

**MARIA ANTONIA MACHADO BARBOSA**

**ECOFISIOLOGIA, FRUTIFICAÇÃO E PRODUTIVIDADE DA MACAÚBA: UM  
ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS E PRÁTICAS  
AGRÍCOLAS**

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

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel

Coorientadores: José Antônio Saraiva Grossi  
Kacilda Naomi Kuki

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

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

T

B238e  
2021  
Barbosa, Maria Antonia Machado, 1984-  
Ecofisiologia, frutificação e produtividade da macaúba: um estudo  
sobre a influência de fatores ambientais e práticas agrícolas / Maria  
Antonia Machado Barbosa. - Viçosa, MG, 2021.  
1 tese eletrônica (154 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Leonardo Duarte Pimentel.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento  
de Agronomia, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.088>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Acrocomia aculeata*. 2. Plantas oleaginosas. 3. Agricultura e  
energia. 4. Macaúba - Aspectos ambientais. 5. Fisiologia vegetal.  
6. Macaúba - Reprodução. 7. Produtividade. I. Pimentel, Leonardo  
Duarte, 1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 584.5

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB6/2578


MARIA ANTONIA MACHADO BARBOSA

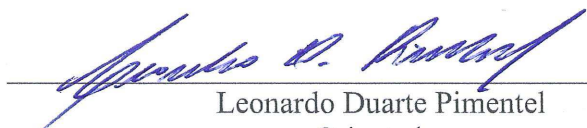
**ECOFISIOLOGIA, FRUTIFICAÇÃO E PRODUTIVIDADE DA MACAÚBA:  
UM ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE FATORES AMBIENTAIS E  
PRÁTICAS AGRÍCOLAS**

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

APROVADA: 08 de dezembro de 2021

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Maria Antonia Machado Barbosa  
Autora

  
\_\_\_\_\_  
Leonardo Duarte Pimentel  
Orientador

Dedico:

À minha avó Margarida da Silva Machado (para  
sempre viva em meu coração).

Minha maior incentivadora aos estudos, deixando-  
me a maior de todas as heranças:

A EDUCAÇÃO.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força diária, presença constante e imerecidas bênçãos.

Aos meus pais Maria Lúcia e Antônio José pelo apoio e amor incondicional.

Às minhas irmãs Marilane, Aldiane, Eliane e meu irmão José Erlan, pelo companheirismo, paciência e palavras de incentivo.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pela infraestrutura e oportunidade na realização desse doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – código de financiamento 001 – e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

Ao professor Leonardo Duarte Pimentel, pela orientação e confiança a mim depositada para a execução desse projeto. Sobretudo, agradecer por todo apoio, incentivos e ensinamentos, e pelo grande exemplo como profissional e ser humano.

À Dra. Kacilda Naomi Kuki pela singular coorientação. Por todo repasse de conhecimentos e experiências como pessoa e que sempre esteve disponível para contribuir com essa pesquisa;

Ao professor e Coorientador José Antônio Saraiva Grossi pela disponibilidade e troca de experiências.

Ao pesquisador Dr. Leo Duc Haa Carson Schwartzhaupt da Conceição e sua equipe de trabalho na Embrapa Cerrados, pelo apoio na execução de parte dessa pesquisa.

A todos os integrantes da Rede Macaúba de Pesquisa – REMAPE – pelas inúmeras experiências vividas, por todo apoio e repasses de conhecimentos. Em especial aos professores Sérgio Motoike e Sebastian Montoya. Ao Técnico do Laboratório de Pós-Colheita e amigo Francisco de Assis Lopes que sempre esteve disponível para ajudar em todos os momentos. Aos amigos/parceiros de experimentos e lidas no campo: Otto Dietrich, Paulo Henrique, Emilly e Evandro.

A todos os amigos do Grupo Sorgo, ao qual tive a oportunidade de compartilhar experiências e amizades. Especialmente à Angélica Barros, que se tornou uma grande amiga e minha grande inspiração para realização de concursos.

A todos os funcionários da UEPE – Araponga, em especial ao Emiliano, Adiliano, Sidcley, Rui, Valter, Girson e Wallyson. Agradeço imensamente à todos, pois nunca mediram esforços para ajudar nas atividades de campo.

Aos meus amigos do Programa de Fisiologia Vegetal: Juliene, Jessenia, Emmanuel, João Victor, Bruno, Giuliana, Túlio, Carla, Amanda e Leonardo, pelas prosas e xícaras de café compartilhadas, sobretudo, pela amizade.

Aos orientadores Allan Lobato (graduação) e Agustín Zsögön (mestrado) por todos os ensinamentos e ajuda na minha formação.

Às amigas de república Gélia e Odyone (mestrado), Aline, Júlia e Flávia (doutorado) pelo companheirismo.

A todos os amigos (as) que Viçosa me presenteou e que estiveram presentes durante esses seis anos de pós-graduação na UFV.

“Pois será como a árvore plantada junto às águas, que estende as suas raízes para o ribeiro, e não receia quando vem o calor, mas a sua folha fica verde; e no ano de sequeidão não se afadiga, nem deixa de dar fruto.”

**Jeremias 17:8**

## RESUMO

BARBOSA, Maria Antonia Machado, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2021. **Ecofisiologia, frutificação e produtividade da macaúba: Um estudo sobre a influência de fatores ambientais e práticas agrícolas.** Orientador: Leonardo Duarte Pimentel. Coorientadores: José Antônio Saraiva Grossi e Kacilda Naomi Kuki.

A macaúba é uma espécie oleaginosa cujas características são promissoras para atender a demanda dos setores agroenergético, alimentício e de cosméticos. Sendo o fruto o principal produto de interesse, é importante entender as causas que podem levar à baixa produção de frutos, como a influência dos fatores ambientais, a supra-anualidade e as práticas agrícolas. Objetivou-se com esse estudo, avaliar a influência dos fatores ambientais e da variação reprodutiva entre as safras, sobre a produção final de frutos de macaúba, assim como, a influência de práticas agrícolas como, densidade de plantio, topografia da área, suplementação hídrica e o fator genético, sobre a sua capacidade fisiológica e produtiva. Para tanto, realizaram-se três experimentos inéditos em condição de campo: Experimento 1 – Impacto dos fatores ambientais e supra-anualidade sobre o florescimento, frutificação e produção de frutos da macaúba. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Araponga, pertencente à UFV. Plantas adultas de macaúba foram avaliadas quanto a época de florescimento, frutificação e produção final de frutos. As variáveis ambientais: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, foram monitoradas durante o período de florescimento das plantas. Os dados de precipitação anual foram confrontados com os dados de produção de frutos. Variações reprodutivas entre safras, como reflexo da supra-anualidade, foram avaliadas através de comparações entre o número de cachos produzidas entre as safras, a taxa de pegamento de frutos, e a competição entre cachos de uma mesma safra e de safras diferentes. Como resultados, obteve-se a resposta do florescimento e produção de frutos da macaúba frente às variáveis ambientais e de seu comportamento de frutificação bienal. Experimento 2 – Interferência da densidade do plantio e topografia do terreno na fisiologia e produção de frutos de macaúba. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Araponga, pertencente à UFV. Foram avaliadas plantas adultas de macaúba que encontravam-se arranjadas em duas densidades de plantio: 494 plantas por hectare (DP<sub>494</sub>) e 312 plantas por hectare (DP<sub>312</sub>), combinadas com dois níveis topográficos do terreno: topo e baixada. Foram determinados os níveis de irradiância, umidade do solo, potencial hídrico foliar, trocas gasosas, taxa de pegamento de frutos, produção e produtividade. Como resultados, obteve-se uma referência da resposta da macaúba à

densidade de plantio e condição topográfica, com base nos níveis de irradiância, umidade do solo, comportamento fisiológico das plantas, pegamento de frutos e produtividade. Experimento 3 – obtenção das respostas fisiológicas, pegamento dos frutos e produtividade de dois acessos de macaúba em função de duas condições hídricas. O estudo foi realizado no Campo Experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), na Embrapa Cerrados, Planaltina – DF. Acessos de macaúba oriundos de São Paulo (acesso SP) e do Distrito Federal (acesso DF) foram submetidos às condições de com e sem suplementação hídrica durante a estação seca, denominados de CSH e SSH, respectivamente. Foram determinados o potencial hídrico foliar, trocas gasosas, taxa de pegamento de frutos, produção e produtividade. Como resultados, obteve-se a resposta fisiológica e produtiva da macaúba a diferentes suplementações hídricas, bem como, o comportamento diferenciado entre os dois acessos. Os resultados obtidos nos três experimentos foram compilados com outras informações da literatura para elaboração de uma revisão sobre os principais fatores de influência na produção de frutos da macaúba. Com essas informações, foi possível observar que a disponibilidade hídrica e a densidade de plantio são fundamentais para a resposta produtiva da macaúba, assim como outros fatores que precisam ser melhor investigados. De maneira geral, este estudo, permitiu desvendar algumas lacunas sobre a fisiologia, frutificação e produtividade da macaúba e nortear a instalação de cultivos comerciais em diferentes condições edafoclimáticas.

**Palavras-chave:** *Acrocomia aculeata*. Oleaginosa. Agroenergia. Fatores Ambientais. Fisiologia. Abortamento de frutos. Produção.

## ABSTRACT

BARBOSA, Maria Antonia Machado, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2021. **Ecophysiology, fructification and productivity of macaw-palm: A study on the influence of environmental factors and agricultural practices.** Advisor: Leonardo Duarte Pimentel. Co-advisers: José Antônio Saraiva Grossi and Kacilda Naomi Kuki.

Macaw-palm is an oleaginous species whose characteristics are promising to meet the demand of the agro-energy, food and cosmetics sectors. As the fruit is the main product of interest, it is important to understand the causes that have led to low fruit production, such as the influence of environmental factors, supra-annually and agricultural practices. The aim of this study was to evaluate the influence of environmental factors and reproductive variation between crops on the final production of macaw-palm fruits, as well as the influence of agricultural practices such as planting density, topography, water supplementation and genetic material on the physiological and productive capacity. To this end, three experiments were carried out under field conditions: Experiment 1 – Influence of environmental factors and supra-annually on the flowering, fructification and fruit production of macaw-palm. The study was carried out at the Experimental Station of Araçuaia, belonging to the UFV. Macaw-palm adult's plants were evaluated for flowering time, fruiting and final fruit production. The environmental variables: precipitation, temperature and relative humidity were monitored during the flowering period of the plants. Annual precipitation data were compared with fruit production data. Reproductive variations between harvest, as a reflection of the supra-annually, were evaluated through comparisons between the number of bunches produced between harvest, the fruit set rate, and the competition between bunches from the same and different harvest. As a result, the response of flowering and fruit production of macaw-palm to environmental variations and its biennial fruiting behavior was obtained. Experiment 2 – Interference of planting density and topography on the physiology and production of macaw-palm. The study was carried out at the Experimental Station of Araçuaia, belonging to the UFV. Macaw-palm adult's plants were arranged in two planting densities were evaluated: 494 plants per hectare (PD<sub>494</sub>) and 312 plants per hectare (PD<sub>312</sub>), combined with two topographic levels: Upland and Lowland. The levels of irradiance, soil moisture, leaf water potential, gas exchange, fruit set rate and yield were determined. As a result, a reference to the response of macaw-palm to planting density and topographic condition was obtained, based on the levels of irradiance, soil moisture, physiological behavior of plants, fruit set and yield. Experiment 3 – obtaining the physiological

responses, fruit set and yield of two macaw-palm accessions as a function of two water conditions. The study was carried out at the Experimental Field of the Cerrados Agricultural Research Center (CPAC), at Embrapa Cerrados, Planaltina – DF. Macaw-palm accessions from São Paulo (SP accession) and Distrito Federal (DF accession) were subjected to conditions with and without water supplementation during the dry season, called WWS and NWS, respectively. Leaf water potential, gas exchange, fruit set rate and yield were determined. As a result, the physiology and production response of macaw-palm to different water supplements was obtained, as well as the different behavior between the two accessions. The results obtained in the three experiments were compiled with other information from the literature to prepare a review on the main factors influencing macaw-palm fruit production. With this information, it was possible to observe that water availability and planting density are fundamental for the productive response of macaw-palm, as well as other factors that need to be better investigated. In general, this study allowed us to unravel some gaps about the physiology, fruit set and productivity of macaw-palm and to guide the installation of commercial crops in different soil and climatic conditions.

**Keywords:** *Acrocomia aculeata*. Oilseed. Agroenergy. Environmental Factors. Plant Physiology. Fruit abortion. Production.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I: Impacto dos fatores ambientais e da supra-anualidade no florescimento e frutificação da macaúba.....</b>	<b>20</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>21</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>22</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>23</b>
<b>Material e Métodos.....</b>	<b>25</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>29</b>
<b>Discussão .....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>43</b>
<b>Referências .....</b>	<b>44</b>
<b>CAPÍTULO II: Interferência da densidade do plantio e topografia do terreno no status hídrico, trocas gasosas e produção de frutos de macaúba .....</b>	<b>49</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>50</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>51</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>52</b>
<b>Material e Métodos.....</b>	<b>53</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>60</b>
<b>Discussão .....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusões.....</b>	<b>75</b>
<b>Referências .....</b>	<b>75</b>
<b>Material Suplementar .....</b>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO III: Respostas ecofisiológicas e produtivas de dois acessos de macaúba em função da disponibilidade hídrica .....</b>	<b>83</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>84</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>85</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>86</b>
<b>Material e Métodos.....</b>	<b>87</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>93</b>
<b>Discussão .....</b>	<b>100</b>
<b>Conclusões .....</b>	<b>105</b>
<b>Referências .....</b>	<b>106</b>
<b>Material Suplementar .....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO IV – Fatores de influência na produção de frutos em macaúba: Revisão .....</b>	<b>113</b>

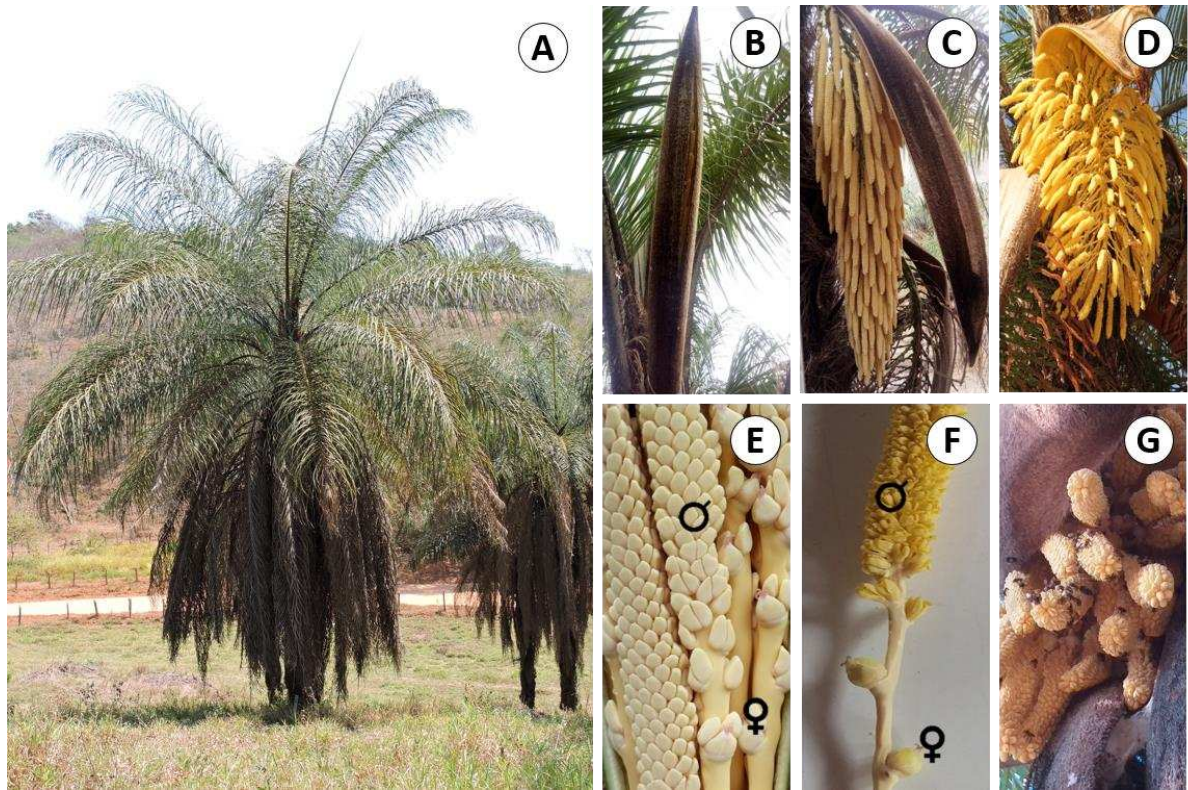
<b>Resumo .....</b>	<b>114</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>115</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>116</b>
<b>Fatores climáticos sobre a fisiologia e produção da macaúba.....</b>	<b>117</b>
<b>Importância dos fatores edáficos para a macaúba .....</b>	<b>124</b>
<b>Outros fatores .....</b>	<b>132</b>
<b>Disponibilidade hídrica e população de plantas como fatores decisivos na produção da macaubeira.....</b>	<b>142</b>
<b>Perspectivas para futuros ambientes de produção da macaúba.....</b>	<b>146</b>
<b>Considerações finais .....</b>	<b>148</b>
<b>Referências .....</b>	<b>148</b>
<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>153</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

O rápido crescimento populacional e o uso excessivo de combustíveis fósseis registrados nos últimos anos, tem levado ao aumento na demanda por alimentos e fontes alternativas de energia (PIMENTEL *et al.*, 2009). Soma-se a isso, o fato de que as mudanças climáticas influenciam negativamente a produção agrícola, por alterar eventos climáticos essenciais ao crescimento das plantas. Diante desse quadro, há uma preocupação em buscar por outras fontes de energia e alimentação, com melhor adaptação a condições ambientais mais extremas, menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) e sem competir por área com culturas agrícolas já estabelecidas (KITCHA; CHEIRSILP, 2011).

Atualmente, a palma africana (*Elaeis guineensis*) é a principal fonte de óleo vegetal, suprimindo a maior parcela comercial de óleo comestível do mundo (SHIDOSHI, 2020). Considerada como a cultura oleaginosa de maior eficiência na produção de óleo, produz em média 6.0 t óleo/ha, que em termos comparativos, é muito superior a outras importantes oleaginosas, como a soja que produz em média 0.5 t óleo/ha. Entretanto, a produção de óleo de palma é restrita às regiões equatoriais do globo, sendo que os principais países produtores são Indonésia e Malásia, responsáveis por 85% da produção mundial (ABRAPALMA, 2021). No Brasil, os plantios se concentram em maior grau na região Amazônica e em partes do estado da Bahia (Mata Atlântica). Isso por que a palma africana requer precipitações anuais mínimas de 2000 mm para que seu potencial produtivo seja expresso.

De maneira semelhante a palma africana, a macaúba (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Lodd. Ex Mart.) é uma palmeira arborescente oleaginosa pertencente à família Arecaceae (Figura 1 A) que vem despontando como uma promissora fonte de óleos em termos de quantidade e qualidade (COLOMBO *et al.*, 2018). A macaubeira apresenta inflorescências interfoliárias compostas de flores amareladas unissexuais reunidas em espigas e protegidas por uma bráctea peduncular denominada de espata (Figuras 1 B-D) (BRITO, 2013). A antese das flores pistiladas antecede à estaminada em um evento denominado de protoginia (Figuras 1 E e F). Essa diferença temporal na viabilidade floral, permite a ocorrência da xenogamia, através da polinização cruzada que é executada principalmente por insetos polinizadores (Figura 1 G), embora, a polinização pelo vento (anemofilia) e a autopolinização, também possam ocorrer (SCARIOT *et al.*, 1991; SCARIOT *et al.*, 1995).



**Figura 1.** Morfologia geral da macaubeira (A); Emissão (B) e abertura natural da espata (C); Exposição total da inflorescência após abertura da espata (D); Detalhes das flores estaminadas e pistiladas (em tríade) na fase de pré-antese (E) e pós-antese (F) e atividade dos polinizadores nas flores estaminadas (G). Fonte: A autora (2019).

A macaubeira tem grande potencial para produção de óleo, e com grande riqueza de ácidos graxos insaturados (BORA & ROCHA, 2004). O óleo extraído do mesocarpo é rico em ácido oleico (65%), que confere ótima qualidade para uso como biodiesel. Já o óleo obtido a partir da amêndoa, é rico em ácido láurico (45%) que permite seu uso na produção de cosméticos (HIANE *et al.*, 2006). Além disso, a macaúba possui grande versatilidade de uso, podendo ser utilizada para produção de energia, através da queima do endocarpo (carvão) que possui alto poder calorífico, na alimentação humana e animal (frutos, palmito, torta) e ainda, construções de casas (folhas e estipe) (LORENZI, 2006).

A macaubeira é nativa de florestas neotropicais com ampla distribuição nas Américas Central e do Sul, sendo que no Brasil pode ser encontrada desde o norte (Pará) até o sul (Paraná) (LORENZI, 2006). Dada a sua ampla dispersão, é caracterizada como uma planta rústica e de alta adaptabilidade às condições ambientais mais extremas, quando comparada à palma africana (MOTTA *et al.*, 2002; CHAGAS *et al.*, 2019). Nesse sentido, a macaubeira torna-se uma atraente candidata para ocupar áreas com condições mais extremas de solo e clima, e sem competir pelas melhores áreas com outras grandes culturas já bem estabelecidas (TELES *et al.*, 2011; FALASCA; ULBERICH; PITTA-ALVAREZ, 2017).

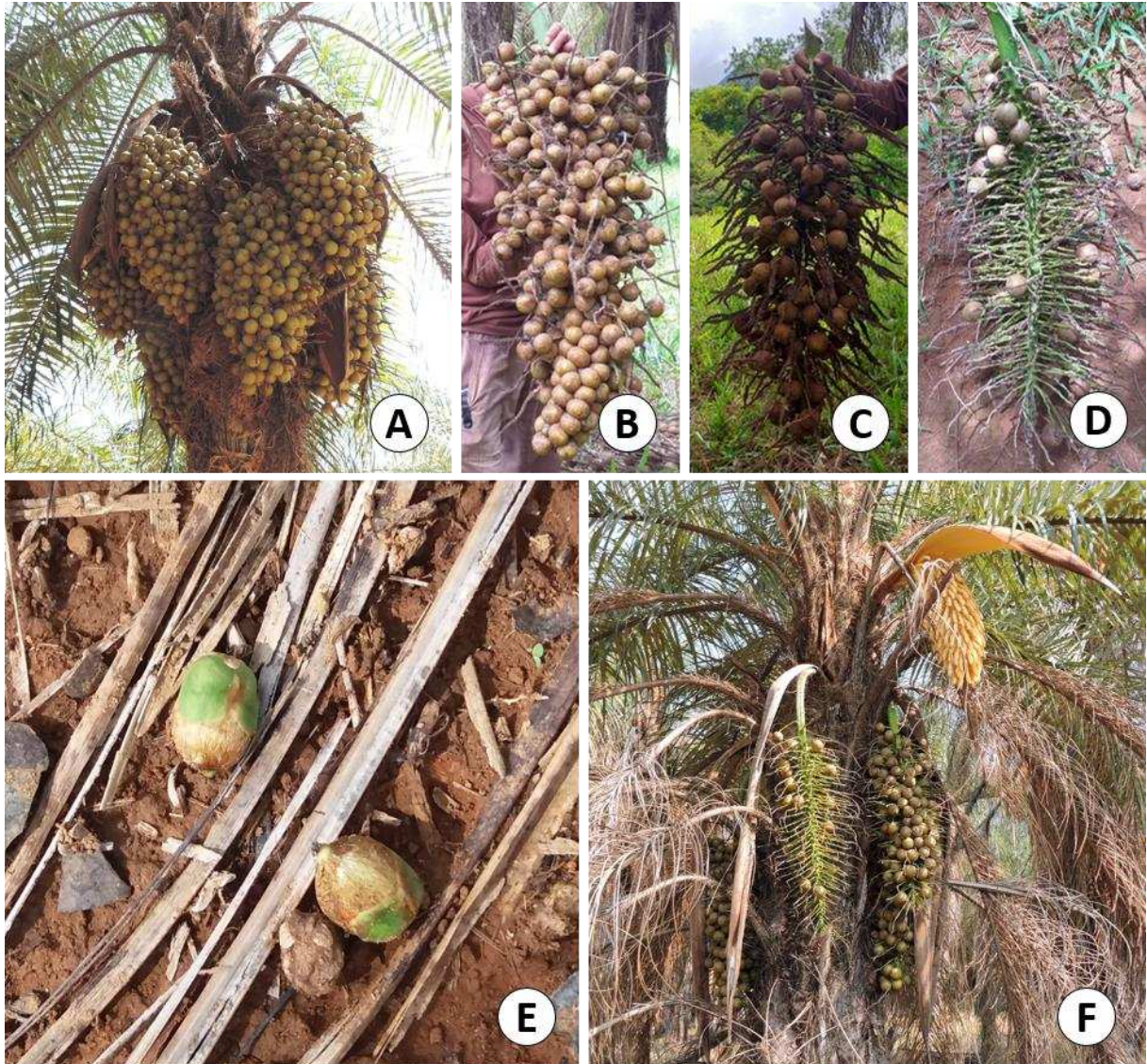
A domesticação da macaúba se encontra em ascensão onde diversos trabalhos têm sido realizados por instituições públicas e privadas, revelando informações sobre a composição química dos óleos, além de aspectos fisiológicos, ecológicos, genéticos e nutricionais dessa palmeira (PIRES *et al.*, 2013; LANES *et al.* 2015; MONTOYA *et al.* 2015; PIMENTEL *et al.* 2015; DIAS *et al.* 2018). Pesquisas envolvendo a produção de frutos de macaúba em palmares cultivados, ainda são recentes e muitos deles ainda em fase de execução. Todas estas, visando principalmente obter incrementos de produtividade, uma vez que o fruto é o principal produto de interesse dessa cultura.

Embora a macaubeira tenha potencial para produzir cachos frutíferos volumosos (Figura 2 A), tem sido notificado grande variação no número de frutos nos cachos (Figuras 2 B-D), com observações de ocorrência de aborto dos frutos jovens (Figura 2 E), cujas causas ainda são pouco compreendidas. Para alguns autores, a baixa frutificação na macaúba pode estar relacionada a fatores genéticos (SIMIQUELI *et al.* 2018), à presença de insetos pilhadores nas folhas e nos frutos (MONTOYA *et al.*, 2015), e ainda, à uma limitação dos polinizadores (SCARIOT *et al.* 1995), entretanto, essas causas são pouco esclarecidas e outros fatores também podem estar relacionados.

Um fato adicional sobre a macaubeira é que esta apresenta ciclo supra-anual, com duração aproximada de 14 meses entre a antese e a abscisão do fruto, fato que permite observar uma sobreposição de safras, ou seja, a presença de frutos em fase final de maturação de maneira concomitante com frutos jovens (Figura 2 F) (MONTOYA *et al.*, 2016). Nesse caso, é provável que esse cenário possa constituir uma situação potencial de competição entre frutos de diferentes idades na planta, sendo isso responsável pelo abortamento dos frutos mais jovens (MARCELIS *et al.*, 2004).

Em palmeiras de interesse comercial, como a palma africana e o coqueiro (*Cocos nucifera*), alterações nos fatores ambientais que ocorrem na fase de florescimento, podem prejudicar a produção final de frutos, através das interações entre microclima, agentes polinizadores, aborto de inflorescências e atraso no crescimento dos órgãos reprodutivos (LEGROS *et al.*, 2009; RANASINGHE; SILVA; PREMASIRI, 2015; LAWSON & RANDS, 2019). A longo prazo, variações exacerbadas nos níveis de chuvas, radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, etc, podem alterar a condição fisiológica da planta, com consequente redução da capacidade de sustentação dos frutos (RACSKÓ *et al.*, 2007). Em adição, para muitas espécies frutíferas, mesmo que as etapas de polinização e fecundação sejam bem

sucedidas, a frutificação também dependerá da disponibilidade de recursos e da habilidade da planta em conduzir os frutos à maturação (GANESHIAH & SHAANKER, 1994).



**Figura 2.** Expressão do alto potencial produtivo em número de frutos e de cachos da macaubeira (A); Cachos de uma mesma safra com variação de frutificação (B-D); Frutos abortados na fase inicial de desenvolvimento (2 semanas após a antese) (E) e planta apresentando cachos com diferentes idades e pegamento de frutos – a inflorescência recém aberta na parte superior da planta mostra a sobreposição de safras (supra-anualidade) (F). Fonte: A autora (2019).

É importante ressaltar que a capacidade produtiva de uma cultura, também está intimamente relacionada às práticas agrícolas. Como exemplo, a escolha da condição ideal de plantio, como o local, a condição topográfica, a população de plantas, entre outros, podem alterar os recursos disponíveis no ambiente, a condição fisiológica da planta, e conseqüentemente, a sua produtividade. Para a macaúba, não existem esclarecimentos sobre a influência dos fatores ambientais e práticas agrícolas sobre a produção de frutos. Nesse sentido,

há a necessidade de maiores estudos que esclareçam os fatores relacionados com o abortamento de frutos, e ainda, quais práticas agrícolas poderiam ser realizadas para amenizar essas perdas na produção.

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência dos fatores ambientais e práticas agrícolas sobre a fisiologia, frutificação e produtividade da macaúba, com o intuito de entender os fatores relacionados à sua produção. Para isso, foram desenvolvidos três trabalhos inéditos a nível de campo, a saber: i) Impacto dos fatores ambientais e supra-anualidade sobre o florescimento e produção de frutos da macaúba; ii) Interferência da densidade do plantio e topografia do terreno na fisiologia e produção de frutos de macaúba; e iii) Respostas ecofisiológicas e produtivas de dois acessos de macaúba em função da disponibilidade hídrica. De maneira complementar, as principais informações desses estudos foram compiladas com dados da literatura e produzido um quarto capítulo de revisão, cujo objetivo foi: iv) Reunir informações sobre os principais fatores de influência na produção da macaúba, enfatizando a importância da disponibilidade hídrica e densidade de plantio.

## REFERÊNCIAS

- ABRAPALMA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE ÓLEO DE PALMA. **A palma no Brasil e no mundo**. 2021. Disponível em: <http://www.abrapalma.org/pt/a-palmano-brasil-e-no-mundo/>. Acesso em: 13 de outubro de 2021.
- BORA, P. S.; ROCHA, R. V. M. Macaiba Palm: fatty and amino acids composition of fruits macaiba. **Ciencia y Tecnologia Alimentaria**, v. 4, n. 3, p. 158–162, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1080/11358120409487755>
- COLOMBO, C. A. et al. Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v. 25, n. 1, p. 4–9, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>
- DIAS, A. N. et al. Acclimation responses of macaw palm seedlings to contrasting light environments. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33553-1>
- FALASCA, S.; ULBERICH, A.; PITTA-ALVAREZ, S. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 1321–1333, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1850-6>
- GANESHIAH, K. N.; SHAANKER, R. U. Seed and fruit abortion as a process of self-organization among developing sinks. **Physiologia Plantarum**, v. 91, n. 1, p. 81–89, 1994. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00662.x>

HIANE, P. A. et al. Óleo da polpa e amêndoa de bocaiúva, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. caracterização e composição em ácido graxos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 3, p. 256–259, 2005.

