

FREDERICO CÁSSIO MOREIRA MARTINS

**MONITORAMENTO DO CRESCIMENTO DA MACAÚBA
UTILIZANDO IMAGENS AÉREAS**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

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

T

M379m
2014
Martins, Frederico Cássio Moreira, 1980-
Monitoramento do crescimento da macaúba utilizando
imagens aéreas / Frederico Cássio Moreira Martins. – Viçosa,
MG, 2014.
ix, 56f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Macaúba - Cultivo. 2. *Acrocomia aculeata*. 3.
Biocombustível - Energia - Fontes alternativas. 4. Sensoriamento
Remoto. 5. Processamento de imagens - Técnicas digitais.
6. Fotogrametria aérea. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.851

FREDERICO CÁSSIO MOREIRA MARTINS

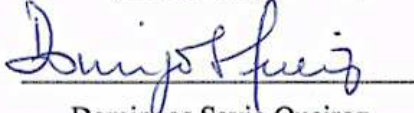
**MONITORAMENTO DO CRESCIMENTO DA MACAÚBA
UTILIZANDO IMAGENS AÉREAS**

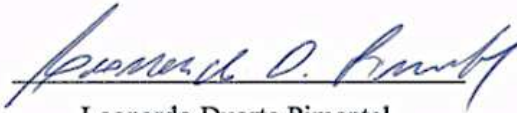
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 09 de julho de 2014.


Daniel Marçal de Queiroz
(Coorientador)


Domingos Sárvio Magalhães Valente


Domingos Sárvio Queiroz


Leonardo Duarte Pimentel


Francisco de Assis de Carvalho Pinto
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola. À CAPES, pelo financiamento neste período.

Ao Professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, pela orientação e pela contribuição na minha formação, tanto profissional como pessoal.

Aos coorientadores e professores Igor Rodrigues de Assis, Sérgio Yoshimitsu Motoike e Daniel Marçal de Queiroz, pelas orientações e atenção durante o trabalho.

À Kelly, pelo companheirismo, amor, paciência e apoio, essenciais durante este período. Em especial agradeço pelas incansáveis ajudas e por fazer parte deste momento.

À minha família pela torcida.

Ao grande amigo Igor, pelo companheirismo, pelos excelentes momentos vividos em Viçosa, pela paciência e transferência de conhecimento e ao Thiago pela amizade e alegria em nossa república.

À turma da Mecanização Agrícola da UFV, pela boa convivência, pela presteza e pela troca de conhecimentos e experiências. Agradeço em especial ao Anderson e a Flora, por toda ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Carlos Nick e aos funcionários do banco de germoplasma de Macaúba da UFV, pela colaboração nos trabalhos de campo.

Aos professores Leonardo Duarte Pimentel e Domingos Sárvio Magalhães Valente e ao pesquisador Domingos Sávio Queiroz pela participação da banca de defesa e sugestões apresentadas.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola.

A Deus, por permitir essa conquista.

A todos aqueles que de alguma forma fizeram parte desta etapa e colaboraram para sua conclusão.

BIOGRAFIA

FREDERICO CÁSSIO MOREIRA MARTINS, filho de Maria Madalena Moreira Martins e José Roberto Menezes Martins, nasceu no dia 18 de fevereiro de 1980 em Itabira, Minas Gerais.

Em janeiro de 2005, concluiu o curso de Agronomia na Universidade Federal de Minas Gerais.

Em março de 2008, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo a dissertação em fevereiro de 2010.

Em março de 2010, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na mesma área de concentração e universidade, defendendo a tese em julho de 2014.

SUMÁRIO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
CAPÍTULO 1.....	7
RESUMO	8
INTRODUÇÃO	9
MATERIAL E MÉTODOS.....	10
Área experimental	10
Caracterização e origem das amostras	10
Caracterização do solo	11
Caracterização vegetal	12
Georreferenciamento das imagens	12
Identidade amostral e área de interesse	13
Classificação das imagens.....	13
Área ocupada pelo dossel.....	14
Análise dos resultados.....	15
RESULTADOS.....	16
Classificadores	16
Desenvolvimento do dossel da macaúba.....	16
Caracterização do solo	18
Correlações das variáveis edáficas e morfológicas da macaúba.....	19
DISCUSSÃO.....	21
CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24

CAPÍTULO 2.....	28
RESUMO	29
INTRODUÇÃO	30
MATERIAL E MÉTODOS.....	31
Área experimental	31
Caracterização e origem das amostras	31
Medições e análises.....	33
Georreferenciamento das imagens	33
Identidade amostral e área de interesse.....	34
Classificação das imagens e área ocupada pelo dossel	34
Composição química das plantas	36
Análise dos resultados.....	36
RESULTADOS.....	37
Classificadores	37
Desenvolvimento do dossel.....	37
Desenvolvimento em altura.....	39
Relações morfológicas com as idades da macaúba.....	41
Composição e variação química foliar	41
A morfologia e a variação química foliar da macaúba	42
Relações morfológicas com a produção da macaúba.....	44
DISCUSSÃO.....	45
CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
CONCLUSÕES GERAIS.....	56

RESUMO

MARTINS, Frederico Cássio Moreira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Monitoramento do crescimento da macaúba utilizando imagens aéreas.** Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Igor Rodrigues de Assis, Sérgio Yoshimitsu Motoike, Daniel Marçal de Queiroz.

O cenário energético mundial tem apontado a importância de fontes renováveis. Portanto, as culturas bioenergéticas têm sido cada vez mais investigadas. A crescente demanda no cenário mundial por fontes de energia renovável vêm fazendo com que as culturas bioenergéticas sejam cada vez mais investigadas. No Brasil, a macaúba tem se destacado pela elevada produtividade e adaptabilidade no território. Sabe-se que, a variabilidade genética, a morfologia e os fatores ambientais interferem diretamente na produtividade das culturas. Conhecer a interação dessas variáveis com o ambiente de cultivo pode melhorar a eficiência da exploração. A macaúba apresenta desenvolvimento inicial lento e características morfológicas difíceis de serem mensuradas, como porte da planta, a área ocupada pelo dossel, e outras. Nesse sentido, estudos acerca do desenvolvimento da cultura utilizando técnicas de sensoriamento remoto poderia contribuir para melhorar o entendimento da fisiologia da cultura. O objetivo deste trabalho foi detectar correspondências morfológicas e fenológicas da macaúba com as características físico-químicas do solo e com a composição química das plantas, utilizando o sensoriamento remoto e análises de imagens digitais. A caracterização do desenvolvimento foi realizada utilizando plantas com um, dois e quatro anos de idade, pertencentes ao banco de germoplasma de macaúba da Universidade Federal de Viçosa. Os estudos utilizaram para cada idade, cinco famílias (plantas de mesma origem) contendo de três a cinco indivíduos. Por meio de análises físico-químicas do solo, de análises foliares e da determinação das variações morfológicas, investigaram-se as relações em três diferentes idades. Todas as avaliações foram realizadas em três épocas distintas - Tempo 0 (início), Tempo 5 (após cinco meses) e Tempo 9 (após nove meses). Ao final do estudo avaliou-se a correspondência morfológica da cultura com a primeira produção de frutos. Utilizou-se a correlação linear de Pearson para a análise dos resultados. Os resultados relativos à área ocupada pelo dossel das plantas permitiram caracterizar o perfil de crescimento em diferentes idades, em especial o período adaptativo da cultura. Plantas com um e quatro anos de

idade apresentaram relações mais específicas com as características químicas do solo sobre o desenvolvimento em dossel que plantas de dois anos. Os resultados indicaram que a macaúba apresentou sensibilidade à densidade do solo apenas para plantas em estágio inicial de desenvolvimento (um ano de idade); o desenvolvimento do dossel das plantas com idade acima de quatro anos foi fortemente influenciado pelos macroelementos K e P e pelos microelementos Mn e Zn; a idade das plantas influenciou a composição química das folhas; plantas com idade superior a quatro anos apresentaram menores teores de P e K nas folhas; o teor de P foliar não apresentou um padrão de influência sobre o desenvolvimento de plantas com idade superior a quatro anos. Observou-se também que o período de adaptação da macaúba (idade próxima a um ano) não foi adequado para realizar inferências agronômicas e que as variáveis alométricas - altura e área ocupada pelo dossel foram fortemente correlacionadas com a idade da macaúba. A diferenciação morfológica do dossel da macaúba tendeu a reduzir após o início da frutificação apontando a variabilidade genética bem como o estágio fenológico como fatores que interferiram diretamente nas correlações entre variáveis morfológicas e a produção da cultura.

ABSTRACT

MARTINS, Frederico Cássio Moreira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2014. **Monitoring the growth of macaw palm using aerial images.** Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-Advisers: Igor Rodrigues de Assis, Sérgio Yoshimitsu Motoike and Daniel Marçal de Queiroz.

The global energy scenario has pointed out the importance of renewable sources. Therefore, bioenergy crops have been increasingly investigated. In Brazil, macaw palm has been highlighted by high productivity and adaptability. It is known that genetic variability, morphology and environmental factors directly affect crop yield. Understanding the interaction of these variables with the growing environment can optimize the exploration. The macaw palm shows slow initial growth and morphological characteristics that are difficult to be measured, such as plant size, the area occupied by the canopy, among others. In this sense, studies about crop development using remote sensing techniques could assist the understanding of crop's physiology. The aim of this study was to detect morphological and phenological correspondence of macaw with physico-chemical characteristics of the soil and the chemical composition of plants, using remote sensing and digital images analysis. The development characterization of macaw palm was performed using plants of, one, two and four years old, belonging to the germplasm bank of Federal University of Viçosa. In this study were used for each age, five families (plants from the same origin) containing three to five plants. It was used physico-chemical analysis of soil, foliar analysis and determination of morphological changes, to investigate the relationships at three different ages. All assessments were performed at three different times - Time 0 (start), Time 5 (after five months) and Time 9 (nine months). The correspondence among morphology and the first yield was evaluated at the end of study. It was used Pearson's correlation for the results analysis. The results for the occupied plant canopy area were used to characterize the growth profile in different age groups in the adaptive period of crop. Plants of one to four years of age showed more specific relations with chemical soil characteristics on the plant canopy development than those of two years. The results indicated that macaw palm showed sensitivity to the density of the soil to plants only in the initial stage of development (one year-old); the development of plant canopy over the age of four years was strongly influenced by macro-elements K and P and the micro-elements Mn and Zn; plant age influences the chemical composition of

the sheet; plants older than four years had lower levels of P and K in the leaves; the content of P in leaflets does not present an influence pattern on the plants development at the age of four years. It was also observed that the adjustment period (age close to one year) is not suitable to perform agronomic's inferences and the morphological variables - height and canopy area are strongly correlated with the macaw palm's age. The morphological differentiation of macaw's canopy tended to decrease after the onset of fruiting, pointing to the genetic variability and phenological stage as factors that directly affect the correlations between morphological variables and the crop yield.

INTRODUÇÃO GERAL

A macaúba, (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.), é uma palmeira originária dos cerrados, savanas e florestas abertas da América Tropical (CLEMENT et al., 2005). Sua população é considerada bem adaptada a diferentes ecossistemas, uma vez que sua ocorrência é notada em áreas degradadas ou intactas (MOTTA et al., 2002; RATTER et al., 2003). De origem grega, *Acrocomia* elucida a disposição das folhas na planta, que gera um formato semelhante a uma coroa, sendo que, os termos “Akron”, significa “uma” e “Kome”, “cabeleira” (HENDERSON et al., 1995). A altura das plantas varia em média de 10 a 15 metros, podendo alcançar mais de 20 metros. O estipe conserva os remanescentes das bainhas foliares e, seu diâmetro, varia entre 20 e 30 centímetros. Uma característica morfológica marcante dessa palmeira é a presença de espinhos com até 10 centímetros ao longo do estipe, das partes que compõem o dossel e inflorescências (MOTTA et al., 2011).

A macaúba é uma espécie que tem potencial para produzir 24 toneladas de frutos/ha, o que corresponde a, aproximadamente, 4,8 toneladas de óleo/ha (CETEC, 1983; TEIXEIRA, 2005; DREHER, 2009). Nos últimos anos, estudos têm revelado os possíveis usos dos derivados desta espécie. Entre eles, podem-se destacar a utilização da torta na alimentação de ruminantes (RUFINO et al., 2011), usos medicinais, cosméticos e alimentícios (SILVA et al., 1986) e a utilização do óleo na produção de biocombustíveis (GONÇALVES et al., 2013; ZANATTA e DALLA ROSA, 2014). As cascas, a polpa seca após a extração do óleo e o tegumento do endocarpo possuem significativo potencial para a produção de briquetes e péletes para a produção de energia. Vale ressaltar que, o tegumento, devido a sua elevada densidade, vem sendo empregado na produção de carvão ativado (VILLAS BOAS et al., 2010; DIAS et al., 2012).

A consolidação do uso da bioenergia tem se firmado diante dos impactos ambientais negativos oriundos dos combustíveis fósseis e das instabilidades econômicas do setor petrolífero (MOTA et al., 2009; ZANATTA e DALLA ROSA, 2014). Nesse contexto, o Brasil tem se pronunciado como um dos maiores produtores de biocombustíveis, apresentando em sua matriz energética a mais alta proporção de energia renovável (MASIERO, 2011).

Todavia, é neste cenário bioenergético que a macaúba tem se evidenciado. Diante das demandas atuais por fontes alternativas de energia, a macaúba é considerada, entre as espécies nativas, uma das mais promissoras fontes de óleo para produção do biodiesel (SILVA, 1994; NAE, 2005). Porém, a viabilidade econômica de sua exploração, no que tange a utilização no biodiesel, é dependente da disponibilidade a longo prazo da espécie e, para isso, tornam-se fundamentais a domesticação e o melhoramento no processamento do óleo (LOPES et al., 2013).

Atualmente, o estabelecimento do uso dos biocombustíveis tem sido questionado pelos segmentos alimentícios por utilizarem matérias primas em comum (PIRES et al., 2013). Porém, sugere-se que a agricultura contemporânea não deve ser vista apenas como instrumento de fomento para atender as necessidades alimentares de uma população, mas também como fonte de matéria prima demandada pela indústria bioenergética. O uso da bioenergia, além de reduzir a evasão de divisas, contrapõe a importação de combustível de origem fóssil, favorecendo a sustentabilidade do mercado interno (WANDECK e JUSTO, 1988).

Para que se consiga o estabelecimento do setor, é preciso anular ou reduzir as controvérsias sobre a sustentabilidade econômica. Portanto, é necessário contemplar a bioenergia em estudos macroeconômicos voltados para os planejamentos energéticos e territoriais (MIURA et al., 2011) pois a manutenção da cadeia é garantida pelo suprimento constante de biomassa com custos competitivos (DAM et al., 2007).

O cultivo de espécies produtoras de óleo para produção de biodiesel requer práticas agrícolas que são determinantes para a sustentabilidade da atividade (SILVA e FREITAS, 2008). Nesse sentido, segundo Motoike e Kuki (2009), um dos maiores desafios da comunidade científica nacional é encontrar uma fonte de matéria prima para biodiesel, que seja tão eficiente quanto a cana de açúcar é para o etanol. Contudo, torna-se necessário conhecer mais especificamente as relações do crescimento de uma cultura energética com seu ambiente de cultivo para garantir a viabilidade econômica da sua exploração, uma vez que o custo é um dos grandes desafios da produção de biodiesel (ZHANG et al., 2003).

Da mesma forma que o melhoramento genético exerce importante papel no processo de domesticação da macaúba (MANFIO et al., 2012), o sensoriamento remoto pode servir como relevante instrumento na exploração de culturas bioenergéticas. O auxílio na logística da produção, o gerenciamento e avaliação de áreas contendo culturas bioenergéticas e a estimativa de produção de biomassa são algumas das

aplicações desta técnica no âmbito bioenergético (BAATH et al., 2002; THENKABAIL et al., 2004; LARSSON e NILSSON, 2005; MIURA et al., 2011).

