Brazil promotes aviation biofuels. **Nature**, v. 511, n. 7507, p. 31-31, 2014.

MATTOS JR, D., GRAETZ, D.A., ALVA, A.K. Biomass distribution and nitrogen-15 partitioning in citrus trees on a sandy Entisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:555–563, 2003b.

MELLO, M. S. **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de calagem e fertilizante para a cultura de tomate**. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000. 91 p.

MOREIRA, S. L. S.; IMBUZEIRO, H. M. A.; DIETRICH, O. H. S.; HENRIQUES, E.; FLORES, M. E. P.; PIMENTEL, L. D.; FERNANDES, R. B. A. Root distribution of cultivated macauba trees. **Industrial Crops & Products**, v. 137, p. 646-651, 2019.

MOTOIKE, S. Y.; KUKI, K. N. The Potential of Macaw Palm (*Acrocomia aculeate*) as Source of Biodiesel in Brazil. **International Review of Chemical Engineering**, v. 1, n. 6, p. 632-635, 2009.

MOTOIKE, S. Y.; CARVALHO, M.; PIMENTEL, L. D.; KUKI, K. N.; PAES, J. M. V.; DIAS, H. C. T.; SATO, A. Y. **A cultura da macaúba**: implantação e manejo de cultivos racionais. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 61 p.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Occurrence of macaúba in Minas Gerais, Brazil: relationship with climatic, pedological and vegetation attributes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p. 1023-1031, 2002.

OLIVEIRA, J. R. V. **Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem e adubação de povoamentos de teca – NUTRITECA**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003, 76 p.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; CANTARUTTI, R, B. Desenvolvimento de um sistema para recomendação de adubação para a cultura da bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:131-143, 2005.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MARTINEZ, H. E. P.; TEIXEIRA, C. M.; MOTOIKE, S. Y.; PEDROSO NETO, J. C. Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1º aproximação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 32, n. 265, p. 20-30, 2011.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C.H. ; MARTINEZ, H. E. P.; MOTOIKE, S. Y.; MANFIO, E. C.; SANTOS, RC. Effect of Nitrogen and Potassium Rates on Early Development of Macaw Palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1671-1680, 2015.

PIMENTEL, L. D.; BRUCKNER, C. H.; MANFIO, E. C.; ; MOTOIKE, S. Y.; MARTINEZ, H. E. P. Substrate, lime, phosphorus and topdress fertilization in macaw palm seedling production. **Revista Árvore**, v. 40, p. 235-244, 2016.

POSSAMAI, J.M. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do algodoeiro**. (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003. 91p.

QUIÑONES, A.; BAÑULS, J.; PRIMO-MILLO, E.; LEGAZ, F. Effects of 15N application frequency on nitrogen uptake efficiency in Citrus trees. **Journal of Plant Physiology**.160:1429-1434, 2003.

RAFFAELI, V. **Sistema de interpretação de análise de solo e de recomendação de nutrientes para arroz irrigado.** (Tese de Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2000. 76p.

RAMÍREZ, D. P. U. **Modelo para recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da batata *Solanum tuberosum* com base no balanço nutricional.** Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015. 79f.

ROSA, G. N. G. P. **Sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura do coqueiro.** 2002. 74p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

SANTOS, R. C. **Aspectos nutricionais e resposta da macaúba a adubação com nitrogênio e potássio.** Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015. 85 p.

SANTOS, F. C.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SEDIYAMA, C. S. Modelagem da recomendação de fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 32, p.1661-1674, 2008.

SILVA, A.P.; ALVAREZ V, V.H.; SOUZA, A.P.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; DANTAS, J.P. Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi – Ferticalc-abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1269-1280, 2009.

STAHRRINGER, N, I. **Sistema de Recomendação de Corretivos e Fertilizantes para a Cultura da Laranja (FERTICALC-LARANJA).** 2013. 116p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

STANFORD, G. S.; SMITH, S. J. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36: 465-472, 1972.

TOMÉ JR, J. B. e NOVAIS, R. F. Utilização de modelos como alternativas às tabelas de recomendação de adubação. **B. Inf. SBCE**. 25(3): 8-11, 2000.

TOMÉ JR., J. B. **Uma nova abordagem nas recomendações de adubação.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa Viçosa, MG, 2004. 133 p.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos desta tese mostraram-se inovadores mediante os objetivos lançados, as metodologias adotadas e a peculiar vantagem de ter-se realizado avaliações com macaúbas cultivadas, e não provenientes de maciços naturais como a maioria dos estudos envolvendo esta espécie.

De maneira geral, os estudos trouxeram grande volume de dados, resultados e conclusões e, conseqüentemente, contribuições para estimativas da demanda nutricional da espécie, para o aprimoramento do manejo nutricional e para ajustes na recomendação de adubação para a cultura da macaúba.

Ao final dos estudos, chegou-se à uma recomendação de adubação baseada na combinação de ensaios de adubação em campo e o modelo de balanço nutricional da cultura da macaúba (FERTICALC-Macaúba) com forte embasamento conceitual e de modo que permita constantes atualizações.