KITCHA, S.; CHEIRSILP, B. Screening of oleaginous yeasts and optimization for lipid production using crude glycerol as a carbon source. **Energy Procedia**, v. 9, n. 1, p. 274–282, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.029>

LANES, É. C. M. et al. Molecular characterization and population structure of the macaw palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex situ germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102–112, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>

LAWSON, D. A.; RANDS, S. A. The effects of rainfall on plant–pollinator interactions. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 13, n. 4, p. 561–569, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11829-019-09686-z>

LEGROS, S. et al. Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photoperiod and climate variability. **Annals of Botany**, v. 104, n. 6, p. 1171–1182, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1093/aob/mcp214>

LORENZI, G. M. A. C. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae: bases para o extrativismo sustentável. Tese de doutorado. Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo. Universidade Federal do Paraná, 156 f. 2006.

MARCELIS, L. F. M. et al. Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 406, p. 2261–2268, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh245>

MONTOYA, S. G. et al. Registro da presença e danos causados por coleopteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.763>

MONTOYA, S. G. et al. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927–938, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2558-7>

MOTTA, P. E. F. et al. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002.

PIMENTEL, D. et al. Food versus biofuels: Environmental and economic costs. **Human Ecology**, v. 37, n. 1, p. 1–12, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10745-009-9215-8>

PIMENTEL, L. D. et al. Effect of nitrogen and potassium rates on early development of macaw palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1671–1680, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140352>

PIRES, T. P. et al. 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

RACSKÓ, J. et al. Fruit drop: The role of inner agents and environmental factors in the drop of flowers and fruits. **International Journal of Horticultural Science**, v. 13, n. 3, 2007. Available at: <https://doi.org/10.31421/ijhs/13/3/741>

RANASINGHE, C.; SILVA, L.; PREMASIRI, R. Major determinants of fruit set and yield fluctuation in coconut (*Cocos nucifera* L.). **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka**, v. 43, n. 3, p. 253, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v43i3.7955>

SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in central Brazil. **Biotropica**, v. 23, n. 1, p. 12, 1991. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388683>

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata*: patterns and consequences. **Biotropica**, v. 27, n. 2, p. 168, 1995. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388992>

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

SIMIQUELI, G. F. et al. Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 652–659, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.068>

TELES, H. D. F. et al. Ambientes de ocorrência natural de macaúba. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 595–601, 2011. Available at: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i4.11851>

VIANA, M. C. M. et al. Cultivo da macaúba em Sistemas Agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário**, v. 32, p. 41–51, 2011.19

---

## CAPÍTULO I

---

### **Impacto dos fatores ambientais e da supra-anualidade no florescimento e produção de frutos da macaúba**

Maria Antonia Machado Barbosa<sup>1\*</sup>; Leonardo Duarte Pimentel<sup>1\*\*</sup>; Kacilda Naomi Kuki<sup>1</sup>; José Antônio Saraiva Grossi<sup>1</sup>; Paulo Henrique Honorato Salla<sup>1</sup>

#### **Afiliações**

<sup>1</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

#### **\*Autor correspondente**

Maria Antonia Machado Barbosa

E-mail: mabarbosa483@gmail.com

Endereço: Avenida Peter Henri Rolfs, s/nº, Viçosa, Minas gerais, Brasil.

Departamento de Agronomia

Universidade Federal de Viçosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-0599>

#### **\*\* Coordenador geral da pesquisa**

**Resumo**

Reduções na produção de frutos de macaúba tem sido associado a baixa frutificação nos cachos e à uma variação reprodutiva entre as safras, cujas causas ainda não estão bem esclarecidas. Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar as possíveis interferências de fatores ambientais como precipitação, temperatura e umidade relativa do ar sobre o florescimento e a produção final de frutos da macaúba, assim como, os efeitos da supra-anualidade sobre a taxa de pegamento de frutos e número de cachos, e a influência da ordem de abertura dos cachos na respectiva frutificação. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Araponga, da Universidade Federal de Viçosa – MG, avaliando 48 plantas adultas de macaúba. Variáveis ambientais foram monitoradas e confrontadas com o florescimento e a taxa de pegamento de frutos. As variações reprodutivas foram avaliadas por duas safras consecutivas. A produção de frutos de macaúba foi favorecida pelo incremento da precipitação anual e pela melhor distribuição das chuvas ao longo do ano. Os fatores precipitação, temperatura e umidade relativa do ar durante o período de florescimento, não influenciaram a taxa de pegamento de frutos. O número de cachos variou entre as safras, e o pegamento de frutos de uma safra é independente do número de cachos remanescentes da anterior. Há uma tendência de menor taxa de pegamento de frutos para os primeiros cachos emitidos pela planta. Em conclusão, a produção final da macaúba está mais bem relacionada à quantidade e distribuição das chuvas ao longo do ano, em comparação às variações ambientais que ocorrem em etapas isoladas do seu ciclo; a produção de cachos de um ano correlaciona-se negativamente com a produção de cachos do ano seguinte, porém, a sobreposição de safras não gera competição entre os frutos de anos diferentes; e ainda, os primeiros cachos das plantas apresentam menor pegamento de frutos, possivelmente devido à baixa ocorrência das chuvas iniciais da estação, menor variabilidade/disponibilidade de pólen e baixa atividade dos polinizadores.

**Palavras-chave:** ambiente; precipitação; competição entre drenos; abortamento de frutos;

**Abstract**

Reductions in the production of macaw palm fruits have been associated with low fruiting in bunches and a reproductive variation between harvest, the causes of which are still not well understood. The aim of this study was to evaluate the possible interference of environmental factors such as precipitation, temperature and relative humidity on the flowering and production of macaw palm, as well as the effects of supra-annual on the fruit set rate and number of bunches, as well as the influence of the opening order of the bunches on the respective fruiting. The study was carried out at the Experimental Station of Araçuaia, Federal University of Viçosa – MG, evaluating 48 adult macaw palms. Environmental factors were monitored and correlated with flowering and fruit set rate. Productive variations were evaluated for two consecutive harvest. The fruit yield of macaw palm was favored by the increase in annual precipitation and by the better distribution throughout the year. The factors precipitation, temperature and relative humidity during the flowering period did not influence the fruit set rate. The number of bunches varied between harvests, and the taking of fruits from one harvest is independent of the number of bunches remaining from the last year. There is a tendency for a lower fruit set rate for the first bunches emitted by the plant. In conclusion, the production of macaw palm is better related to the amount and distribution of rainfall throughout the year, compared to the environmental variations that occur in isolated stages of its cycle; the production of bunches of one year is negatively correlated with the production of bunches of the following year, however, the overlapping of harvest does not generate competition between the fruits of different years; furthermore, the first bunches of the plants show less fruit set, possibly due to the low occurrence of initial rains in the season, less variability/availability of pollen and low pollinator activity.

**Keywords:** Environment. Precipitation. Sink competition. Fruits abortion.

## Introdução

A macaúba (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Lodd. Ex Mart.) – uma palmeira arbórea de ampla distribuição na América Neotropical – tem sido notificada como uma oleaginosa promissora para atender à demanda do mercado agroenergético. Sua capacidade de alto rendimento de óleo, grande versatilidade de uso de seus produtos e coprodutos, associados à boa adaptabilidade a diversos ambientes, justificam seu uso como fonte de matéria-prima sustentável (MOTTA *et al.*, 2002; MOTOIKE; KUKI, 2009; ABREU *et al.*, 2012). A qualidade oleífera dos seus frutos se assemelha a de outras oleaginosas já bem estabelecidas, como a palma africana (*Elaeis guineensis*) e a oliveira (*Olea europaea*), devido a riqueza de ácidos graxos insaturados (BORA; ROCHA, 2004). Assim, os frutos da macaúba, além da aplicação para a produção de biodiesel, apresentam características para uso na indústria alimentícia e de fármaco-cosméticos, sendo portanto, o produto de maior interesse (HIANE *et al.*, 2005).

A biologia reprodutiva e a frutificação da macaúba foram descritas em trabalhos anteriores. Trata-se de uma espécie monoica, com inflorescências interfoliare, composta de flores amareladas unissexuais reunidas em espigas e protegidas por uma bráctea peduncular (espata) (BRITO, 2013). As flores pistiladas são distribuídas em tríades ao longo de uma ráquila, enquanto que as estaminadas são solitárias e em maior quantidade. A antese das flores pistiladas antecede à estaminada (protoginia), constituindo uma diferença temporal na viabilidade floral (SCARIOT *et al.*, 1991), que permite a ocorrência da xenogamia (polinização cruzada) (SCARIOT *et al.*, 1995). A polinização pelo vento (anemofilia) assim como a autopolinização, também podem ocorrer (SCARIOT *et al.*, 1991). O ciclo é supra-anual, com duração aproximada de 14 meses entre a antese e a abscisão do fruto, fato que permite observar uma sobreposição de safras (MONTROYA *et al.*, 2016). Apesar dos cachos frutíferos serem volumosos, observações de campo tem notificado grande variação no número de frutos nos cachos, indicando a ocorrência de aborto dos frutos jovens.

O florescimento e a frutificação são fases fenológicas determinantes para o rendimento final das culturas. Ambos os eventos são governados por transições que ocorrem na planta, que são dependentes de fatores endógenos e exógenos (WUBS; HEUVELINK; MARCELIS, 2009; FERNANDES *et al.*, 2015). Quaisquer interferências em algum desses fatores, como alterações hormonais, má distribuição ou indisponibilidade de recursos, e condições ambientais estressantes, podem alterar a etapa de florescimento e desencadear falhas reprodutivas.

De maneira geral, o abortamento de flores e frutos pode ser ocasionado por fatores inerentes da própria espécie, como por exemplo, produção de flores em excesso para produzir

frutos com qualidade superior (BURD, 1998), ou por condições contrárias ao sucesso reprodutivo, como fatores fisiológicos, ecológicos e genéticos (STEPHENSON, 1981; ASCOUGH *et al.*, 2005). Para a macaúba, o aborto dos frutos nas diferentes fases de desenvolvimento tem sido associado à limitação dos polinizadores (SCARIOT, ALDICIR; LLERAS; HAY, 1995b), depressão endogâmica (SIMIQUELI *et al.*, 2018) e ainda, à presença de insetos pilhadores (MONTTOYA *et al.*, 2015). Entretanto, não existem comprovações experimentais para tais causas.

Os fatores ambientais como alta ou baixa precipitação, alterações nas temperaturas e umidade relativa do ar durante a fase de florescimento, podem prejudicar a produção final de frutos, através das interações entre microclima e agentes polinizadores (LAWSON; RANDS, 2019), e ainda, atrasos no florescimento e danos nas estruturas florais (YOUNG; WILEN; BONHAM-SMITH, 2004). A longo prazo, variações exacerbadas nos níveis de chuvas, radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar, entre outros, podem alterar a condição fisiológica da planta, com conseqüente redução da capacidade de sustentação dos frutos (RACSKÓ *et al.*, 2007). Em coqueiro (*Cocos nucifera*), o florescimento e a frutificação são reduzidas por condições desfavoráveis como altas temperaturas, déficit hídrico e baixa luminosidade (RANASINGHE; SILVA; PREMASIRI, 2015). Na palma africana, períodos de seca prolongados geram atrasos no crescimento dos órgãos reprodutivos e conseqüente aborto de inflorescências (LEGROS *et al.*, 2009). Para a macaúba, não existem esclarecimentos sobre a influência dos fatores precipitação, temperatura e umidade relativa sobre o florescimento e produção de frutos.

Quando eventos de polinização e fecundação não são limitantes, o desenvolvimento dos frutos formados depende da disponibilidade de recursos e da habilidade da planta em conduzi-los à maturação (GANESHAIAH; SHAANKER, 1994). Para muitas espécies, que apresentam sobreposição de safras, a presença de frutos em desenvolvimento na planta pode inibir o pegamento e crescimento de um fruto jovem, devido à competição por recursos (MARCELIS *et al.*, 2004), ou por estratégia de dominância como drenos preferenciais (STEPHENSON, 1981). Em coqueiro, a competição entre os frutos de diferentes idades no momento da polinização, tem sido um fator crítico na determinação da sobrevivência dos frutos jovens (RANASINGHE; SILVA; PREMASIRI, 2015). Para a macaúba, é comum observar em uma mesma planta frutos recém-formados juntamente com frutos da safra anterior ainda em desenvolvimento (MONTTOYA *et al.*, 2016), além de apresentar diferenças cronológicas no florescimento em uma mesma planta. Este cenário pode constituir uma situação potencial de

competição cruzada por recursos da planta, induzindo ao abortamento de alguns frutos em detrimento ao pegamento de outros, sinalizando para drenos preferenciais. Em adição, a quantidade de cachos em uma safra, pode refletir sobre a quantidade de cachos da safra seguinte, como uma possível condição de bienalidade da espécie. Entretanto, são necessárias informações sobre tais respostas da planta na sustentação dos frutos e competição entre os drenos de uma mesma safra e de safras diferentes.

Estando a domesticação da macaúba em ascensão, elucidar possíveis causas de interferência na produção de frutos torna-se crucial para esta cultura emergente. Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi avaliar: i) a associação de variáveis ambientais com o florescimento, frutificação e a produção final de frutos de macaúba; ii) os efeitos da sobreposição de safras sobre a taxa de pegamento de frutos; iii) a variação na produção de número de cachos entre as safras, e iv) a influência da cronologia do florescimento na respectiva frutificação.

## **Material e Métodos**

### ***Local do estudo e condições edafoclimáticas***

O estudo foi realizado durante os anos de 2016 a 2019, na Estação Experimental de Araponga, MG, pertencente a Universidade Federal de Viçosa (20° 39' 16.63" S e 42° 31' 59.40 W). O local de estudo compreendeu numa área experimental de aproximadamente 1,4 hectares, consorciada de macaúba-capim braquiária (*Acrocomia aculeata-Brachiaria decumbens*). Situada na Mesorregião da Zona da Mata, o local apresenta clima do tipo Cwb (com inverno seco e verão chuvoso) segundo a classificação de Köppen (JÚNIOR, 2009; ALVARES *et al.*, 2013). A precipitação anual média é de 1350 mm, com maior concentração nos meses de outubro a março (primavera e verão). A estação seca dura cerca de 6 meses, com menor precipitação registradas nos meses de junho a agosto, coincidindo com os meses mais frios (inverno). A temperatura anual média é de 17 °C, com uma temperatura média mínima de 14 °C no inverno e temperatura máxima média de 20 °C ocorrendo no verão (ALVARES *et al.*, 2013). A região tem altitude máxima, mínima e média de 1970 m, 473 m e 909 m, respectivamente, sendo caracterizada como de intensa variação topográfica (Fonte: [www.topographic-map.com](http://www.topographic-map.com)). O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico argissólico – LVAa, segundo manual de classificação de solos (SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE; SANTOS, 2006).

### ***Material vegetal***

A coleta de dados foi realizada em 48 plantas adultas de macaúba (acessos oriundos de Minas Gerais), plantadas no ano de 2009. As plantas foram escolhidas de maneira criteriosa, com grau de produção similar e 9 anos de idade (quinto consecutivo ano de produção). A altura média das plantas era de aproximadamente 10 metros e encontravam-se arranjadas em sistema de fileira simples, em espaçamentos: 5,0 m x 5,0 m (entre linhas x entre plantas) com densidade de plantio de 400 plantas por hectare. Todas as plantas receberam as mesmas adubações anuais, sempre no mês de novembro, com 1.000 g planta<sup>-1</sup> de NPK (20-5-20) aplicado na projeção da copa, e 2 t ha<sup>-1</sup> de calcário com 1/3 de gesso na sua composição (PIMENTEL *et al.*, 2011). Não houve suplementação hídrica artificial, estando as plantas submetidas à disponibilidade de chuvas.

### ***Avaliações***

#### *Relação entre precipitação e produção de frutos*

Para avaliar a influência da precipitação sobre a produção de frutos, os dados da precipitação anual e durante a estação seca, dos anos 2016, 2017, 2018 e 2019, foram confrontados com os dados de produção de frutos dos respectivos anos. Os dados de produção de frutos (kg planta<sup>-1</sup>) foram obtidos na etapa de colheita de cada ano (mês de fevereiro), através da separação dos frutos dos cachos e posterior pesagem, utilizando uma balança digital manual. Durante esse período (de 2016 a 2019), as 48 plantas apresentavam-se no terceiro, quarto, quinto e sexto ano de produção, respectivamente.

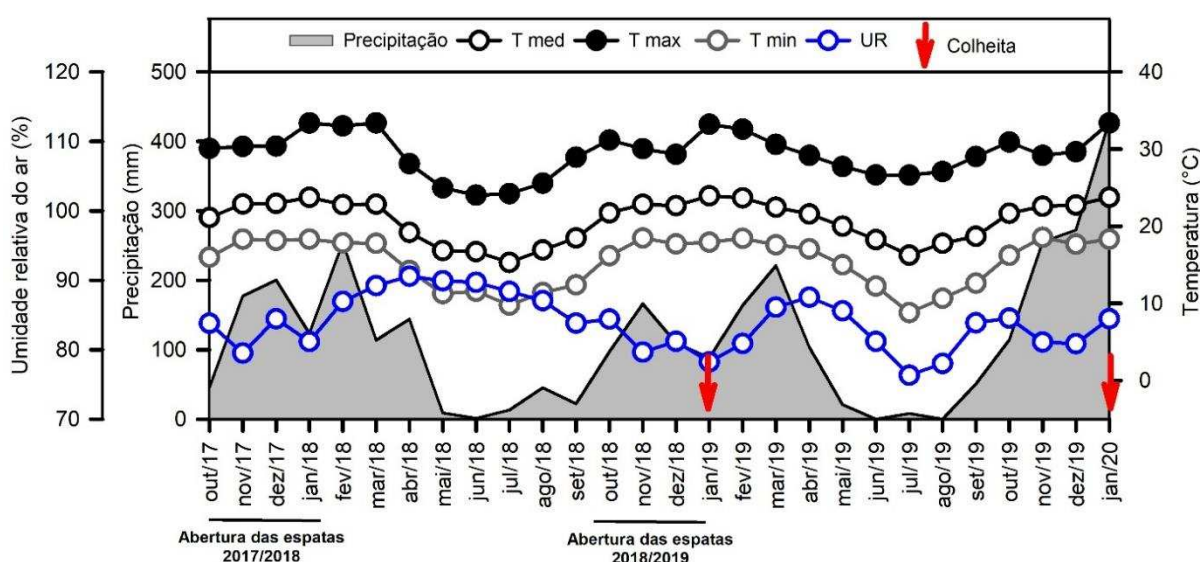
Os dados de precipitação foram obtidos a partir de um pluviômetro manual instalado na estação experimental, a cerca de 50 m das plantas. O somatório da precipitação anual foi determinado como sendo o acumulado entre fevereiro a janeiro do ano seguinte, que corresponde o período de uma colheita a outra. O acumulado de precipitação da estação seca foi obtido pela somatória dos meses de abril a setembro de cada ano, compreendendo os meses de menor volume de chuvas para a região de Araponga – MG (outono e inverno) (ALVARES *et al.*, 2013).

#### *Relação entre precipitação, temperatura e umidade relativa do ar com a abertura das espatas e frutificação*

Para essa avaliação foram utilizados apenas os dados dos anos de 2018 e 2019, nomeados como safra 2017/2018 (final de 2017 correspondendo ao ano de florescimento, e 2018 correspondendo ao ano de desenvolvimento dos frutos) e safra 2018/2019 (final de 2018

correspondendo ao ano de florescimento, e 2019 correspondendo ao ano de desenvolvimento dos frutos).

As variáveis precipitação, temperatura e umidade relativa do ar foram monitoradas a partir do início da abertura das espatas até a colheita dos frutos, nos dois anos experimentais. Os dados de precipitação foram obtidos conforme descrito anteriormente. Os dados de temperatura e umidade relativa, foram registrados com o auxílio de Datalogger (Extech Instruments®, modelo DT-500, Leeds, UK), instalados na altura da copa de quatro plantas escolhidas aleatoriamente na área, sendo um equipamento por planta. Os valores médios mensais das variáveis climáticas durante os dois anos experimentais estão resumidos na Figura 1.



**Figura 1.** Valores mensais de precipitação acumulada, temperaturas máxima, média e mínima e umidade relativa do ar – UR- durante o período experimental (outubro/2017 a janeiro de 2020) em Araponga, MG. O período de abertura das espatas de cada safra é destacado na parte inferior do gráfico, como sendo de outubro a janeiro. Setas vermelhas indicam o mês de colheita dos frutos (janeiro) em cada safra.

Em paralelo ao registro dos fatores ambientais, todas as 48 plantas foram monitoradas quanto ao período e quantidade de espatas abertas. O monitoramento foi realizado semanalmente durante todo o período de abertura das espatas, sendo identificadas com placas coloridas, contendo: a identificação da planta, o número do cacho e a data de abertura. Por motivos de logística experimental, as placas de identificação foram fixadas no estipe da planta, sempre na direção da espata aberta, de forma criteriosa para identificar a ordem de abertura. Essa marcação foi realizada para posteriormente correlacionar os fatores ambientais do período com a quantidade de espatas abertas e com a taxa de pagamento dos frutos.

A taxa de pegamento de frutos foi calculada para todas as espadas abertas, considerando o período de abertura e as condições ambientais em ambas as safras. Para obter a exatidão do número de frutos no cacho, a colheita foi antecipada para o mês de janeiro, que antecede a queda natural dos frutos, e que no local do experimento geralmente ocorre a partir do mês de fevereiro. No momento da colheita, os cachos foram cortados rentes à estipe e os frutos derriçados para quantificação do número de frutos por cacho (NFC). Posteriormente, as ráquias dos cachos foram cortadas, para obtenção do somatório de ráquias do cacho ( $\sum RC$ ) e calcular o número de flores femininas por método de amostragem. A taxa de pegamento de frutos (TPF) foi atribuída como sendo o inverso do abortamento dos frutos, e foi obtida a partir do número de frutos por cacho (NFC - contados no momento da colheita) e a contagem do número de flores femininas (NFF - conferida pelas suas respectivas cicatrizes nas ráquias), que representam a potencialidade do número de frutos do cacho (eq. 1).

$$TPF (\%) = NFC/NFF \times 100 \quad (\text{eq. 1})$$

Onde:

NFC = número de frutos do cacho

NFF = número de flores femininas

A contagem do número de flores femininas (NFF) foi realizada por método de amostragem aleatória de ráquias e das flores femininas na ponta do cacho, conforme a eq. 2. A precisão do método de amostragem apresentou uma variação de  $1,8 \pm$  flores femininas ( $n = 20$ ) em comparação com o método por contagem de todas as flores femininas do cacho.

$$NFF = \bar{x}FFR \times \sum RC + FFPC \quad (\text{eq. 2})$$

Onde:

$\bar{x}FFR$  = média de flores femininas por ráquila

$\sum RC$  = somatório de ráquias do cacho

FFPC = flores femininas na ponta do cacho

#### *Variação reprodutiva entre safras*

As variações reprodutivas entre safras e a nível de planta, como reflexo da sobreposição de safras sobre a produção e sustentação dos frutos, foram avaliadas através de comparações entre o número de cachos produzidos entre as duas safras, o número de cachos produzidos na safra 2017/2018 com a taxa de pegamento de frutos da safra 2018/2019 (ano seguinte), e o número de cachos produzidos em cada safra com a respectiva taxa de pegamento de frutos. A

possível competição entre cachos de uma mesma safra também foi avaliada através de avaliação da taxa de pagamento de frutos em função da ordem cronológica dos cachos.

### ***Análise Estatística***

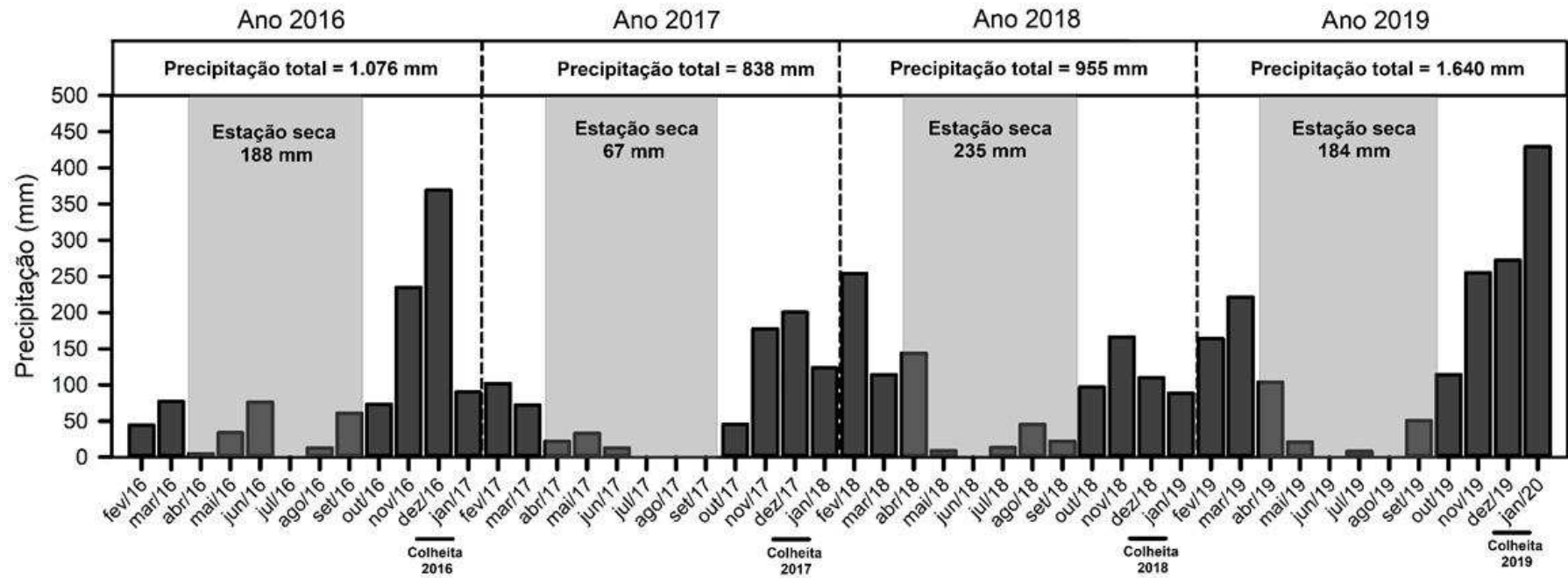
As variações dos fatores ambientais, abertura das espatas, taxa de pagamento de frutos e produção de frutos para os quatro anos de estudo, foram apresentadas por meio de análise descritiva dos dados. Análise de regressão foi utilizada para testar as relações entre: a) precipitação anual e da estação seca com a produção de frutos; b) variáveis ambientais com a frequência de abertura das espatas e taxa de pagamento de frutos; c) frequência de espatas abertas com a taxa de pagamento de frutos; d) número de cachos produzidos entre as duas safras; e) número de cachos produzidos na safra 2017/2018 com a taxa de pagamento de frutos da safra 2018/2019 (ano seguinte); f) número de cachos produzidas em cada safra com a respectiva taxa de pagamento de frutos; g) ordem cronológica dos cachos com a taxa de pagamento de frutos. Todas as análises estatísticas e a confecção dos gráficos foram realizados a partir do Software Sigmaplot® versão 14.0.

## **Resultados**

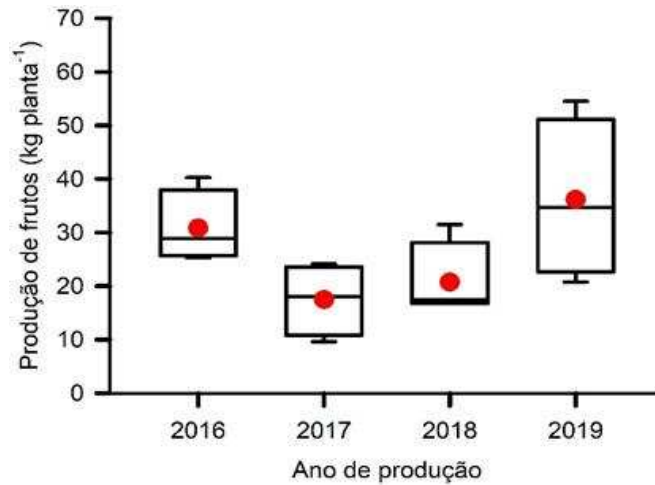
### ***Precipitação e a produção de frutos de macaúba em quatro anos de avaliação***

Houve variação nos níveis de precipitação anual e da estação seca ao longo dos quatro anos de estudo (de 2016 a 2019 – Figura 2). A precipitação anual acumulada para os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019 foram respectivamente, 1076 mm, 838 mm, 955 mm e 1640 mm. Já os acumulados de precipitação na estação seca foram de 188 mm, 67 mm, 235 mm e 184 mm nos anos de 2016, 2017, 2018 e 2019, respectivamente.

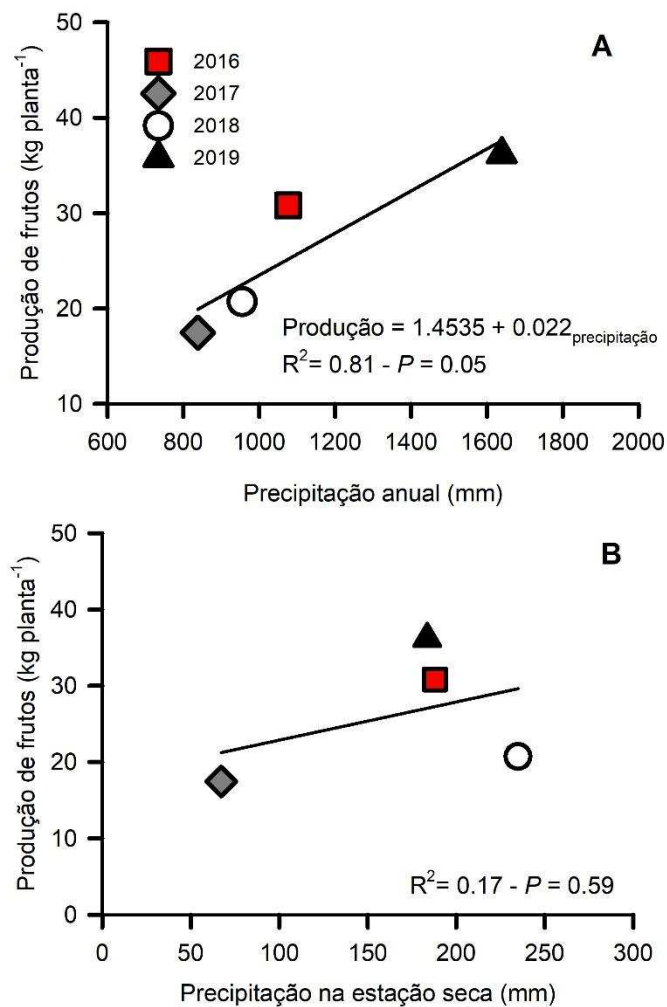
Os valores médios de produção de frutos para as 48 plantas do estudo foram de 30.8, 17.5, 20.7 e 36.1 kg de frutos por planta nos anos 2016, 2017, 2018 e 2019, respectivamente (Figura 3). A resposta da produção de frutos em função da precipitação anual ajustou-se ao modelo linear crescente, com incremento em média de 2,2 kg de frutos para cada 100 mm de precipitação ( $R^2= 0.81$ ;  $P < 0.05$  – Figura 4 A). Já para a produção de frutos em função da precipitação acumulada na estação seca, não houve ajuste de modelo ( $R^2= 0.17$ ;  $P = 0.59$  – Figura 4 B), indicando não haver relação entre essas variáveis.



**Figura 2.** Variação da precipitação mensal acumulada durante quatro anos de produção da macaúba (2016 a 2019) em Araponga – MG. Caixas superiores mostram os valores da precipitação total de cada ano, de uma colheita a outra (de fevereiro a janeiro do ano seguinte). Caixas cinzas destacam o período da estação seca em cada ano (abril a setembro) e os respectivos valores de precipitação acumulada. O mês de colheita de cada ano está destacado na parte inferior do gráfico, como sendo o mês de janeiro.