Assim, a aquisição de maneira remota de dados morfológicos da macaúba por meio de imagens aéreas em diferentes idades, junto às características edáficas de seu ambiente de exploração e sua composição foliar, contribuirão para consolidar a inserção da macaúba no cenário bioenergético.

Este trabalho está dividido em dois capítulos. O primeiro capítulo objetivou caracterizar o desenvolvimento de plantas de macaúba em diferentes idades por meio de imagens aéreas de câmeras não métricas e da composição físico-química do solo do seu ambiente de cultivo. O segundo capítulo, objetivou analisar as relações existentes entre as idades, as variações morfológicas, a composição química das folhas e a produção da macaúba por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAATH, H.; GALLERSPANG, A.; HALLSBY, G.; LUNDSTON, A.; LOFGREN, P.; NILSSON, M.; STAHL, G. Remote sensing, field survey, and long-term forecasting: an eficiente combination for local assessments of forest fuels. **Biomass and Bioenergy**. v. 22, p. 145-157, 2002.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS / MINISTÉRIO INDÚSTRIA E COMÉRCIO (CETEC-MG). Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais (V1): Estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais. Belo Horizonte: **Relatório Final Convênio STI- MIC-CETEC**, 1983. 152p.

CLEMENT, C. R.; LLERAS, E.; VAN LEEUWEN, J. O potencial das palmeiras tropicais no Brasil: acertos e fracassos das últimas décadas. **Agrociências**, v.9, p. 67-71, 2005.

DAM, J. van; FAAIJ, A.P.C.; LEWANDOWSKI, I.; FISCHER, G. Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios. **Biomass and Bioenergy**, Kidlington, v.31, n.6, p.345-366, 2007.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, B. C. H.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA J. D. Produção de briquetes e pletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: **Embrapa Agroenergia**, 2012. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf>. Acesso em: 15/09/2014.

DREHER, F. **Promising South American Oil Palm *Acrocomia totai* Mart.: Current Status and Future Prospects.** Thesis (Doctor Science in Agricultural Economics) – Hochschule für Wirtschaft und Umwelt, Fakultät 2, Nürtinger-Geislingen, Germany, 62 p, 2009.

GONÇALVES, D. B.; BATISTA, A. F.; RODRIGUES, M. Q. R. B.; NOGUEIRA, K. M. V.; SANTOS, V. L. Ethanol production from macaúba (*Acrocomia aculeata*) presscake hemicellulosic hydrolysate by *Candida boidinii*. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 261–266, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413011437>. Acesso em: 09/09/2014.

HENDERSON, A., GALEANO, G., BERNAL, R. **Field Guide to the Palms of the Americas.** New Jersey: Princeton University, 1995.

LARSSON, S.; NILSSON, C. A remote sensing methodology to assess the costs of preparing abandoned farmland for energy crop cultivation in northern Sweden. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 1-6, 2005.

LOPES, D. C.; STEIDLE NETO, A. J.; MENDES, A. A.; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics**, v. 40, p. 819–824, 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988313002284>. Acesso em: 09/09/2014.

MANFIO, C. E.; 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. 63-68, janeiro/março. 2012.

MASIERO, G. Desenvolvimento dos biocombustíveis no Brasil e no Leste Asiático: experiências e desafios. **Revista Brasileira de Política Internacional**, Brasília, v. 54, n. 2, p. 97-117, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-73292011000200005&lng=en&nrm=iso. Acessado em: 08/09/2014.

MIURA, A. K.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ANJOS, S. D.; LUIZ, A. J. B. Avaliação de áreas potenciais ao cultivo de biomassa para produção de energia e uma contribuição de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n.3, p. 607-620, 2011.

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

MOTOIKE, S.Y, KUKI, K. N. The potential of macaw palm (*Acrocomia aculeata*) as source of biodiesel in Brazil. **International Review of Chemical Engineering**. v.1, n. 6, p. 632 - 635, 2009.

MOTTA, J. C.; ALMEIDA, M. M.; ALENCAR, V. C.; CURI, W. F. Impactos e benefícios ambientais, econômicos e sociais dos biocombustíveis: Uma visão global. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n.3, p. 220-242, 2009.

MOTTA, P.E., OLIVEIRA FILHO, A.T., GOMES, J.B.V. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária**, v. 37, p. 1023–1031, 2002.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS – NAE. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Cadernos NAE: **Biocombustíveis**. Brasília: Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2005. 232p.

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. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092666901200578X>. Acesso em: 08/09/2014.

RATTER, J.A., BRIDGEWATER, S., RIBEIRO, J.F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetations of 376 areas. **Edinb. J. Bot.** v. 60, p. 57–109, 2003.

RUFINO, L.M.A.; BARRETO, S. M. P.; DUARTE, E. R.; GERASEEV, L. C. SANTOS, A. C. R. JARUCHE, Y. C. Efeitos da inclusão de torta de macaúba sobre a população de protozoários ruminais de caprinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**. V.40, n.4, p. 899-903, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v40n4/26.pdf>. Acesso em: 09/09/2014.

SILVA, J. C. **Macaúba: fonte de matéria-prima para os setores alimentício, energético e industrial**. Viçosa, MG: CEDAF/DEF/UFV, p. 41, 1994.

SILVA, PAULO REGIS FERREIRA DA.; FREITAS, THAIS FERNANDA STELLA DE.; Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, v.38, n.3, p.843-851, 2008.

SILVA, J.C.; BARRICHELO, L.E.G.; BRITO, J.O. Endocarpos de Macaúba e de Babaçu comparados a madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **IPEF**, Piracicaba, n.34, p.31-34, 1986.

TEIXEIRA, L. C. Produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p.79-86, 2005.

THENKABAIL, P. S. et al. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. **Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5447-5472, 2004.

VILAS BOAS, M. A., CARNEIRO, A. C.O., VITAL, B. R., CARVALHO, A. M .M .L., MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010.

WANDECK, F.A.; JUSTO, P.G. A macaúba, fonte energética e insumo industrial: sua significação econômica no Brasil. **In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, SAVANAS**, 6., 1988, Brasília. Anais. Planaltina: Embrapa-CPAC, p. 541-577, 1988.

ZANATTA, J. S.; DALLA ROSA, C. Produção enzimática de biodiesel utilizando diferentes óleos vegetais como substratos em sistema de ultrassom. **Vivências**, v. 10, n. 18, p. 205-217, 2014. Disponível em: http://www.reitoria.uri.br/~vivencias/Numero_018/artigos/pdf/Artigo_18.pdf. Acesso em: 09/09/2014.

ZHANG, Y., DUBÉ, M. A., MCLEAN, D. D., KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 1. Process design and technological assessment. **Bioresource Technology**, v.89, n.1, p.1-16, 2003.

CAPÍTULO 1

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO PARA AVALIAR O CRESCIMENTO DA CULTURA DA MACAÚBA

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO E VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO PARA AVALIAR O CRESCIMENTO DA CULTURA DA MACAÚBA

RESUMO

A atenção para o uso dos recursos naturais renováveis destinado ao suprimento de energia tem aumentado consideravelmente. É neste sentido que plantas, como a macaúba (*Acrocomia aculeata*), vem sendo investigada entre as culturas oleaginosas, uma vez que apresentam elevada produtividade e adaptabilidade. Conhecer a fenologia e o ambiente de plantas cultivadas permite alcançar ganhos na produtividade e na sustentabilidade do sistema. Assim, objetivou-se nesse trabalho caracterizar o desenvolvimento de plantas de macaúba em diferentes idades por meio de imagens aéreas de câmeras não métricas e da composição físico-química do solo. Utilizaram-se plantas com idades de um, dois e quatro anos. Por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais, determinaram-se as variações morfológicas. Realizaram-se análises físico-químicas de solo. A avaliação ocorreu durante nove meses divididos em T0 (início), T5 (cinco meses) e T9 (nove meses). Utilizou-se a análise de correlação linear de Pearson para análise dos dados. Com o processamento de imagens digitais, estimou-se com eficiência a área ocupada pelo dossel da macaúba. Por meio do dossel, foi possível caracterizar o perfil do crescimento da cultura em diferentes idades, em especial o período adaptativo da cultura. Plantas com um e quatro anos de idade apresentaram relações mais específicas com as características químicas do solo sobre o desenvolvimento em dossel que plantas de dois anos. A macaúba apresentou sensibilidade à densidade do solo apenas para plantas em estágio inicial de desenvolvimento (um ano de idade). O desenvolvimento do dossel das plantas com idade acima de quatro anos foi fortemente influenciado pelos macroelementos K e P e pelos microelementos Mn e Zn.

INTRODUÇÃO

O crescimento da população e o avanço do desenvolvimento têm despertado a atenção mundial na utilização dos recursos naturais renováveis para o suprimento de energia. Este fato se respalda no interesse de promover a redução dos impactos ambientais e de garantir o suprimento das necessidades energéticas (SIVAKUMAR et al., 2010).

Diante da expectativa da necessidade crescente por biodiesel, plantas como a macaúba (*Acrocomia aculeata*) vem sendo investigada por apresentar vantagens sobre outras culturas oleaginosas, como a elevada produtividade, podendo alcançar 24 toneladas de frutos/ha, equivalente a aproximadamente 4,8 toneladas de óleo/ha (CETEC, 1983; TEIXEIRA, 2005; DREHER, 2009). Mesmo apresentando sua cadeia produtiva em desenvolvimento, a macaúba tem características produtivas semelhantes as do dendê (*Elaeis guineensis*), porém com a vantagem da adaptação em grande parte do território nacional, o que difere do dendê, que se restringe a região equatorial (VIÉGAS e BOTELHO, 2000; CORLEY e TINKER, 2003).

Comumente, a macaúba é encontrada em toda a América Latina. No território brasileiro, as maiores concentrações nativas estão localizadas em Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás (LORENZI, 2006). A distribuição espacial da macaúba possivelmente proporciona características exclusivas a cada acesso da planta, devido a variabilidade edafoclimática. Sabe-se que populações nativas são heterogêneas e apresentam problemas como a sazonalidade climática (MOTTA et al., 2002). Neste sentido, surge a necessidade de desenvolver metodologias e técnicas para mensurar as variações e correlações com o seu ambiente de cultivo.

O conhecimento da fenologia das plantas cultivadas permite alcançar ganhos na produtividade e na sustentabilidade do sistema. Técnicas que permitam conhecer ou controlar o comportamento de variáveis relevantes à produção das plantas oleaginosas energéticas ainda são incipientes. Tal fato pode gerar prejuízos no desenvolvimento da cultura ou até mesmo onerar a cadeia produtiva, uma vez que o cultivo dessas espécies exigirá adaptações do sistema agrícola (SILVA e FREITAS, 2008).

O sensoriamento remoto para detecção de características morfológicas das plantas é uma opção para realizar inferências em sistemas agrícolas. Sua utilização já é frequente em práticas agrícolas, como mostra o trabalho de Thenkabail et al. (2004), que estimaram a biomassa e o acúmulo de carbono em plantações de dendê da savana

africana por meio de dados oriundos do satélite IKONOS. Hosainpour et al. (2013) utilizaram um sistema remoto ultrasônico inteligente para estimar o volume do dossel de árvores e apontaram entre as principais vantagens do método, a acurácia do sistema e o baixo custo dos equipamentos.

Promover a identificação das características morfológicas da macaúba de maneira remota e correlacioná-la com os atributos físico-químicos do solo poderá contribuir para sua exploração em âmbito comercial.

O objetivo desse estudo foi caracterizar o desenvolvimento de plantas de macaúba em diferentes idades por meio de imagens aéreas de câmeras não métricas e da composição físico-química do solo do seu ambiente de cultivo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O trabalho foi desenvolvido no banco de germoplasma de macaúba, pertencente a Universidade Federal de Viçosa, com área de aproximadamente três hectares, localizada no município de Araponga-MG. O município de Araponga está situado no bioma Mata Atlântica e localizado a 20° 40' de latitude Sul e 42° 31' de longitude Oeste. A área do estudo apresenta ligeira mudança de pedoforma, com altitude média de 1.300 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical de altitude (Cwa), com chuvas durante o verão e temperatura média anual em torno de 19 °C, com variações médias entre 12 e 26 °C.

Caracterização e origem das amostras

As plantas avaliadas estavam dispostas no espaçamento de cinco metros entre as linhas de cultivo e cinco metros entre plantas. A distribuição das plantas está relacionada aos acessos de origem de cada material genético, sendo assim, distribuídas por famílias. As famílias utilizadas na pesquisa possuíam uma população variando de três a cinco indivíduos.

A área de estudo foi dividida em três subáreas, em que a época de plantio foi utilizada como critério. As áreas intituladas “Área 1”, “Área 2” e “Área 3” possuíam indivíduos com idade média de um, dois e quatro anos, respectivamente, no início da coleta de dados. Para melhor representação das condições de campo, foi pré-definida uma distância média de 20 metros entre as famílias, em cada área. Todas as áreas foram representadas por meio de cinco famílias (Figura 1).



Figura 1 – Imagem aérea das três áreas de estudo.

As amostragens e avaliações foram realizadas em três períodos: T0 (primeira coleta em setembro de 2012), T5 (cinco meses após a primeira coleta) e T9 (quatro meses após a segunda coleta). Fundamentou-se a definição das épocas de coleta na dinâmica de crescimento de culturas arbóreas, tendo em vista que o período de maior vigor vegetativo coincide com o verão, com declínio em direção ao inverno (MANTOVANI, 1988).

Todos os indivíduos investigados tiveram suas referências espaciais determinadas por meio do GPS Topográfico (L1), Marca Magellan, Modelo Promark 3, com correção diferencial pós-processada. Para a correção diferencial utilizaram-se dados da base da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada em Viçosa – MG. Para o ajuste dos dados de coordenadas de campo, foi utilizado o programa *GNSS Solutions*.

Caracterização do solo

As características físicas e químicas do solo foram determinadas por meio da amostragem de quatro pontos circundantes a cada indivíduo. Os dados oriundos de cada indivíduo foram resumidos para o valor médio de sua respectiva família. Foram realizadas amostragens simples no perfil do solo na profundidade de 20 cm.

Amostras indeformadas do solo foram coletadas com auxílio de anel volumétrico e trado tipo *Uhland* para a caracterização física, que compreendeu a determinação da densidade do solo e macro e microporosidade (EMBRAPA, 2011).

Posteriormente, o solo foi retirado do anel e destorreado para determinação da densidade de partículas (EMBRAPA, 2011). Amostras de solo deformadas também foram coletadas para determinação da umidade pelo método termogravimétrico. Em virtude da variação física do solo não ocorrer com a mesma intensidade das variações químicas, realizou-se apenas amostragem de solo para caracterização física no primeiro tempo de coleta de dados. Utilizou-se a média entre as famílias como a condição física das respectivas áreas.

A composição química do solo foi avaliada em três épocas: T0, T5 e T9. Para isso, foram determinados os teores disponíveis de fósforo (P), potássio (K), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu) extraídos por Mehlich 1; teores trocáveis de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) e calculada a saturação por bases (V) (EMBRAPA, 2011). Os resultados encontrados foram submetidos a análise estatística descritiva para os tempos de coleta, e, a seguir, correlacionados aos atributos da planta.

Caracterização vegetal

A variável utilizada para a caracterização das plantas de macaúba foi a área ocupada pelo dossel de cada família, determinada por meio de técnicas de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e processamento de imagens digitais. Todas as plantas da área de estudo foram georreferenciadas e, após a visita de campo, foram definidas e identificadas as plantas de interesse. A coleta de dados referente aos atributos das plantas foi realizada nas épocas T0, T5 e T9. Monitorou-se o desenvolvimento do dossel das plantas de macaúba por meio de imagens digitais obtidas em sobrevoos de uma aeronave do tipo ultraleve avançado (avião leve) modelo Bravo 700.

Para obtenção das imagens digitais aéreas, utilizou-se uma câmera digital não métrica, modelo Sony Cyber-shot DSC-TX20/DC com resolução espacial de 16,2 MP.

Georreferenciamento das imagens

A extração de todas as informações relativas ao desenvolvimento da área do dossel foi realizada no programa ArcGIS®, versão 10.1. As imagens digitais foram georreferenciadas a partir da localização geográfica de referências de campo (alvos) facilmente detectáveis na cena. As coordenadas das referências de campo foram obtidas por meio do GPS topográfico anteriormente apresentado.

Realizou-se o registro da imagem digital, com seis pontos de controle e análise do respectivo erro quadrático médio (RMSE). O RMSE implementado no programa é gerado a partir das coordenadas espaciais reais e da tela dos pontos de controle (Equação 1).

Para tanto, foram dispostas previamente ao imageamento, placas de dimensões de um por um metro no centro de cada uma das três subáreas experimentais. A qualidade do registro foi avaliada pela comparação das dimensões da placa na imagem georreferenciada com a dimensão real.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}{n}} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

y_j = Coordenada real

$\hat{y}_j$ = Coordenada de tela

n = número de pontos

Identidade amostral e área de interesse

Para a identificação das plantas, criou-se uma feição do tipo ponto com as respectivas coordenadas das plantas investigadas.

Após a identificação das coordenadas referentes às plantas em questão, foi criada uma feição do tipo polígono para extração da área ocupada pelo dossel de cada família. A evolução do desenvolvimento das plantas foi determinada por meio da área ocupada na respectiva família, não por planta individualmente. Definiu-se manualmente o polígono envolvente de cada família e, em seguida, recortou-se as imagens das famílias avaliadas.

Classificação das imagens

Determinou-se a área aparente ocupada pelo dossel das plantas selecionadas após a classificação das imagens digitais em duas classes: “solo” e “dossel”. Testaram-se dois classificadores do programa ArcGIS® e um do programa Matlab®, sendo o *Isocuster*, Máxima verossimilhança e o *Otsu*, respectivamente.

Uma imagem de toda a área experimental foi classificada e, posteriormente, a classificação foi analisada por meio do índice *Kappa* e do teste Z. Para tanto, a determinação do índice *Kappa* se fez a partir da matriz de contingência (confusão), obtida por meio da geração de 100 pontos aleatórios internos ao limite da imagem original (antes da classificação).

Para elaboração da matriz de contingência, atribuiu-se à localização de cada ponto aleatório a respectiva coordenada geográfica. Utilizaram-se os pontos aleatórios para extração subjetiva da informação da imagem referência (solo ou dossel) e do valor indicativo da classe após a classificação (solo ou dossel). A matriz de contingência foi construída e, a partir dos resultados, definiu-se a Exatidão Global, os erros de comissão e omissão e o Índice *Kappa*. Os classificadores foram submetidos ao teste Z para a distinção estatística e, assim, utilizado o classificador de maior *Kappa*.

Área ocupada pelo dossel

Devido ao imageamento ter sido feito em três tempos diferentes, pela dificuldade de estabilização da altura de voo e a utilização de câmeras não métricas, dispuseram-se nas três subáreas experimentais, placas com dimensões de um metro por um metro para o ajuste das resoluções espaciais das cenas. As placas foram colocadas sobre suporte metálico previamente nivelado e georreferenciado (Figura 2A).

A determinação da área aparente ocupada pelo dossel das plantas foi realizada pela contabilização do número de pixels classificados como planta (Figura 2B), multiplicados pela resolução espacial proveniente das dimensões da placa na imagem georreferenciada.

O acompanhamento do desenvolvimento da área do dossel foi realizado pelo incremento de área em relação a área do primeiro período do estudo. Dessa maneira, as áreas do dossel de cada família foram normalizadas pela divisão das respectivas áreas pela área encontrada no primeiro período. Por último, o incremento em cada período foi determinado pela diferença entre a área normalizada atual e a área normalizada do período anterior.



Figura 2A – Placa de referência utilizada na calibração das resoluções espaciais das imagens digitais.

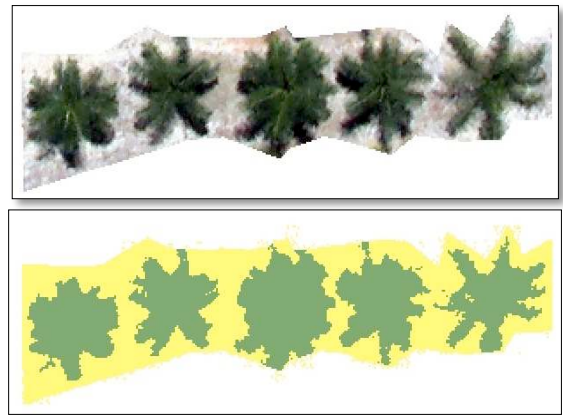


Figura 2B – Classificação de imagem para identificação da área ocupada pelo dossel.

Análise dos resultados

O monitoramento do desenvolvimento das plantas de macaúba foi avaliado por meio das características físicas e químicas do solo em função da variação morfológica (dossel) nos três tempos de coleta. Utilizaram-se análises de correlação linear de Pearson para identificar quais os fatores investigados se correlacionam fortemente com o desenvolvimento das plantas. Neste estudo foram analisados apenas os atributos do solo que apresentaram o coeficiente de correlação significativo ($p < 0,20$), qualitativamente avaliado como forte e correlação linear muito forte, segundo CALLEGARI-JACQUES (2003):

- se $0,00 < |\hat{\rho}| < 0,30 \rightarrow$ fraca correlação linear;
- se $0,30 < |\hat{\rho}| < 0,60 \rightarrow$ moderada correlação linear;
- se $0,60 < |\hat{\rho}| < 0,90 \rightarrow$ forte correlação linear;
- se $0,90 < |\hat{\rho}| < 1,00 \rightarrow$ correlação linear muito forte.

A macaúba apresenta altos coeficientes de herdabilidade relacionados ao desenvolvimento da planta (MANFIO et al., 2012). Tendo em vista que esse trabalho poderá subsidiar o melhoramento genético da espécie, justificou-se utilizar níveis mais elevados de significância, por poderem auxiliar na estimação de valores fenotípicos (JANGARELLI, 2011).

RESULTADOS

Classificadores

Os classificadores *Isocluster*, *Otsu* e Máxima verossimilhança apresentaram respectivamente os seguintes índices *Kappa*: 0,84, 0,64 e 0,96. Todos os classificadores testados foram significativamente maiores que zero quando submetidos ao teste Z ($\alpha=0,05$). Nesse sentido, utilizou-se o classificador que apresentou o maior *Kappa*, sendo este a Máxima Verossimilhança.

Desenvolvimento do dossel da macaúba

As áreas contendo plantas com idade mais avançada, áreas 2 e 3, apresentaram maior desenvolvimento no primeiro intervalo de estudo (T0 a T5). As plantas com um ano de idade apresentaram um crescimento diferente do esperado no período, uma vez que normalmente se desenvolvem mais rápido que plantas com idade mais avançada (Tabelas 1, 2 e 3).

Tabela 1 - Estatística descritiva do desenvolvimento do dossel das famílias de macaúba na Área 1, com plantas de um ano de idade

Área	Famílias	Incremento* 0/5 (0 – 150 dias)	Incremento 5/9 (150 a 270 dias)	Incremento 0/9 (0 a 270 dias)
Área 1	Família 1	0,459	3,407	3,866
	Família 2	-0,247	0,732	0,485
	Família 3	-0,261	0,543	0,281
	Família 4	0,380	1,472	1,852
	Família 5	1,046	0,679	1,725
Média		0,276	1,366	1,642
Máximo		1,047	3,407	3,866
Mínimo		-0,262	0,543	0,281
Desvio padrão		0,548	1,197	1,431
CV (%)		198,85	87,57	87,12

*Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

Tabela 2 - Estatística descritiva do desenvolvimento do dossel das famílias de macaúba na Área 2, com plantas de dois anos de idade

Área	Famílias	Incremento* 0/5 (0 – 150 dias)	Incremento 5/9 (150 a 270 dias)	Incremento 0/9 (0 a 270 dias)
Área 2	Família 1	0,283	0,269	0,552
	Família 2	0,803	0,057	0,860
	Família 3	0,815	0,397	1,213
	Família 4	0,319	-0,078	0,241
	Família 5	0,288	-0,118	0,169
Média		0,501	0,105	0,607
Máximo		0,815	0,397	1,213
Mínimo		0,283	-0,118	0,169
Desvio padrão		0,281	0,223	0,436
CV (%)		56,06	211,25	71,82

*Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

Tabela 3 - Estatística descritiva do desenvolvimento do dossel das famílias de macaúba na Área 3, com plantas de quatro anos de idade

Área	Famílias	Incremento* 0/5 (0 – 150 dias)	Incremento 5/9 (150 a 270 dias)	Incremento 0/9 (0 a 270 dias)
Área 3	Família 1	0,291	0,159	0,450
	Família 2	0,162	0,147	0,309
	Família 3	0,363	0,028	0,392
	Família 4	0,259	0,216	0,375
	Família 5	0,458	0,384	0,443
Média		0,307	0,187	0,393
Máximo		0,363	0,384	0,450
Mínimo		0,058	0,028	0,309
Desvio padrão		0,120	0,130	0,057
CV (%)		58,17	69,48	14,49

*Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

A evolução da área ocupada pelo dossel da macaúba foi influenciada pela sanidade da mesma, demonstrado por meio dos valores negativos encontrados (Tabelas 1 e 2). O aparecimento de doenças na área 2, durante o período chuvoso, ocasionou a senescência natural de algumas folhas, o que também levou a uma ligeira redução da área ocupada pelo dossel. Na área 1, no primeiro período de estudo, as plantas apresentaram um declínio no incremento do dossel devido a morte de algumas.

Apesar de ter sido observado um comportamento incomum no início do período de avaliação, a área 1 apresentou um incremento superior as demais quando a análise foi feita sem distinção das famílias e dos períodos, ou seja, quando se analisou o incremento total (Figuras 4 – a, b, c).

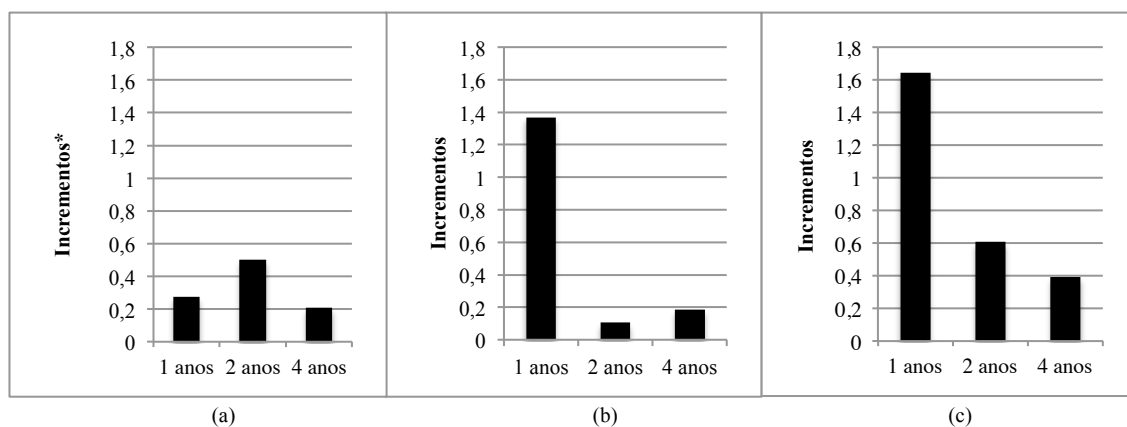


Figura 4 – Incrementos médios da área dossel em função da idade e tempos de amostragem. (a) Incrementos para o tempo 0/5 (0 a 150 dias) , (b) Incrementos para o tempo 5/9 (150 a 270 dias) e (c) Incrementos para o tempo 0/9 (270 dias de avaliação ou incremento total). *Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

O comportamento das plantas da área 1 no primeiro intervalo de estudo demonstrou claramente que a macaúba, no início de seu ciclo, apresentou crescimento reduzido devido ao período de adaptação e, em seguida, acelerou esse processo.

As áreas 2 e 3, por possuírem plantas com idade mais avançada e, conseqüentemente, por já estarem adaptadas, apresentaram valores de incrementos próximos ao encontrado nas plantas de um ano de idade neste período (período inicial – 150 dias). Mesmo o estudo estando limitado à idade máxima de 4 anos, observou-se que a cultura da macaúba apresenta a velocidade de crescimento do dossel a partir do 2º ano de cultivo bastante reduzida, semelhante ao observado por Pimentel (2012).

Caracterização do solo

A área de estudo possui dimensões reduzidas e ligeira variação das características físicas solo. Apenas a Área 1 apresentou densidade do solo significativamente superior, e mesmo assim, em função do baixo valor, não foi observado prejuízo no desenvolvimento das plantas (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores médios de densidade, micro e macroporosidade do solo e umidade nas diferentes áreas estudadas

Áreas	Densidade aparente	Microporosidade	Macroporosidade	Umidade
	g cm ⁻³	m ³ m ⁻³		kg kg ⁻¹
1 (um ano)	1,09 a	0,126 c	0,216 d	0,33
3 (quatro anos)	0,95 b	0,144 c	0,230 d	0,31
2 (dois anos)	0,93 b	0,154 c	0,248 d	0,31
CV(%)	6,05	9,94	19,14	0,03

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5 % de significância.

Apesar da área de estudo ser de apenas três hectares e apresentar pouca variabilidade topográfica, a composição química do solo foi evidenciada pela ausência de padrão nos tempos de estudo devido a amplitude dos resultados encontrados (Tabela 5).

Tabela 5 – Variabilidade espaço-temporal média da composição química dos solos

Variável	Área 1 (um ano)			Área 2 (dois anos)			Área 3 (quatro anos)		
	T0	T5	T9	T0	T5	T9	T0	T5	T9
P (mg dm ⁻³)	9,94	10,56	5,72	4,60	8,08	5,00	10,48	7,54	17,84
P-rem (mg/L)	10,8	13,2	15,6	17,3	11,6	9,2	12,6	11,0	13,6
K (mg dm ⁻³)	171,20	53,60	56,00	96,60	48,20	61,00	76,20	35,20	58,20
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,26	3,22	3,68	1,89	3,41	3,83	3,68	3,53	5,08
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,99	1,18	1,25	0,91	1,81	1,83	1,25	1,49	2,23
Zn (mg dm ⁻³)	3,99	3,41	1,43	1,96	1,83	2,75	1,04	2,97	7,19
Fe (mg dm ⁻³)	104,12	89,62	72,36	74,94	96,58	73,10	97,14	94,9	67,86
Mn (mg dm ⁻³)	22,12	20,04	19,48	12,86	15,40	15,68	14,02	15,84	15,08
Cu (mg dm ⁻³)	0,53	0,94	0,70	0,41	1,22	0,71	0,45	0,82	0,74
V (%)	21,84	30,34	40,86	17,3	30,24	38,38	30,02	32,28	49,64

Foi observada uma variação não linear na composição química do solo no decorrer dos tempos. Os teores de fósforo, por exemplo, evidenciaram esse comportamento por meio dos valores máximos encontrados estarem presentes em tempos diferentes para as diferentes áreas.

A relação entre o Ca e Mg não estava distante da ideal para o desenvolvimento de plantas, uma vez que, o objetivo em cultivos comerciais é manter ou alcançar uma relação entre esses elementos próxima a 3,5 vezes (SILVA, 1980).

Correlações das variáveis edáficas e morfológicas da macaúba

O desenvolvimento do dossel apresentou forte correlação com a densidade do solo nas Áreas 1 e 2. As correlações encontradas para as áreas foram negativas e significativas ($p < 20$), sendo -0,69 e -0,72, respectivamente, ou seja, quanto maior foi a densidade do solo menor foi o desenvolvimento do dossel das plantas. Importante reiterar que, a redução do desenvolvimento do dossel apontada quando interpretada pela densidade do solo não foi considerada relevante.

A partir das densidades encontradas na Área 3 e do estágio fenológico da cultura na respectiva área, foi possível inferir que plantas com idade mais avançada podem resistir mais a solos compactados, uma vez que o resultado da correlação foi positiva e classificado como moderada correlação linear (0,31), conforme classificação proposta por Callegari-Jacques (2003).