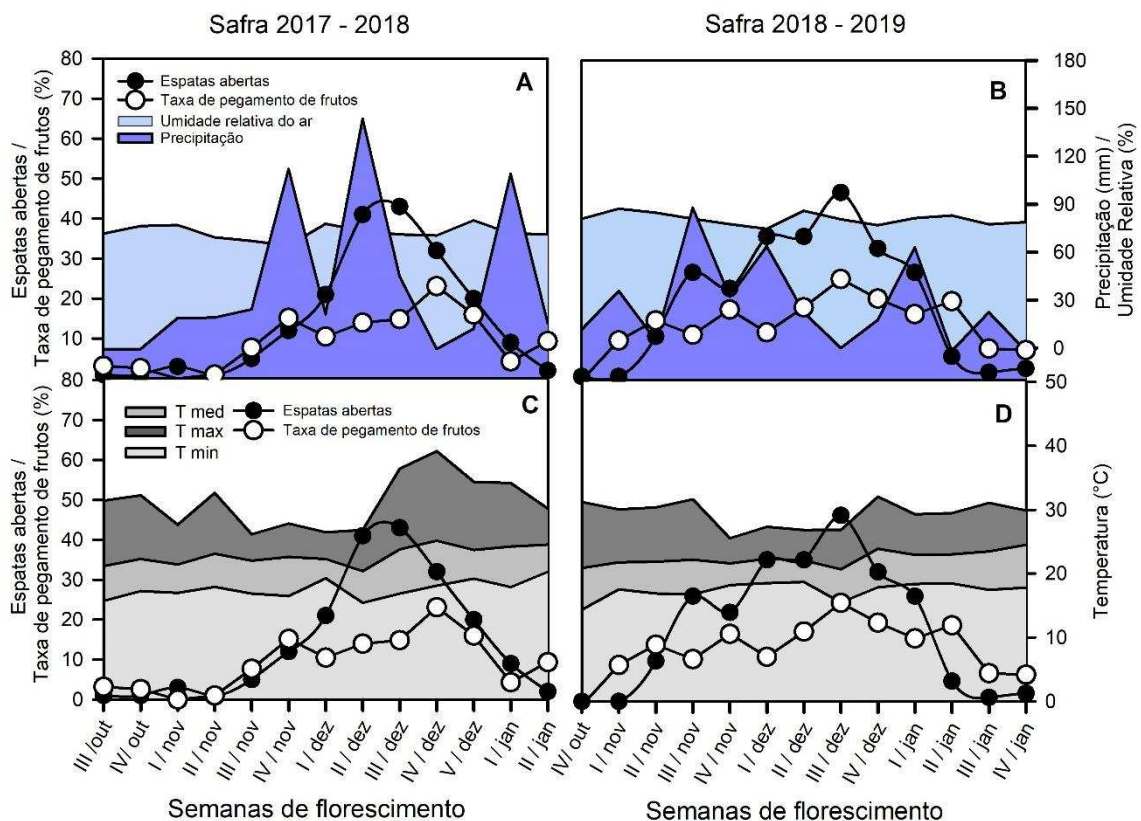
**Figura 3.** Produção média de frutos por planta em 48 plantas de macaúba avaliadas durante quatro anos consecutivos (2016 a 2019) em Araponga – MG. As linhas sólidas nos boxes representam as medianas, e símbolos vermelhos (●) representam as médias.



**Figura 4.** Produção de frutos de macaúba em resposta à precipitação anual acumulada (A) e a precipitação acumulada na estação seca (meses de abril a setembro) (B) durante quatro anos de avaliação experimental em Araponga – MG. Cada símbolo representa um ano de avaliação.

### *Fatores ambientais, abertura de espatas e taxa de pegamento de frutos*

Durante as safras de 2017/2018 e 2018/2019, os fatores ambientais e a quantidade de espatas abertas, foram monitorados semanalmente a partir da abertura da primeira espata até a última. Posteriormente, foram obtidas as taxas de pegamento de frutos, considerando a semana de abertura das espatas (Figura 5).



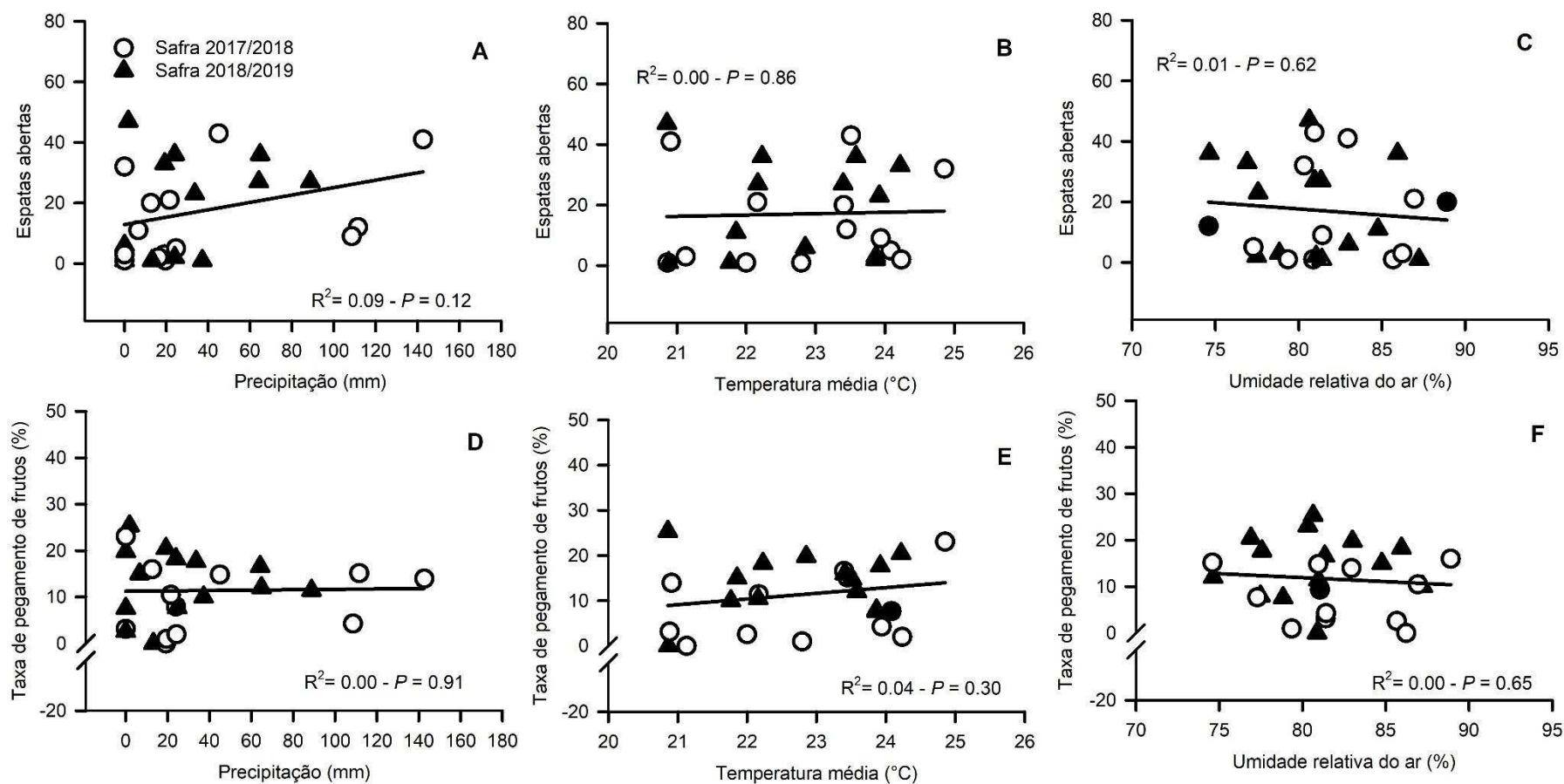
**Figura 5.** Quantidade de espatas abertas (símbolos fechados), taxa de pegamento de frutos (símbolos abertos) e os fatores ambientais: precipitação e umidade relativa do ar (A e B) e temperaturas máxima, média e mínima (C e D) registrados durante as semanas de florescimento da macaúba nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 em Araçuaia - MG.

As precipitações acumuladas durante as semanas de florescimento das safras 2017/2018 e 2018/2019, foram respectivamente 522 mm e 377 mm (Figuras 5 A e B). Durante o florescimento da safra 2017/2018, a precipitação semanal variou de 0 mm a 143 mm, com chuvas mais intensas a partir da quinta semana de florescimento (semana III/nov) e a média de umidade relativa do ar da safra 2017/2018 foi de 82%, variando de 74.5% (semana IV/nov.) a 89% (semana V/dez.) (Figuras 5 A). Já na safra de 2018/2019, a variação da precipitação foi de 0 mm a 89 mm, com uma melhor distribuição das chuvas ao longo do período, em comparação com a safra anterior, enquanto que a média de umidade relativa do ar foi de 80.7%, com variação de 74.6% (semana I/dez.) a 87% (semana I/nov.) (Figura 5B). No período de florescimento da safra 2017/2018, as temperaturas máximas, médias e mínimas variaram ao

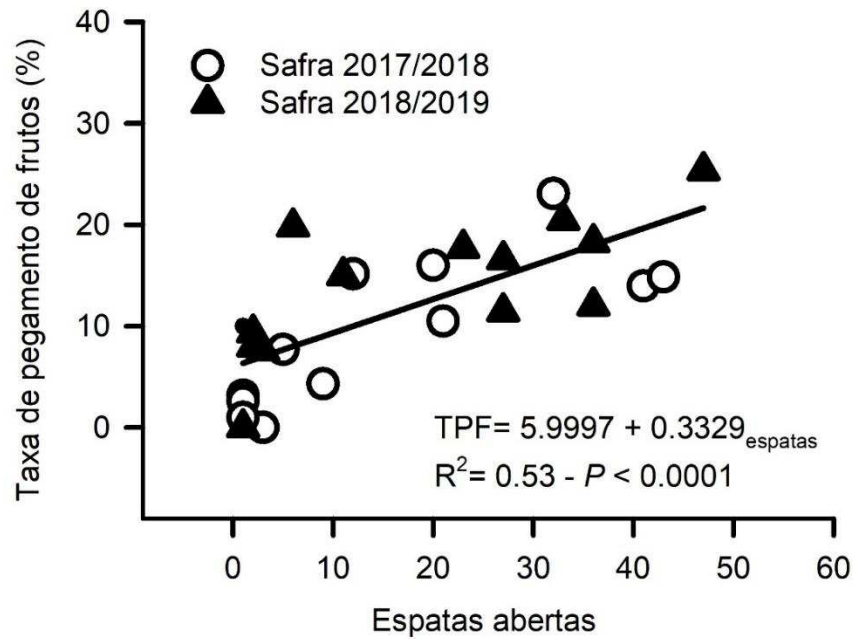
longo do período (Figura 5 C), com respectivos valores médios de 31 °C, 22.8 °C e 17.8 °C. Na safra 2018/2019, as temperaturas máxima, média e mínima registradas durante o período de florescimento, foram bem semelhantes aos da safra anterior, com valores médios de 30.2 °C, 22.7 °C e 17.7 °C, respectivamente (Figura 5 D).

Na safra 2017/2018, foi registrado a abertura de 191 espatas, com menor ocorrência no início e final do período de florescimento (Figuras 5 A, C e E). A partir da quarta semana (semana II/nov.), houve um incremento na quantidade de espatas abertas, com o pico de abertura de 43 espatas ocorrendo na semana III/dez, e uma tendência de redução a partir dessa semana até o final do período. Na safra 2018/2019, houve uma maior quantidade de espatas abertas em comparação com a safra anterior, com um total de 253. Entretanto, a abertura das espatas foi melhor distribuída ao longo dos três meses de florescimento, com o pico de abertura também na semana III/dez (47 espatas), semelhante à safra anterior (Figuras 5 B, D e F). Para a safra de 2017/2018, as taxas de pagamento de frutos variaram de 0% a 23% ao longo do período de florescimento, concentrando as maiores taxas para as espatas abertas a partir da semana II/nov. (Figuras 5 A, C e E), com redução nas taxas a partir dessa semana até o final do período de florescimento. Na safra 2018/2019, a taxa de pagamento de frutos variou de 0% a 25.3%, com taxas mais uniformes entre as semanas de florescimento em comparação com a safra anterior, sendo observado incrementos já a partir da segunda semana (Figuras 5 B, D e F).

Em relação a análise de regressão, não houve ajuste de modelo para as relações entre a quantidade de espatas abertas com os fatores ambientais registrados durante o período de florescimento: precipitação ( $R^2 = 0.09$ ;  $P = 0.12$ ), temperatura média ( $R^2 = 0.00$ ;  $P = 0.86$ ) e umidade relativa do ar ( $R^2 = 0.01$ ;  $P = 0.62$ ) (Figuras 6 A, B e C). De maneira semelhante, não houve relação entre a taxa de pagamento de frutos em função da precipitação ( $R^2 = 0.00$ ;  $P = 0.91$ ), temperatura média ( $R^2 = 0.04$ ;  $P = 0.30$ ) e umidade relativa do ar ( $R^2 = 0.00$ ;  $P = 0.65$ ) registrados no período de florescimento (Figuras 6 D, E e F), indicando ausência de relação nessas variáveis para esse período. Entretanto, a relação entre a taxa de pagamento de frutos e a quantidade de espatas abertas ajustou-se ao modelo linear crescente, com incrementos médios de 0.33% sobre a taxa de pagamento de frutos para cada aumento de 1 espata aberta ( $R^2 = 0.53$ ;  $P < 0.0001$  - Figura 7).



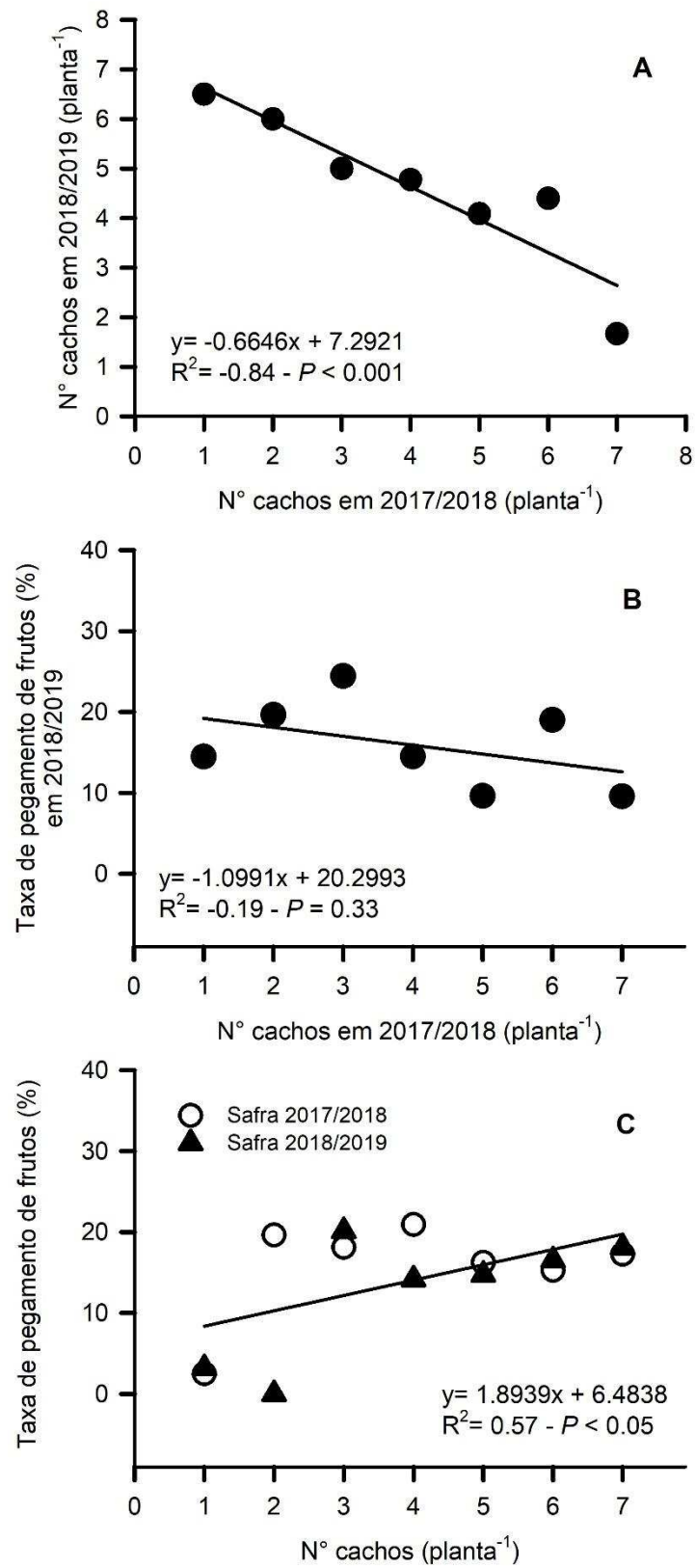
**Figura 6.** Relação entre a quantidade de espatas abertas com a precipitação (A), temperatura média (B) e umidade relativa do ar (C) e entre a taxa de pegamento de frutos com a precipitação (D), temperatura média (E) e umidade relativa do ar (F) registrados durante o período de florescimento das safras 2017/2018 (símbolos abertos) e 2018/2019 (símbolos fechados). Cada símbolo representa os valores semanais.



**Figura 7.** Taxa de pagamento de frutos – TPF em função da quantidade de espatas abertas avaliadas em 48 plantas de macaúba durante as safras de 2017/2018 (símbolos abertos) e 2018/2019 (símbolos fechados). Cada símbolo representa os valores semanais do período de florescimento.

#### *Variação reprodutiva entre safras*

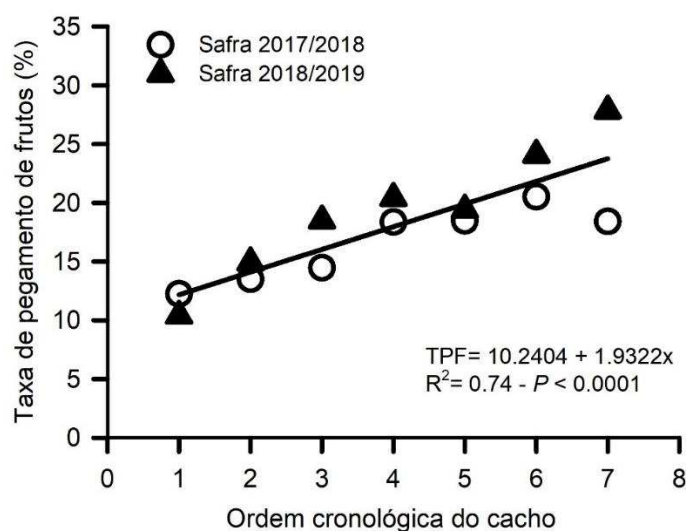
Análise de regressão revelou que o número de cachos entre as duas safras ajustou-se a um modelo linear decrescente ( $R^2 = -0.84$ ;  $P < 0.001$ ) com redução em média de 0.66 cachos por planta numa safra para cada incremento em 1 cacho por planta da safra anterior (Figura 8 A). Para a relação entre o número de cachos produzidos na safra 2017/2018 com a taxa de pagamento de frutos da safra seguinte (2018/2019) não houve ajuste de modelo ( $R^2 = -0.19$ ;  $P = 0.33$  – Figura 8 B), entretanto, a taxa de pagamento de frutos foi influenciada pelo número de cachos da sua respectiva safra ajustando-se ao modelo linear crescente, com incremento médio em 1.9% na taxa de pagamento de frutos para cada aumento em 1 cacho produzido pela planta ( $R^2 = 0.57$ ;  $P < 0.05$ ) (Figura 8 C).



**Figura 8.** Relação entre o número de cachos produzidos nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 (A), número de cachos produzidos na safra de 2017/2018 com a taxa de pegamento da safra de 2018/2019 (B) e o número de cachos produzidos por planta com a respectiva taxa de pegamento de frutos (C). Símbolos abertos e fechados são referentes às safras de 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente.

### ***Variação reprodutiva entre cachos***

A resposta da taxa de pagamento de frutos em função da ordem cronológica dos cachos ajustou-se ao modelo linear crescente ( $R^2 = 0.74$ ;  $P < 0.0001$ ), com incrementos em média de 1.9% na taxa de pagamento de frutos em para cada incremento de 1 cacho de frutos em sua ordem cronológica (Figura 9).



**Figura 9.** Resposta da taxa de pagamento de frutos em função da ordem da ordem cronológica do cacho das safras 2017/2018 (símbolos abertos) e 2018/2019 (símbolos fechados).

### **Discussão**

#### ***A variação interanual da precipitação exerce influência na produção de frutos de macaúba***

O maior nível de precipitação anual beneficiou a produção de frutos da macaúba. A diferença entre o ano de maior e menor precipitação anual foi de 802 mm, refletindo em ganhos médios de 18.6 kg na produção de frutos (por planta) para o ano de maior precipitação (Figura 3). A variabilidade nos níveis de chuva entre os anos tem sido cada vez mais frequente, principalmente em decorrência das mudanças climáticas (PENDERGRASS *et al.*, 2017). Essa variação frequentemente vem acompanhada de outras alterações ambientais, como aumento de temperatura e déficit de pressão de vapor, reduções na umidade relativa do ar e umidade do solo, que sinergicamente podem comprometer o crescimento e rendimento das plantas (TANI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020). Para esse primeiro ensaio, os esforços foram primeiramente para quantificar dados de precipitação, porém, uma possível redução de umidade do solo nos anos com menores índices de chuvas não podem ser descartada. Embora o impacto dessas alterações dependa da espécie, outros trabalhos já comprovaram que a produção de frutos de macaúba é afetada pela oferta de água no solo, seja em função da topografia da área (Capítulo II) ou por fornecimento artificial (Capítulo III).

Os efeitos da variação da precipitação interanual sobre o rendimento das palmeiras ainda não estão bem esclarecidos. Entretanto, é sabido que uma restrição hídrica afeta os processos de expansão foliar da macaúba, sendo comum observar acúmulo de folhas recém-formadas com atraso de abertura. Essa alteração no crescimento vegetativo causa um desbalanço na relação fonte-dreno da planta, uma vez que as potenciais fontes – folhas expandidas e fotossinteticamente ativas – são reduzidas, enquanto que os drenos (frutos em formação) continuam a demanda por energia (MIALET-SERRA *et al.*, 2008). Dessa forma, a produção de assimilados torna-se baixa ou insuficiente para garantir o desenvolvimento e sustentação dos frutos até a colheita. Esse comportamento também tem sido observado na palma africana, onde os efeitos da menor precipitação anual são mais evidentes sobre o crescimento e desenvolvimento vegetativo, que por sua vez, causam efeitos indiretos sobre a produção (LEGROS *et al.*, 2009).

Menores níveis de precipitação são capazes de ocasionar estresse hídrico nas plantas e reduções na capacidade fisiológica (YAN; ZHONG; SHANGGUAN, 2016). Alguns efeitos pontuais da menor disponibilidade hídrica são observados sobre a condutância estomática, taxa de assimilação de CO<sub>2</sub>, produção de fotoassimilados e ganhos de biomassa da palma africana (CARR, 2011a) e em coqueiro (GOMES *et al.*, 2008), assim como para a macaúba (ver capítulos II e III). Além disso, o aborto de frutos em estádios mais desenvolvidos tem sido mais frequente em anos mais secos, indicando um maior desgaste fisiológico da macaubeira.

Para a macaúba que apresenta sobreposição de safras (MONTROYA *et al.*, 2016), a maior e melhor distribuição das chuvas, certamente contribui para a manutenção dos processos metabólicos durante todo o ano e entre os anos, levando a um estoque contínuo de reservas nos órgãos vegetativos, para uso posterior no crescimento vegetativo e reprodutivo. Conforme observado no Capítulo III deste estudo, alguns parâmetros fisiológicos da macaúba, como potencial hídrico foliar, fotossíntese líquida e condutância estomática, foram favorecidos durante a estação seca pela suplementação hídrica, e conseqüentemente, houve maior produção de frutos, confirmando a importância do fator água para a essa espécie.

Por outro lado, os efeitos da variabilidade das chuvas em palmeiras por vezes não são percebidos a curto prazo, mas sim, anos após o evento de seca. Em coqueiro, a produção de frutos de inflorescências formadas em anos de seca, foram reduzidos drasticamente, sendo a sua diferenciação ocorrendo cerca de 44 meses antes da colheita (CARR, 2011b). Para a palma africana, os danos causados por um ano de baixa precipitação sobre a produção, somente são visualizados cerca de 29 meses posteriores a diferenciação floral (ADAM *et al.*, 2005; LEGROS *et al.*, 2009). Entretanto, a fase de diferenciação floral da macaúba ainda carece de

informações, assim como a fase fenológica mais crítica ao déficit hídrico, necessitando de estudos sobre esses aspectos.

De maneira geral, as palmeiras parecem requerer uma quantidade mínima de precipitação anual para expressar seu potencial produtivo. A palma africana, por exemplo, por ser uma planta de origem equatorial, requer precipitações anuais entre 2000 mm e 3000 mm, com distribuição mensal entre 120 e 150 mm (CARR, 2011a; PATERSON *et al.*, 2015). Já a macaúba expressou incrementos de produção com a precipitação anual variando de aproximadamente 1000 mm (ano de 2016) a 1600 mm (ano de 2019), com distribuição média mensal de 80 mm a 135 mm, fato este que pode ser atribuído ao seu ambiente de origem (cerrado), o qual apresenta baixos níveis de precipitação (LORENZI *et al.*, 2010). Falasca *et al.* (2017), em estudo sobre o zoneamento agroclimático para a macaúba, consideraram que as regiões com índices pluviométricos anuais variando de 500 a 1000 mm são adequadas para o cultivo, sendo que acima de 1000 mm, podem ser consideradas como ótimas. Motta *et al.* (2002) encontraram uma ampla distribuição das espécies em locais com precipitação anual variando de 1100 a 1500 mm. Entretanto, esses trabalhos não avaliaram a produção de frutos da planta, sendo possível inferir que a macaúba é responsiva ao incremento da precipitação anual, porém, em menor grau de exigência do que a palma africana.

### ***Os fatores ambientais durante o período de florescimento não influenciam a abertura das espatas e o pegamento dos frutos***

O mecanismo que envolve a abertura das espatas da macaúba, ainda permanece obscuro. Embora as variações nos fatores ambientais durante o período de abertura das espatas não exerceram influência sobre a quantidade de espatas abertas (Figuras 6 A-C), é reconhecido que a ruptura da espata ocorre quando as inflorescências atingem a maturidade e pela ação dos elementos climáticos (SCARIOT *et al.*, 1991; BRITO, 2013). Nos resultados do presente estudo, foi nítido que a emissão das espatas tem início no final da estação seca, e a abertura ocorre com o início das chuvas (ver Figura 1). Para algumas espécies, essa coincidência do florescimento com a estação chuvosa, tem um significado importante para restabelecer o status hídrico das plantas, que após um período de seca, retomam seu desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (BORCHERT, 1994). Nesse caso, o aumento na hidratação celular leva a incrementos na expansão dos tecidos (em especial na inflorescência), que certamente aumenta a pressão sobre a bráctea, ocasionando sua ruptura. Essa sobreposição do florescimento com a estação chuvosa, já havia sido confirmada em outros estudos com macaúba (SCARIOT *et al.*, 1991; BRITO, 2013; SILVA, 2019), e parece ser comum também em outras palmeiras como

*Euterpe oleraceae* (OLIVEIRA *et al.*, 2002), *Euterpe precatória* (KÜCHMEISTER *et al.*, 1997) e várias espécies do gênero *Bactris* (HENDERSON *et al.*, 2000).

Em adição, a macaubeira possui um padrão de florescimento regular, pois a floração sempre ocorre no mesmo período do ano. Essa persistência de uma fase fenológica ocorrendo sempre na mesma época entre os anos, tem sido considerada como resultado de pressões seletivas vivenciadas pela espécie, principalmente em regiões com alta sazonalidade climática, assim como, por controle genético (FENNER, 1998). Como exemplo, a ocorrência da macaúba em ambientes diversos e, em especial os ambientes secos (cerrado principalmente), pode ter levado a espécie a se adaptar e sincronizar seu florescimento com épocas de chuvas, intervalo temporal mais favorável devido a maior disponibilidade de recursos e presença dos polinizadores.

O florescimento é um dos estádios mais críticos do ciclo de vida dos vegetais, principalmente por ser tratar de uma fase determinante na produção final (CRAUFURD; WHEELER, 2009). Considerando que a taxa de pegamento de frutos não foi influenciada pelos fatores ambientais do período de florescimento (Figuras 6 D-F), esse resultado é oposto ao observado em outras palmeiras, onde a condição climática exerce influência sob a frutificação. Em *Attalea speciosa*, por exemplo, a temperatura e o fotoperíodo, correlacionaram-se negativamente com a frutificação de infrutescências jovens, enquanto que em infrutescências verdes, o impacto negativo é ocasionado pela precipitação, umidade relativa do ar e fotoperíodo (ROSA *et al.*, 2020). Tal comportamento pode ser associado à fenologia reprodutiva dessa espécie, em que o florescimento ocorre durante todo o ano e de maneira assíncrona, diferentemente da macaubeira, que concentra o florescimento em determinada época e, portanto, menor chance de exposição às sazonalidades climáticas.

Para espécies que são predominantemente alógamas e cujas inflorescências possuem protoginia (como é o caso da macaúba), a coincidência de fenofases reprodutivas entre os indivíduos, resulta em maior sucesso reprodutivo em função da maior oferta de pólen (SCARIOT *et al.*, 1995; VERDU; GARCIA-FAYOS, 1998), fato confirmado pelo maior sucesso no pegamento de frutos com a maior quantidade de espatas abertas (Figura 7). Durante a fase de florescimento, com a abertura das flores estaminadas, há a liberação de odores atrativos aos polinizadores, com aumento na taxa de visitação e polinização (FILELLA *et al.*, 2013). Para a macaubeira, o pegamento dos frutos parece ser ainda mais intensificado quando a espata se rompe sob menor nível de precipitação (ver Figura 6 D), certamente por favorecer a atividade dos polinizadores e/ou facilitar a dispersão anemocórica do pólen (SILVA & RODAL, 2009; LAWSON & RANDS, 2019). Outro fato adicional é que, uma maior

quantidade de indivíduos com espatas abertas aumenta a variabilidade do pólen disponível, reduzindo a possibilidade de ocorrência de efeitos deletérios causados por depressão endogâmica (SIMIQUELI *et al.*, 2018).

### ***A produção de cachos varia entre as safras e não há competição inter e intra-anual pelos drenos***

A macaubeira possui mecanismos eficientes na regulação do metabolismo dos carboidratos em anos com demandas produtivas diferentes. Conforme apresentado por Rosa (2018), na ocasião de remoção total dos cachos, houve aumento nas concentrações de amido no estipe das plantas, com efeitos positivos sobre o crescimento vegetativo e reprodutivo na safra seguinte. Isso é um indicativo de que a variação no número de cachos entre as safras pode ser uma resposta do desgaste fisiológico sofrido pela planta, em anos de alta demanda energética (DAMATTA *et al.*, 2007), e que há uma necessidade de recuperação no acúmulo das reservas entre as safras. Esse comportamento pode ser confirmado pelo efeito negativo do número de cachos produzidos numa safra sobre a seguinte (Figura 8A), sendo muito comum em espécies que apresentam a supra-anualidade.