A influência da composição química do solo sobre o desenvolvimento em dossel na macaúba ocorreu em diferentes famílias, incrementos e elementos nas diferentes áreas, não havendo uma resposta clara (Tabelas 6, 7 e 8).

Tabela 6 – Correlações entre a composição química do solo e o desenvolvimento em dossel das plantas pertencentes a Área 3 (quatro anos)

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
P	T1	0,96	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,73	-
K	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,93	-
Zn	T1	-	-	-
	T2	0,94	-	-
	T3	-	0,76	-
Mn	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,74	-
Cu	T1	-	-	-
	T2	0,91	-	-
	T3	-	-0,79	-

⁽¹⁾Momentos utilizados na determinação das variáveis, sendo: T1 (0 meses), T2 (5 meses após T1) e T3 (9 meses após T0). ($p < 0,20$).

Tabela 7 – Correlações entre a composição química do solo e o desenvolvimento em dossel das plantas pertencentes a Área 2 (dois anos)

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
P	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	-0,82
K	T1	-	-	-
	T2	-0,74	-	-
	T3	-	-	-
Ca	T1	-0,78	-	-
	T2	-0,75	-	-
	T3	-	0,72	-
Mg	T1	-0,86	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,92	-
Zn	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,64	-
Fe	T1	-	-	-
	T2	0,97	-	-
	T3	-	-0,88	-
Mn	T1	-0,86	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	-
Cu	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	0,97	-
V	T1	-0,84	-	-
	T2	-0,93	-	-
	T3	-	0,86	-

⁽¹⁾ Momentos utilizados na determinação das variáveis, sendo: T1 (0 meses), T2 (5 meses após T1) e T3 (9 meses após T0). ($p < 0,20$).

Tabela 8 – Correlações entre a composição química e o desenvolvimento em dossel das plantas de macaúba pertencentes a Área 1 (um ano)

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
P	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	0,81
K	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	0,82
Ca	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	0,66
Mg	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	0,74
Zn	T1	-	-	-
	T2	0,90	-	-
	T3	-	-	0,62
Mn	T1	-	-	-
	T2	-	-	-
	T3	-	-	0,82

⁽¹⁾ Momentos utilizados na determinação das variáveis, sendo: T1 (0 meses), T2 (5 meses após T1) e T3 (9 meses após T0). ($p < 0,20$).

DISCUSSÃO

A proposta desse estudo se direcionou para o uso do sensoriamento remoto na mensuração da área ocupada pelo dossel da macaúba. Apesar da técnica ainda não ter sido difundida para a cultura, estudos apontaram o potencial para outras culturas (LEE e EHSANI, 2008; WEI e SALYANI, 2005; ROSELL e SANZ, 2012). Avaliando a relação entre as medidas (altura, largura, volume, circunferência e dossel) do cafeeiro (*Coffea Arabica* L.) e seu índice de área foliar, Favarin et al. (2002) obtiveram uma alta correlação ($R^2 = 0,97$) em relação aos métodos diretos.

O desenvolvimento do dossel foi marcado pelo processo adaptativo das plantas mais jovens (Área 1). Durante o período inicial de avaliação, as áreas com plantas mais desenvolvidas apresentaram maior incremento da característica, sendo, incrementos médios de 0,307 (plantas de quatro anos) e 0,501 (plantas de dois anos). Observou-se que após o primeiro período, as plantas da Área 1 apresentaram desenvolvimento em dossel mais intenso que as demais. Portanto, o dossel da macaúba foi uma característica influenciada diretamente pela idade das plantas, uma vez que a fenologia abrange o comportamento das plantas sobre os padrões estacionais de floração, frutificação e folhagem (RUIZ e ALENCAR, 2004).

Os solos avaliados no presente estudo não apresentaram similaridade em sua composição química quando comparado com aquele normalmente encontrado na Zona da Mata mineira (região da área de estudo). O solo típico brasileiro tem a distrofia como característica marcante (KER, 1997), porém, por meio dos teores de P, K e saturação por bases (V), percebeu-se que a área de estudo recebeu aportes para ganho em fertilidade. Nesse sentido, aumentou-se a complexidade na interpretação das relações existentes no sistema solo/planta.

O crescimento da área ocupada pelo dossel apresentou uma relação direta com a qualidade física do solo. A suscetibilidade da cultura à compactação do solo foi evidenciada e comprovada pelas correlações fortes e negativas entre os incrementos em dossel e a densidade do solo nas áreas com idade menos avançada, ou seja, a Área 1 ($r = -0,72$) sofreu mais influência que a Área 2 ($-0,69$). O solo das áreas de estudo possuem textura argilosa. Portanto apesar das correlações terem sido significativas e negativas, o solo apresentou valores de densidade na faixa considerada não restritiva para culturas com sistema radicular mais frágil (SECCO et al., 2004; SUZUKI, 2007). A densidade média e máxima das áreas foram 0,99 e 1,21 g cm⁻³,

respectivamente. Observou-se também uma porosidade total e macroporosidade média de 0,37 e 0,14 m⁻³ m⁻³, respectivamente. Por meio da robustez do sistema radicular da macaúba e da fragilidade do sistema da soja, é possível afirmar que o solo sob investigação apresenta boa estrutura física. Secco et al. (2004) e Suzuki (2007) verificaram, respectivamente, reduções de produtividade em soja cultivada em solo argiloso quando a macroporosidade atingiu 0,10 m⁻³ m⁻³ e quando a densidade foi igual a 1,36 g cm⁻³ pois limitou o crescimento radicular.

As plantas em estágio inicial tenderam a crescer menos no início, possivelmente por possuírem um sistema radicular menos desenvolvido. Nesse sentido, a relação entre o desenvolvimento do dossel e a estrutura física do solo pode estar relacionada com a disponibilidade de água no solo.

Em estudo sobre a fenologia e estratégias reprodutivas de espécies arbóreas, observou-se que a periodicidade existente no crescimento pode ser influenciada diretamente pela aparente sincronia entre a atividade e disponibilidade de água no ambiente, quando se considera a seca sazonal (FIGUEIREDO, 2008).

Tendo em vista que os maiores ganhos em dossel para a área contendo plantas mais jovens aconteceram apenas no segundo período de avaliação (pós-chuvas), é possível inferir que plantas mais desenvolvidas são menos influenciadas pela estrutura física do solo, uma vez que a Área 1 não apresentou correlação significativa entre a área ocupada pelo dossel e a estrutura física do solo no mesmo período de avaliação.

As alterações da área ocupada pelo dossel apresentaram relações com a composição química do solo. Os macronutrientes P e K e os micronutrientes Zn e Mn influenciaram positivamente o desenvolvimento do dossel na Área 1, quando analisado o incremento gerado no último período de avaliação (T5/T9) com o teor final dos respectivos elementos (T9).

Em um estudo sobre a cultura do dendezeiro (*Elaeis guineensis*) na Amazônia durante oito anos, observou-se que a produção de matéria seca foi lenta até o 3º e 4º ano, acelerando o processo a partir do final do 5º ano (VIÉGAS, 1993). Nesse contexto e pela similaridade das culturas, percebeu-se que na área de estudo a evolução do dossel das plantas mais desenvolvidas (idade superior a quatro anos), quando comparada com a das plantas mais novas, pode ser explicada relacionando a ordem decrescente de acúmulo de nutrientes na planta, apontada pelo autor: **K** > **N** > **Ca** > **Mg** > **P** > **S**, e as correlações identificadas do K e P com o desenvolvimento do dossel, 0,93 e 0,76, respectivamente. Nesse sentido, os elementos que se encontram entre o K e o P na

sequência apresentada, podem influenciar, porém, nesse estudo não apresentaram correlação com o incremento do dossel.

A mesma análise pode ser feita com os microelementos Zn e Mn que se correlacionaram fortemente com o dossel na mesma área (Área 1). Em ordem decrescente, o acúmulo de micronutrientes segundo o mesmo autor foi: $\text{Cl} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{B} > \text{Cu}$. Considerando que as correlações foram próximas Mn (0,76) e Zn (0,74), pode-se inferir que esses elementos atuaram de forma semelhante nos ganhos em dossel para a cultura em estágio avançado.

As plantas pertencentes a Área 2 (dois anos de idade), quando foram analisados os comportamentos perante as características do solo, destacou-se a correlação forte e negativa da saturação por bases com o desenvolvimento em dossel. Tal fato é compreendido pela tolerância de algumas palmáceas à acidez (ARES et al., 2003; CORLEY e TINKER, 2003), apesar da macaúba ser encontrada comumente no estado de Minas Gerais em ambientes onde os solos são eutróficos (MOTTA et al., 2002). Foi observado que plantas com idade próxima a dois anos já se adaptaram ao ambiente, tendo em vista a velocidade dos incrementos gerados em dossel supracitados. Portanto, entender a dinâmica da composição química do solo e o desenvolvimento do dossel se torna complexo.

Na Área 1, contendo plantas com um ano de idade, observou-se correlações fortes e positivas com os macronutrientes K, P, Ca e Mg e com os micronutrientes Zn e Mn. Conforme já apontado, plantas de macaúba com idade pouco avançada passam por um período de adaptação. Nesse sentido, o reduzido crescimento fez com que as correlações fossem identificadas apenas quando se correlacionou os incrementos totais com os teores finais dos elementos mencionados. Na agricultura contemporânea, características físico-químicas do solo não podem ser tratadas isoladamente, pois ambas fazem parte do todo e compõem a conhecida “fertilidade integral do solo” (DENARDIN et al., 2005). Contudo, como o conhecimento sobre a demanda nutricional da macaúba ainda é incipiente para todos os estágios de desenvolvimento, sugere-se estudos sobre o comportamento morfológico perante características edáficas.

CONCLUSÕES

- Foi possível estimar a área ocupada pelo dossel da macaúba por meio de processamento de imagens digitais;
- Os resultados relativos à área ocupada pelo dossel das plantas permitiram caracterizar o perfil do crescimento da cultura em três diferentes idades, em especial o período adaptativo da cultura. Isto é, plantas que iniciaram o estudo com um ano de idade aceleraram o desenvolvimento a partir do 5º mês de avaliação, enquanto que, no mesmo período, as plantas com idade superior a dois anos reduziram a velocidade de crescimento;
- Plantas com um e quatro anos de idade apresentaram relações mais específicas com as características químicas do solo sobre o desenvolvimento em dossel que plantas de dois anos;
- A macaúba apresentou sensibilidade à densidade do solo apenas para plantas em estágio inicial de desenvolvimento (um ano de idade);
- O desenvolvimento do dossel das plantas com idade acima de quatro anos foi fortemente correlacionado pelos macroelementos K e P e pelos microelementos Mn e Zn.

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. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.66, p.221-232. 2003.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS / MINISTÉRIO INDÚSTRIA E COMÉRCIO (CETEC-MG). Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais (V1): Estudo das oleaginosas nativas de Minas Gerais. Belo Horizonte: **Relatório Final Convênio STI- MIC-CETEC**, 1983. 152p.

CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. **The Oil Palm** (4nd ed). Oxford/EUA: Blackwell Science, 562 p., 2003.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, N. D. Sistema agrícola produtivo: fator de promoção da fertilidade integral do solo. **In:** Workshop sobre o sistema plantio direto no estado de São Paulo, 2005, Campinas. Sistema plantio direto. Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: IAC, 2005. p.156-167.

DREHER, F. **Promising South American Oil Palm *Acrocomia totai* Mart.: Current Status and Future Prospects**. Thesis (Doctor Science in Agricultural Economics) – Hochschule für Wirtschaft und Umwelt, Fakultät 2, Nürtinger-Geislinger, Germany, 62 p, 2009.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

FIGUEIREDO, P. S., Fenologia e estratégias reprodutivas das espécies arbóreas em uma área marginal de cerrado, na transição para o semi-árido no nordeste do Maranhão, Brasil. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**. v. 2, n. 2, p. 8, 2008.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCÍA, A. G. Y. MACAÚBA.; NOVA, N. A. V.; FAVARIN, M. G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 769- 773, jun. 2002.

HOSAINPOUR, A., ESKANDARI, M., GHAMARY, B. Intelligent estimation of trees canopy size using ultrasonic sensors. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, V. 6, p. 641-647, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013. **Base de dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela_inicial.php?tipo=8. Acesso em: 15/08/2013.

JANGARELLI, M.; EUCLYDES, R. F.; CECON, P. R. Níveis de significância na identificação de marcadores moleculares no mapeamento genômico. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 40, n.2, p.308-313, 2011.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, 5:17- 40, 1997.

LEE K. H.; EHSANI R. **A laser-scanning system for quantification of tree-geometric characteristics**. V. 5, p. 2801-2811, 2008.

LORENZI, G. M. A. C. ***Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae: Bases para o Extrativismo Sustentável**. Curitiba, PR. UFPR. 2006. 156p. Tese (Doutorado em Fitotecnia e Fitossanitarismo), Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MANFIO, C. E. et al. 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. 63-68, janeiro/março. 2012.

MANTOVANI, W.; MARTINS, F. R. Variações fenológicas das espécies do cerrado da Reserva Biológica de Moji-Guaçu, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 11. p. 101-112, 1988.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GOMES, J. B. V. Ocorrência de macaúba em Minas Gerais: Relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37 p.1023-1031, 2002.

PIMENTEL, L. D. **Nutrição mineral da macaúba: bases para adubação e cultivo**. UFV, Viçosa, MG. UFV. 2012. 126p. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.

ROSELL, J. R.; SANZ, R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 81, p. 124-141, 2012.

RUIZ, R. R. e ALENCAR, J. C. Comportamento fenológico da palmeira patauá (*Oenocarpus bataua*) na Reserva Florestal Adolpho Duke, Manaus, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 4, p. 443-448, 2004.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 794-804, 2004.

SILVA, PAULO REGIS FERREIRA DA.; FREITAS, THAIS FERNANDA STELLA DE.; Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, v.38, n.3, p.843-851, 2008.

SILVA, J. E. Balanço de cálcio e magnésio e desenvolvimento de milho em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, V. 15, n. 3, p. 329-333, 1980.

SUZUKI, L. E. A. S; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

SIVAKUMAR, G.; VAIL D. R.; XU, J.; BURNER, D. M.; Jr., J. O. L.; GE, X.; WEATHERS, P. J. Bioethanol and Biodiesel: Alternative liquidfuels for future generations. **Engineering in Life Sciences**, v. 10, n.1, p.8-18, 2010.

TEIXEIRA, L. C. Produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p.79-86, 2005.

THENKABAIL, P. S.; STUCKY, N.; GRISCOM, B. W.; ASHTON, M. S.; ENCLONA, E. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using IKONOS data. **Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5447-5472, 2004.

VIÉGAS, I. de J. M. **Crescimento do dendezeiro (*Elaeis guineensis*), 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** Piracicaba, SP. Esalq. 1993. 217p. (Tese de Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

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

WEI J, SALYANI M. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. **Transactions of the ASAE**, v. 48, p. 1595-1601, 2005.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIAS MORFOLÓGICAS NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA VEGETAL E NA PRODUÇÃO DA MACAÚBA IDENTIFICADAS POR MEIO DE IMAGENS AÉREAS

INFLUÊNCIAS MORFOLÓGICAS NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA VEGETAL E NA PRODUÇÃO DA MACAÚBA IDENTIFICADAS POR MEIO DE IMAGENS AÉREAS

RESUMO

O conhecimento das variações morfológicas da macaúba pode ser considerado crucial em sua cadeia produtiva, uma vez que, por meio do monitoramento delas, a exemplo do dossel, pode-se realizar o manejo adequado de árvores e culturas. Sabe-se que a produtividade das palmáceas é influenciada diretamente pela fertilização do solo e que conhecer a composição de nutrientes nos diversos estádios e partes das plantas condiciona a cultura a alcançar elevados níveis de produtividade. Objetivou-se nesse estudo, identificar as relações entre a composição química das folhas e o desenvolvimento do dossel da macaúba monitorado de maneira remota. Utilizaram-se plantas com idades de um, dois e quatro anos. As variações morfológicas foram determinadas por meio de técnicas de sensoriamento remoto, processamento de imagens digitais e sistemas de informações geográficas. A composição química das plantas foi determinada utilizando a terceira folha completamente desenvolvida em cada indivíduo. O trabalho ocorreu durante nove meses divididos em T0 (início), T5 (cinco meses) e T9 (nove meses). Utilizou-se a análise de correlação linear de Pearson para análise dos dados. Plantas com idade próxima ao período reprodutivo (quatro anos) apresentaram crescimento mais intenso que plantas com um ano de idade no período de transição da seca para o chuvoso. A idade das plantas influenciou a composição química das folhas. Plantas com idade de quatro anos reduziram os teores de P e K nas folhas. O teor de P foliar não apresentou um padrão de influência sobre o desenvolvimento de plantas com idade superior a quatro anos. O período de adaptação da macaúba (idade próxima a um ano) não é adequado para realizar inferências agronômicas. Devido a variabilidade genética das plantas utilizadas no estudo, as correlações entre as variáveis morfológicas e a produção foram classificadas como moderadas.

INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de biodiesel no Brasil têm destacado, além do potencial, a relevância do país no setor energético internacional (BRASIL, 2009). Atualmente, algumas palmáceas cultivadas têm se destacado na produção de óleo para fins bioenergéticos. Entre elas podemos destacar a palma africana ou dendê (*Elaeis guineenses* Jacq.) e a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.).

O dendê é a espécie com maior produtividade de óleo por hectare cultivado (CORLEY e TINKER, 2003). Considerada uma espécie exótica, de origem africana, sua exploração está restrita a condições climáticas equatoriais (VIÉGAS e BOTELHO, 2000; CORLEY e TINKER, 2003).

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) tem sido evidenciada pelo potencial bioenergético (PIMENTEL et al., 2004), porém, o seu cultivo comercial ainda não está estabelecido e baseia-se em plantas nativas (COSTA e MARCHI, 2008). Estudos apontam que sua produção de frutos pode atingir 24 t ha⁻¹, rendendo aproximadamente 4,8 t ha⁻¹ de óleo (TEIXEIRA, 2005; DREHER, 2009).

A macaúba, mesmo com características produtivas similares ao dendê, tem como vantagem estar adaptada a grande parte do território nacional (MOURA et al., 2009; ARKCOLL, 1990). No entanto, sua adaptabilidade não a isenta de estudos para exploração comercial, visto que ainda pouco se sabe sobre a relação entre o desenvolvimento e a exigência nutricional.

Monitorar as variações morfológicas da macaúba é essencial para a cadeia produtiva, pois características morfológicas, como o dossel das plantas, são essenciais para o manejo adequado de árvores e culturas (LLORENS et al., 2011).

Vários são os métodos utilizados na mensuração do crescimento de plantas. Medidas lineares tais como, comprimentos de ramificações, diâmetro de caules, altura da planta, diâmetro a altura do peito, entre outras, podem juntamente com as unidades estruturais anatômicas e morfológicas como frutos, flores, raízes e folhas, caracterizar a fenologia da cultura (BENINCASA, 1988). A geometria do dossel se relaciona diretamente com o crescimento e a produtividade de árvores, portanto, pode ser utilizada para indicar biomassa e crescimento, previsão de rendimento, estimativa de consumo de água, avaliação de saúde e monitoramento de produtividade a longo prazo (LEE E EHSANI, 2009).

As relações morfológicas com a produtividade de palmeiras, como a pupunha (*Bactris gasipaes Kunth*), já são exploradas (BOVI, 1992), porém, para a macaúba este conhecimento ainda é incipiente. Sabe-se que a produtividade das palmáceas é influenciada diretamente pela fertilização do solo (CORLEY e TINKER, 2003; SOBRAL e LEAL, 2005) e que conhecer a composição de nutrientes nos diversos estádios e partes das plantas condiciona a cultura a alcançar elevados níveis de produtividade (VIÉGAS, 1993).

O estado nutricional das plantas auxilia o ajuste do manejo da adubação, porém, exige que se tenha uma visão sistêmica e amplo conhecimento sobre a cultura de interesse (CERETTA et al., 2007). Nesse sentido, para inferir sobre a quantidade de nutrientes a ser utilizado é necessário conhecer a quantidade acumulada nos tecidos da planta, bem como a exportada pela colheita (CANTARUTTI et al., 2007).

Objetivou-se nesse estudo, analisar as relações existentes entre as variações morfológicas, a composição química das folhas e a produção da macaúba em diferentes idades por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O trabalho foi desenvolvido no banco de germoplasma de macaúba, pertencente a Universidade Federal de Viçosa, com área de aproximadamente três hectares, localizada no município de Araponga-MG. O município de Araponga está situado no bioma Mata Atlântica e localizado a 20° 40' de latitude Sul e 42° 31' de longitude Oeste. A área do estudo apresenta ligeira mudança de pedofoma, com altitude média de 1300 m. O clima segundo a classificação de Köppen é do tipo tropical de altitude (Cwa), com chuvas durante o verão e temperatura média anual em torno de 19 °C, com variações médias entre 12 e 26 °C.

Caracterização e origem das amostras

As plantas avaliadas para o estudo sobre as influências morfológicas e a composição química estavam dispostas no espaçamento de cinco metros entre as linhas de cultivo e cinco metros entre plantas. A distribuição destas plantas está relacionada aos acessos de origem de cada material genético, sendo assim, distribuídas por famílias. As famílias utilizadas na pesquisa possuíam uma população variando de três a cinco indivíduos.

A área de estudo foi dividida em três subáreas, em que a época de plantio foi utilizada como critério. As áreas intituladas “Área 1”, “Área 2” e “Área 3” possuíam indivíduos com idade média de um, dois e quatro anos, respectivamente, no início da coleta de dados. Para melhor representação das condições de campo, foi pré-definida uma distância média de 20 metros entre as famílias, em cada área. Todas as áreas foram representadas por meio de cinco famílias (Figura 1).



Figura 1 – Imagem aérea das três áreas de estudo.

As amostragens e avaliações foram realizadas em três períodos: T0 (primeira coleta em setembro de 2012), T5 (cinco meses após a primeira coleta) e T9 (quatro meses após a segunda coleta). Fundamentou-se a definição das épocas de coleta na dinâmica de crescimento de culturas arbóreas, tendo em vista que o período de maior vigor vegetativo coincide com o verão, com declínio em direção ao inverno (MANTOVANI, 1988).

As plantas utilizadas na análise da influência da variação morfológica na produção não seguiram esse delineamento por terem sido escolhidas aquelas que iniciaram a fase reprodutiva em 2012 (emissão de espata) e produziram no ano de 2013.

Todos os indivíduos investigados tiveram suas referências espaciais determinadas por meio do GPS Topográfico (L1), Marca Magellan, Modelo Promark 3, com correção diferencial pós-processada. Para a correção diferencial, utilizaram-se dados da base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada em Viçosa – MG. Para o ajuste dos dados de coordenadas de campo, foi utilizado o programa GNSS Solutions.

Medições e análises

As variáveis determinadas para a caracterização morfológica das plantas de macaúba foram a área ocupada pelo dossel, altura e o diâmetro a altura do peito (DAP = 1,3 metros do solo). A área do dossel foi determinada por meio de técnicas de sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais. A altura e o DAP foram determinados manualmente por meio de trena e suta respectivamente. Utilizou-se como referência para a determinação da altura das plantas com idade de quatro anos, o nível do solo até a altura da folha flecha e para as plantas com idade de um e dois anos, a altura máxima da terceira folha completamente desenvolvida. A variável altura foi utilizada apenas na análise da relação entre as variações morfológicas do dossel e a idade das plantas. Ou seja, na análise do crescimento da cultura.

Para analisar a relação entre a variação morfológica e a produção, utilizou-se a área do dossel de cada planta, o DAP e a produção expressa por meio do peso total de frutos colhidos por planta, sendo a derriça feita manualmente. Não utilizou-se a altura nessa análise devido ao fato de não ter sido possível antever exatamente quais as plantas do banco de germoplasma iriam produzir no momento da coleta de dados. Nesse contexto, foram selecionadas 15 plantas pertencentes a “Área 3” sendo que estas não estavam regularmente espaçadas. Utilizou-se como critério aquelas plantas que iniciaram a fase reprodutiva em 2012 (emissão de espata) e produziram no ano de 2013.

Todas as plantas das áreas de estudo foram georreferenciadas e, após a visita de campo, foram definidas e identificadas as plantas de interesse.

Monitorou-se o desenvolvimento do dossel das plantas de macaúba por meio de imagens digitais obtidas em sobrevôos de uma aeronave do tipo ultraleve avançado (avião leve) modelo Bravo 700. Para obtenção das imagens digitais aéreas, utilizou-se uma câmera digital não métrica, modelo Sony Cyber-shot DSC-TX20/DC com resolução espacial de 16,2 MP. A caracterização morfológica das plantas se fez nos três períodos já apresentados.

Georreferenciamento das imagens

A extração de todas as informações relativas ao desenvolvimento da área do dossel foi realizada no programa ArcGIS®, versão 10.1. As imagens digitais foram georreferenciadas a partir da localização geográfica de referências de campo (alvos) facilmente detectáveis na cena. As coordenadas das referências de campo foram obtidas por meio do GPS topográfico anteriormente apresentado. Realizou-se o registro da imagem digital, com seis pontos de controle e análise do respectivo erro quadrático

médio (RMSE). O RMSE implementado no programa é gerado a partir das coordenadas espaciais reais e da tela dos pontos de controle (Equação 1).

Para tanto, foram dispostas previamente ao imageamento, placas de dimensões de um por um metro no centro de cada uma das três subáreas experimentais. A avaliação da qualidade do registro foi realizada pela comparação das dimensões da placa na imagem georreferenciada com a dimensão real.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}{n}} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

y_j = Coordenada real

$\hat{y}_j$ = Coordenada de tela

n = número de pontos

Identidade amostral e área de interesse

Para a identificação das plantas, criou-se uma feição do tipo ponto com as respectivas coordenadas das plantas investigadas.

Após a identificação das coordenadas referentes às plantas em questão, foi criada uma feição do tipo polígono para extração da área ocupada pelo dossel. Definiu-se manualmente os polígonos envolventes de cada família para as análises envolvendo a variação morfológica e a idade das plantas, e os polígonos envolventes de cada planta para as análises relativas a variação morfológica e a produção. Em seguida, recortaram-se as imagens para proceder a avaliação.

Classificação das imagens e área ocupada pelo dossel

Determinou-se a área aparente ocupada pelo dossel das plantas selecionadas após a classificação das imagens digitais em duas classes: “solo” e “dossel”. Testaram-se dois classificadores do programa ArcGIS® e um do programa Matlab®, sendo o *Isocluster* (CELES et al., 2013), Máxima verossimilhança (DUDA et al., 2001) e o *Otsu* (OTSU, 1979), respectivamente.

Uma imagem da área experimental foi classificada e, posteriormente, essa classificação foi analisada por meio do índice *Kappa* (CONGALTON, 1991) e do teste Z. A determinação do índice *Kappa* se fez a partir da matriz de contingência (confusão), obtida por meio da geração de 100 pontos aleatórios internos ao limite da imagem original (antes da classificação).

Para elaboração da matriz de contingência, foi feita uma classificação visual e comparada com a classificação dos três métodos testados para os pontos aleatórios gerados. Da matriz calculou-se a Exatidão Global, os erros de comissão e omissão e o Índice *Kappa*. Os índices *Kappa* dos classificadores foram comparados pelo teste Z para a distinção estatística e, assim, utilizado o classificador de melhor desempenho.

Devido ao imageamento ter sido feito em três tempos diferentes, pela dificuldade de estabilização da altura de voo e a utilização de câmeras não métricas, dispuseram-se nas três subáreas experimentais, placas com dimensões de um metro por um metro para o ajuste das resoluções espaciais das cenas. As placas foram colocadas sobre suporte metálico previamente nivelado e georreferenciado (Figura 2A).

A determinação da área aparente ocupada pelo dossel das plantas foi realizada pela contabilização do número de pixels classificados como planta (Figura 2B), multiplicados pela resolução espacial proveniente das dimensões da placa na imagem georreferenciada.

O acompanhamento do desenvolvimento da área do dossel foi realizado pelo incremento de área em relação a área do primeiro período do estudo. Dessa maneira, as áreas do dossel de cada família foram normalizadas pela divisão das respectivas áreas pela área encontrada no primeiro período. Por último, o incremento em cada período foi determinado pela diferença entre a área normalizada atual e a área normalizada do período anterior.



Figura 2A – Placa de referência utilizada na calibração das resoluções espaciais das imagens digitais.

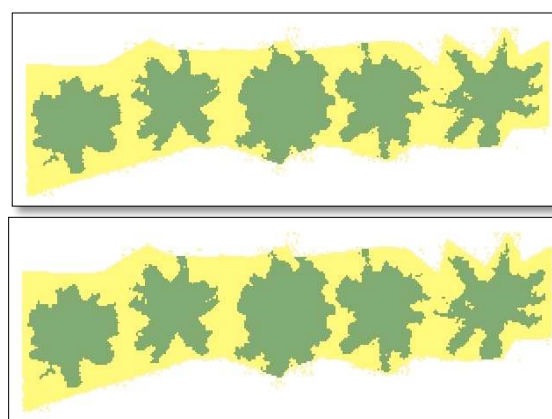


Figura 2B – Classificação de imagem para identificação da área ocupada pelo dossel.

Composição química das plantas

A determinação da composição química das plantas foi realizada nos três tempos de coletas, por meio de análises foliares, em que se utilizou sempre a terceira folha completamente desenvolvida em cada indivíduo.

As folhas amostradas foram lavadas com água corrente para remover partículas de solo, poeira e resíduos de algum insumo eventualmente sobre elas. Após a lavagem e pré-secagem ao sol, as folhas foram secas à temperatura de 65 °C em estufa com circulação forçada de ar até atingir peso constante, sendo após, passadas em moinho tipo Willey e submetidas à digestão nítrico-perclórica. Utilizaram-se amostras de 0,50 g de material seco e moído em 10 mL de solução nítrico-perclórica (relação 3:1 v/v) para digestão à temperatura de, no máximo, 200 °C. No extrato obtido, determinaram-se os teores de Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu em espectrômetro de absorção atômica. Os teores de P e S foram determinados por espectrômetro de absorção molecular e K por espectrofotometria de chama. Para determinação do N, amostras de 0,5 g foram submetidas a digestão sulfúrica e, posteriormente foi realizada a destilação em aparelho Kjeldahl, seguida da dosagem por titulação. A seguir, os dados foram submetidos a uma análise estatística descritiva para serem utilizados nas análises de correlação.

Análise dos resultados

O monitoramento do desenvolvimento das plantas de macaúba foi avaliado por meio das características físicas e químicas do solo em função da variação morfológica (dossel) nos três tempos de coleta. Utilizaram-se análises de correlação linear de Pearson para identificar quais os fatores investigados se correlacionam fortemente com o desenvolvimento das plantas. Neste estudo foram analisados apenas os atributos do solo que apresentaram o coeficiente de correlação significativo ($p < 0,20$), qualitativamente avaliado como forte e correlação linear muito forte, segundo CALLEGARI-JACQUES (2003):

- se $0,00 < |\hat{\rho}| < 0,30 \rightarrow$ fraca correlação linear;
- se $0,30 < |\hat{\rho}| < 0,60 \rightarrow$ moderada correlação linear;
- se $0,60 < |\hat{\rho}| < 0,90 \rightarrow$ forte correlação linear;
- se $0,90 < |\hat{\rho}| < 1,00 \rightarrow$ correlação linear muito forte.

A macaúba apresenta altos coeficientes de herdabilidade relacionados ao desenvolvimento da planta (MANFIO et al., 2012). Tendo em vista que esse trabalho poderá subsidiar o melhoramento genético da espécie, justificou-se utilizar níveis mais

elevados de significância por poderem auxiliar na estimação de valores fenotípicos (JANGARELLI, 2011).

RESULTADOS

Classificadores

Os classificadores *Isocluster*, *Otsu* e Máxima verossimilhança apresentaram respectivamente os seguintes índices *Kappa*: 0,84, 0,64 e 0,96. Todos os classificadores testados foram significativamente maiores que zero quando submetidos ao teste Z ($\alpha=0,05$). Nesse sentido, utilizou-se o classificador que apresentou o maior *Kappa*, sendo este a Máxima Verossimilhança.