A produção bienal tem sido um fato comum em muitas espécies como *Coffea* sp. (SANTINATO *et al.*, 2019), *Malus domestica* (GUITTON *et al.*, 2012) e *Mangifera indica* (CHOUDHARY *et al.*, 2016). Para as palmeiras, a ocorrência dessa bienalidade ainda não foi notificada. No caso da macaubeira, esta parece expressar tal comportamento, porém, o tempo necessário para sua recuperação e se isso ocorre de maneira gradativa, também permanece desconhecido. Um fato adicional para o restabelecimento da macaúba, poderia ser associado a variação nos níveis de precipitação entre os anos, uma vez que tanto a produção de frutos, quanto o número médio de cachos por planta foram incrementados no ano com maior precipitação (safra 2018/2019). Esse resultado tem sido bastante evidente em algumas espécies frutíferas (SINGH; SINGH; KUMAR, 2012).

O pegamento dos frutos recém-formados é independente da quantidade de cachos remanescentes da safra anterior e que, provavelmente, estes não competem pelos mesmos recursos maternos. Conforme descrito por Montoya *et al.* (2016), o tempo médio para o desenvolvimento do fruto da macaúba é de aproximadamente 62 semanas, com mudanças qualitativas e quantitativas ao longo do tempo. Na fase de sobreposição de safras, ao mesmo tempo em que o fruto jovem inicia sua demanda por assimilados, o fruto mais velho se encontra em etapa de biossíntese de ácidos graxos – um processo que ocorre através da degradação do amido (XU *et al.*, 2019). Sendo o amido o composto em maior concentração no caule e em

frutos não maduros da macaúba (ROSA, 2018; MONTOYA *et al.*, 2016), é possível que os requerimentos tanto dos frutos velhos quanto dos jovens, sejam atendidos de maneira independente por essas reservas da planta. Nesse caso, as reservas de amido no mesocarpo dos frutos mais velhos, suprem o requerimento para a biossíntese de óleo (MONTOYA *et al.*, 2016), enquanto que, os carboidratos armazenados no corpo da planta (principalmente no caule), provavelmente são direcionados para as novas inflorescências e infrutescências, como ocorre na palma africana (LEGROS *et al.*, 2009) e no coqueiro (MIALET-SERRA *et al.* 2005). Isso vai em oposto ao observado em outras espécies, onde a presença de frutos em desenvolvimento na planta, pode inibir o pegamento e crescimento de um fruto jovem, devido a competição por recursos disponíveis, ou ainda, por estratégia de dominância (STEPHENSON, 1981; GANESHIAH; SHAANKER, 1994; MARCELIS *et al.*, 2004).

As observações de que o número de cachos produzidos influenciou positivamente o pegamento de frutos do mesmo ano, reforça ainda mais o pressuposto de que para a macaúba, parece não ocorrer competição entre os drenos (em formação, e com os remanescentes), uma vez que uma maior quantidade de cachos poderia representar maior demanda e competição por assimilados (WUBS; HEUVELINK; MARCELIS, 2009). É possível que a maior quantidade de cachos na planta, tenha ocasionado maior pegamento dos frutos (a nível de planta) devido a um maior sucesso da polinização (WALSH; ARNOLD; MICHAELS, 2014), conforme discutido anteriormente nesse estudo. Além disso, mesmo que a macaúba seja predominantemente alógama, ela possui ainda um sistema misto de reprodução (SCARIOT *et al.*, 1995; NUCCI *et al.*, 2008), que pode ter resultado também em autofecundação na ocasião de maior quantidade de cachos resultando em um maior pegamento de frutos a nível de planta.

### ***O pegamento de frutos foi influenciado pela ordem cronológica dos cachos***

Embora a maior quantidade de cachos tenha representado maior sucesso reprodutivo a nível de planta (como visto na figura 8 C), a taxa de pegamento de frutos não ocorreu de maneira igual entre os cachos. Os primeiros a florescer apresentaram menor taxa de pegamento em comparação com os que floresceram posteriormente (Figura 9). As explicações plausíveis para esse maior abortamento nos primeiros cachos, poderia ser associado aos baixos níveis de chuvas, baixa presença de polinizadores, e menor disponibilidade e variabilidade de pólen, que são recorrentes no início da estação de florescimento (BRITO, 2013). Nesse último caso, quando há poucas inflorescências abertas, a variabilidade genética é baixa, levando a possíveis cruzamentos entre indivíduos com alto grau de parentesco, e conseqüentemente à depressão endogâmica, que tem sido apontado como umas das causas do aborto de frutos da macaubeira

(ABREU *et al.*, 2012; LANES *et al.*, 2015; SIMIQUELI *et al.*, 2018). Isso ocorre como uma estratégia reprodutiva da própria espécie, que apesar de apresentar autocompatibilidade entre os indivíduos, é mais favorecida pela heterozigose em detrimento à homozigose (SILVA, 2019). Por outro lado, o florescimento dos primeiros cachos pode ser considerado estratégico para o aumento na atratividade e sobrevivência dos polinizadores, contribuindo para o sucesso produtivo dos cachos futuros (FENNER, 1998).

### **Conclusões**

A produção de frutos de macaúba foi favorecida pelo incremento da precipitação anual, fato que destaca a disponibilidade hídrica como fator determinante ao sucesso reprodutivo dessa espécie, e que possivelmente gera condições mais favoráveis ao crescimento vegetativo e condição fisiológica dessas plantas. Quanto aos demais fatores ambientais: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar analisados no período de florescimento, estes não se mostraram decisivos ao sucesso do pegamento de frutos, demonstrando que a produção final de frutos da macaúba está mais bem relacionada ao aumento em quantidade das chuvas ao longo do ano, quando comparado às variações ambientais que ocorrem em etapas específicas do seu ciclo.

A sobreposição de safras dada pelo ciclo supra-anual da espécie, não tem relação direta com o pegamento de frutos, indicando ausência de competição por recursos entre frutos de safras diferentes e de drenos preferenciais. Entretanto, a produção de cachos de um ano correlaciona-se negativamente com a produção de cachos do ano seguinte, demonstrando um comportamento de bienalidade na macaúba, como é observado em outras culturas, como o café.

A frutificação da macaúba é influenciada pela cronologia de abertura das espatas, com os primeiros cachos apresentando menor pegamento de frutos, possivelmente devido à baixa ocorrência das chuvas iniciais da estação, menor variabilidade/disponibilidade de pólen e baixa atividade dos polinizadores.

### **Agradecimentos**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## Referências

- ABREU, A. G. *et al.* The genetic structure and mating system of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, n. 1, p. 119–121, 2012.
- ADAM, H. *et al.* Reproductive developmental complexity in the African oil palm (*Elaeis guineensis*, Arecaceae). **American Journal of Botany**, v. 92, n. 11, p. 1836–1852, 2005. Available at: <https://doi.org/10.3732/ajb.92.11.1836>
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ASCOUGH, G. D. *et al.* Flower abscission: Environmental control, internal regulation and physiological responses of plants. **South African Journal of Botany**, v. 71, n. 3–4, p. 287–301, 2005. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0254-6299\(15\)30101-0](https://doi.org/10.1016/S0254-6299(15)30101-0)
- BORA, P. S.; ROCHA, R. V. M. Macaíba Palm: Fatty and amino acids composition of fruits macaíba. **Ciencia y Tecnologia Alimentaria**, v. 4, n. 3, p. 158–162, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1080/11358120409487755>
- BORCHERT, R. Soil and stem water storage determine phenology and distribution of tropical dry forest trees. **Ecology**, v. 75, n. 5, p. 1437–1449, 1994. Available at: <https://doi.org/10.2307/1937467>
- BRITO, A. C. **Biologia reprodutiva de macaúba: floração, polinizadores, frutificação e conservação de pólen**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, p. 47, 2013.
- BURD, M. "Excess" flower production and selective fruit abortion: A model of potential benefits. **Ecology**, v. 79, n. 6, p. 2123–2132, 1998.
- CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coconut (*Cocos nucifera*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 27–51, 2011a. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479710000931>
- CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 629–652, 2011b. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479711000494>
- CHOUDHARY, R. K. *et al.* Detection of biennial rhythm and estimation of repeatability in mango (*Mangifera indica* L.). **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, v. 76, n. 1, p. 88–97, 2016. Available at: <https://doi.org/10.5958/0975-6906.2016.00020.1>
- CRAUFURD, P. Q. WHEELER, T. R. Climate change and the flowering time of annual crops. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n. 9, p. 2529–2539, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp196>
- DAMATTA, F. M. *et al.* Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 485–510, 2007.
- FALASCA, S.; ULBERICH, A.; PITTA-ALVAREZ, S. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*).

**Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1321–1333, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1850-6>

FENNER, M. The phenology of growth and reproduction in plants. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 1, n. 1, p. 78–91, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00053>

FERNANDES, P. *et al.* Do climatic and habitat conditions affect the reproductive success of an invasive tree species? An assessment of the phenology of *Acacia longifolia* in Portugal. **Plant Ecology**, v. 216, n. 2, p. 343–355, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0441-9>

FILELLA, I. *et al.* Floral advertisement scent in a changing plant-pollinators market. **Scientific Reports**, v. 3, p. 1–6, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep03434>

GANESHIAH, K. N.; SHAANKER, R. U. Seed and fruit abortion as a process of self organization among developing sinks. **Physiologia Plantarum**, v. 91, n. 1, p. 81–89, 1994. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00662.x>

GOMES, F. P. *et al.* Photosynthetic limitations in leaves of young Brazilian Green Dwarf coconut (*Cocos nucifera* L' nana') palm under well-watered conditions or recovering from drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 62, n. 3, p. 195–204, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.08.006>

GUITTON, B. *et al.* Genetic control of biennial bearing in apple. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 131–149, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/err261>

HENDERSON, A. *et al.* Flowering phenology of a palm community in a central Amazon forest. **Brittonia**, v. 52, n. 2, p. 149–159, 2000. Available at: <https://doi.org/10.2307/2666506>

HIANE, P. A. *et al.* Óleo da polpa e amêndoa de bocaiúva, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. caracterização e composição em ácido graxos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 3, p. 256–259, 2005.

SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 101 p, 2009

KÜCHMEISTER, H.; SILBERBAUER-GOTTSBERGER, I.; GOTTSBERGER, G. Flowering, pollination, nectar standing crop, and nectaries of *Euterpe precatória* (Arecaceae), an Amazonian rain forest palm. **Plant Systematics and Evolution**, v. 206, n. 1–4, p. 71–97, 1997. Available at: <https://doi.org/10.1007/bf00987942>

LANES, É. C. M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the macaw palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex situ germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102–112, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>

LAWSON, D. A.; RANDS, S. A. The effects of rainfall on plant–pollinator interactions. **Arthropod-Plant Interactions**, v. 13, n. 4, p. 561–569, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11829-019-09686-z>

LEGROS, S. *et al.* Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photoperiod and climate variability. **Annals of Botany**, v. 104, n. 6, p. 1171–1182, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1093/aob/mcp214>

LORENZI, H. *et al.* **Flora brasileira: Arecaceae (palmeiras)**. Instituto Plantarum. Nova Odessa, Nova Odessa, p. 368, 2010.

MARCELIS, L. F. M. *et al.* Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 406, p. 2261–2268, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh245>

MIALET-SERRA, I. *et al.* Whole-plant adjustments in coconut (*Cocos nucifera*) in response to sink-source imbalance. **Tree Physiology**, v. 28, n. 8, p. 1199–1209, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1093/treephys/28.8.1199>

MONTOYA, S. G. *et al.* Registro da presença e danos causados por coleopteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.763>

MONTOYA, S. G. *et al.* Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927–938, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2558-7>

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, P. E. F. *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: Relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700017>

NUCCI, S. M. *et al.* Development and characterization of microsatellites markers from the macaw. **Molecular Ecology Resources**, v. 8, n. 1, p. 224–226, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2007.01932.x>

OLIVEIRA, M. S. P. *et al.* Cultivo do açaizeiro para produção de frutos. **Circular técnica**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, v. 26, p. 1–18, 2002.

PATERSON, R. R. M. *et al.* Future climate effects on suitability for growth of oil palms in Malaysia and Indonesia. **Scientific Reports**, v. 5, n. October, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep14457>

PENDERGRASS, A. G. *et al.* Precipitation variability increases in a warmer climate. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–9, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>

PIMENTEL, L. D. *et al.* Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1a aproximação. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 256, p. 20–30, 2011.

RACSKÓ, J. *et al.* Fruit drop: The role of inner agents and environmental factors in the drop of flowers and fruits. **International Journal of Horticultural Science**, v. 13, n. 3, 2007. Available at: <https://doi.org/10.31421/ijhs/13/3/741>

- RANASINGHE, C.; SILVA, L.; PREMASIRI, R. Major determinants of fruit set and yield fluctuation in coconut (*Cocos nucifera* L.). **Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka**, v. 43, n. 3, p. 253, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v43i3.7955>
- ROSA, B. L. **Alterações fotossintéticas e metabólicas em respostas a variação sazonal e manipulação fonte-dreno em *Acrocomia aculeata* (Jacquin) Loddies ex Martius (Arecaceae)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 42 p. 2018.
- ROSA, J. C. *et al.* Phenological reproductive pattern of the *Attalea speciosa* mart ex spreng. In pasture area in the central region of Rondônia. **Floresta**, v. 50, n. 2, p. 1335–1344, 2020. Available at: <https://doi.org/10.5380/ufv.v50i2.63713>
- SANTINATO, F. *et al.* Morphological and productive influence of harvest on coffee plants. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 1, p. 144–150, 2019. Available at: <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.01.p6955>
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; SANTOS, L. H. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2aed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata*: Patterns and consequences. **Biotropica**, v. 27, n. 2, p. 168, 1995. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388992>
- SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil. **Biotropica**, v. 23, n. 1, p. 12, 1991. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388683>
- SILVA, M. C. N. A.; RODAL, M. J. N. Padrões das síndromes de dispersão de plantas em áreas com diferentes graus de pluviosidade, PE, Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, v. 23, n. 4, p. 1040 – 1047, 2009
- SILVA, T. C. **Cruzamentos dirigidos e caracterização de híbridos F1 de plantas de macaúbas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 88p, 2019.
- SIMIQUELI, G. F. *et al.* Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 652–659, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.068>
- SINGH, B.; SINGH, J.; KUMAR, P. Rainfall-fruit production relationships : An analysis. In: 2012. **International Conference on Sustainable Agriculture for Food and Livelihood Security**. 2012. p. 479–480.
- STEPHENSON, A. G. Flower and fruit abortion: proximate causes and ultimate functions. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 12, n. 1, p. 253–279, 1981. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.12.110181.001345>
- TANI, N. *et al.* Small temperature variations are a key regulator of reproductive growth and assimilate storage in oil palm (*Elaeis guineensis*). **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57170-8>

- VERDU, M.; GARCIA-FAYOS, P. Ecological causes, function, and evolution of abortion and parthenocarpy in *Pistacia lentiscus* (Anacardiaceae). **Canadian Journal of Botany**, v. 76, n. 1, p. 134–141, 1998. Available at: <https://doi.org/10.1139/cjb-76-1-134>
- WALSH, R. P.; ARNOLD, P. M.; MICHAELS, H. J. Effects of pollination limitation and seed predation on female reproductive success of a deceptive orchid. **AoB PLANTS**, v. 6, n. June, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1093/aobpla/plu031>
- WILLIAMS, P. A. *et al.* Impact of climate variability on pineapple production in Ghana. **Agriculture and Food Security**, v. 6, n. 1, p. 1–14, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1186/s40066-017-0104-x>
- WUBS, A. M.; HEUVELINK, E.; MARCELIS, L. F. M. Abortion of reproductive organs in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.): A review. **Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 84, n. 5, p. 467–475, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512550>
- XU, X. *et al.* Upregulated lipid biosynthesis at the expense of starch production in potato (*Solanum tuberosum*) vegetative tissues via simultaneous downregulation of ADP-glucose pyrophosphorylase and sugar dependent expressions. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1–18, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01444>
- YAN, W.; ZHONG, Y.; SHANGGUAN, Z. A meta-analysis of leaf gas exchange and water status responses to drought. **Scientific Reports**, v. 6, n. February, p. 1–9, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep20917>
- YOUNG, L. W.; WILEN, R. W.; BONHAM-SMITH, P. C. High temperature stress of *Brassica napus* during flowering reduces micro- and megagametophyte fertility, induces fruit abortion, and disrupts seed production. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 396, p. 485–495, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh038>
- ZHANG, P. *et al.* Profile distribution of soil moisture response to precipitation on the Pisha sandstone hillslopes of China. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2020.

---

## CAPÍTULO II

---

### **Interferência da densidade do plantio e topografia do terreno no status hídrico, trocas gasosas e produção de frutos de macaúba**

Maria Antonia Machado Barbosa<sup>1\*</sup>; Leonardo Duarte Pimentel<sup>1\*\*</sup>; Kacilda Naomi Kuki<sup>1</sup>; José Antônio Saraiva Grossi<sup>1</sup>; Paulo Henrique Honorato Salla<sup>1</sup>

#### **Afiliações**

<sup>1</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

#### **\*Autor correspondente**

Maria Antonia Machado Barbosa

E-mail: mabarbosa483@gmail.com

Endereço: Avenida Peter Henri Rolfs, s/nº, Viçosa, Minas gerais, Brasil.

Departamento de Agronomia

Universidade Federal de Viçosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-0599>

#### **\*\* Coordenador geral da pesquisa**

## Resumo

A macaúba é uma palmeira oleaginosa com alta capacidade de aclimação a diversos ambientes. É possível que o seu potencial produtivo seja muito superior aos observados atualmente, uma vez que o abortamento de frutos antes do ponto de colheita tem sido um problema recorrente. A densidade do plantio e a escolha da topografia do terreno, são práticas que podem afetar o microambiente do campo e interferir nas respostas fisiológicas e produtivas dos vegetais, como a frutificação. O objetivo desse trabalho foi investigar a influência de duas densidades de plantio e dois níveis topográficos sobre as trocas gasosas, status hídrico e produção de frutos em plantas de macaúba. O estudo foi realizado na Estação Experimental de Araponga, MG, pertencente a UFV durante duas safras consecutivas. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com duas densidades de plantio ( $DP_{312}$  e  $DP_{494}$  plantas por  $ha^{-1}$ ) e dois níveis topográficos (topo e baixada). Plantas em  $DP_{312}$  receberam maior quantidade de radiação (RFA) em comparação com a densidade  $DP_{494}$ . A condição de baixada apresentou maior umidade do solo em comparação com a área de topo, proporcionando maiores valores de potencial hídrico ( $\Psi_w$ ) para as plantas durante a estação seca. As variáveis de trocas gasosas ( $A$ ,  $g_s$ ,  $C_i$  e  $A/C_i$ ) foram favorecidos positivamente pela combinação da densidade  $DP_{312}$  com a baixada. A taxa de pegamento de frutos nas duas safras avaliadas apresentou correlações positivas com os aumentos de RFA, umidade do solo e  $A$ .  $DP_{312}$  incrementou a produção a nível de planta, porém, não resultou em incrementos no rendimento por área. Conclui-se que sob as condições experimentais avaliadas, a menor densidade de plantio e a área de baixada, favoreceram conjuntamente o potencial hídrico, as trocas gasosas, a frutificação e a produção de frutos por planta, sendo essas respostas dependentes da disponibilidade de irradiância e umidade do solo.

**Palavras-chave:** Oleaginosas. Ecofisiologia. Abortamento de frutos. Práticas agrícolas.

**Abstract**

Macaw palm is an oleaginous palm tree with high capacity for acclimatization to multiple environments. It is possible that its productive potential is much higher than those currently observed, considering that the fruits abortion before the harvest point has been a recurrent problem. Planting density and the choice of topography are practices that can affect microclimate in the field and interfere in the physiological and productive responses of vegetables, such as fruiting. The aim of this work was investigate the influence of two planting densities and two topographic levels on gas exchange, water status and fruit production in macaw palm. The study was carried out at the Experimental Station of Araçuaia, MG, belonging to UFV during two consecutive harvests. A randomized block design was used, with two planting densities (PD<sub>312</sub> and PD<sub>494</sub> plants per ha<sup>-1</sup>) and two topographic levels (top and bottom). Plants in PD<sub>312</sub> received greater amount of radiation (PAR) compared to density PD<sub>494</sub>. The bottom condition showed higher soil moisture compared to the top area, providing higher values of leaf water potential ( $\Psi_w$ ) for plants during the dry season. The gas exchange variables ( $A$ ,  $g_s$ ,  $C_i$  e  $A/C_i$ ) were positively favored by the combination of the PD<sub>312</sub> density with the bottom. The fruit set rate in the two evaluated harvests showed positive correlations with increases in PAR, soil moisture and  $A$ . PD<sub>312</sub> increased production at plant level, however, it did not result in increases in yield per area. We conclude that, under our experimental conditions, the lower planting density and bottom area jointly favored leaf water potential, gas exchange, fructification and fruit production, these responses being dependent on the availability of irradiance and soil moisture.

**Keywords:** Oleaginous. Ecophysiology. Fruit abortion. Agricultural practices.

## Introdução

A macaúba (*Acrocomia aculeata* [Jacq.] Lodd. Ex Mart.) é uma palmeira oleaginosa amplamente distribuída na América Neotropical, com grande importância socioeconômica e ambiental para as populações locais (LORENZI, 2006; LIMA *et al.*, 2018). Seu potencial produtivo e características oleoquímicas, são similares às da palma africana (*Elaeis guineenses*), com elevada produtividade de óleo – estimada em até 6.200 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> – e altas concentrações de ácidos graxos (ácidos oleico, palmítico e láurico), muito indicados para a produção de biodiesel, cosméticos e alimentos (HIANE *et al.*, 2005; MOTOIKE; KUKI, 2009). Ademais, os resíduos sólidos oriundos da extração do óleo podem ser destinados como biomassa para produção de energia calorífica e fonte de fibras e proteína para alimentação animal e humana (EVARISTO *et al.*, 2016). A espécie possui alta adaptabilidade a diversos ambientes, sendo possível encontrar maciços naturais em locais com condições edafoclimáticas variáveis (MOTTA *et al.*, 2002). Esta conjuntura favorável torna a macaúba uma atraente e competitiva fonte de matéria prima para a produção de óleos vegetais.

Tendo em vista as múltiplas possibilidades de aproveitamento do fruto da macaúba, recentes pesquisas têm buscado uma melhor compreensão de seus atributos, a fim de nortear sua domesticação (MANFIO *et al.*, 2011; PIMENTEL *et al.*, 2011; (GOULART, 2014; LANES *et al.*, 2015). Alguns trabalhos têm estimado valores de produtividade de frutos que variam entre 10 e 24 t ha (CETEC, 1983; ROSCOE; RICHETTI; MARANHÃO, 2007). Entretanto, é possível que o potencial produtivo da macaúba seja muito superior, uma vez que o abortamento de frutos antes do ponto de colheita é um problema recorrente, mas pouco compreendido. Assim, há uma grande necessidade de estudos com práticas agrícolas, visando reduzir as perdas de frutos por abortamento, e conseqüentemente, incrementar o rendimento final das plantas.

A densidade do plantio está entre as práticas agrônômicas mais importantes no estabelecimento de uma cadeia produtiva; contudo, ela deve ser implementada após rigorosa investigação, uma vez que a mesma – quando inapropriada – pode afetar o microambiente do campo e interferir no crescimento e desenvolvimento das plantas. Na maioria das culturas, o plantio denso promove um maior rendimento por área (ÇALIŞKAN *et al.*, 2007); entretanto, espaçamentos inadequados podem ocasionar competição intraespecífica por luz, água e nutrientes (COURBIER; PIERIK, 2019). Por outro lado, baixas densidades de plantio podem trazer melhorias fisiológicas e aumento no rendimento a nível de planta, porém, com possível subutilização da área (MWAMLIMA *et al.*, 2020). Em palmeiras oleaginosas, como a palma africana e o coqueiro, existe uma forte relação entre a ótima densidade de plantas com a produção de frutos e rendimento de óleo por área (FERNANDO; BANDARANAYAKE, 1996;

BONNEAU *et al.*, 2014). Alguns trabalhos têm proposto arranjos e densidades de plantio para a macaúba, a depender do sistema de plantio adotado (PULROLNIK *et al.*, 2019; SOUSA *et al.*, 2019). Entretanto, são experiências realizadas com plantas jovens ou em primeiro ano de produção, carecendo de estudos com plantas adultas em estágios reprodutivos mais avançados.

O êxito da cadeia produtiva também depende da escolha do local de cultivo. Diferenças topográficas podem promover respostas diversas de sobrevivência e capacidade produtiva nos vegetais, em resposta às variações ambientais como, temperatura, umidade relativa do ar, incidência de ventos e umidade do solo (OGWANG *et al.*, 2014). Áreas de topo (maior elevação), geralmente apresentam ar mais saturado e temperaturas mais baixas, em decorrência do fluxo ascendente de ar vindo da baixada (HAIS; KUČERA, 2009). Adicionalmente, áreas de baixada (menor elevação) são conhecidas por apresentar solos mais profundos, com maior capacidade de armazenamento de água (BECKER *et al.*, 1988). Maciços naturais de macaúba ocorrem tanto em partes altas da paisagem quanto em encostas e vales de rios, como referência a sua aclimação a diferentes ambientes proporcionados pelo relevo do local que ocupa (MARKLEY, 1956; BHERING *et al.*, 2010).

Pelo exposto acima, acredita-se que a condição de plantio, como a densidade de plantas e a topografia da área, pode influenciar o pegamento de frutos e a produtividade final da macaúba, por meio de alterações no status hídrico e trocas gasosas das plantas, como reflexo de possíveis alterações nos níveis de radiação e umidade do solo. Assim, para nortear o manejo agrícola da macaúba, o presente trabalho teve por objetivo investigar (i) a influência da topografia do terreno e (ii) a interferência da densidade de plantio no desempenho do potencial hídrico foliar, trocas gasosas, frutificação e produtividade de plantas de macaúba em plena fase reprodutiva.

## **Material e Métodos**

### ***Local do estudo e condições edafoclimáticas***

O estudo foi realizado na Estação Experimental de Araponga, MG, pertencente a Universidade Federal de Viçosa (UFV; 20° 39' 16.63" S e 42° 31' 59.40 W) nos anos de 2018 e 2019. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Alumínico argissólico – LVAa, segundo manual de classificação de solos (SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE; SANTOS, 2006). A região tem altitude máxima, mínima e média de 1970 m, 473 m e 909 m, respectivamente, sendo caracterizada como de intensa variação topográfica (Fonte: [www.topographic-map.com](http://www.topographic-map.com)). O clima da região é do tipo Cwb segundo a classificação de

Köppen (JÚNIOR, 2009), com clima temperado úmido e inverno seco. A precipitação anual média é de 1300 mm, com temperatura anual média de 18 °C.

Durante o período experimental, os dados de temperatura e umidade relativa foram registrados com o auxílio de Datalogger (Extech Instruments<sup>®</sup>, modelo DT-500, Leeds, UK), instalados na altura da copa das plantas. Os dados de precipitação foram obtidos por meio de um pluviômetro manual instalado a cerca de 50 m de distância do local do experimento, e a coleta dos dados foi realizada diariamente (Figuras 1A e B). Com base nos dados de temperatura e umidade relativa do ar, foi calculado o déficit de pressão de vapor (DPV), conforme proposto por Jones (1992):

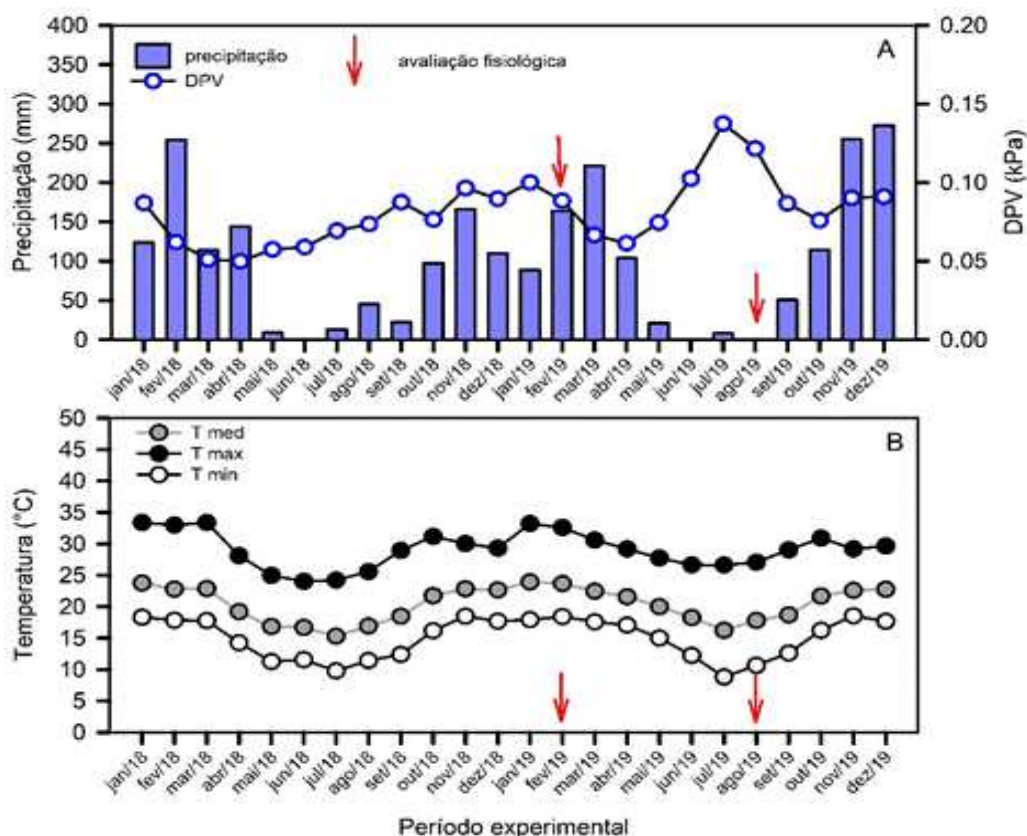
$$DPV_{ar} \text{ (kPa)} = 0.61137e^t * (1-UR/100) \quad (\text{eq. 1})$$

onde t é calculado pela equação 2:

$$t = 17.502 * (T_{arec}) / (240.97 + T_{arec}) \quad (\text{eq. 2})$$

onde  $T_{arec}$  é a temperatura do ar em °C e UR é umidade relativa do ar em %.

As precipitações acumuladas durante o período experimental foram de 1000 mm e 1600 mm para os anos de 2018 e 2019, respectivamente. Na estação seca de cada ano (meses de abril a setembro) a precipitação acumulada foi de 235 mm no ano de 2018 e 184 mm em 2019. O valor médio de DPV em 2018 foi de 0.071, variando de 0.096 a 0.050 kPa ao longo do ano (média de 0.06 na estação seca). Em 2019, a média de DPV foi de 0.091 kPa, variando de 0.137 a 0.061 kPa durante o ano (valor médio de 0.097 kPa na estação seca) (Figura 1A). No ano de 2018, as temperaturas médias, máximas e mínimas registradas foram de 20 °C, 28.8 °C e 14.7 °C, respectivamente. Em 2019, as temperaturas médias, máximas e mínimas registradas foram de 20.8 °C, 29.3 °C e 15.2 °C, respectivamente. Na estação seca de cada ano, foram registradas reduções nas temperaturas, como é característico da estação (Figura 1B).



**Figura 1.** Médias mensais de precipitação e déficit de pressão de vapor – DPV (A), e temperaturas máxima mínima e média avaliadas no período experimental (janeiro de 2018 a dezembro de 2019) em Araponga, MG. As setas vermelhas indicam os meses de realização das avaliações fisiológicas, correspondentes às estações chuvosa (fevereiro) e seca (agosto) do ano de 2019.

### ***Material vegetal e fertilização***





No experimento foram utilizadas plantas adultas de macaúba cultivadas consorciadas com capim braquiária em uma área de plantio experimental de 0.28 hectares (42 m x 65 m). As plantas são oriundas de sementes de matrizes procedentes do estado de Minas Gerais e, no período experimental, encontravam-se com 9 anos de idade e no quinto ano consecutivo de produção. As plantas monitoradas foram escolhidas de maneira criteriosa, com aproximadamente 10 metros de altura e grau de produção similar. Adubações anuais foram realizadas de acordo com a análise de solo e seguindo as recomendações feita por Pimentel *et al.* (2011).

### ***Caracterização do experimento***

A determinação dos tratamentos foi feita com base na densidade do plantio e topografia da área em que as plantas de macaúba estavam inseridas. As plantas encontravam-se arranjadas em sistema de fileira simples, em dois diferentes espaçamentos: 4.5 m x 4.5 m e 8.0 m x 4.0 m

(entre linhas x entre plantas), que resultaram nas densidades de plantio de 494 (DP<sub>494</sub>) e 312 (DP<sub>312</sub>) plantas por hectare, respectivamente, conforme a tabela 1.

**Tabela 1.** Espaçamentos e densidades de plantio utilizados no experimento. As imagens das vistas inferior do dossel e lateral do sub-bosque, detalham a sobreposição da copa das plantas e o grau de sombreamento. Fotos: a autora (2019).

Espaçamento*	Densidade**	Perspectiva inferior do dossel	Perspectiva lateral do sub-bosque
8,0 m x 4,0 m	312		
4,5 m x 4,5 m	494		

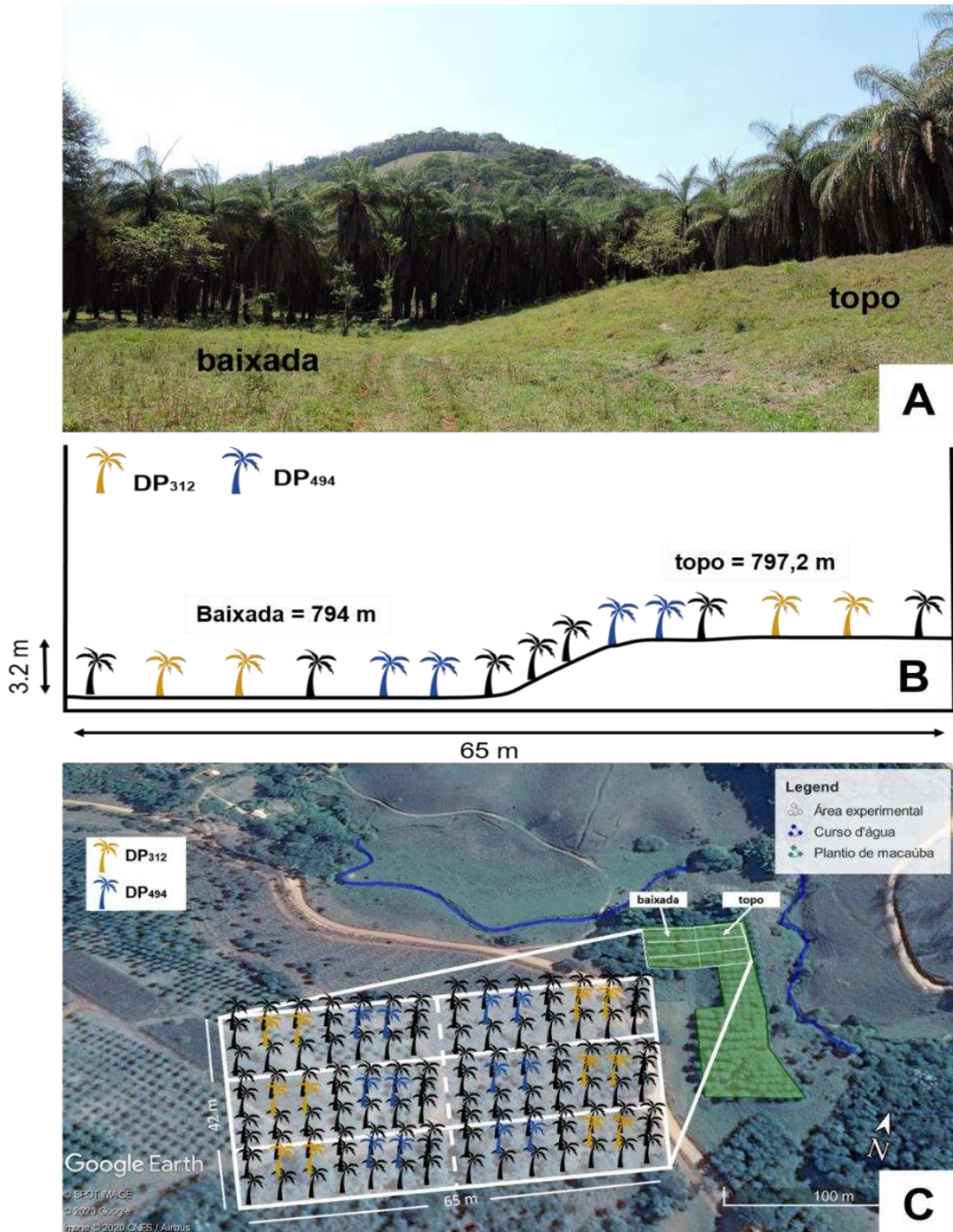
\* entre linhas x entre plantas;

\*\* plantas ha<sup>-1</sup>

As plantas estavam inseridas numa área que apresentava variação topográfica, conforme observado na figura 2 A. A variação altimétrica da área foi determinada pelo método de nivelamento simples, utilizando uma mangueira de plástico transparente, conforme Guimarães *et al.* (2002), revelando um desnível de 3,2 m entre a área mais elevada (797,2 m de altitude - topo) e a mais baixa (794 m de altitude - baixada) (Figura 2 B). A declividade do terreno entre as áreas de topo e baixada foi de 5%, classificando o relevo como suave-ondulado (EMBRAPA, 1979).

### ***Delineamento experimental***

O experimento foi realizado em esquema fatorial 2 x 2, utilizando o delineamento em blocos casualizados com três repetições. Os tratamentos consistiram na combinação de duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) e dois níveis topográficos (topo e baixada) totalizando quatro tratamentos. A parcela útil foi constituída por duas plantas, sendo avaliadas oito plantas por bloco e um total de 24 plantas no experimento. Detalhes da área e croqui experimental são observados na figura 2 C.



**Figura 2.** Detalhe da área experimental mostrando a diferença topográfica do terreno (A) – Fonte: a autora (2019). Iconográfico do gradiente de altitude da área experimental mostrando o perfil de elevação do solo e distribuição das plantas na área de acordo com a densidade de plantio (B). Mapa de localização da Estação Experimental de Araponga com detalhes da área e croqui experimental (C) – Fonte: Google Earth com modificações feitas pela autora.

### *Avaliações*

Os níveis de irradiância, umidade do solo, potencial hídrico foliar e trocas gasosas foram avaliados nas estações chuvosa e seca do ano de 2019. Todos os parâmetros de produção foram determinados no momento da colheita das safras de 2017/2018 e 2018/2019.

### *Quantificação dos níveis de radiação fotossinteticamente ativa (RFA)*

O nível de irradiância foi mensurado para cada densidade de plantio e em campo aberto (sem plantas de macaúba), utilizando um medidor de RFA (ceptômetro AccuPAR LP-80 - Decagon Devices, UK). Por questões operacionais, as medições foram realizadas a uma altura de aproximadamente 1,2 m do solo (altura do peito), pois a altura das plantas dificultou as leituras ao nível do dossel. Um teste inicial revelou não haver diferença nos níveis de irradiância entre as leituras feita a altura do peito ou a altura do dossel. As leituras foram feitas registrando 7 pontos entre as linhas das plantas, sendo quantificada um total de 6 plantas por espaçamento. Cada ponto representou a média de quatro leituras seguindo a direção dos pontos cardeais. As medições ocorreram no intervalo entre 8:00 e 12:00 h.

### *Determinação da umidade do solo*

A umidade do solo foi determinada utilizando a metodologia proposta pela Embrapa (1979). Amostras de solo foram coletadas a uma profundidade de 20 cm, coincidindo com a camada de maior densidade de raízes de macaúba (MOREIRA *et al.*, 2019), e em seis pontos para cada área (topo e baixada). A umidade do solo também foi determinada em campo aberto (sem plantas de macaúba) em seis pontos amostrais e nos dois níveis de elevação, como uma avaliação controle.

### *Status hídrico das plantas e trocas gasosas*

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi determinado utilizando um folíolo destacado por planta, retirado da região mediana da segunda folha completamente expandida (contada do ápice para base) entre os horários de 4:00 h e 5:30 h (antemanhã). As amostras de folíolos foram coletadas no campo e transferidas para o laboratório em sacos herméticos com papel levemente úmido, sendo estes acondicionados em caixa de isopor com gelo para evitar perda de água por transpiração. Para determinar o  $\Psi_w$ , foi utilizado uma câmara de pressão (SCHOLANDER *et al.*, 1964) modelo 3035 (Soil Moisture Equipment Corp., USA) de acordo com as recomendações de Turner (1988).

Variáveis de trocas gasosas foram determinadas utilizando folíolos destacados da região mediana da segunda folha completamente expandida, como proposto por Pires *et al.* (2013) e adotando a metodologia de excisão do folíolo descrita por Rosa (2018) com estabilização fotossintética ocorrendo em no máximo dois minutos. As medições foram feitas utilizando um analisador de gás infra-vermelho (IRGA), modelo portátil LC-Pro (ADC Bioscientific Ltd, Hertfordshire, UK). As avaliações foram realizadas nos horários entre 8:00 e 10:30 h da manhã,

período diário de maior atividade fotossintética da macaúba (PIRES *et al.*, 2013a). A taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) foram medidas sob temperatura, umidade e concentração de  $\text{CO}_2$  ambiente. Na ocasião da estação chuvosa, os valores médios de temperatura, umidade relativa e concentração de  $\text{CO}_2$  no horário das medições, foram respectivamente, 25 °C, 75% e 430 ppm. Na estação seca, os valores obtidos para esses parâmetros foram respectivamente, 20 °C, 78% e 460 ppm. O equipamento foi configurado para fornecer  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiação fotossinteticamente ativa a partir de fonte de luz LED acoplada a câmara. Os valores da eficiência no uso da água foram obtidos através da razão entre a taxa de fotossíntese líquida e a transpiração ( $A / E$ ). A eficiência da carboxilação instantânea foi obtida pela razão entre taxa de fotossíntese líquida e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $A / C_i$ ).

#### *Taxa de pagamento de frutos e parâmetros de produção*

No momento da colheita os cachos foram cortados rentes à estipe e os frutos derriçados para quantificação do número de frutos por cacho (NFC). Posteriormente, as ráquias dos cachos vazios foram cortadas, para obtenção do somatório de ráquias do cacho ( $\sum\text{RC}$ ) e posteriormente calcular o número de flores femininas por método de amostragem. A taxa de pagamento de frutos (TPF) foi atribuída como sendo o inverso do abortamento dos frutos, e foi obtida a partir do número de frutos por cacho - NFC (contados no momento da colheita) e a contagem do número de flores femininas (NFF - conferida pelas suas respectivas cicatrizes nas ráquias), que representam a potencialidade do número de frutos do cacho (equação 3). A precisão do método de amostragem apresentou uma variação de  $1,8 \pm$  flores femininas ( $n = 20$ ) em comparação com o método por contagem de todas as flores femininas do cacho.

$$\text{TPF (\%)} = \text{NFC/NFF} \times 100 \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

NFC = número de frutos do cacho

NFF = número de flores femininas

A contagem do número de flores femininas (NFF) foi realizada por método de amostragem aleatória de ráquias, conforme a equação 4.

$$\text{NFF} = \bar{x}\text{FFR} \times \sum\text{RC} + \text{FFPC} \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

$\bar{x}\text{FFR}$  = média de flores femininas por ráquila

$\Sigma RC$  = somatório de ráquias do cacho

FFPC = flores femininas na ponta do cacho

Características relacionadas ao potencial produtivo das plantas foram avaliadas como: número de frutos por cacho, massa de frutos por cacho ( $\text{kg cacho}^{-1}$ ), produção de frutos ( $\text{kg planta}^{-1}$ ) e produtividade ( $\text{t ha}^{-1}$ ). Após a separação dos frutos dos cachos, estes foram pesados em sua totalidade, utilizando uma balança digital manual para obtenção da massa de frutos por cacho e a produção da planta ( $\text{kg planta}^{-1}$ ). A produtividade foi calculada para cada densidade de plantio, utilizando os dados de produção de frutos por planta.

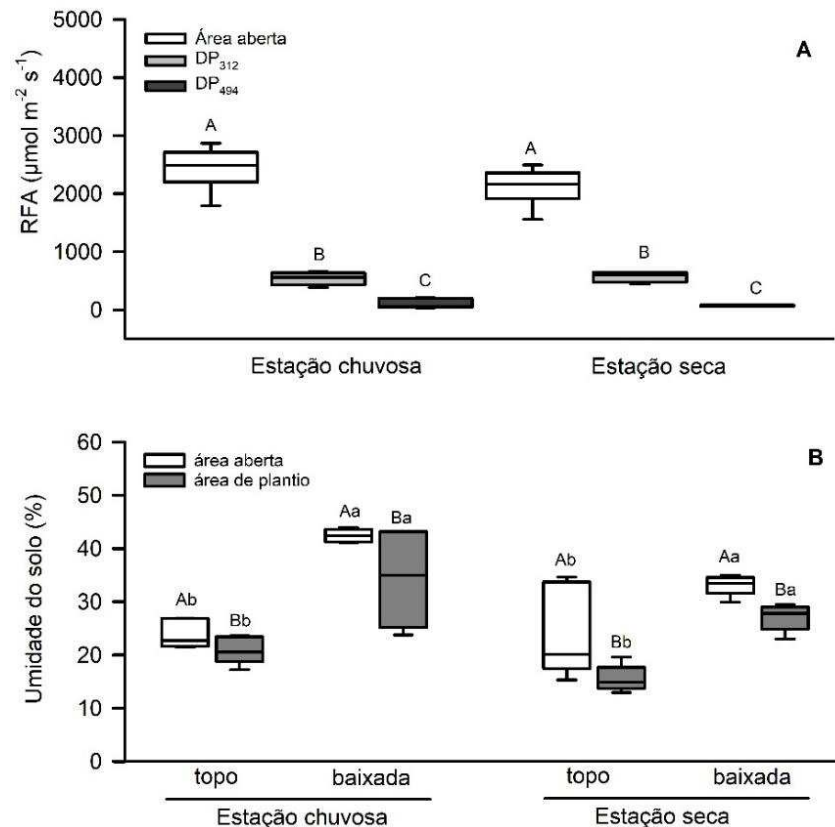
### *Análise estatística*

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e quando detectadas variações significativas, as médias foram contrastadas pelo teste de Duncan a 5% de significância ( $P < 0,05$ ). Análise de regressão ( $R^2$ ) foi utilizada para verificar a relação entre a taxa de pegamento de frutos da safra de 2018/2019 com os níveis de RFA, umidade do solo e fotossíntese líquida ( $A$ ), assim como a relação da produção de frutos com a  $A$ . As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Software R<sup>®</sup> (R Core Team, 2014) utilizando pacotes específicos. Os gráficos foram produzidos a partir do Software Sigmaplot<sup>®</sup> versão 14.0.

## **Resultados**

### *Níveis de irradiância e umidade do solo*

Maiores valores de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) foram observados na condição de área aberta, com valores médios de 2439 e 2121  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  nas estações chuvosa e seca, respectivamente (Figura 3A). Entretanto, nas áreas com plantio, maiores valores de RFA foi observado para a condição DP<sub>312</sub> em comparação com DP<sub>494</sub>, com respectivos valores médios de 539 e 97  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na estação chuvosa e 576 e 71  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  na estação seca. Essa quantificação revelou que tanto na estação chuvosa quanto na seca, os níveis de radiação no interior do dossel das plantas sob DP<sub>312</sub>, foram em média 583% maiores em comparação com DP<sub>494</sub>.



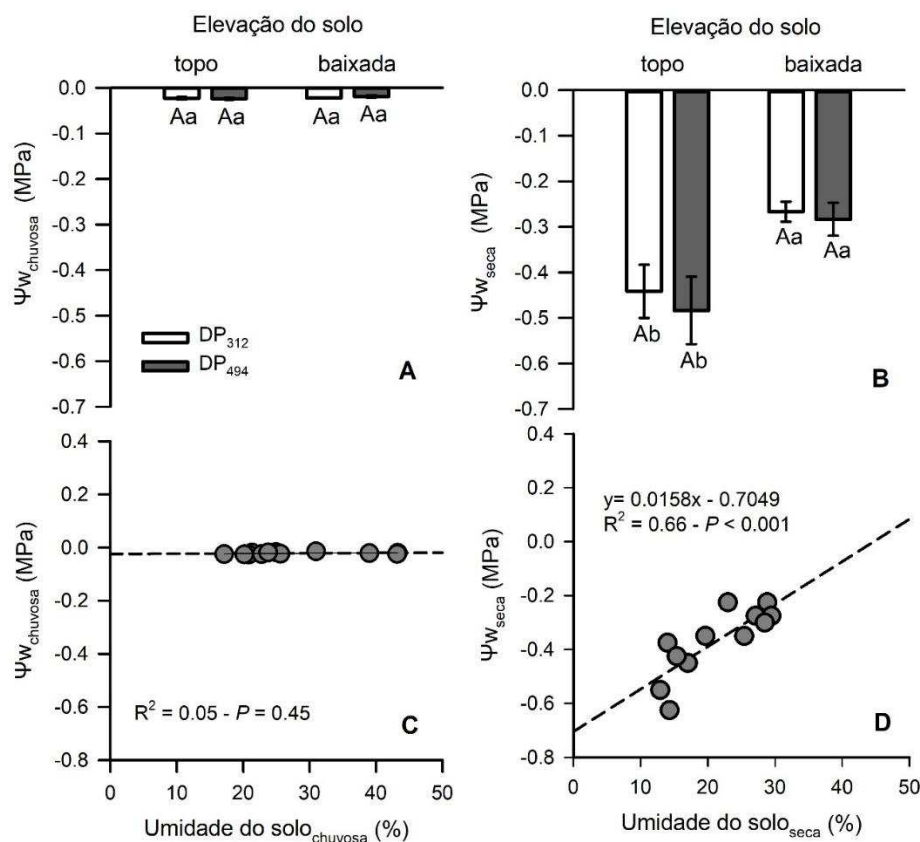
**Figura 3.** Box plot para os parâmetros ambientais avaliados nas estações chuvosa e seca do ano de 2019 em Araponga – MG. (A) valores médios de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) registradas em área aberta (sem plantio de macaúba) e nas densidades de plantio DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade. (n= 6). (B) valores médios de umidade do solo quantificadas em área aberta (sem plantio de macaúba) e em área de plantio nos dois níveis topográficos (topo e baixada) e em ambas estações chuvosa e seca. Letras maiúsculas comparam o efeito da área sem e com plantio de macaúba numa mesma condição topográfica. Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma condição sem e com plantio de macaúba. (n = 6).

A umidade do solo em área aberta foi significativamente maior em comparação com a área de plantio em ambas condições topográficas, com incrementos de 12,4% no topo e 19,2% na baixada (Figura 3B). Durante a estação chuvosa, a umidade do solo na condição de baixada, foi significativamente maior em comparação com a de topo, com valores médios de 34,2% e 20,7% para essas duas condições, respectivamente. Na estação seca, os valores médios de umidade do solo na baixada foi significativamente maior em comparação com o topo, com valores na ordem de 27% e 15,5%, respectivamente. Nesse sentido, houve uma diferença média de 70% na umidade do solo entre as condições de baixada e topo (média para as duas estações).

### **Status hídrico das plantas e trocas gasosas**

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) não diferiu entre os tratamentos na estação chuvosa (Figura 4A), com valores médios de -0,02 MPa. Na estação seca, houve diferença significativa no  $\Psi_w$  entre as plantas em função da condição topográfica (Figura 4B;  $P < 0,05$ ). Os valores

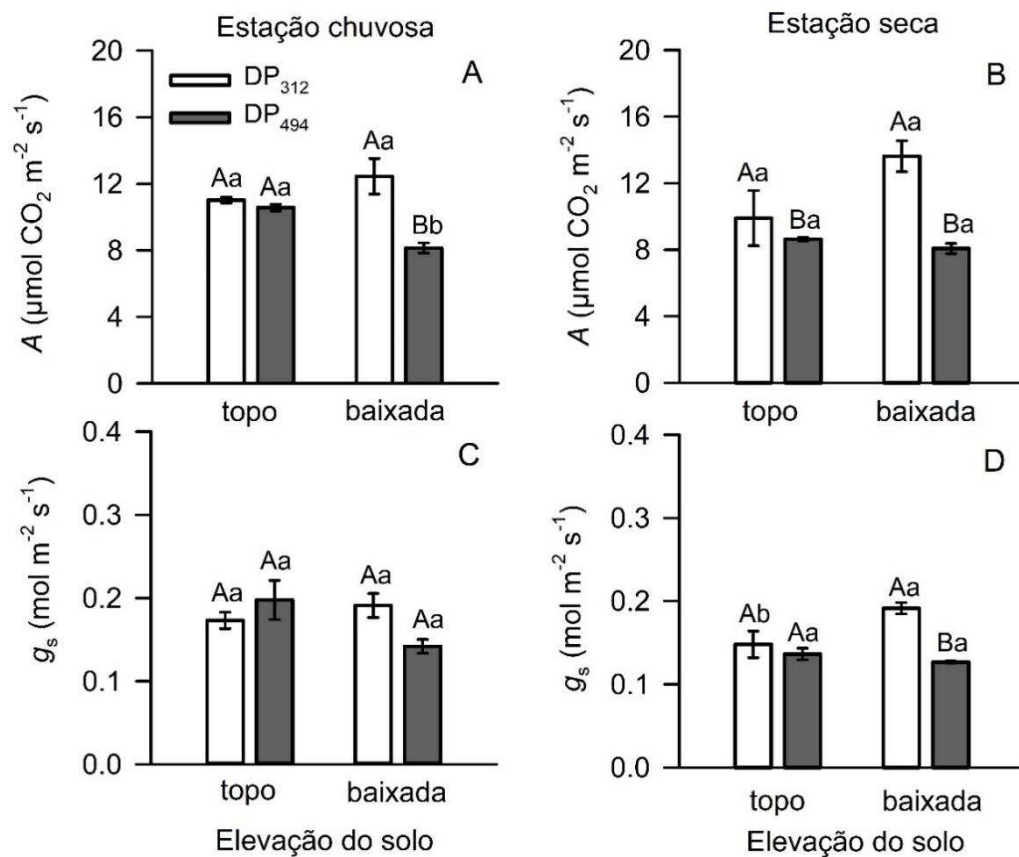
médios de  $\Psi_w$  das plantas em DP<sub>312</sub> cultivadas no topo e na baixada, foram respectivamente -0,44 MPa e -0,27 MPa, com incremento de aproximadamente 63% para as plantas da baixada em comparação com as de topo. Para DP<sub>494</sub>, os valores médios de  $\Psi_w$  na condição de topo e baixada, foram respectivamente, -0,48 MPa e -0,28 MPa, com vantagem de 60% no  $\Psi_w$  das plantas na baixada em comparação com o topo. O  $\Psi_w$  das plantas na estação chuvosa não pode ser explicado pela variação na umidade do solo dessa mesma estação ( $P = 0,45$  – Figura 4 C), entretanto, o  $\Psi_w$  das plantas na estação seca, variou em função da umidade do solo, com ajuste de modelo linear crescente e incrementos médios no  $\Psi_w$  de 0,015 Mpa para cada incremento em 1% na umidade do solo ( $R^2 = 0,66$  - Figura 4D).



**Figura 4:** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) avaliados nas estações chuvosa (A) e seca (B) do ano de 2019, em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica. Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio. Médias  $\pm$  erro padrão da média. (n = 3). Análise de regressão entre umidade do solo e o  $\Psi_w$  das estações chuvosa (C) e seca (D) do ano de 2019.

Houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e condição topográfica para os valores de fotossíntese líquida (A) na estação chuvosa ( $P < 0,05$  – Figura 5A). Na condição de topo, os valores de A foram semelhantes entre as duas densidades de plantio. Entretanto na baixada, DP<sub>312</sub> apresentou aumentos de 53% em comparação com DP<sub>494</sub>. As plantas na condição DP<sub>494</sub> + topo, apresentaram incrementados em 30% em relação à mesma

densidade de plantas na baixada, enquanto que para DP<sub>312</sub> os valores de *A* foram semelhantes nas duas condições topográficas (Figura 5A). Na estação seca, os valores médios de *A* das plantas em DP<sub>312</sub> foram significativamente maiores em comparação com DP<sub>494</sub> em ambas condições topográficas, sendo que as plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram incrementos em 15% e 70% em comparação com DP<sub>494</sub> no topo e baixada, respectivamente, e portanto, com uma discrepância mais expressiva na condição de baixada (Figura 5B). Durante a estação chuvosa, a condutância estomática (*g<sub>s</sub>*) foi semelhante para todas as condições (Figura 5C) (*P* = 0,18). Entretanto, na estação seca, houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e condição topográfica (*P* < 0,05 – Figura 5D). Para as plantas na condição de topo, os valores de *g<sub>s</sub>* foram semelhantes nas duas densidades de plantio. Na baixada, as plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram incrementos de 52% nos valores de *g<sub>s</sub>* em comparação com DP<sub>494</sub> na mesma condição topográfica. As plantas na condição DP<sub>312</sub> na baixada, apresentaram incrementos em cerca de 29% nos valores de *g<sub>s</sub>* em relação a mesma densidade de plantio no topo, enquanto que para DP<sub>494</sub>, a *g<sub>s</sub>* foi semelhante nas duas condições topográficas.



**Figura 5.** Fotossíntese líquida - *A* (A e B) e condutância estomática - *g<sub>s</sub>* (C e D) avaliadas nas estações chuvosa e seca do ano de 2019, em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada. Médias seguida pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica. Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio. Médias  $\pm$  erro padrão da média. (n = 3).

Os valores de transpiração ( $E$ ) na estação chuvosa foram significativamente iguais em todas as condições de cultivo (Tabela 2). Entretanto, na estação seca houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e topografia ( $P < 0,001$ ). Na condição de topo, a  $E$  foi semelhante nas duas densidades de plantio, entretanto na baixada, plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram incrementos de 49% nos valores de  $E$  em comparação com DP<sub>494</sub>. Os valores médios de  $E$  das plantas em DP<sub>312</sub> na baixada foram 47% maior em comparação com a mesma densidade de plantio no topo, enquanto que para DP<sub>494</sub>, a  $E$  foi semelhante nas duas condições topográficas. Houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e condição topográfica para a Eficiência no Uso da Água (EUA) durante a estação chuvosa ( $P < 0,05$ ). Na condição de topo, a EUA foi semelhante para as duas densidades de plantio, porém na baixada, houve um incremento de 43% na EUA para DP<sub>312</sub> em comparação com DP<sub>494</sub>. A EUA para DP<sub>312</sub> foi semelhantes em ambas condições topográficas. Entretanto, para DP<sub>494</sub>, o topo incrementou em 29% esse parâmetro em comparação a condição de baixada. Já na estação seca, a EUA não diferiu entre os tratamentos (Tabela 2).

**Tabela 2.** Valores médios da taxa de transpiração ( $E$ ), concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ), eficiência no uso da água (EUA) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) avaliados nas estações chuvosa e seca do ano de 2019 em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada.

Estação Chuvosa				
	$E$ (mmol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	EUA (μmol mmol <sup>-1</sup> )	$C_i$ (μmol mol <sup>-1</sup> )	$A/C_i$ (μmol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
<b>DP<sub>312</sub> / topo</b>	2,09 ± 0,12 Aa	5,29 ± 0,37 Aa	289,36 ± 14,20 Aa	0,036 ± 0,0013 Aa
<b>DP<sub>494</sub> / topo</b>	2,11 ± 0,18 Aa	5,13 ± 0,33 Aa	295,66 ± 6,61 Ab	0,035 ± 0,0014 Aa
<b>DP<sub>312</sub> / baixada</b>	2,23 ± 0,16 Aa	5,69 ± 0,60 Aa	299,10 ± 17,30 Ba	0,037 ± 0,0032 Aa
<b>DP<sub>494</sub> / baixada</b>	2,10 ± 0,11 Aa	3,99 ± 0,20 Bb	342,20 ± 13,85 Aa	0,023 ± 0,0017 Bb
Estação Seca				
	$E$ (mmol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	EUA (μmol mmol <sup>-1</sup> )	$C_i$ (μmol mol <sup>-1</sup> )	$A/C_i$ (μmol m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> Pa <sup>-1</sup> )
<b>DP<sub>312</sub> / topo</b>	1,26 ± 0,06 Ab	7,72 ± 0,94 Aa	329,00 ± 9,91 Ba	0,030 ± 0,0057 Ab
<b>DP<sub>494</sub> / topo</b>	1,17 ± 0,03 Aa	7,37 ± 0,18 Aa	363,50 ± 8,91 Aa	0,023 ± 0,0004 Aa
<b>DP<sub>312</sub> / baixada</b>	1,85 ± 0,06 Aa	7,37 ± 0,45 Aa	257,20 ± 3,00 Bb	0,053 ± 0,0032 Aa
<b>DP<sub>494</sub> / baixada</b>	1,24 ± 0,01 Ba	6,52 ± 0,25 Aa	311,50 ± 19,25 Ab	0,026 ± 0,0027 Ba

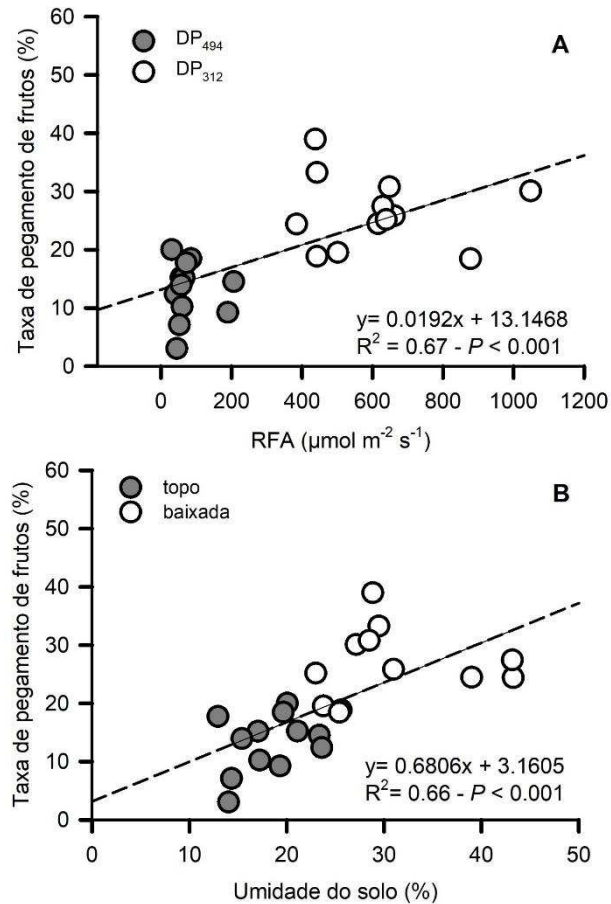
Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan, Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica, Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio, Médias ± erro padrão da média, (n = 3).