Desenvolvimento do dossel

No primeiro período de avaliação (0/5), a área contendo idade menos avançada evidenciou a existência de um período adaptativo para a cultura. Isto é, a Área 1, contendo plantas com um ano de idade, apresentou baixo desenvolvimento enquanto comparada as áreas contendo plantas com idade superior a 2 anos no mesmo período (Figura 3).

O dossel da macaúba apresentou desuniformidade nos ganhos em incremento apenas quando a análise foi feita em tempos distintos, pois quando observado o incremento total para as diferentes áreas, a correlação entre a idade e o desenvolvimento foi reestabelecida. Ou seja, plantas mais jovens apresentaram um incremento superior às demais ao final da avaliação.

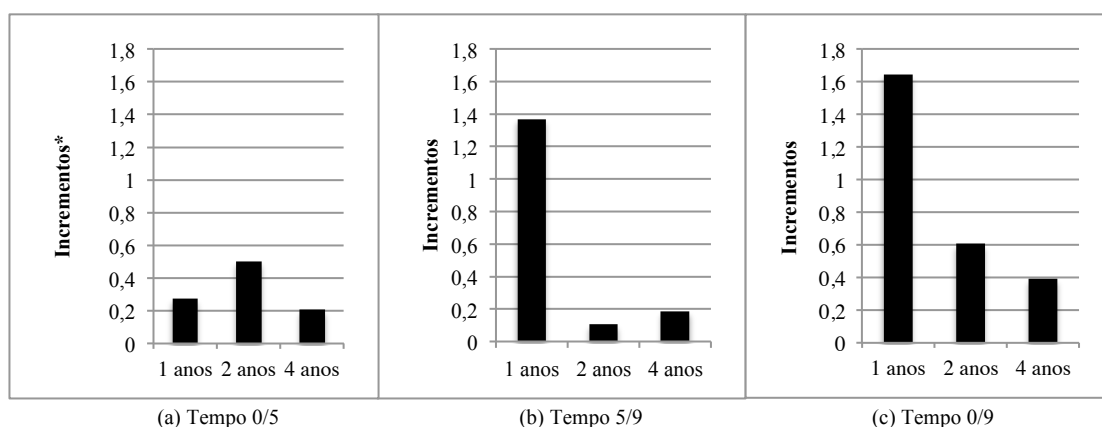


Figura 3 – Incrementos do dossel em função da idade e tempos de amostragem. *Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

A área 1, contendo plantas com um ano de idade, no início do período de estudo, apresentou um declínio no incremento do dossel também devido a morte de algumas plantas. Por sua vez, a adaptabilidade ao ambiente de cultivo da macaúba foi confirmada quando se analisou o ganho em dossel da cultura a partir do quinto mês (5/9), por meio do incremento alcançado pelas plantas desta idade (Figura 4).

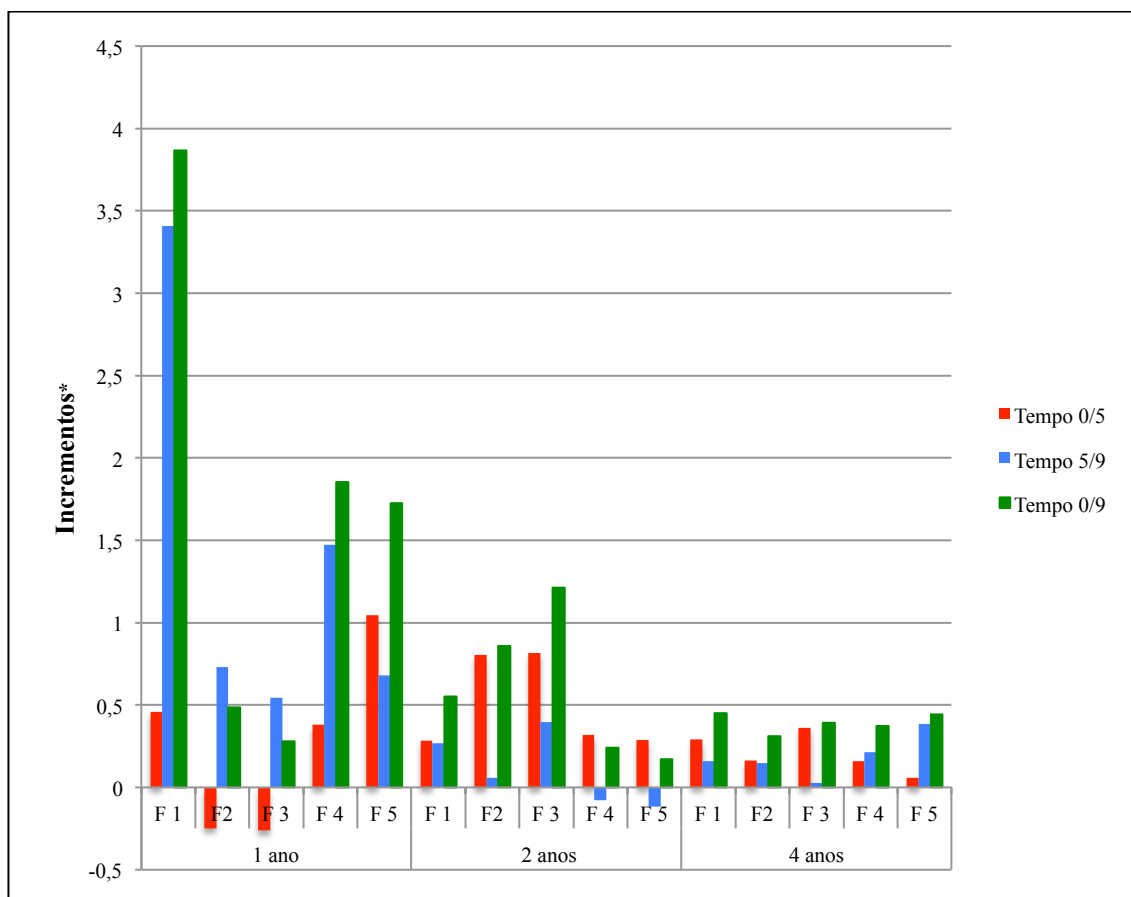


Figura 4 – Variabilidade dos incrementos em área do dossel para três diferentes idades da macaúba. F1, F2, F3, F4 e F5 correspondem as famílias representantes de cada idade. *Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

Foi detectada uma relação direta entre os máximos incrementos gerados em cada idade ao longo do período avaliado (Tempo 0/9). Observou-se um crescimento linear, porém, negativo, à medida que as plantas avançaram em idade (Figura 5).

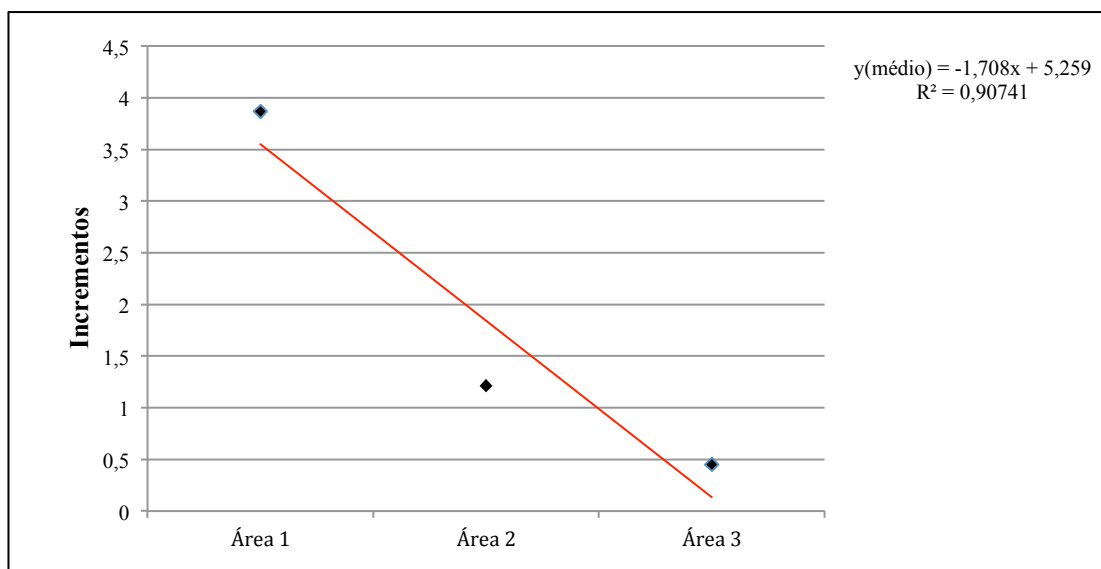


Figura 5 – Regressão entre as idades e os incrementos gerados em dossel. *Incremento calculado pela área do dossel padronizada em relação a área do primeiro período.

Desenvolvimento em altura

Avaliando a intensidade do desenvolvimento em altura para as três idades, observou-se que foi maior no período inicial do estudo, uma vez que neste período as plantas apresentaram os maiores ganhos para a variável.

Além disso, foi observada correspondência entre as idades e o incremento em altura, tendo em vista que os valores máximos e médios relativos aos incrementos totais (Tempo 0/9) apresentaram uma relação linear no decorrer do estudo (Figura 6).

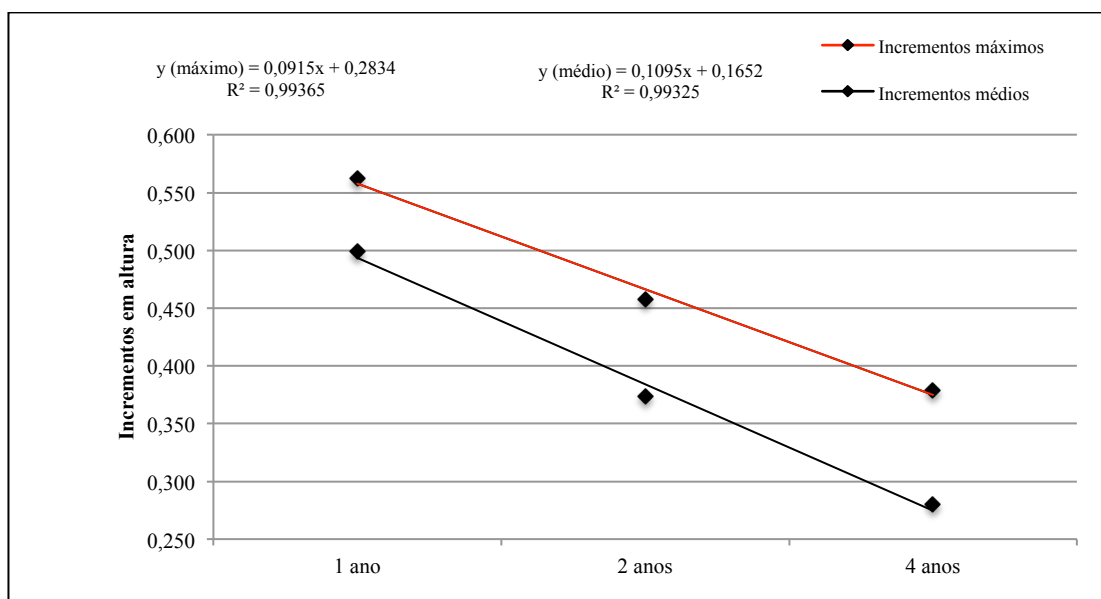


Figura 6 – Regressão entre as idades, e os incrementos gerados em altura.

Os ganhos em altura após cinco meses de avaliação diminuíram para todas as idades, porém, observou-se que as plantas em estágio inicial (um ano de idade) mantiveram a intensidade de ganho superior as demais (Tabela 1 e Figura 7), diferente do observado na evolução da área do dossel, que apresentou no período inicial do estudo um possível período de adaptação (Figura 4). Ao analisar o incremento total em altura (Tempo 0/9) foi identificado que as variabilidades tenderam a aumentar nas plantas mais desenvolvidas (Área 3).

Tabela 1 - Estatística descritiva dos incrementos em altura* das famílias de macaúba em função das idades

Idades	Parâmetros estatísticos	Tempo 0/5	Tempo 5/9	Tempo 0/9
4 anos	Média	0,156*	0,124	0,280
	Máximo	0,216	0,196	0,379
	Mínimo	0,069	0,047	0,211
	σ	0,055	0,063	0,064
	CV	35,02	50,85	22,76
2 anos	Média	0,232	0,142	0,374
	Máximo	0,300	0,180	0,458
	Mínimo	0,177	0,113	0,328
	σ	0,045	0,027	0,050
	CV	19,22	19,31	13,27
1 ano	Média	0,303	0,196	0,499
	Máximo	0,483	0,303	0,562
	Mínimo	0,189	0,079	0,442
	σ	0,109	0,086	0,058
	CV	36,13	43,88	11,58

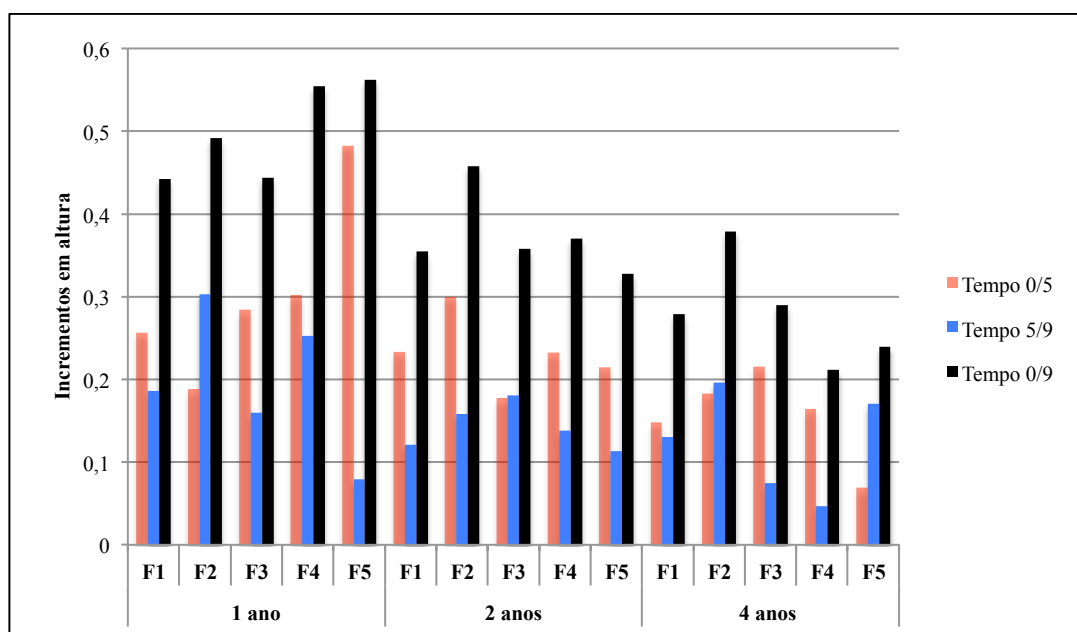


Figura 7 – Variabilidade dos incrementos em altura para três diferentes idades da macaúba. F1, F2, F3, F4 e F5 correspondem as famílias representantes de cada idade.

Relações morfológicas com as idades da macaúba

As idades da cultura apresentaram fortes e positivas correlações com as variáveis morfológicas - “área ocupada pelo dossel” e “altura” - apenas no primeiro período de avaliação. As correlações ocorreram em plantas com um e quatro anos de idade. Não foi percebida a influência das variáveis morfológicas em plantas com idade de dois anos. As relações entre o dossel e a altura de indivíduos com idade superior a quatro anos foram fortes e negativas quando a análise foi feita em função do incremento total gerado. Nesse sentido, a cultura da macaúba apresentou uma tendência em diferir os incrementos referentes a altura e o dossel em plantas de um e quatro anos (Tabela 2).