Na estação chuvosa, houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e condição topográfica para os valores de concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) ( $P < 0,05$ ) (Tabela 2). Na condição de topo, os valores de  $C_i$  foram semelhantes para as duas densidades de plantio.

Entretanto na baixada, o valor médio de  $C_i$  foi aproximadamente 14% maior para DP<sub>494</sub> em comparação com DP<sub>312</sub>. Plantas em DP<sub>494</sub> na baixada, apresentaram valores de  $C_i$  cerca de 14% maior em comparação com a mesma densidade de plantio no topo, enquanto que para DP<sub>312</sub> os valores de  $C_i$  foram semelhantes nas duas condições topográficas. Na estação seca, os valores de  $C_i$  das plantas em DP<sub>494</sub> foram 10% maior em comparação com DP<sub>312</sub> no topo, e 21% maior na baixada. Plantas no topo apresentaram maiores valores de  $C_i$  em comparação com as de baixada, com incrementos de 28% e 17% para DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>, respectivamente. Houve interação significativa entre os fatores para a Eficiência Instantânea da Carboxilação ( $A/C_i$ ) durante a estação chuvosa ( $P < 0,05$ ). Na condição de topo, os valores de  $A/C_i$  foram semelhantes para as duas densidades de plantio. Entretanto na baixada, plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram  $A/C_i$  61% maior em comparação com DP<sub>494</sub>. Os valores de  $A/C_i$  nas plantas em DP<sub>312</sub>, foram semelhantes nas duas condições topográficas. Em contrapartida, para as plantas em DP<sub>494</sub>, houve incremento em 52% nos valores de  $A/C_i$  para as plantas do topo em comparação com a baixada. Na estação seca, houve interação significativa entre os fatores densidade de plantio e topografia ( $P < 0,05$ ). Na condição de topo, os valores de  $A/C_i$  foram semelhantes para as duas densidades de plantio. Na condição de baixada, DP<sub>312</sub> apresentou incrementos de 104% em comparação com DP<sub>494</sub>. Plantas em DP<sub>312</sub> + baixada, apresentaram incremento em 77% nos valores de  $A/C_i$  em relação ao topo, enquanto que os valores de  $A/C_i$  para DP<sub>494</sub> não diferiram nas duas condições topográficas.

### ***Taxa de pegamento de frutos e caracteres de produção***

A taxa de pegamento de frutos foi influenciada pelas condições microclimáticas em função da densidade de plantio e condições topográficas nas duas safras avaliadas, sendo que as plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram maior pegamento de frutos em comparação com as plantas em DP<sub>494</sub> em ambas as safras (Figura Suplementar 1). Análise de regressão revelou ajuste de modelo linear crescente para a taxa de pegamento de frutos em função da variação na RFA ( $R^2= 0,67$ ;  $P < 0,001$  - Figura 6A) com incrementos médios de 1,92% na taxa de pegamento de frutos para cada incremento em  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de RFA. De maneira semelhante, a taxa de pegamento de frutos em função da umidade do solo, também se ajustou ao modelo linear crescente ( $R^2= 0,66$ ;  $P < 0,001$ ; Figura 6B), com incrementos médios em 0,68% na taxa de pegamento de frutos para cada aumento em 1% na umidade do solo.

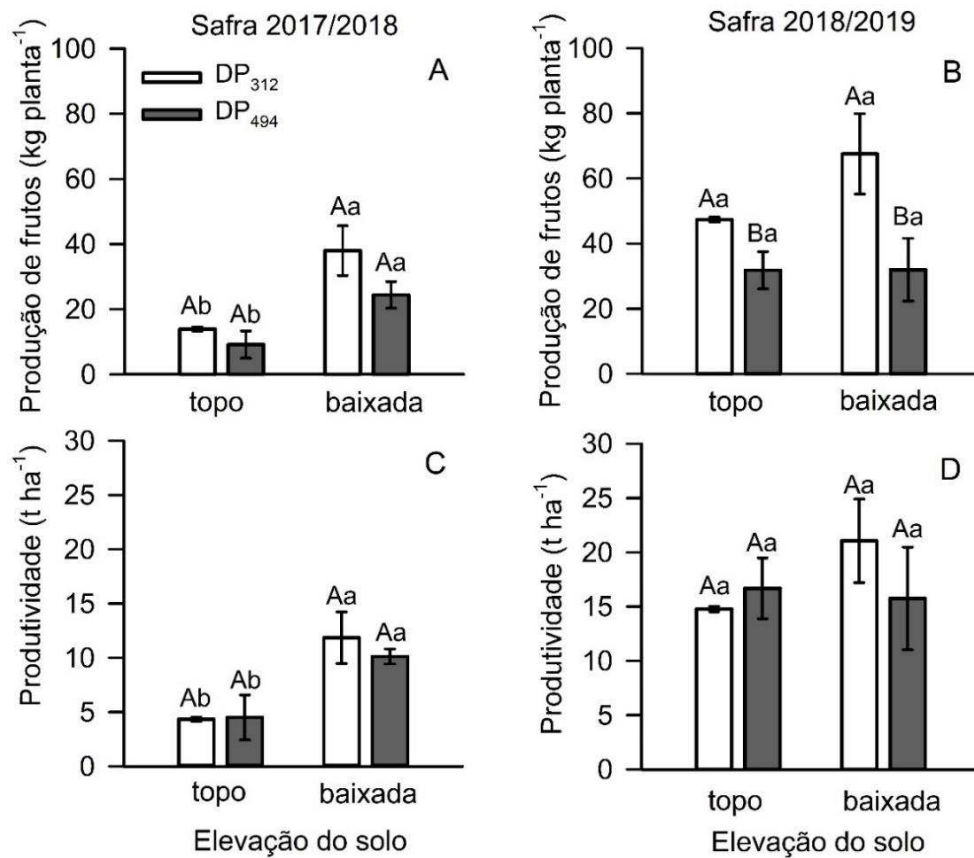


**Figura 6.** Análise de regressão para a taxa de pegamento de frutos da safra 2018/2019 com a Radiação Fotossinteticamente Ativa – RFA (A) e umidade do solo (B) em plantas adultas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada. Avaliações de RFA e umidade do solo foram realizadas nas estações chuvosa e seca do ano de 2019.

A produção de frutos foi influenciada pela condição topográfica, sendo que para as plantas em DP<sub>312</sub> na baixada houve um incremento em aproximadamente 173% em comparação com DP<sub>312</sub> no topo durante a safra 2017/2018. Para DP<sub>494</sub> na baixada, houve aumento de 166% em relação a DP<sub>494</sub> no topo (Figura 7A). Na safra 2018/2019, a produção de frutos em DP<sub>312</sub> no topo, foi incrementada em aproximadamente 49% em relação à DP<sub>494</sub> na mesma condição topográfica. Na baixada, plantas em DP<sub>312</sub> apresentaram incrementos de 111% na produção de frutos em comparação com DP<sub>494</sub> (Figura 7B). Maiores produtividades foram obtidas na condição de baixada para ambas densidades de plantio na safra 2017/2018. A produtividade em DP<sub>312</sub> na baixada foi cerca de 173% maior em comparação com DP<sub>312</sub> em topo. Para DP<sub>494</sub>, a condição de baixada proporcionou um aumento de 124% na produtividade em comparação com a condição de topo (Figura 7C). Na safra 2018/2019, a produtividade foi estatisticamente semelhante entre as condições de cultivo (Figura 7D).

As densidades de plantio e os níveis topográficos do terreno também influenciaram outros caracteres de produção como, número de frutos por cacho (NFC) e massa de frutos por cacho

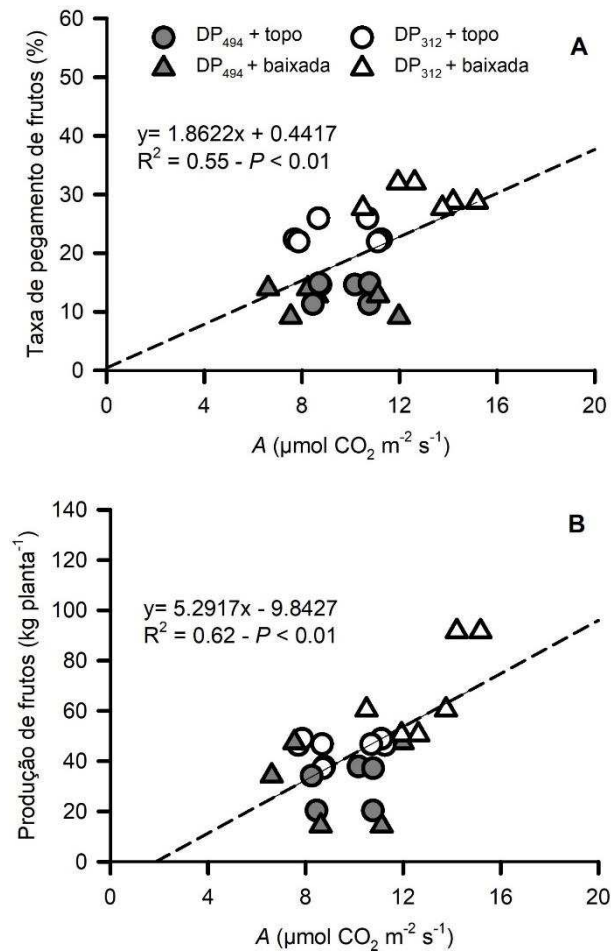
(MFC) nas duas safras avaliadas, sendo a condição DP<sub>312</sub> + baixada mais benéfica para esses parâmetros, conforme a Tabela Suplementar 1.



**Figura 7.** Valores médios de produção de frutos (A e B) e produtividade (C e D) das safras 2017/2018 e 2018/2019, em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada, Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica, Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio, Médias  $\pm$  erro padrão da média, (n = 3).

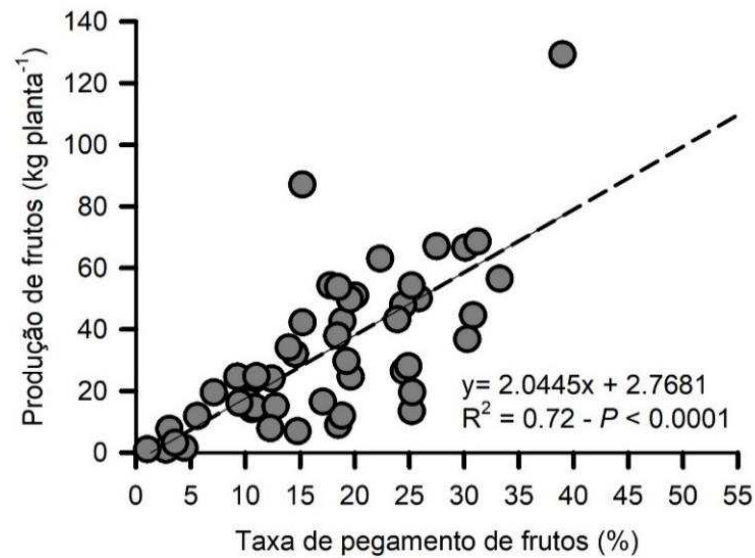
### *Influência da fotossíntese líquida sobre a taxa de pagamento e produção de frutos*

A taxa de pagamento de frutos ajustou-se ao modelo linear crescente função da fotossíntese líquida (A) ( $R^2 = 0,55$ ;  $P < 0,01$ ; Figura 8A), com aumentos médios em 1,86% para cada incremento em  $1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em A. Semelhantemente, a produção de frutos também foi ajustada ao modelo linear crescente em função da A ( $R^2 = 0,62$ ;  $P < 0,01$ ; Figura 8B), apresentando incremento médios de 5,29 kg de frutos para cada incremento em  $1 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em A.



**Figura 8:** Análise de regressão para a taxa de pegamento de frutos (A) e a produção de frutos (B) em função dos valores de A avaliadas nas estações chuvosa e seca em plantas adultas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada. Avaliações de A foram realizadas nas estações chuvosa e seca do ano de 2019. Características de produção são referentes à safra de 2018/2019.

Houve ajuste de modelo linear crescente para a produção de frutos em função da taxa de pegamento de frutos, revelando incrementos médios de 2,04 kg de frutos por planta para aumento em 1% na taxa de pegamento de frutos ( $R^2 = 0,72$ ;  $P < 0,001$ ; Figura 9).



**Figura 9:** Correlação de Pearson entre a taxa de pegamento de frutos e a produção de frutos obtidas em duas safras consecutivas (2017/2018 e 2018/2019) em plantas adultas de macaúba, cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada.

## Discussão

### *A densidade do plantio e a topografia do terreno determinaram os níveis de radiação e umidade do solo no cultivo de macaúba*

As densidades de plantio de macaúba avaliadas nesse estudo resultaram em diferenças na intensidade de RFA incidente no interior do dossel durante as duas estações avaliadas (Figura 3A). A maior disponibilidade de RFA sob a menor densidade de plantas (DP<sub>312</sub>) ocorreu devido à ausência de auto-sombreamento das folhas nas linhas de plantio. Para as plantas em DP<sub>494</sub>, a radiação interceptada pelo dossel sobreposto possivelmente foi menos uniforme ao longo da folhagem, com uma interceptação excessiva pela camada superior do dossel, afetando de forma negativa a fotossíntese por unidade foliar (BREURE, 1988; BISTGANI *et al.*, 2012). Semelhante aos resultados desse trabalho, diferenças nos níveis de radiação também foram encontrados em função de diferentes densidades de plantio de *Elaeis guineenses* (HENSON; DOLMAT, 2003) e *Quercus petraea* (FARQUE *et al.*, 2001).

A topografia do terreno tem importância substancial na distribuição de água no solo ao longo de uma paisagem (ALI *et al.*, 2014; YU *et al.*, 2018), sendo a declividade, um fator adicional para o escoamento da água na superfície e nas camadas subterrâneas do solo (LEIBOWITZ *et al.*, 2018). Este pode ter sido um dos fatores contribuintes para os maiores níveis de umidade do solo na área de baixada em comparação com a área de topo em ambas estações estudadas (Figura 3B). Em adição, foi verificado na área amostral, um córrego próximo às áreas de topo e baixada, porém, é possível que a área de baixada estivesse melhor conectada

a esse fluxo de água devido a menor elevação do solo, através de um lençol freático mais raso. A presença desse elemento superficial contribuiria também, para que a área de baixada permanecesse com maior umidade do solo mesmo na estação seca, quando houve uma redução considerável na precipitação, aumento em DPV (Figura 1), e possivelmente uma maior evapotranspiração. Semelhante aos resultados do presente estudo, outros trabalhos também demonstraram diferenças na umidade do solo em função da topografia, sendo observado maior umidade do solo em áreas de menor elevação, refletindo diretamente na capacidade de sobrevivência e desempenho das espécies (GIBBONS; NEWBERY, 2003; JUCKER *et al.*, 2018).

### ***O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi influenciado pela topografia do terreno durante a estação seca***

Os valores de  $\Psi_w$  semelhantes entre os tratamentos na estação chuvosa, demonstraram que a disponibilidade de água nesse período não foi um fator limitante, assim como a demanda evaporativa da atmosfera (menor DPV – Figura 1). Em contrapartida, as reduções nos valores médios de  $\Psi_w$  durante a estação seca (especialmente para as plantas no topo), demonstram uma forte influência da umidade do solo na manutenção do status hídrico das plantas de macaúba ( $R^2= 0,81$  – Figura 4D). A variação sazonal na umidade do solo tem sido apontada como uma das principais causas das alterações do  $\Psi_w$  de diversas espécies (SAHA *et al.*, 2008). Para a macaúba, que possui reservatórios alternativos para o armazenamento de água no estipe e na bainha do pecíolo (HOLBROOK & SINCLAIR, 1992; DIAS *et al.*, 2011; SPERLING *et al.*, 2015), essas estratégias morfológicas parecem ter sido pouco eficientes para manter o status hídrico das plantas do topo, que foram mantidas a níveis de umidade do solo sempre menores em relação à área de baixada durante todo o ano. Por outro lado, as plantas na baixada foram capazes de manter maiores valores de  $\Psi_w$  em função da maior umidade do solo, somado à capacidade de ajustamento osmótico (acúmulo de prolina) e o eficiente controle estomático, características que ajudam a manter valores de  $\Psi_w$  satisfatórios e torna essa espécie com maior grau de tolerância à estação seca em comparação com outras palmeiras (SURESH *et al.*, 2010; PIRES *et al.*, 2013; ROSA, 2018).

A manutenção de maiores valores de  $\Psi_w$  nas plantas em época de seca, tem sido possível através de práticas agrícolas que ajudam na manutenção da umidade do solo. A condição topográfica configura-se como fator de influência na disponibilidade hídrica do solo em diversos estudos (LUO; ZANG; LI, 2006; MARKESTEIJN *et al.*, 2010; HAWTHORNE & MINIAT, 2018), com conseqüente capacidade de alteração no status hídrico das plantas

(MITCHELL *et al.*, 2008). Em áreas de maior elevação (topo) geralmente ocorre um incremento no coeficiente de difusão de vapor de água na atmosfera e redução na temperatura do solo, que podem dificultar a absorção de água pelas raízes (LUO; ZANG; LI, 2006). Por outro lado, áreas de menor elevação, podem mitigar os efeitos de uma estação seca nas plantas, através de uma maior manutenção hídrica do solo durante todo o ano (HAWTHORNE & MINIAT, 2018). Este último caso, parece ter ocorrido no presente estudo.

As respostas de  $\Psi_w$  similares independentemente da densidade de plantio são um indicativo claro de que o maior adensamento das plantas não ocasiona uma possível competição por água entre as plantas, sendo relevante, especialmente na situação de topo, onde a topografia condiciona um maior escoamento da água. Oliveira *et al.* (2016) avaliando plantas de macaúba cultivadas em condição semiárida, também observaram reduções nos valores de  $\Psi_w$  durante a estação seca, sendo esse resultado associado ao menor conteúdo de água no solo. Em adição, como demonstrado no Capítulo III deste trabalho, a manutenção da disponibilidade hídrica do solo em condição de cerrado, ocasionou melhorias nos valores de  $\Psi_w$  em plantas de macaúba durante a estação seca, semelhantes aos resultados do presente estudo.

#### ***As trocas gasosas foram favorecidas pela condição de baixada associada a menor densidade de plantio***

A maior umidade do solo da condição de baixada associada a maior disponibilidade de luz para as plantas em DP<sub>312</sub>, trouxeram benefícios sobre os valores de *A* nessas condições e em ambas estações chuvosa e seca. Tais resultados são reflexos de uma melhor condição hidrológica nas plantas ( $\Psi_w$ ) com efeitos positivos na etapa bioquímica da fotossíntese (FLEXAS *et al.*, 2014). Conforme observado, as plantas em DP<sub>312</sub> + baixada apresentaram menores valores de concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ) e incrementos nos valores de eficiência na carboxilação instantânea ( $A/C_i$ ) (Tabela 2), indicando maior assimilação de CO<sub>2</sub> nas células mesofílicas decorrentes de uma participação mais efetiva da enzima Rubisco (TOMINAGA *et al.*, 2018). Por outro lado, as plantas que foram mantidas na condição DP<sub>494</sub> + baixada, experimentaram um microclima mais desfavorável às trocas gasosas, com menores valores de *A*. Sob essas condições, também houve redução em  $A/C_i$ , que por sua vez, foi preponderante para a redução na Eficiência no Uso da Água (EUA) dessas plantas (estação chuvosa). Isso pode ser explicado pelo fato de que, a menor disponibilidade de luz no ambiente, é capaz de provocar um desfalque na energia bioquímica a nível celular, prejudicando a reconstituição da enzima Rubisco e conseqüentemente, a assimilação de carbono.

A eficiência fotossintética da macaúba em resposta à condição hídrica foi relatada em estudos anteriores. Eventos de seca são capazes de reduzir a eficiência na utilização energética dessa espécie, diminuindo a eficiência quântica máxima do FSII ( $F_v/F_m$ ) e taxa de transporte de elétrons (ETR) (ROSA, 2018). Mota & Cano (2016) observaram que as taxas fotossintéticas da macaúba, foram impactadas em diferentes ciclos de déficit hídrico, através de reduções no  $\Psi_w$  e aumentos na razão entre concentração de CO<sub>2</sub> intercelular e atmosférico ( $C_i/C_a$ ). Por outro lado, a macaúba possui mecanismos eficientes de proteção ao aparato fotossintético quando a seca é moderada, como manter níveis de solutos e clorofila (ROSA; SOUZA; PEREIRA, 2019), além de um eficiente controle estomático para evitar perdas excessivas de água por transpiração (ROSA, 2018).

Em conjunto com a maior umidade do solo, aumentos nos níveis de RFA nas plantas em DP<sub>312</sub>, foram determinantes para a resposta fotossintética da macaúba. Uma menor densidade de plantio melhora a condição luminosa do ambiente em termos de quantidade e qualidade, com efeitos diretos sob a abertura estomática e ativação de enzimas da maquinaria fotossintética, levando a uma maior absorção de CO<sub>2</sub> (COURBIER & PIERIK, 2019). Adicionalmente, em plantios menos adensados ocorre uma melhoria na incidência de ventos que diminuem a espessura da camada limítrofe sobre a superfície foliar, reduzindo as barreiras para o influxo de CO<sub>2</sub> e saída de vapor de água (APHALO; JARVIS, 1993; ISEKI; OLALEYE, 2020). Dias *et al.* (2018) trabalhando com plantas jovens de macaúba em casa de vegetação, encontraram alta capacidade de modulação dos eventos fotoquímicos no aparato fotossintético, além de baixo ponto de compensação luminoso (PCL) e escape à fotoinibição, indicando que a macaúba possui mecanismo eficiente em ambientes contrastantes de luz. Entretanto, vale ressaltar que esses resultados são em plantas jovens, onde as necessidades pelos recursos são diferentes das plantas em fase de produção.

Os incrementos da  $A$  nesse estudo foram acompanhados por aumentos na condutância estomática ( $g_s$ ) nas plantas em DP<sub>312</sub> na baixada durante a estação seca, atuando como um mecanismo chave na regulação das trocas gasosas, como ganho de carbono e perdas de água por transpiração ( $E$ ) (GAGO *et al.*, 2016). Sob menor densidade de plantas, aumentos nos níveis de luz azul (em especial), atua na abertura estomática através de uma cascata de sinalização nas células guardas, com a ativação de bombas de prótons (H<sup>+</sup>ATPases) e canais iônicos que promovem o acúmulo de K<sup>+</sup>, culminando para um aumento na absorção de água nas células-guardas (INOUE *et al.*, 2017). Nesse caso, como o fator água também estava disponível, contribuiu para os incrementos de  $g_s$ , atuando na manutenção da pressão de turgor das células-guarda. Oliveira *et al.* (2016) avaliando características ecofisiológicas de palmeiras nativas do

semiárido, também encontraram maiores valores de  $g_s$  em plantas de macaúba como efeito positivo da maior umidade do solo, corroborando com nossos resultados.

Quando o status hídrico da planta é comprometido, uma das primeiras respostas da planta é evitar a perda excessiva de água por transpiração através de um maior fechamento estomático (FAROOQ *et al.*, 2009). De fato, quando a macaúba foi exposta às condições DP<sub>312</sub> + topo na estação seca, houve reduções em  $g_s$  (Figura 5D) e a consequente diminuição nos valores de  $E$ , demonstrando um eficiente controle estomático para evitar perdas excessivas de água em períodos de maior escassez. Para a macaúba, já foi constatado que os valores de  $E$  seguem a constância da  $g_s$  ao longo do dia (PIRES *et al.*, 2013a), o que de fato ocorreu em nosso estudo em ambas estações chuvosa e seca. De maneira interessante, plantas em DP<sub>494</sub> + baixada durante a estação seca, também apresentaram reduções nos valores de  $E$ , embora a disponibilidade de água não tenha sido limitante nessas condições (baixada, > umidade do solo). Esse comportamento tem relação direta com os menores valores de  $g_s$  obtidos nessas condições (Figura 5D), que por sua vez, são resultantes dos menores níveis de RFA no entorno da copa (INOUE *et al.*, 2017). Em consequência, essas plantas também apresentaram reduções nos valores de  $A$ . Consequentemente reconhece-se que as trocas gasosas da macaúba são beneficiadas pela umidade do solo, porém o fator luz é determinante para esses eventos.

***A taxa de pegamento e a produção de frutos foram influenciados positivamente pela maior RFA, umidade do solo e fotossíntese líquida em decorrência das condições de cultivo***

A taxa de pegamento de frutos foi favorecida pela menor densidade de plantio em ambas as safras avaliadas, como uma resposta positiva ao incremento dos níveis de RFA em DP<sub>312</sub> (Figura 6A e Figura Suplementar 1). Em espécies supra-anuais e com florescimento em massa (mass-flowering) como a macaúba (MONTROYA *et al.*, 2016), há um aumento considerável na força do dreno durante o florescimento (coincidente com a estação chuvosa), principalmente porque há uma sobreposição de fenofases reprodutivas. Entretanto, sob menor densidade de plantio (DP<sub>312</sub>), a produção de assimilados é potencializada (maior  $A$ ) devido a maior disponibilidade de luz para as folhas, favorecendo o pegamento dos frutos (Figura 6) (MAO *et al.*, 2016). Em consequência, parâmetros como produção de frutos, o NFC e MFC também são beneficiados pela maior RFA em DP<sub>312</sub> (Figura 8; Tabela Suplementar 1), estando isso associado à condição fisiológica da planta, como maiores valores de  $A$ . Esses resultados são semelhantes ao observado por Breure *et al.* (1990) avaliando os efeitos da densidade de plantio no sucesso reprodutivo de *Elaeis guineensis*, onde observaram incrementos na produção de frutos em menor densidade de plantas.

A menor produção observada em DP<sub>494</sub> ocorreu possivelmente devido a um maior auto-sombreamento entre as plantas, com alterações na quantidade de RFA disponível para a produção de carboidratos; além de causar possível rearranjo no balanço da radiação vermelho:vermelho-distante (V:VD) no interior do dossel, que na maioria das vezes, resulta em aceleração no florescimento e altera a atividade dos polinizadores (HERRERA, 1995; KIM *et al.*, 2008). A macaúba é polinizada principalmente por xenogamia (polinização cruzada), através de agentes da ordem Coleóptera, principalmente dos gêneros *Andranthobius* e *Mystrops* (CONTRERAS, 2018). Correa *et al.* (2016) avaliaram a interação de polinizadores do gênero *Mystrops* com palmeiras ao longo de um gradiente geográfico e ambiental, observaram que a dispersão desses agentes é prejudicada principalmente pelo microclima, fato que pode ter ocorrido em nosso estudo. Em adição, a polinização da macaúba também pode ocorrer por anemofilia (vento) (SCARIOT *et al.*, 1991), sendo favorecida por plantios menos adensados, como observado em DP<sub>312</sub>.

A maior umidade do solo em decorrência da condição de baixada favoreceu a taxa de pegamento de frutos ( $R^2 = 0,66$ ;  $P < 0,001$ ; Figura 6B) através de ação sinérgica com os níveis de RFA. Quando água e luz não são limitantes, a produção de fotoassimilados é contínua, sendo passível de acumulação nos tecidos da planta. Posteriormente, estes são descarregados ativamente no floema, gerando diferenças no potencial osmótico e atraindo o fluxo de água que governa a translocação entre os diferentes órgãos da planta (LEMOINE *et al.*, 2013). Em macaúba, já é esclarecido que o estipe atua como dreno transitório de carboidratos, contribuindo posteriormente para a manutenção de novas folhas e cachos (ROSA, 2018). Além disso, a capacidade extra de armazenamento de água na parte basal do estipe (caule subterrâneo do tipo saxofone), favorece uma melhor condição hídrica para essas plantas, e possivelmente, potencializa a translocação de açúcares para os novos drenos (HOLBROOK; SINCLAIR, 1992; DIAS *et al.*, 2011; SPERLING *et al.*, 2015). Em concordância com esses achados, Cros *et al.* (2013) avaliando plantas de *Elaeis guineensis* em resposta ao balanço hídrico, também observaram reduções no abortamento de frutos e incrementos na produção em função da maior disponibilidade hídrica no solo.

O aumento na produção de frutos (a nível de planta) é resposta dos incrementos da taxa de pegamento de frutos ( $R^2 = 0,72$ ;  $P < 0,0001$ ; Figura 9) através das melhorias nos níveis de RFA e umidade do solo, que por sua vez, são resultantes da menor densidade de plantio e condição de baixada, respectivamente. Essas condições também promoveram aumento em *A* (devido à melhoria do status hídrico e ganho de carbono pelas plantas), que esteve associada positivamente ao aumento da produção de frutos ( $R^2 = 0,62$ ;  $P < 0,0001$ ; Figura 8B). Plantas na

condição DP<sub>312</sub> + baixada apresentaram produções médias de frutos na ordem de 68 kg planta<sup>-1</sup> (safra 2018/2019 – Figura 7B), enquanto que as plantas na condição DP<sub>494</sub> + topo, foram as menos produtivas, com valores médios de produção de 9,2 kg planta<sup>-1</sup> (safra 2017/2018 – Figura 7A). Isso reforça ainda mais a ideia de que na instalação de cultivos de macaúba, utilizando uma densidade de plantio adequada e mantendo a umidade do solo, favorece os processos fisiológicos e a produção de frutos por planta, semelhante ao observado em outras palmeiras, como em *Cocos nucifera* (FERNANDO; BANDARANAYAKE, 1996) e *Elaeis guineensis* (BONNEAU, 2018).

Em todo caso, é esperado que a melhor condição de cultivo traga incrementos na produção, não apenas a nível de planta, mas que haja também ganhos no rendimento por área, a fim de tornar o plantio mais rentável. Nossos resultados mostraram que a produtividade foi incrementada pela condição de baixada em relação ao topo (assim como para produção por planta), com produtividades médias de 11,8 e 10 t ha<sup>-1</sup> para as plantas em DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>, respectivamente (Figuras 7C e D). Esses valores estão bem abaixo dos observados no Capítulo III deste estudo, onde foram encontrados valores médios de produtividade na ordem de 25,8 t ha<sup>-1</sup>, para um plantio de macaúba com densidade de 400 plantas ha<sup>-1</sup> e com uma suplementação hídrica artificial mantida durante todo o ano. Além disso, foi observado uma menor variação na produtividade ao longo de duas safras, indicando que a produção de frutos da macaúba, possivelmente se torna mais estável entre as safras em resposta a uma suplementação hídrica mais contínua.

Vale destacar ainda que as densidades de plantio resultaram em produtividades estatisticamente iguais, tanto no topo como na baixada e em ambas as safras. Entretanto, uma maior produção de frutos foi verificada para DP<sub>312</sub> (principalmente na baixada), indicando que uma menor densidade de plantio exerce melhor influência à nível de planta, em comparação com o plantio mais adensado, porém, sem vantagens no rendimento por área. Dessa forma, é possível que haja uma densidade de plantio ótima para a macaúba, onde a quantidade de plantas por área seja favorável à produção de frutos por planta e por área simultaneamente. Assim, se faz necessário novas investigações com densidades de plantio intermediárias às que propomos nesse estudo.

## Conclusões

A topografia do terreno exerce influência sobre o status hídrico, trocas gasosas, frutificação e produção de frutos de macaúba, sendo a condição de baixada mais favorável a estes eventos, como uma resposta a manutenção da umidade do solo, em especial durante a

estação seca. Quanto ao fator densidade de plantio, as plantas mantidas em menor adensamento apresentaram maior produção por planta, como resposta a melhor condição luminosa do ambiente e melhorias nos processos fotossintéticos, reduzindo assim, a competição entre as plantas por esse recurso.

De maneira geral, esse estudo demonstra que embora a macaúba seja uma espécie bem adaptada a ambientes diversos, a definição da densidade de plantio e ambiente topográfico podem incrementar a produção de frutos, principalmente por melhorar a disponibilidade de recursos e a fisiologia dessas plantas.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### Referências

- ALI, G. *et al.* A comparison of wetness indices for the prediction of observed connected saturated areas under contrasting conditions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 3, p. 399–413, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1002/esp.3506>
- APHALO, P. J.; JARVIS, P. G. The boundary layer and the apparent responses of stomatal conductance to wind speed and to the mole fractions of CO<sub>2</sub> and water vapour in the air. **Plant, Cell & Environment**, v. 16, n. 7, p. 771–783, 1993. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00499.x>
- BECKER, P. *et al.* Water potential gradients for gaps and slopes in a panamanian tropical moist forest's dry season. **Journal of Tropical Ecology**, v. 4, n. 2, p. 173–184, 1988. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0266467400002674>
- BHERING, L. L. *et al.* Mapeamento de maciços naturais de ocorrência de macaúba (*Acrocomia aculeata*) visando à exploração sustentável. **IV Congresso Brasileiro de Mamona e I Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa, PB**, p. 143–148, 2010.
- BISTGANI, Z. E. *et al.* Influence of plant density on light absorption and light extinction coefficient in sunflower cultivars. **Research on Crops**, v. 13, n. 1, p. 174–179, 2012.
- BONNEAU, X. *et al.* Early impact of oil palm planting density on vegetative and oil yield variables in West Africa. **OCL - Oilseeds and fats**, v. 21, n. 4, p. 0–6, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2014009>
- BONNEAU, X.; IMPENS, R.; BUABENG, M. Optimum oil palm planting density in West Africa. **OCL - Oilseeds and fats, Crops and Lipids**, v. 25, n. 2, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017060>
- BREURE, C. J. The effect of different planting densities on yield trends in oil palm. **Experimental Agriculture**, v. 24, p. 37–52, 1988.

BREURE, C. J.; MENENDEZ, T.; POWELL, M. S. The effect of planting density on the yield components of oil palm (*Elaeis guineensis*). **Experimental Agriculture**, v. 26, n. 1, p. 117–124, 1990. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479700015453>

ÇALIŞKAN, S. *et al.* The effects of row spacing on yield and yield components of full season and double-cropped soybean. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 31, n. 3, p. 147–154, 2007. Available at: <https://doi.org/10.3906/tar-0703-10>

CETEC: CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS/MINISTÉRIO INDÚSTRIA E COMÉRCIO – STI. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais. Serie Documentos 16**. 2. ed. Belo Horizonte: [s. n.], 1983.

COURBIER, S.; PIERIK, R. Canopy light quality modulates stress responses in plants. **iScience**, [s. l.], v. 22, p. 441–452, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.035>

CROS, D. *et al.* Differential response to water balance and bunch load generates diversity of bunch production profiles among oil palm crosses (*Elaeis guineensis*). **Tropical Plant Biology**, v. 6, n. 1, p. 26–36, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12042-013-9116-2>

DE LIMA, N. E. *et al.* A review of the palm genus *Acrocomia*: Neotropical green gold. **Organisms Diversity and Evolution**, v. 18, n. 2, p. 151–161, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13127-018-0362-x>

DIAS, A. N. *et al.* Acclimation responses of macaw palm seedlings to contrasting light environments. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33553-1>

DIAS, H. C. T. *et al.* Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 52–60, 2011.

EMBRAPA. **Serviço nacional de levantamento e conservação de solos: Manual de métodos de análise de solo**. 1. ed. Rio de Janeiro: 1979.

EVARISTO, A. B. *et al.* Energy potential of the macaw palm fruit residues and their use in charcoal production. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571–577, 2016. Available at: <https://doi.org/10.5902/1980509822757>

FAROOQ, M. *et al.* Review article Plant drought stress : effects, mechanisms and management. **Agron. Sustain. Dev**, v. 29, p. 185–212, 2009.

FARQUE, L.; SINOQUET, H.; COLIN, F. Canopy structure and light interception in *Quercus petraea* seedlings in relation to light regime and plant density. **Tree Physiology**, v. 21, n. 17, p. 1257–1267, 2001. Available at: <https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1257>

FERNANDO, W. M. U.; BANDARANAYAKE, C. K. Effect of planting density on the yield of coconut. **Cocos**, v. 11, n. 0, p. 32–39, 1996. Available at: <https://doi.org/10.4038/cocos.v11i0.2156>

FLEXAS, J. *et al.* Photosynthetic limitations in Mediterranean plants: A review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 103, p. 12–23, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.002>

GAGO, J. *et al.* Relationships of leaf net photosynthesis, stomatal conductance, and mesophyll conductance to primary metabolism: A multispecies meta-analysis approach. **Plant Physiology**, v. 171, n. 1, p. 265–279, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1104/pp.15.01660>

GIBBONS, J. M.; NEWBERY, D. M. Drought avoidance and the effect of local topography on trees in the understorey of Bornean lowland rain forest. **Plant Ecology**, v. 164, n. 1, p. 1–18, 2003. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1021210532510>

GOULART, S. de M. **Amadurecimento pós-colheita de frutos de macaúba e qualidade do óleo para a produção de biodiesel**. 84 f. 2014. - Universidade Federal de Viçosa, 2014.

GUIMARÃES, A. J. M.; DE ARAÚJO, G. M.; CORRÊA, G. F. Estrutura fitossociológica em área natural e antropizada de uma vereda em Uberlândia, MG. **Acta Botanica Brasilica**, v. 16, n. 3, p. 317–329, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062002000300007>

HAI, M.; KUČERA, T. The influence of topography on the forest surface temperature retrieved from Landsat TM, ETM+ and ASTER thermal channels. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 6, p. 585–591, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.003>

HAWTHORNE, S.; MINIAT, C. F. Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient. **Ecohydrology**, v. 11, n. 1, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/eco.1825>

HENSON, I. E.; DOLMAT, M. T. Physiological analysis of an oil palm density trial on a peat soil. **Journal of Oil Palm Research**, v. 15, n. 2, p. 1–27, 2003.

HERRERA, C. M. Floral biology, microclimate, and pollination by ectothermic bees in an early-blooming herb. **Ecology**, v. 76, n. 1, p. 218–228, 1995. Available at: <https://doi.org/10.2307/1940644>

HIANE, P. A. . *et al.* Óleo da polpa e amêndoa de bocaiúva, *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. caracterização e composição em ácido graxos. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 8, n. 3, p. 256–259, 2005.

HOLBROOK, N. M.; SINCLAIR, T. R. Water balance in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. I. Stem structure, tissue water release properties and leaf epidermal conductance. **Plant, Cell & Environment**, v. 15, n. 4, p. 393–399, 1992. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00989.x>

INOUE, S. I.; KINOSHITA, T. Blue light regulation of stomatal opening and the plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase. **Plant Physiology**, v. 174, n. 2, p. 531–538, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1104/pp.17.00166>

ISEKI, K.; OLALEYE, O. A new indicator of leaf stomatal conductance based on thermal imaging for field grown cowpea. **Plant Production Science**, v. 23, n. 1, p. 136–147, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1080/1343943X.2019.1625273>

JONES, H. G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**: Cambridge University Press, 1992. v. 2

JUCKER, T. *et al.* Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes. **Ecology Letters**, v. 21, n. 7, p. 989–1000, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1111/ele.12964>

JÚNIOR, A. de S. **Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais**. 101 f. 2009. - Universidade Federal de Lavras, [s. l.], 2009.

KIM, S. Y.; YU, X.; MICHAELS, S. D. Regulation of constans and flowering locus T expression in response to changing light quality. **Plant Physiology**, v. 148, n. 1, p. 269–279,

2008. Available at: <https://doi.org/10.1104/pp.108.122606>

LANES, É. C. M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the Macaw Palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), ex situ germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102–112, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>

LAVERDE CONTRERAS, V. Análisis integrativo del estatus taxonómico de los polinizadores de la palma de corozo (*Acrocomia aculeata*) en la Orinoquía colombiana. p. 33, 2018. Available at: [http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/28812/20132006\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/28812/20132006_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

LEIBOWITZ, S. G. *et al.* Connectivity of streams and wetlands to downstream waters: An integrated systems framework. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 2, p. 298–322, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12631>

LEMOINE, R. *et al.* Source-to-sink transport of sugar and regulation by environmental factors. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. JUL, p. 1–21, 2013. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00272>

LORENZI, G. M. A. C. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae: bases para o extrativismo sustentável. Tese de doutorado. Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo. Universidade Federal do Paraná, 156 p, 2006.

LUO, J.; ZANG, R.; LI, C. Physiological and morphological variations of *Picea asperata* populations originating from different altitudes in the mountains of southwestern China. **Forest Ecology and Management**, v. 221, n. 1–3, p. 285–290, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.004>

MANFIO, C. E. *et al.* Repetibilidade em características biométricas do fruto de macaúba. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, p. 70–76, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000100012>

MAO, L. *et al.* Identification of plant configurations maximizing radiation capture in relay strip cotton using a functional-structural plant model. **Field Crops Research**, v. 187, p. 1–11, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.12.005>

MARKESTEIJN, L. *et al.* Seasonal variation in soil and plant water potentials in a Bolivian tropical moist and dry forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 26, n. 5, p. 497–508, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0266467410000271>

MARKLEY, K. S. Mobocayá or Paraguay coco palm: an important source of oil. **Economic Botany**, v. 10, n. 1, p. 3–32, 1956.

MITCHELL, P. J. *et al.* Leaf water relations during summer water deficit: Differential responses in turgor maintenance and variation in leaf structure among different plant communities in south-western Australia. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, n. 12, p. 1791–1802, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2008.01882.x>

MONTOYA, S. G. *et al.* Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927–938, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00425-016-2558-7>

MOREIRA, S. L. S. *et al.* Root distribution of cultivated macauba trees. **Industrial Crops and Products**, v. 137, n. May, p. 646–651, 2019. Available at:

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

MOTA, C. S.; CANO, M. A. O. Matter accumulation and photosynthetic responses of macaw palm to cyclical drought. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 4, p. 850–858, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n409rc>

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, P. E. F. da *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2002000700017>

MWAMLIMA, L. H.; PAMELA OUMA, J.; KIMUTAI CHERUIYOT, E. Leaf gas exchange and root nodulation respond to planting density in soybean [*Glycine max* (L) Merrill]. **Advances in Agriculture**, v. 2020, p. 1–7, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1155/2020/6424389>

OGWANG, B. A. *et al.* The influence of topography on east African October to December climate: Sensitivity experiments with RegCM4. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1155/2014/143917>

OLIVEIRA, D. *et al.* Ecophysiological leaf traits of native and exotic palm tree species under semi-arid conditions. **Bragantia**, v. 75, n. 2, p. 128–134, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.364>

PIMENTEL, L. D. *et al.* Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1ª aproximação. **Informe Agropecuário**, [s. l.], v. 32, n. 256, p. 20–30, 2011.

PIRES, T. P. *et al.* 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

PULROLNIK, K.; VILELA, L.; GONÇALVES, H. M. Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de plantas de macaúba (*Acrocomia aculeata*) implantadas em pastagem degradada. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, v. 346, p. 19, 2019.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2014. Available at: <http://www.r-project.org/>

RESTREPO CORREA, Z. *et al.* Exploring palm–insect interactions across geographical and environmental gradients. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 182, n. 2, p. 389–397, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1111/boj.12443>

ROSA, B. L. **Alterações fotossintéticas e metabólicas em respostas a variação sazonal e manipulação fonte-dreno em *Acrocomia aculeata* (Jacquin) Loddies ex Martius (Arecaceae)**. 42 f. 2018. - Universidade Federal de Viçosa, 2018.

ROSA, B. L.; SOUZA, J. P.; PEREIRA, E. G. Increased atmospheric CO<sub>2</sub> changes the photosynthetic responses of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) to drought. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, n. 3, p. 486–497, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0056>

ROSCOE, R.; RICHETTI, A.; MARANHÃO, E. Análise de viabilidade técnica de oleaginosas para produção de biodiesel em Mato Grosso do Sul. **Política Agrícola**, v. XVI, n. 1, p. 48–59,

2007.

SAHA, S. *et al.* Linking the patterns in soil moisture to leaf water potential, stomatal conductance, growth, and mortality of dominant shrubs in the Florida scrub ecosystem. **Plant and Soil**, v. 313, n. 1–2, p. 113–127, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9684-3>

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; SANTOS, L. H. dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2<sup>a</sup>ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

SCARIOT, A.; DU, J.; HAY, V. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in central Brazil. **Biotropica**, v. 23, n. March, p. 12–22, 1991. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388683>

SCHOLANDER, P. F. .; HAMMEL, H. T. .; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 52, p. 119–125, 1964. Available at: <http://www.pnas.org/content/pnas/52/1/119.full.pdf>

SOUSA, H. U. *et al.* Comportamento inicial da macaubeira cultivada em consórcio com feijão-caupi e milho na região norte do Piauí. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Meio-Norte**, p. 28, 2019.

SPERLING, O. *et al.* Direct in vivo evidence of immense stem water exploitation in irrigated date palms. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 1, p. 333–338, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru421>

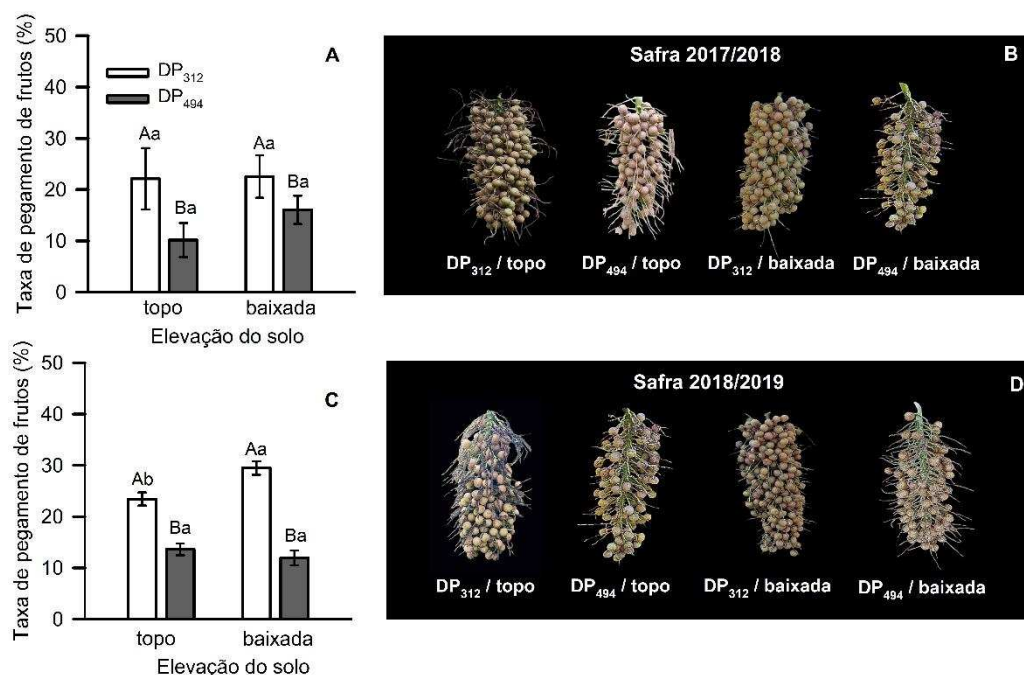
SURESH, K. *et al.* Gas-exchange characteristics, leaf water potential and chlorophyll a fluorescence in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings under water stress and recovery. **Photosynthetica**, v. 48, n. 3, p. 430–436, 2010. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0056-x>

TOMINAGA, J.; SHIMADA, H.; KAWAMITSU, Y. Direct measurement of intercellular CO<sub>2</sub> concentration in a gas-exchange system resolves overestimation using the standard method. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 8, p. 1981–1991, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/ery044>

TURNER, N. C. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 289–308, 1988. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00296704>

YU, B. *et al.* Effects of micro-topography and vegetation type on soil moisture in a large gully on the loess plateau of China. **Hydrology Research**, v. 49, n. 4, p. 1255–1270, 2018. Available at: <https://doi.org/10.2166/nh.2017.023>

## Material Suplementar



**Figura suplementar 1.** Taxa de pegamento de frutos das safras de 2017/2018 (A) e 2018/2019 (C) em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis de elevação do solo: topo e baixada, Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan, Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica, Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio, Médias  $\pm$  erro padrão da média, (n = 3), Imagens de cachos com frutos de macaúba são ilustrativos para cada tratamento nas duas safras avaliadas (B e D).

**Tabela suplementar 1.** Valores médios de número de frutos por cacho e massa de frutos por cacho em plantas de macaúba cultivadas em duas densidades de plantio (DP<sub>312</sub> e DP<sub>494</sub>) combinado com dois níveis topográficos: topo e baixada. Os dados são referentes às safras de 2017/2018 e 2018/2019.

	Safra 2017/2018		Safra 2018/2019	
	NFC	MFC (kg)	NFC	MFC (kg)
<b>DP<sub>312</sub> / topo</b>	149,63 $\pm$ 33,86 Ab	6,14 $\pm$ 1,51 Ab	233,33 $\pm$ 11,59 Ab	9,07 $\pm$ 0,35 Ab
<b>DP<sub>494</sub> / topo</b>	75,19 $\pm$ 24,63 Bb	2,79 $\pm$ 0,76 Bb	129,49 $\pm$ 26,04 Bb	5,73 $\pm$ 1,29 Bb
<b>DP<sub>312</sub> / baixada</b>	192,39 $\pm$ 40,64 Aa	8,42 $\pm$ 1,59 Aa	310,58 $\pm$ 04,54 Aa	14,47 $\pm$ 0,50 Aa
<b>DP<sub>494</sub> / baixada</b>	170,36 $\pm$ 16,10 Ba	7,16 $\pm$ 0,69 Ba	177,01 $\pm$ 03,86 Ba	7,98 $\pm$ 0,71 Ba

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da densidade de plantio para uma mesma condição topográfica. Letras minúsculas comparam as diferentes condições topográficas para uma mesma densidade de plantio. Médias  $\pm$  erro padrão da média, (n = 3).

---

## CAPÍTULO III

---

### **Respostas ecofisiológicas e produtivas de dois acessos de macaúba em função da disponibilidade hídrica**

Maria Antonia Machado Barbosa<sup>1\*</sup>; Leonardo Duarte Pimentel<sup>1\*\*</sup>; Kacilda Naomi Kuki<sup>1</sup>; Leo Duc Haa Carson Schwartzhaupt da Conceição<sup>2</sup>; Paulo Henrique Honorato Salla<sup>1</sup>; Otto Herbert Schuhmacher Dietrich<sup>1</sup>

#### **Afiliações**

<sup>1</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

<sup>2</sup>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) - Cerrados, BR 020 Km 18, Rodovia Brasília-Fortaleza, CEP 73310-970, Planaltina, DF, Brasil

#### **\*Autor correspondente**

Maria Antonia Machado Barbosa

E-mail: mabarbosa483@gmail.com

Endereço: Avenida Peter Henri Rolfs, s/nº, Viçosa, Minas gerais, Brasil.

Departamento de Agronomia

Universidade Federal de Viçosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-0599>

#### **\*\* Coordenador geral da pesquisa**

## Resumo

A macaúba é uma importante espécie oleífera com alto rendimento de óleo e rusticidade a ambientes mais extremos. Estudos sobre a responsividade de diferentes materiais genéticos de macaúba a diferentes suprimentos de água ainda não foram explorados. O objetivo desse estudo foi verificar a responsividade de dois acessos de macaúba ao fornecimento hídrico na estação seca. O estudo foi realizado no CPAC, na Embrapa Cerrados, Planaltina – DF. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 2: dois acessos de macaúba (Distrito Federal - DF e São Paulo - SP) e duas condições hídricas (sem suplementação hídrica - SSH e com suplementação hídrica - CSH). Foram determinados o status hídrico das plantas ( $\Psi_w$ ), trocas gasosas, taxa de pegamento de frutos e características produtivas. A condição CSH influenciou positivamente o  $\Psi_w$ ,  $A$ ,  $g_s$ ,  $E$  e  $A/C_i$  durante a estação seca. O acesso SP apresentou maiores ganhos percentuais nesses parâmetros em comparação com o acesso DF. A taxa de pegamento de frutos foi beneficiada pela condição CSH em comparação com SSH, sendo o acesso SP mais favorecido. Houve correlações positivas entre parâmetros fisiológicos da estação seca com a taxa de pegamento de frutos. O acesso SP apresentou aumentos de 91% e 121% na produtividade das duas safras respectivamente, em função do tratamento CSH, enquanto que para o acesso DF, esse aumento na produtividade foi de apenas 26% e 16%. A macaúba foi favorecida pelo aumento da suplementação hídrica durante a estação seca, sendo o acesso SP mais responsivo à essa condição. Esses resultados podem contribuir para o estabelecimento da cadeia produtiva da macaúba, levando ao direcionamento do material genético ideal para cada ambiente ou situação de cultivo.

**Palavras-chave:** Água. Trocas gasosas. Rendimento de frutos. Material genético

**Abstract**

Macaw palm is an important oil species with high oil yield and hardiness in more extreme environments. Studies on the responsiveness of different macaw palm genetic materials to the increase in water supply have not been explored. The aim of this study was to verify macaw palm responsiveness water supply during the dry season at two accessions. The study was carried out at CPAC, Embrapa Cerrados, Planaltina - DF. The survey design used randomized blocks organized in a 2 x 2 factorial scheme: two accessions to macaw palm (Distrito Federal - DF and São Paulo - SP) and two water conditions: no water supply (NWS) and with water supply (WWS). The leaf water potential ( $\Psi_w$ ), gas exchange, fruit set rate and productive characteristics were determined. The WWS condition positively influenced  $\Psi_w$ ,  $A$ ,  $g_s$ ,  $E$  and  $A/C_i$  during the dry season. The SP accession showed greater percentage gains in these parameters compared to the DF accession. The fruit set rate was benefited by the CSH condition compared to SSH being the most favored SP access. There were positive correlations between physiological parameters of the dry season and the fruit set rate. The SP accession showed increases of 91% and 121% in the productivity of the two harvests respectively, due to the WWS treatment. For DF accession, the increase in productivity was only 26% and 16%. Macaw palm was favored by the increase in water supplementation during the dry season, with SP accession being more responsive to this condition. These results can contribute to the establishment of the macaw palm production chain, leading to the selection of the ideal genetic material for each environment or cultivation situation.

**Keywords:** Water. Gas exchange. Fruit yield. Genetic material.

## Introdução

A redução da produtividade das culturas tem sido fortemente associadas as mudanças climáticas registradas nos últimos anos. Entre essas, um destaque especial para as mudanças na intensidade e distribuição das chuvas, que tem tornado cada vez mais frequente a ocorrência de longos períodos de seca durante o ano agrícola (ZHIÑA *et al.*, 2019). Em paralelo a isso, a demanda mundial por óleos vegetais tem aumentado nas últimas décadas, criando grande pressão no setor agrícola. Diante desse quadro, há uma procura crescente por novas culturas oleíferas, com melhor adaptação a condições ambientais mais extremas, menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) e sem competir por área com culturas agrícolas já estabelecidas (KITCHA; CHEIRSILP, 2011). O cultivo de uma espécie oleaginosa que atenda essas exigências, com grande rendimento de óleo por hectare, tem despertado grande interesse por parte dos produtores e instituições (MOTOIKE *et al.*, 2007; PIMENTEL, L. D. *et al.*, 2011).

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) é uma espécie oleaginosa cujas características são promissoras para atender a demanda dos setores agroenergético, alimentício e de cosméticos (RAMOS *et al.*, 2008; MOTOIKE; KUKI 2009; EVARISTO *et al.*, 2016). Pertencente à família Arecaceae, é uma palmeira nativa e de ampla distribuição na América Neotropical, sendo que no Brasil ela pode ser encontrada desde o norte (Pará) até o sul (Paraná), ocupando, em especial, ecorregiões savânicas como o cerrado e transição cerrado-floresta atlântica (MOTTA *et al.* 2002; LORENZI *et al.*, 2011). Essa grande dispersão revela que a espécie possui adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, sendo plausível seu cultivo em solos com drenagem variando de média a alta (MOTTA *et al.* 2002; MOTA; CANO, 2016).

De maneira similar à palma africana (*Elaeis guineenses* Jacq), a macaúba apresenta características favoráveis à produção de óleo, em termos de quantidade e qualidade (COLOMBO *et al.*, 2018). Em adição, a macaúba se destaca por apresentar maior rusticidade e adaptabilidade às condições ambientais mais rigorosas, como déficits de pressão de vapor (DPV) e índice pluviométrico que seriam inadequados à palma africana. Embora a macaúba ainda se encontre em fase de transição do extrativismo para o cultivo comercial, diversos trabalhos têm disponibilizado informações sobre aspectos fisiológicos, ecológicos, genéticos e nutricionais, principalmente com um direcionamento ao melhoramento genético e aumento da produtividade dessa palmeira (PIRES *et al.*, 2013; LANES *et al.*, 2015; MONTOYA *et al.*, 2015; PIMENTEL *et al.*, 2015; DIAS *et al.* 2018).

Diversos fatores podem comprometer o rendimento das culturas. Em palmáceas, a ocorrência de déficit hídrico durante a fase reprodutiva pode provocar o abortamento dos frutos

antes que estes possam alcançar o ponto de colheita. Esses eventos ocorrem principalmente porque a falta de água constitui um entrave ao metabolismo e reduz a capacidade de sustentação dos frutos pela planta (NOOR *et al.* 2011). Experiências em campo com a macaúba tem demonstrado uma grande incidência de aborto de frutos, poucas semanas após o florescimento e ao longo do desenvolvimento dos frutos, que tem levado a perdas significativas no rendimento final. As causas desse aborto têm sido associadas - mas sem comprovação experimental - à limitação dos polinizadores (SCARIOT, ALDICIR; LLERAS; HAY, 1995a), depressão endogâmica (SIMIQUELI *et al.*, 2018) e ainda, a presença de insetos pilhadores (MONTROYA, SEBÁSTIAN GIRALDO *et al.*, 2015). Entretanto, o fator disponibilidade hídrica ainda não reportado.

Em palmeiras de interesse comercial, como a palma africana e o coqueiro, o aumento no suprimento de água tem mostrado resultados positivos na produtividade por intermédio dos processos fisiológicos dessas plantas que contribuíram para a redução da queda prematura dos frutos (SURESH; NAGAMANI, 2006; CARR 2011a). Embora a macaúba seja uma planta adaptada à ambientes mais secos, ela também tem sido encontrada em ambientes de baixada, caracterizado como de solos mais úmidos (MOTTA, PAULO EMILIO FERREIRA DA *et al.*, 2002), e diferentes capacidades reprodutivas em função das diferenças da umidade do solo (Capítulo II). Adicionalmente, a ampla distribuição geográfica da macaúba, possivelmente remete a diferentes requerimentos de água entre os ecótipos, como resultado do histórico evolutivo e adaptativo do seu local de origem. Assim, informações sobre a necessidade hídrica da macaúba, considerando o seu ambiente de origem, pode minimizar os desperdícios de água, e ainda, contribuir para zoneamento agroclimático e direcionamento de materiais genéticos de acordo com a sua demanda hídrica.

De maneira complementar aos estudos já existentes, o objetivo desse estudo foi verificar a responsividade de dois diferentes acessos de macaúba à suplementação hídrica na estação seca, baseando em caracteres fisiológicos e de produção, e ainda, se há uma mitigação ao abortamento dos frutos. Assim, esse estudo poderá contribuir para um melhor entendimento da exigência hídrica de diferentes genótipos de macaúba, caminhando para o desenvolvimento de um zoneamento agroclimático dessa espécie.

## **Material e Métodos**

### ***Local do experimento e condições edafoclimáticas***

O estudo foi realizado no Campo Experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), na Embrapa Cerrados, Planaltina - DF (15°60' S e 47°73' W, 1007 m de altitude), no período de setembro de 2018 a setembro de 2019. O solo do local é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, profundo e bem drenado (EMBRAPA, 1999) e o relevo apresenta leve declividade. A classificação climática da região de acordo com Köppen, é do tipo AW (tropical chuvoso) com a presença de dois períodos definidos: estação chuvosa, entre novembro e abril e estação seca, entre maio a outubro (ausência quase total de chuvas). Os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e evapotranspiração, foram coletados da Estação Meteorológica do CPAC. O déficit de pressão de vapor (DPV), foi calculado baseado nos dados de temperatura e umidade relativa do ar, conforme equação 1 proposta por Jones (1992):

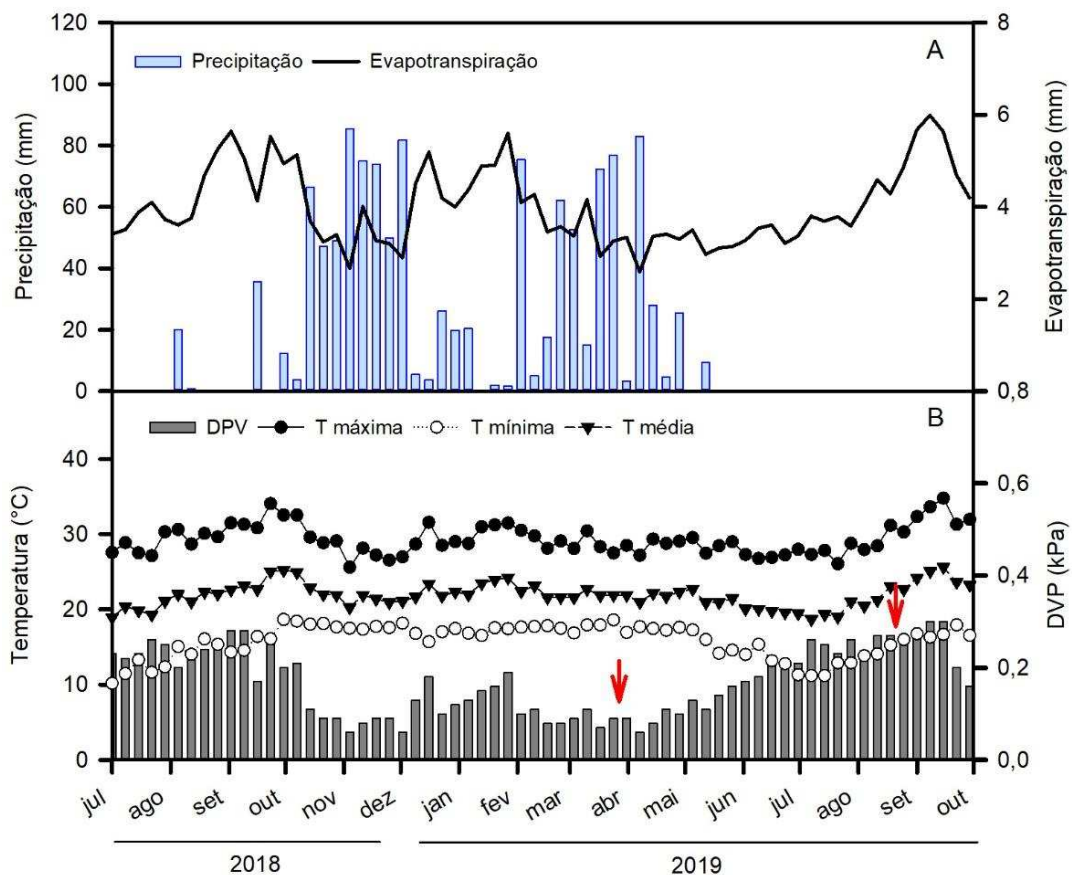
$$DPV_{ar} \text{ (kPa)} = 0.61137e^t * (1-UR/100) \quad (\text{eq. 1})$$

onde t é calculado pela equação 2:

$$t = 17.502 * (T_{arec}) / (240.97 + T_{arec}) \quad (\text{eq. 2})$$

onde  $T_{arec}$  é a temperatura do ar em °C e UR é umidade relativa do ar em %.