Tabela 2 – Resultados das análises de correlação de *Pearson* ($p < 0,20$) entre o desenvolvimento do dossel e o desenvolvimento em altura da macaúba em três diferentes idades avaliados em três momentos

Idades	Incrementos		
	T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
4 anos	0,79	0,36	-0,64
2 anos	0,34	0,47	0,47
1 ano	0,82	0,53	0,30

Composição e variação química foliar

Os teores de nitrogênio foliares foram crescentes em todos os tempos e áreas. Quanto mais jovens foram as plantas, maiores foram os teores de nitrogênio encontrados.

Por meio dos coeficientes de variação encontrados para os elementos avaliados, foi possível destacar o P pela maior estabilidade quanto a composição foliar nas áreas de estudo, uma vez que não variou tanto o teor quanto os demais. A composição química das plantas foi marcada pela dinâmica do Fe durante o estudo em todas as áreas, uma vez que o Fe apresentou os maiores coeficientes de variação quando comparado aos demais dentro de cada área. Fe em plantas com idade superior a quatro anos apresentou maior variabilidade que plantas mais jovens (Tabela 3).

A análise da composição foliar da macaúba foi realizada comparativamente com estudos feitos com o dendê. Tal fato justifica-se não apenas pela similaridade entre as culturas em questão, mas também pela carência de informações sobre a nutrição mineral da macaúba. Dessa forma, utilizando as variações nos teores foliares em dendezeiros no Brasil e a faixa considerada ótima apresentada por Chepote et al. (1988), Viégas (1989)

e Rodrigues (1997), observou-se que os teores de P, K e Zn apresentaram faixa de concentração ótima, sendo: 2 g kg⁻¹, 11.9 g kg⁻¹, 14 g kg⁻¹, respectivamente.

Os teores de Ca e Mg apresentaram-se na faixa ótima de concentração apenas na composição foliar das plantas mais jovens, ou melhor, aquelas pertencentes a Área 1 (um ano de idade).

Tabela 3 - Variabilidade espaço-temporal média da composição química das plantas

Áreas	Tempos	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu
		dag kg ⁻¹					mg kg ⁻¹			
Área 3 (4 anos)	Tempo 0	2,53	0,20	1,25	0,18	0,18	9,54	289,94	25,26	4,54
	Tempo 5	2,66	0,20	1,19	0,24	0,18	13,52	188,36	26,89	5,36
	Tempo 9	2,79	0,20	1,13	0,30	0,19	17,49	86,77	28,52	6,18
	Média	2,66	0,20	1,19	0,24	0,18	13,52	188,36	26,89	5,36
	Máximo	2,97	0,22	1,58	0,37	0,23	20,00	388,10	38,00	0,37
	Mínimo	2,20	0,18	0,80	0,16	0,15	8,50	68,05	18,30	3,40
	Desvio padrão	0,22	0,01	0,52	0,06	0,02	3,57	100,02	6,17	1,11
	CV (%)	8,10	6,35	43,78	26,43	11,40	26,41	53,10	22,93	20,73
Área 2 (2 anos)	Tempo 0	2,45	0,18	1,10	0,27	0,20	7,26	222,14	27,94	4,16
	Tempo 5	2,79	0,22	1,25	0,46	0,32	16,84	110,09	39,36	7,37
	Tempo 9	2,79	0,19	0,74	0,35	0,25	17,97	102,74	31,33	6,25
	Média	2,68	0,20	1,03	0,36	0,25	14,02	144,99	32,88	5,93
	Máximo	3,12	0,24	1,36	0,60	0,41	22,10	252,00	56,15	10,00
	Mínimo	1,41	0,17	0,53	0,22	0,15	4,50	78,00	21,60	3,60
	Desvio padrão	0,44	0,02	0,24	0,11	0,07	5,76	60,13	9,12	1,81
	CV (%)	16,28	11,11	23,66	30,10	26,38	41,09	41,47	27,75	30,47
Área 1 (1 ano)	Tempo 0	3,18	0,20	1,20	0,61	0,26	6,08	260,54	29,28	3,22
	Tempo 5	3,50	0,28	1,46	0,69	0,39	15,20	115,41	36,38	4,64
	Tempo 9	3,54	0,21	1,01	0,53	0,32	18,66	105,17	28,43	4,93
	Média	3,41	0,23	1,22	0,61	0,32	13,31	160,37	31,36	4,26
	Máximo	4,13	0,31	1,85	0,88	0,53	22,45	355,90	55,35	5,65
	Mínimo	2,81	0,16	0,65	0,30	0,18	3,70	90,35	13,10	2,40
	Desvio padrão	0,38	0,04	0,33	0,17	0,09	6,06	81,40	12,60	0,96
	CV (%)	11,10	19,63	26,79	28,52	27,63	45,51	50,76	40,16	22,46

A morfologia e a variação química foliar da macaúba

Os teores de fósforo determinados nos tempos 1 e 2 nas folhas da macaúba no período inicial do trabalho (T1/T2) apresentaram correlações fortes e negativas com o desenvolvimento do dossel na área contendo plantas com idade superior a quatro anos (Área 3). Nesta área, o P somente influenciou diretamente os ganhos em dossel após os 150 dias iniciais do período de avaliação ($p = 0,67$). Nesse mesmo período e época de determinação do elemento (T2/T3 e T3, respectivamente), foram observados os mesmos comportamentos para os teores de Mg e Mn. No primeiro período da pesquisa (T0/T5), apenas o teor de Fe nas folhas apresentou relação direta com os incrementos em dossel (Tabela 4).

Tabela 4 – Correlações fortes ou muito fortes entre a composição química das plantas e o desenvolvimento em dossel das plantas de macaúba com quatro anos de idade

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
P	T0	-0,73	-	-
	T5	-0,88	-	-
	T9	-	0,67	-
Ca	T0	-	-	-
	T5	-0,86	0,87	-
	T9	-	-	-
Mg	T0	-	-	-
	T5	-	-	-
	T9	-	0,84	-
Fe	T0	0,84	-	-
	T5	0,70	-	-
	T9	-	-	-
Mn	T0	-	-	-
	T5	-	-	-
	T9	-	0,94	-

⁽¹⁾Momento da determinação da composição química expressa em teores. Indica se o teor foi determinado no início ou no final do respectivo período (Incrementos).

As plantas de macaúba com idade próxima a dois anos relacionaram o desenvolvimento do dossel apenas com os teores foliares dos elementos Ca e Mg e Zn, determinados nos tempos 1 e 2 (Tabela 5). O Ca na primeira etapa do estudo apresentou correlação positiva com o desenvolvimento do dossel apenas no primeiro período do estudo, quando a análise utilizou os teores iniciais (T0) e finais (T5) do respectivo período, enquanto que os teores de Mg e Zn para o mesmo período se correlacionaram com os teores finais (T5).

Tabela 5 – Correlações fortes ou muito fortes entre a composição química das plantas e o desenvolvimento em dossel das plantas de macaúba com dois anos de idade

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
Ca	T0	0,78	-	-
	T5	0,74	-	-
	T9	-	-0,76	-
Mg	T0	-	-	-
	T5	0,81	-	-
	T9	-	-	-
Zn	T0	-	-	-
	T5	0,73	-	-
	T9	-	-	-

⁽¹⁾ Momento da determinação da composição química expressa em teores. Indica se o teor foi determinado no início ou no final do respectivo período (Incrementos).

As plantas com um ano de idade, possivelmente devido ao período de adaptação, não apresentaram correlação positiva com nenhum dos elementos sob estudo (Tabela 6). No período inicial (T1/T2), a participação dos teores foliares de K, Zn e Mn não refletiu de maneira positiva nos incrementos do dossel da macaúba.

Importante ressaltar que os teores dos micronutrientes Zn, Fe e Mn correlacionaram-se de maneira forte, porém negativamente com o desenvolvimento do dossel quando correlacionados com os teores finais (T3), considerando todo o período de estudo (T1/T3).

Tabela 6 – Correlações fortes ou muito fortes entre a composição química das plantas e o desenvolvimento em dossel das plantas de macaúba com um ano de idade

Elemento	Teores ⁽¹⁾	Incrementos		
		T0/T5 ^(150 dias)	T5/T9 ^(120 dias)	T0/T9 ^(270 dias)
K	T0	-0,82	-	-
	T5	-0,9	-	-
	T9	-	-	-
Mg	T0	-	-	-
	T5	-	-	-
	T9	-	-0,81	-
Zn	T0	-	-	-
	T5	-0,92	-	-
	T9	-	-	-0,78
Fe	T0	-	-	-
	T5	-	-	-
	T9	-	-	-0,98
Mn	T0	-0,79	-	-
	T5	-0,69	-	-
	T9	-	-	-0,94

⁽¹⁾Momento da determinação da composição química expressa em teores. Indica se o teor foi determinado no início ou no final do respectivo período (Incrementos).

Relações morfológicas com a produção da macaúba

As plantas utilizadas para analisar as relações morfológicas com a produção foram selecionadas por terem iniciado a fase reprodutiva no ano de 2012 e terem produzido frutos em 2013. As plantas avaliadas apresentaram elevados coeficientes de variação quanto ao desenvolvimento em dossel e a produção, diferente do observado na variável “DAP” (Tabela 7).

Tabela 7 – Estatística descritiva dos resultados da variação morfológica, produção de 15 plantas avaliadas perante a produção

Parâmetros estatísticos	Dossel-T1 (m ²)	Dossel-T2 (m ²)	Dossel-T3 (m ²)	Produção (kg)	DAP (cm)
Média	0,14	0,14	0,28	5,26	41,43
Máximo	0,35	0,43	0,55	20,30	49,00
Mínimo	0,01	-0,13	0,07	0,66	29,00
σ	0,09	0,18	0,16	5,48	4,88
CV	68,26	125,95	59,07	104,29	11,78

As variáveis morfológicas utilizadas na análise com a produção não apresentaram correlações fortes ou muito fortes de acordo com a classificação sugerida por Callegari-Jacques (2003) (Tabelas 8, 9 e 10).

Tabela 8 - Resultados da análise de correlações lineares entre o desenvolvimento do dossel, a produção de frutos e o diâmetro a altura do peito no período T0/T5

Variáveis	T0/T5	Frutos(kg)	Dap(cm)
T0/T5	1	-0,367	-0,063
Frutos(kg)	-0,367	1	0,178
Dap(cm)	-0,063	0,178	1

Valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância $\alpha = 0,2$.

Tabela 9 - Resultados da análise de correlações lineares entre o desenvolvimento do dossel, a produção de frutos e o diâmetro a altura do peito no período T5/T9

Variáveis	T5/T9	Frutos(kg)	Dap(cm)
T5/T9	1	0,052	0,576
Frutos(kg)	0,052	1	0,178
Dap(cm)	0,576	0,178	1

Valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância $\alpha = 0,2$.

Tabela 10 - Resultados da análise de correlações lineares entre o desenvolvimento do dossel, a produção de frutos e o diâmetro a altura do peito no período T0/T9

Variáveis	T0/T9	Frutos(kg)	Dap(cm)
T0/T9	1	-0,155	0,580
Frutos(kg)	-0,155	1	0,178
Dap(cm)	0,580	0,178	1

Valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância $\alpha = 0,2$.

DISCUSSÃO

Mensurar o tamanho do dossel de árvores é um constante desafio e consome um tempo considerável devido ao complexo crescimento das estruturas e a presença de formatos irregulares (HOSAINPOUR, 2013). A macaúba apresenta características foliares diversificadas que torna seu monitoramento difícil.

Diversos autores utilizaram imagens de satélites para monitorar o volume de árvores em floresta (CARREIRAS et al., 2006; LE MAIRE et al., 2008; MÄKELÄ e PEKKARINEN, 2004; MÖTTUS et al., 2006). Porém, a morfologia do dossel quando influenciada pelas pequenas dimensões ou orientação das folhas, pela presença de espaços entre as camadas de folhas e pela baixa densidade de folhas na superfície do dossel, intensificam as fontes de erro que prejudicam a estimativa de dados morfológicos relativos ao dossel de árvores (ESCOLA et al., 2011). Assim, justificou-se

a utilização de imagens aéreas suborbitais para determinação da área ocupada pelo dossel da macaúba, em função do aumento da resolução espacial.

No presente trabalho, as plantas mais jovens (um ano de idade) no início do estudo se desenvolveram menos que as plantas mais desenvolvidas. O período inicial de avaliação, coincidente em grande parte com o período chuvoso, proporcionou às áreas contendo plantas mais desenvolvidas um maior incremento da característica, apesar do comportamento ser esperado para plantas mais novas. Para a maioria das espécies, o crescimento é retomado simultaneamente à reprodução, no período de transição da seca para o início das chuvas na primavera, quando as plantas florescem e frutificam (OLIVEIRA, 1998; BATALHA e MANTOVANI, 2000), corroborando, assim, com o constatado neste trabalho. Portanto, como foi observado um período adaptativo da cultura, o desenvolvimento mais intenso das plantas mais jovens foi reestabelecido conforme esperado, ao final do primeiro período de estudo, ou seja, depois dos 150 dias iniciais.

O desenvolvimento em altura da macaúba indicou inicialmente um comportamento linear para todas as idades. Durante o período do estudo, percebeu-se que a medida que a idade das plantas avançou em direção ao período produtivo, os incrementos ou a velocidade de ganho na variável foi reduzindo a intensidade. Essa ocorrência pode ser entendida por meio do comportamento das plantas perante o desenvolvimento. O acúmulo crescente de biomassa nas plantas se faz a medida que crescem, em decorrência da demanda por sustentação, pressões ambientais tais como a gravidade e a força dos ventos (WALLER, 1986). Porém o investimento feito para altura deve ser equalizado junto a área fotossintética (dossel) para que ocorra a assimilação de biomassa (O'BRIEN et al., 1995). Isto é, o surgimento de uma possível demanda diferenciada por meio do período reprodutivo pode indiretamente levar a planta a reduzir sua intensidade de ganho na variável altura e compensar em área foliar. Considerando que a variabilidade referente a altura das plantas foi acentuada em direção as plantas mais desenvolvidas (quatro anos), pode-se inferir também que os fatores que refletem a dinâmica do crescimento em altura na macaúba não são influenciados apenas pelas condições momentâneas às quais a cultura está submetida e sim pela carga genética e fatores ambientais, os quais interferiram em todo desenvolvimento (ARCHIBALD e BOND, 2003).

Ao observar o comportamento da morfologia nas diferentes idades, foi possível identificar que durante os cinco primeiros meses de avaliação as plantas que estavam

em estágio inicial (um ano de idade) e próximas à produção (quatro anos) apresentaram uma correlação forte e positiva quanto às variáveis “área ocupada pelo dossel” e “altura”. Esse comportamento sugere que o diferimento das estruturas vegetais para os respectivos estádios fenológicos neste período seguem a mesma tendência. Importante ressaltar que, embora o período relativo aos estádios fenológicos de uma cultura seja fixado geneticamente, variações ambientais podem condicionar o desenvolvimento indiferente a sua idade cronológica (GATSUK et al., 1980). A análise de correlação feita após 270 dias, apresentou uma correlação forte porém negativa entre as plantas com idade superior a quatro anos, e as variáveis “área ocupada pelo dossel e “altura”. Este fato aponta a capacidade da cultura em diferir seu desenvolvimento em função da idade, uma vez que a idade em questão se aproxima da fase reprodutiva, e nos vegetais em geral é tida como a fase mais susceptível às variações no ambiente (FISCH et al., 2000).

Conhecer a cultura de posse de análises de solo e foliares auxilia na identificação do status de desenvolvimento da planta, indicando se existe ou não subdesenvolvimento, relacionado à carência nutricional. Essas informações tornam possíveis os diagnósticos de deficiência antes que ela se torne visível nas folhas, uma vez que é nesse estágio de severidade que ocorre comprometimento da produção (FONTES, 2001). Os resultados demonstraram que a idade das plantas influenciou a variação dos teores foliares na macaúba. Malavolta et al. (1997) relataram a existência de relação entre teores foliares e a idade das plantas apresentando a tendência de redução de valores de N, P e K e aumento das concentrações de Ca e Mg a medida que as plantas se desenvolvem. Tendo em vista que no presente estudo as áreas investigadas representaram três diferentes idades da macaúba e que estas foram monitoradas durante nove meses, observou-se o comportamento semelhante ao apontado pelos autores para os teores foliares de Ca e Mg apenas nas plantas com idade superior a quatro anos (próxima ao estágio reprodutivo). As áreas contendo plantas com idade inferior, possivelmente devido ao período de adaptação, não acumularam esses elementos com a mesma intensidade e padrão das plantas desenvolvidas. Os teores de N para todas as áreas não apresentaram exatamente a mesma tendência apontada por Malavolta et al. (1997), uma vez que ao avançar o tempo dentro dos estádios fenológicos os teores foram aumentando. Porém, quando se analisa os teores de N em cada estágio isoladamente, confirmou-se que os teores de N reduzem a medida que as plantas se desenvolvem. O P e o K apresentaram o padrão supracitado, porém apenas para as

plantas com idade superior a quatro anos. De acordo com Ollagnier e Ocs (1981), existe um sinergismo de absorção e assimilação, entre o teor N e o P no dendezeiro. Os mesmos autores apresentam uma relação em torno de 16 para que a nutrição fosfórica e nitrogenada esteja balanceada, ou melhor, em equilíbrio, enquanto que menor, indica um déficit em P. Nesse contexto, partindo da similaridade entre as culturas, a composição química das plantas de macaúba indicou um déficit em P devido a relação durante todo o estudo ter se mostrado inferior a 16, apontando então uma demanda pelo nutriente. Wijebandara e Ranasinghe (2004) relataram efeito antagônico do Fe com outros cátions metálicos em coqueiro, portanto, foi possível inferir que o elevado coeficiente de variação detectado do elemento Fe foi, possivelmente, devido a sua interação com os demais.

A variabilidade da morfologia do dossel da macaúba pode ser interpretada como informação importante no manejo da cultura. Em estudo sobre a cultura do dendê e em coqueiros, Hartley (1977) e Child (1974) relatam que o índice de área foliar influencia diretamente a produção. A determinação da composição química das plantas por meio das folhas é justificada por saber que este é o principal sítio do metabolismo, que alterações no aporte de nutrientes interferem na composição química foliar e apresentam uma relação entre as produções alcançadas e as respectivas concentrações dos nutrientes (MALAVOLTA et al., 1997).

Contudo, ao observar a relação inversa entre o desenvolvimento do dossel da macaúba com idade de quatro anos e o teor de P no início do período de estudo, pode-se considerar que a macaúba em estágio avançado não responde com fidelidade por meio da morfologia todas as condições do solo. Isto é, devido a influência do P no desenvolvimento das plantas (HINSINGER, 2001) e pela sua assimilação estar condicionada em sua grande maioria pela difusão do elemento na solução do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999), condição esta que o solo em um dos momentos de determinação (T1) do elemento não proporcionava, por corresponder ao período seco. A consideração é confirmada também pelo antagonismo ocorrido após 150 dias de estudo, de correlação positiva entre o desenvolvimento e os teores de P, Mg e Mn.

As plantas com três anos de idade apresentaram correlação positiva entre o desenvolvimento e os teores de Ca, Mg e Zn quando determinados no final do primeiro período de avaliação (T2). As palmeiras normalmente são tolerantes à acidez do solo, porém, altas produtividades são alcançadas com correção para elevar os teores de Ca e Mg (ARES et al., 2003; CORLEY e TINKER, 2003). Nesse contexto, ao analisar o

período da determinação que apresentou correlação (T2), coincidente com elevada umidade no solo, infere-se que os teores de Ca e Mg possivelmente influenciaram o desenvolvimento das plantas em função das alterações das características químicas, em especial do pH (SPOSITO, 1989).

As plantas com um ano de idade, apresentaram diversas correlações, porém negativas, possivelmente devido ao período de adaptação e a composição dos substratos utilizados no plantio. Cabe ressaltar que nessa faixa etária os microelementos presentes nas folhas pouco influenciaram o desenvolvimento em dossel, e que inferências utilizando a dinâmica bem como a composição do solo foram realizadas devido a alterações ocorridas no solo refletirem na composição química das folhas (MALAVOLTA et al., 1997).

A população investigada para a análise de correlação entre as variáveis alométricas (área ocupada pelo dossel e o diâmetro a altura do peito (DAP) e a produção foi composta por plantas com idade próxima a quatro anos. Esta análise foi feita sobre os três tempos do estudo. Por não se tratar de um cultivo de plantas geneticamente idênticas (clones) e por não ter sido possível a obtenção de plantas “meio-irmãs” ou melhor, pertencentes a mesma família, notou-se uma significativa variação entre as variáveis utilizadas. Esta variação é consideravelmente aceitável para a macaúba, uma vez que em experimentos conduzidos a campo com a pupunheira, Ares et al. (2002) observaram elevados coeficientes de variação mesmo para plantas de mesma origem e idade. Além disso, cabe ressaltar que a reprodução da macaúba é predominantemente alogâmica (NUCCI, 2007). Entre as variáveis utilizadas nesta análise, o diâmetro a altura do peito (DAP) apresentou baixa variabilidade indicando ser uma variável morfológica com menor capacidade de diferenciação. As correlações das variáveis morfológicas com a produção foram significativas porém moderadas (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Este resultado possivelmente ocorreu devido a elevada variabilidade dos indivíduos analisados. Sugere-se, portanto, que após a fixação do cultivo comercial da macaúba, plantas geneticamente semelhantes sejam cultivadas, para então estabelecer com segurança as relações alométricas com a produtividade.

CONCLUSÕES

- Plantas com idade próxima ao período reprodutivo (quatro anos) apresentaram crescimento mais intenso que plantas com um ano de idade no período de transição da seca para o chuvoso;
- A idade das plantas influenciou a composição química das folhas;
- Plantas com idade superior a quatro anos reduziram os teores de P e K nas folhas;
- O teor de P foliar não apresentou um padrão de influência sobre o desenvolvimento de plantas com idade superior a quatro anos;
- O período de adaptação da macaúba (idade próxima a um ano) não foi adequado para realizar inferências agronômicas.
- Técnicas de sensoriamento remoto e análise de imagens digitais se apresentaram como alternativa confiável para obtenção de dados morfológicos;
- As variáveis morfológicas altura e área ocupada pelo dossel foram fortemente correlacionadas com a idade da macaúba;
- A diferenciação morfológica do dossel da macaúba tenderam a reduzir após o início da frutificação;
- As correlações entre as variáveis morfológicas e a produção não foram consideradas fortes devido a variabilidade genética das plantas avaliadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCHIBALD, S.; BOND, W. J. *Growing tall vs growing wide: tree architecture and allometry of Acacia karroo in forest, savanna, and arid environments. Oikos*, Buenos Aires, v. 102, p. 3-14, 2003.

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. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.66, p.221-232. 2003.

ARES, A.; QUESADA, J.P.; BONICHE, J.; YOST,R.S.; MOLINA, E.; SMYTH, J. Allometric relationships in *Bactris gasipaes* for heart-of-palm production agroecosystems in Costa Rica. **Journal of Agricultural Science**, v.138, n.3, p.285-292, 2002.

ARKCOLL, D. New crops from Brazil: In JANICK, J.; SIMON, E. J. (Eds). *Advances in new crops. Timber Press*, Portland, OR. Pag. 367 – 371, 1990.

BATALHA, M.A. & MANTOVANI, W. Reproductive phenological patterns of cerrado plant species at the Pé-de-Gigante Reserve (Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brazil): a comparison between the herbaceous and woody floras. **Revista Brasileira de Biologia**, v.60, p.129-145, 2000.

BENINCASA, M. M. P. *Análise de crescimento de plantas*, Jaboticabal, **FUNEP**, 1988, 42 p.

BOVI, M. L. A.; SAES, L. A; GODOY JÚNIOR, G. Correlações fenotípicas entre caracteres não destrutíveis e palmito em pupunheiras. **Turrialba**, v. 42, n. 3, p. 382-390, 1992.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário estatístico da agroenergia**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 160 p.

CELES, C. H. S.; SHIMABUKURO, Y. E.; CAMPOS, M. A. A.; HIGUCHI, N. ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM UMA FLORESTA TROPICAL NO MUNICÍPIO DE MAUÉS – AM, BRASIL. **Revista Brasileira de Cartografia. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto**. v. 3, n. 65, p. 541-554, 2013.

CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F. de; MARTINEZ, H. E. P. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.

- H.; BARROS, N. F. de; et al. (Eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, p.769- 850, 2007.
- CARREIRAS, J. M. B., PEREIRA J. M. C., PEREIRA J. S. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 223, p. 45-53. 2006.
- CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; PAVINATO, A. Manejo da adubação. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. de; et al. (Eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, p.851-872, 2007.
- CHEPOTE, R. E.; VALLE, R. R.; SANTANA, C. J. L. Resposta do dendezeiro à adubação mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 12, n. 3, p. 257 – 262, 1988.
- CHILD, R. Coconuts. 2 ed. London: **Longman, (Tropical Agriculture Series)**. 335 p. 1974.
- CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v. 49 n. 12, p. 1671-1678, 1991.
- CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. The Oil Palm (4nd ed). Oxford/EUA: **Blackwell Science**, 562p. 2003.
- COSTA, C. J.; MARCHI, E. C. S. Germinação de sementes de palmeiras com potencial para produção de agroenergia. Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 35 p., 2008.
- DREHER, F. **Promising South American Oil Palm *Acrocomia totai* Mart.: Current Status and Future Prospects**. Thesis (Doctor Science in Agricultural Economics) – Hochschule fur Wirtschaft und Umwelt, Fakultat 2, Nürtinger-Geislinger, Germany, 62 p, 2009.
- DUDA, R.O.; HART, P.E.; STORK, D.G. **Pattern Classification**. John Wiley & Sons, Inc. 2001. 654p.
- ESCOLA A, PLANAS S, ROSELL JR, POMAR J, CAMP F, SOLANELLES F, GRACIA F, LLORENS J, GIL E. Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. **Sensors (Basel)**, v.11, p. 2459-2477, 2011.
- FISCH, S. T. V., JR, L. R. N., MANTOVANI, W. Fenologia reprodutiva de *Euterpe edulis* Mart. na mata atlântica (Reserva ecológica do Trabiju, Pindamonhangaba – SP. **Revista Biociência**, Taubaté, v.6, n.2, p. 31-37, 2000.
- FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, p. 122, 2001.

GATSUK, L.E., SMIRNOVA, O.V., VORONTZOVA, L.B. & ZHUKOVA, L.A.. Age states of plants of various growth forms: a review. **Journal of Ecology**, v.68, p.675-696, 1980.

HARTLEY, C. W. S. **The oil palm (*Elaeis guineenses* Jacq.)** 2.ed. London: Longman,. (Tropical Agriculture Series). 806 p.1977.

HINSINGER, P. Biology availability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, v. 237, p. 173-195, 2001.

HOSAINPOUR, A., ESKANDARI, M., GHAMARY, B. Intelligent estimation of trees canopy size using ultrasonic sensors. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, V. 6, p. 641-647, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2013. **Base de dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/download/tela_inicial.php?tipo=8. Acesso em: 15/08/2013.

JANGARELLI, M.; EUCLYDES, R. F.; CECON, P. R. Níveis de significância na identificação de marcadores moleculares no mapeamento genômico. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 40, n.2, p.308-313, 2011.

LE MAIRE, G.; FRANÇOIS C.; SOUDANI K.; BERVEILLER, D.; PONTAILLER J. Y.; BRÉDA. N.; GENET, H.; DAVI, H.; DUFRÊNE, E. Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p. 3846-3864, 2008.

LEE K. H.; EHSANI R. A laser scanner based measurement system for quantification of citrus tree geometric characteristics. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 25, p.777-788, 2009.

LLORENS J.; GIL E.; LLOP J.; Escola A. Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. **Sensors (Basel)**, v.11, p. 2177-2194, 2011.

MÄKELÄ, H., PEKKARINEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, v. 196, p. 245-255, 2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Revisada e atualizada. Piracicaba: **POTAFOS**. p. 319, 1997.

MANFIO, C. E. et al., 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. 63-68, janeiro/março. 2012.

MANTOVANI, W. & MARTINS, F.R. Variações fenológicas das espécies do cerrado da Reserva Biológica de Moji-Guaçu, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 11. p. 101-112, 1988.

MÖTTUS, M., SULEV, M., LANG, M. Estimation of crown volume for a geometric radiation model from detailed measurements of tree structure. **Ecological Modelling**, v.198, p. 506-514, 2006.

MOURA, E. F.; MOTOIKE, S. Y.; VENTRELLA, M. C.; JÚNIOR, A. Q. DE SÁ; CARVALHO, M. Somatic embryogenesis in Macaw Palm (*Acrocomia aculeata*) from zygotic embryos. **Scientiae Horticulturae**, v. 119, p. 447 – 454, 2009.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV - Departamento de Solos, 399 p. 1999.

NUCCI, S. M. **Desenvolvimento, caracterização e análise da utilidade de marcadores microsatélites em genética de população de macaúba**. 2007. 82p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agrônomo, Campinas. SP, 2007.

O'BRIEN, S. T.; HUBBELL, S. P.; SPIRO, P.; RICHARD, C.; FOSTER, R. B. Diameter, height, crown and age relationships in eight neotropical tree species. **Ecology**, Oxford, v. 76, p. 1926-1939, 1995.

OLIVEIRA, P.O. Fenologia e biologia reprodutiva das espécies de cerrado. In Sano, S.M. & Almeida, S.P.(eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. Embrapa-CPAC, Brasília, p. 169-192, 1998.

OLLAGNIER, M.; OCHS, R. Gestion de la nutrition minérale des plantations industrielles de palmiers à huile. Economies d'engrais. **Oléagineux**, v. 36, n. 8-9, p. 409-421, 1981.

OTSU N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 9(1), p. 62–66, 1979.

PIMENTEL, L. D.; DIAS, L. A. dos S.; PAES, J. M. V.; et al. Diversidade no gênero *Acrocomia* e proposta de subdivisão da espécie *Acrocomia aculeata*. **Informe Agropecuário**, v. 32, n 265, p. 81-87, 2011.

RODRIGUES, M. R. et al. La fumure du palmier à huile en amazonie central brésilienne. **Plantations, recherché, Développement**, v.4, p. 392-400, 1997.

SOBRAL, L. F.; LEAL, M. L. S. Resposta do coqueiro à adubação com uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio em dois solos do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 85-89, 2005.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989.

TEIXEIRA, L. C. Produção de biodiesel. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p.79-86, 2005.

VIÉGAS, I. de J. M.; BOTELHO, S. M. Nutrição mineral do dendezeiro. **In:** VIÉGAS, I. de 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.

VIÉGAS, I. de J. M. **Crescimento do dendezeiro (*Elaeis guineensis*), 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** Piracicaba, SP. Esalq. 1993. 217p. (Tese de Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

WALLER, D. M. The dynamics of growth and form. **In:** CRAWLEY, M. J. (Ed.). *Plant ecology*. **Oxford: Blackwell Scientific Publications**, p.291-320, 1986.

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

CONCLUSÕES GERAIS

A utilização de sensoriamento remoto e análise de imagens digitais na detecção de variações morfológicas do dossel da macaúba se mostrou eficiente e auxiliou o monitoramento do crescimento da cultura. A macaúba apresentou diferenciação morfológica evidente em plantas com idades de um, dois e quatro anos, sendo que a diferenciação da área do dossel tende a reduzir após o início da frutificação. As plantas com um ano de idade evidenciaram o período de adaptação, por meio da aceleração do crescimento a partir do 5º mês de avaliação, enquanto que, no mesmo período, as plantas com idade superior a dois anos reduziram esta velocidade. As variáveis altura e área ocupada pelo dossel apresentaram forte correlação com a idade das plantas. A idade influenciou a composição química foliar. As plantas com um e quatro anos de idade apresentaram relações mais específicas com as características químicas do solo sobre o desenvolvimento em dossel que plantas de dois anos. A macaúba apresentou sensibilidade à densidade do solo apenas para plantas com um ano de idade. As correlações morfológicas e a produção foram diretamente influenciadas pela variabilidade genética.