A estação chuvosa (novembro de 2018 a maio de 2019) apresentou uma precipitação acumulada de 1025.3 mm, evapotranspiração média de 3.65 mm, temperatura média de 22 °C, e valor médio de DPV de 0.11 kPa. Na estação seca (maio a outubro de 2019) a precipitação acumulada foi de 0.20 mm, evapotranspiração média de 4.22 mm, temperatura média de 21 °C e valor médio de DPV de 0.23 kPa (Figura 1).



**Figura 1.** Precipitação acumulada e evapotranspiração (A), temperaturas máxima, média e mínima e déficit de pressão de vapor – DPV (B) calculados semanalmente durante o período de estudo. Setas vermelhas (↓) indicam o período em que as avaliações fisiológicas foram realizadas, compreendendo os períodos chuvoso (abril) e seco (setembro).

### ***Material vegetal e fertilização***

Foram utilizadas no experimento dois acessos de macaúba em idade produtiva (plântio em 2008) oriundos de dois locais distintos: a) Acesso do Distrito Federal – DF, procedente do Núcleo Rural Buriti Vermelho – DF (15°53'S; 47°24'W) e b) Acesso de São Paulo – SP, com procedência do município de Igarapava – SP (20°14.72'S; 47°44.80'W). Conforme a classificação de Köppen, o clima dos municípios de origem dos acessos é do tipo AW (tropical savânico com inverno seco). Ambos locais pertencem ao bioma Cerrado, entretanto, existem algumas particularidades – como a proximidade de um curso d'água perene, o Rio Grande – e que refletem nos valores médios climatológicos mensais nas estações chuvosa e seca, conforme a tabela 1.

**Tabela 1:** Valores médios dos últimos 36 anos das temperaturas máxima, mínima e média, precipitação e umidade relativa do ar durante as estações chuvosa e seca no Distrito Federal – DF e Igarapava – SP. Fonte: www.weatherspark.com

	<b>Estação chuvosa</b>	
	<b>Distrito Federal – DF</b>	<b>Igarapava – SP</b>
<b>Temperatura mínima (°C)</b>	18	20
<b>Temperatura máxima (°C)</b>	27	29
<b>Temperatura média (°C)</b>	23	25
<b>Precipitação (mm)</b>	170	186
<b>Umidade relativa (%)</b>	81	91
	<b>Estação seca</b>	
	<b>Distrito Federal – DF</b>	<b>Igarapava – SP</b>
<b>Temperatura mínima (°C)</b>	15	17
<b>Temperatura máxima (°C)</b>	28	28
<b>Temperatura média (°C)</b>	21	22
<b>Precipitação (mm)</b>	22	44
<b>Umidade relativa (%)</b>	17	27

O plantio foi realizado no Campo Experimental do CPAC em dezembro de 2008, utilizando mudas já formadas em seu local de origem, que foram selecionadas de acordo com a altura e idade. Antes da instalação do experimento, foi realizada uma correção do solo, utilizando 3,0 t de calcário ha<sup>-1</sup> e 2,0 t de gesso ha<sup>-1</sup>. Após o plantio, foi realizada uma adubação de base com 300 g de NPK (4:30:16), e uma adubação de cobertura com 100 g de sulfato de amônio na cova (60 e 120 dias após o plantio). Após o 1º ano, foram realizadas adubações de manutenção durante a estação chuvosa. A partir do 6º ano foi utilizado NPK (10-05-15), 1.2 kg planta<sup>-1</sup>, três aplicações a cada 30 dias entre novembro e fevereiro, e suplementação de micronutrientes com 300 g do fertilizante FTE (composição: Boro: 2,5%, Cobre: 7,5%, Manganês: 12,0%, Zinco: 5,0%, Ferro: 6,0%) apenas na primeira aplicação.

### ***Suplementação hídrica***

A suplementação hídrica foi fornecida através de sistema de irrigação, adotado desde o início do experimento. Nos estádios iniciais das plantas (até o 5º ano), foi utilizado um sistema de irrigação por gotejamento, com dois gotejadores por planta, com vazão de 4 L h<sup>-1</sup>, acionados 4 h dia<sup>-1</sup> e 2 vezes por semana. Após o 5º ano de idade das plantas (início da fase produtiva), foi adotado um sistema de microaspersão (modelo DAN 2002, NaaDanJain Irrigation, São Paulo, Brasil), e pressão de 150 a 350 kPa, com eficiência de 90% de aplicação, sendo dois aspersores autocompensantes por planta.

A irrigação foi disponibilizada sempre durante os períodos de estiagem no verão e durante toda a estação seca, sendo estimada de acordo com a disponibilidade de chuvas e a evapotranspiração. O perfil de controle da irrigação foi de 0,5 metros, correspondendo à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. A área molhada, por ocasião da aplicação da lâmina de água, foi de 43% da área total ocupada por planta. A evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ) foi estimada pela equação de Penman-Monteith, alimentada com dados obtidos da estação meteorológica próxima da área experimental. O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) adotado foi igual a 1 (PETERLE, 2018) e o momento de irrigação foi definido pelo uso do fator de disponibilidade de águas no solo ( $f$ ), assumindo  $f = 0,5$ . A lâmina de água aplicada, em cada irrigação, foi obtida pelo produto resultante da  $E_{To}$  com o  $K_c$ , considerando a eficiência do sistema de 90%.

### ***Delineamento Experimental***

O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 2, constituído por 2 acessos: Distrito Federal (DF) e São Paulo (SP) e 2 condições hídricas: sem suplementação hídrica (SSH) e com suplementação hídrica (CSH), totalizando 4 tratamentos. As parcelas experimentais mediram 25 m lineares, contendo 6 plantas, com espaçamento de 5 x 5 m (densidade de 400 plantas  $ha^{-1}$ ). A parcela útil foi constituída por 2 plantas escolhidas aleatoriamente nas parcelas, sendo avaliadas 32 plantas no experimento.

### ***Potencial Hídrico Foliar ( $\Psi_w$ )***

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) foi avaliado durante os períodos chuvoso e seco, no intervalo entre as colheitas das safras 2017/2018 e 2018/2019, utilizando um folíolo por planta de oito plantas por tratamento, sendo esse folíolo retirado da região mediana da segunda folha completamente expandida (contada do ápice para base) entre os horários de 4:00 h e 5:30 h (antemanhã). As amostras de folíolos foram coletadas no campo e transferidas para o laboratório em sacos herméticos com papel levemente úmido, sendo estes acondicionados em caixa de isopor com gelo para evitar perda de água por transpiração. Para determinar o  $\Psi_w$ , foi utilizado uma câmara de pressão (SCHOLANDER *et al.*, 1964) modelo 3035 (Soil Moisture Equipment Corp., USA) de acordo com as recomendações de Turner (1988).

### ***Trocas Gasosas***

Parâmetros de trocas gasosas foram determinados na mesma época das avaliações do status hídrico das plantas ( $\Psi_w$ ), utilizando folíolos destacados da região mediana da segunda

folha completamente expandida, como proposto por Pires et al. (2013) e adotando a metodologia empregada por Rosa (2018) em plantas adultas de macaúba. As medições foram feitas utilizando um analisador de gás infra-vermelho (IRGA), modelo portátil LC-Pro (ADC Bioscientific Ltd, Hertfordshire, UK). A taxa de fotossíntese líquida ( $A$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), transpiração ( $E$ ) e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) foram medidas sob temperatura, umidade e concentração de  $\text{CO}_2$  ambiente, com o equipamento configurado para fornecer  $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de luz artificial. As avaliações foram realizadas nos horários entre 8:00 e 10:30 h da manhã, período diário de maior atividade fotossintética da macaúba (PIRES *et al.*, 2013b). Os valores da Eficiência Instantânea do Uso da Água ( $EUA$ ) foram obtidos através da razão entre a taxa de fotossíntese líquida e a condutância estomática ( $A/g_s$ ). A Eficiência da Carboxilação Instantânea foi obtida pela razão entre taxa de fotossíntese líquida e concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $A/C_i$ ).

### ***Características produtivas e taxa de pegamento dos frutos***

Para verificar se haveria influência dos tratamentos SSH e CSH sobre o abortamento dos frutos, foi feita a quantificação da taxa de pegamento de frutos, assumindo como um caractere inverso ao aborto, contabilizando-se a quantidade de frutos aderidos no cacho no momento da colheita, em relação a quantidade de flores femininas (representando o potencial de frutos do cacho). No momento da colheita nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, os cachos foram cortados no início da incisão com a estirpe da planta e os frutos foram derriçados e contados manualmente. Posteriormente, foram avaliadas características relacionadas ao potencial produtivo das plantas, como: número de frutos por cacho, massa de frutos por cacho ( $\text{kg cacho}^{-1}$ ), massa de frutos por planta ( $\text{kg planta}^{-1}$ ) e produtividade ( $\text{t ha}^{-1}$ ). Após a contagem e pesagem dos frutos, as ráquias vazias foram destacadas para determinação da taxa de pegamento de frutos, obtida a partir do número de frutos por cacho (contados no momento da colheita) e a contagem do número de flores femininas (conferida pelas suas respectivas cicatrizes nas ráquias), que representam a potencialidade do número de frutos do cacho (equação 3). A precisão do método de amostragem apresentou uma variação de  $1.8 \pm$  flores femininas ( $n = 20$ ) em comparação com o método por contagem de todas as flores femininas do cacho.

$$\text{TPF (\%)} = \text{NFC/NFF} \times 100 \quad (\text{eq. 3})$$

Onde:

TPF = taxa de pegamento de frutos

NFC = número de frutos por cacho

NFF = número de flores femininas

A contagem do número de flores femininas (NFF) foi realizada por método de amostragem aleatória de ráquulas, conforme a equação 4.

$$NFF = \bar{x}FFR \times \sum RC + FFPC \quad (\text{eq. 4})$$

Onde:

$\bar{x}FFR$  = média de flores femininas por ráquila

$\sum RC$  = somatório de ráquulas do cacho

FFPC = flores femininas na ponta do cacho

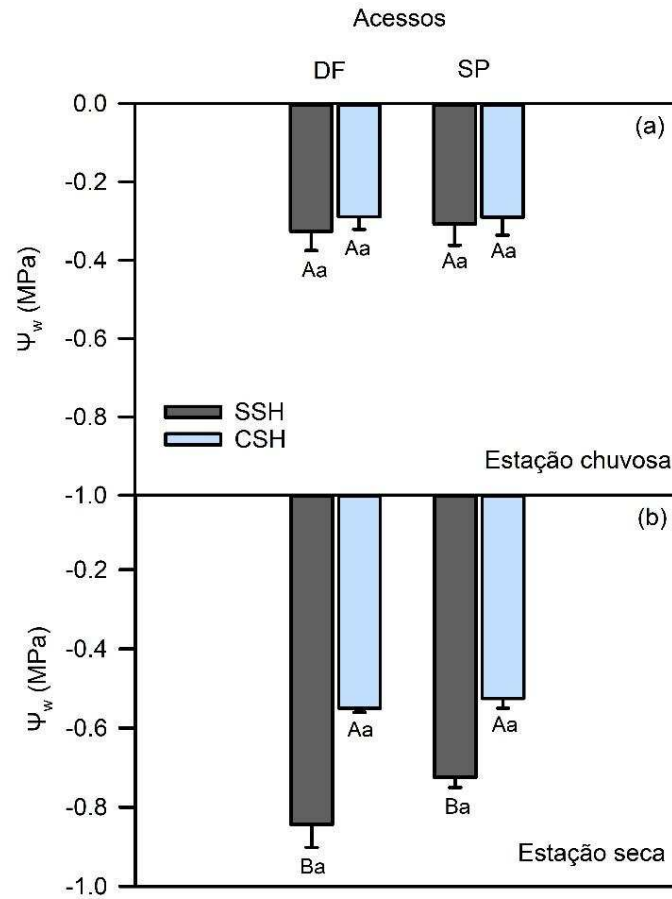
### ***Análise Estatística***

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) pelo teste F e quando detectadas variações significativas, as médias foram contrastadas pelo teste de Duncan a 5% de significância ( $P < 0,05$ ). Análise de regressão ( $R^2$ ) foi calculada para verificar a relação entre a taxa de pegamento de frutos e variáveis fisiológicas dos acessos DF e SP da estação seca ( $\Psi_w$ ,  $A$  e  $g_s$ ) e entre a taxa de pegamento de frutos e características produtivas nas duas safras avaliadas e em ambos acessos. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Software R (R CORE TEAM, 2014) utilizando pacotes específicos.

## **Resultados**

### ***Potencial Hídrico ( $\Psi_w$ ) e Trocas Gasosas***

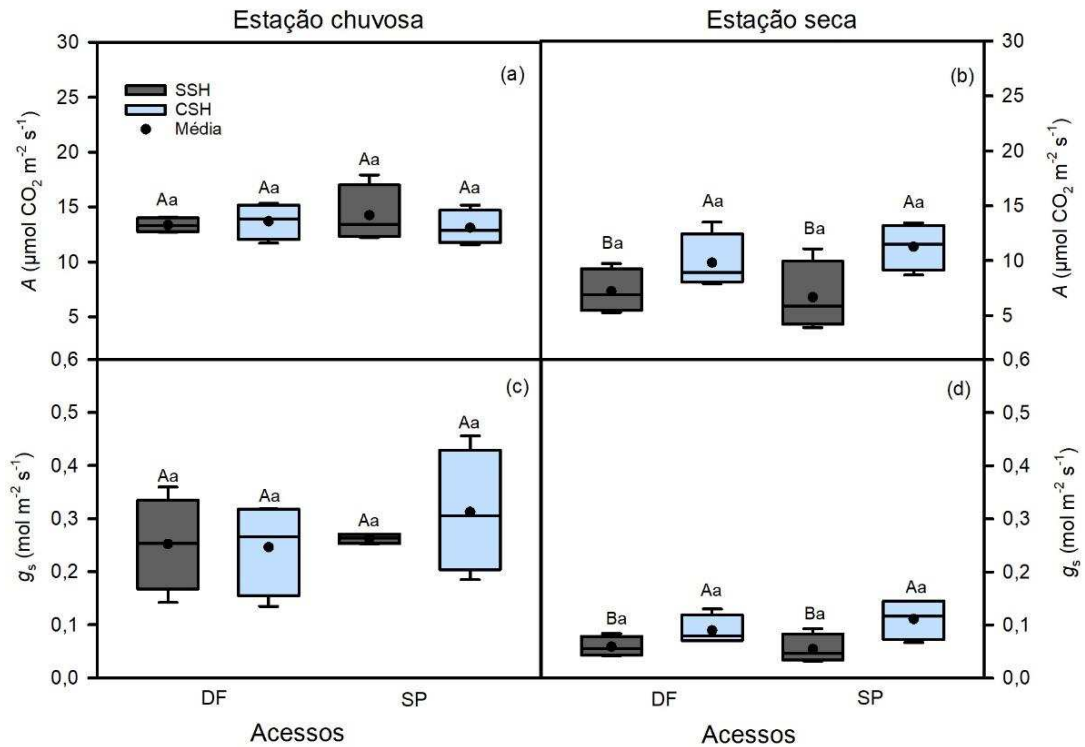
Os valores de  $\Psi_w$  foram semelhantes para os fatores acesso e condição hídrica durante a estação chuvosa (Figura 2 A). Entretanto, na estação seca, houve diferença significativa para o fator condição hídrica ( $P < 0,01$ ). Para o acesso DF, o  $\Psi_w$  das plantas sob condição CSH foi 34% maior em comparação com as plantas em SSH. No acesso SP, o tratamento CSH promoveu aumento de 28% no  $\Psi_w$  em comparação com as plantas em SSH (Figura 2 B).



**Figura 2.** Potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) em dois acessos de macaúba (DF e SP) sob duas condições hídricas (SSH e CSH), avaliado nas estações chuvosa (A) e seca (B) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ) pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da condição hídrica para o mesmo acesso. Letras minúsculas comparam os acessos para uma mesma condição hídrica. Os valores representam a média de quatro repetições e as barras verticais representam o erro padrão ( $\pm$  SE).

Durante a estação chuvosa não houve diferença significativa para os parâmetros  $A$ ,  $g_s$ ,  $E$ ,  $C_i$ ,  $EUA$  e  $A/C_i$  em função dos fatores acesso e condição hídrica (Figura 3 A e C, tabela 2). Com exceção do parâmetro  $C_i$ , a estação seca promoveu diferenças em todas as variáveis fisiológicas. Os valores de  $A$  na estação seca foram estatisticamente diferentes para o fator condição hídrica ( $P < 0,01$ ), sendo que a condição CSH promoveu aumentos de 36% e 69% para os acessos DF e SP, respectivamente, em comparação com o tratamento SSH (Figura 3 B). A  $g_s$  do acesso DF na estação seca, apresentou um aumento de 51% na condição CSH em comparação com SSH, assim como para o acesso SP, esse aumento foi de 105% (Figura 3 D). O tratamento CSH promoveu aumentos de 33% e 90% nos valores de  $E$  para os acessos DF e SP, respectivamente, em comparação com o tratamento SSH na estação seca (Tabela 2). Para os valores de  $EUA$  na estação seca, o tratamento de SSH promoveu aumentos significativos nesse parâmetro em comparação com CSH ( $P < 0,01$ ), sendo de 30% para o acesso DF e 20% para SP. O tratamento

CSH ocasionou um aumento de 24% e 88% para os acessos DF e SP, respectivamente, no que se refere a  $A/C_i$  na estação seca.



**Figura 3.** Fotossíntese líquida -  $A$  (A e B) e condutância estomática -  $g_s$  (C e D) em dois acessos de macaúba (DF e SP) avaliados nas estações chuvosa e seca e cultivadas sob duas condições hídricas (SSH e CSH) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados). Médias seguida pela mesma letra não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ) pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da condição hídrica para o mesmo acesso. Letras minúsculas comparam os acessos para uma mesma condição hídrica.

**Tabela 2.** Transpiração ( $E$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), eficiência no uso da água ( $EUA$ ) e eficiência instantânea da carboxilação ( $A/C_i$ ) em dois acessos de macaúba (DF e SP) avaliados nas estações chuvosa e seca e cultivadas sob duas condições hídricas (SSH e CSH) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados).

Acessos/suplementação hídrica	$E$ ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )		$C_i$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
DF/SSH	$2.45 \pm 0.28$ Aa	$1.56 \pm 0.21$ Ba	$274.9 \pm 14.84$ Aa	$220.4 \pm 10.95$ Aa
DF/CSH	$2.57 \pm 0.30$ Aa	$2.08 \pm 0.26$ Aa	$271.6 \pm 19.32$ Aa	$243.4 \pm 22.35$ Aa
SP/SSH	$2.67 \pm 0.31$ Aa	$1.28 \pm 0.16$ Ba	$294.9 \pm 16.74$ Aa	$253.2 \pm 21.29$ Aa
SP/CSH	$2.80 \pm 0.25$ Aa	$2.43 \pm 0.26$ Aa	$312.0 \pm 15.93$ Aa	$242.1 \pm 15.55$ Aa

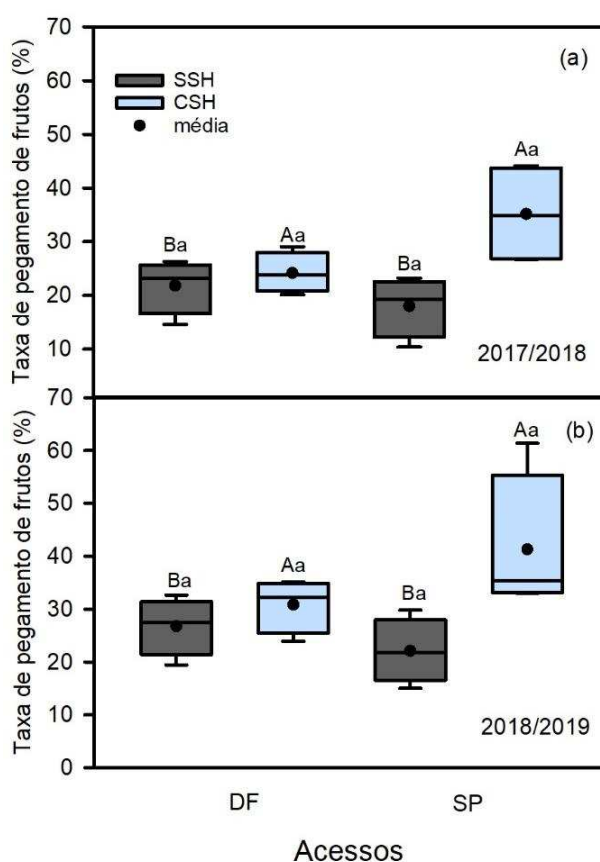
  

Acessos/suplementação hídrica	$EUA$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )		$A/C_i$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ )	
	Estação chuvosa	Estação seca	Estação chuvosa	Estação seca
DF/SSH	$61.32 \pm 13.13$ Aa	$135.93 \pm 8.98$ Aa	$0.057 \pm 0.006$ Aa	$0.033 \pm 0.004$ Ba
DF/CSH	$63.17 \pm 13.25$ Aa	$104.40 \pm 4.35$ Ba	$0.071 \pm 0.013$ Aa	$0.041 \pm 0.007$ Aa
SP/SSH	$61.98 \pm 7.07$ Aa	$129.70 \pm 13.6$ Aa	$0.048 \pm 0.004$ Aa	$0.025 \pm 0.003$ Ba
SP/CSH	$51.57 \pm 10.22$ Aa	$107.64 \pm 7.51$ Ba	$0.048 \pm 0.005$ Aa	$0.047 \pm 0.004$ Aa

Letras maiúsculas diferentes na coluna comparam o efeito da condição hídrica (SSH e CSH) para o mesmo acesso. Letras minúsculas na coluna comparam os diferentes acessos (DF e SP) para uma mesma condição hídrica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de significância. Médias  $\pm$  erro padrão da média,  $n = 4$ .

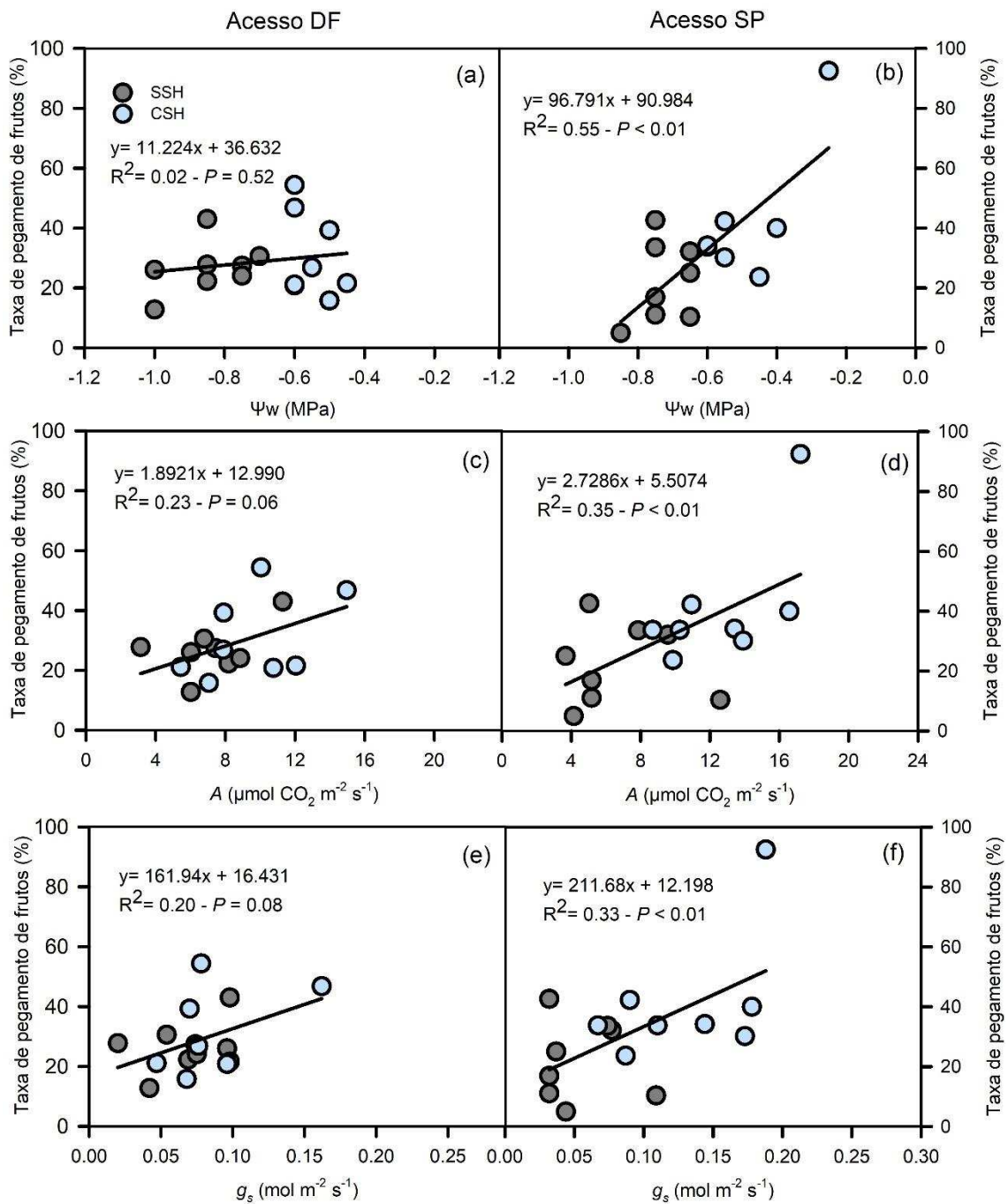
### Taxa de pagamento de frutos e características produtivas

Na safra de 2017/2018, a taxa de pagamento de frutos foi significativamente diferente apenas para o fator condição hídrica ( $P < 0,05$ ) (Figura 4 A). Porém, em percentual de ganho, sob tratamento CSH, o acesso DF apresentou uma taxa de pagamento de frutos apenas 11% maior em comparação com as plantas em condição SSH, enquanto que para o acesso SP esse incremento foi de 101%. O mesmo comportamento foi observado na safra de 2018/2019, em que a taxa de pagamento de frutos para os acessos DF e SP sob tratamento CSH, foram respectivamente, 15% e 101% maiores do que o tratamento SSH (Figura 4 B).



**Figura 4.** Taxa de pagamento de frutos das safras de 2017/2018 (A) e 2018/2019 (B) em dois acessos de macaúba (DF e SP) cultivadas em duas condições hídricas (SSH e CSH) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ) pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da condição hídrica para o mesmo acesso. Letras minúsculas comparam os acessos para uma mesma condição hídrica. (n=4).

Para o acesso DF, a taxa de pagamento de frutos não foi influenciada pelo  $\Psi_w$  ( $P = 0.52$ ) e pelas variáveis de trocas gasosas  $A$  ( $P = 0.06$ ) e  $g_s$  ( $P = 0.08$ ). Em contrapartida, a taxa de pagamento de frutos para o acesso SP ajustou-se ao modelo linear crescente em função dos valores de  $\Psi_w$  ( $R^2 = 0.55$ ;  $P < 0.01$ ),  $A$  ( $R^2 = 0.35$ ;  $P < 0.05$ ) e  $g_s$  ( $R^2 = 0.33$ ;  $P < 0.05$ ) (Figura 5).

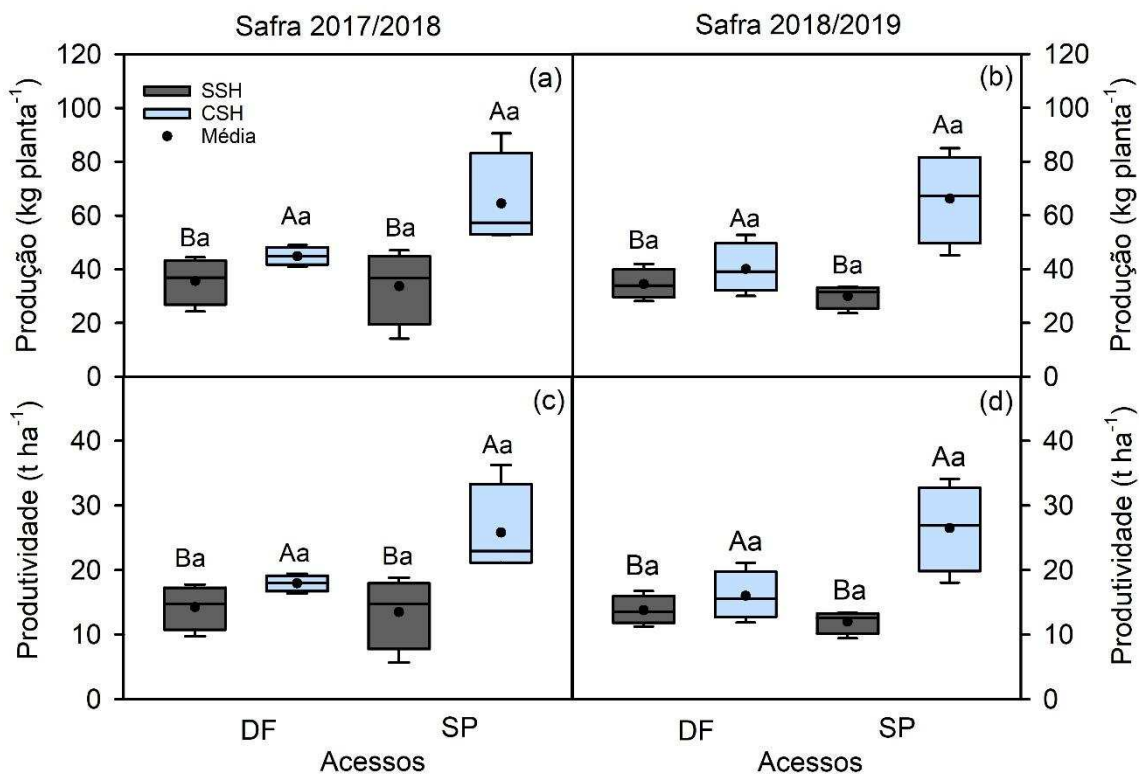


**Figura 5.** Análise de regressão entre taxa de pegamento de frutos da safra de 2018/2019 com o potencial hídrico foliar  $-\Psi_w$  (A e B), fotossíntese líquida -  $A$  (C e D) e condutância estomática -  $g_s$  (E e F) obtidos na estação seca em dois acessos de macaúba (DF e SP) e em função dos tratamentos SSH (pontos cinzas) e CSH (pontos azuis).

A produção de frutos por planta foi incrementada em ambos acessos sob tratamento CSH em comparação com a condição de SSH (Figuras 6 A e B). Na safra 2017/2018, o acesso DF em CSH apresentou um aumento na produção de frutos em 33% em comparação com o tratamento de SSH. Para o acesso SP, esse incremento foi de 92%. Já para a safra de 2018/2019, o tratamento CSH promoveu aumentos na produção em 16% e 121% para os acessos DF e SP,

respectivamente, em comparação com a condição de SSH. Para as duas safras avaliadas, houve aumento na produtividade das plantas em CSH em comparação com as de SSH (Figuras 6 C e D). Para o acesso DF, a condição CSH promoveu aumento de 26% e 16% na produtividade, para as safras 2017/2018 e 2018/2019, respectivamente, em comparação com a condição de SSH. No acesso SP, o tratamento CSH beneficiou a produtividade em 91% e 121%, para os dois anos de safra, respectivamente, em relação ao tratamento de SSH.

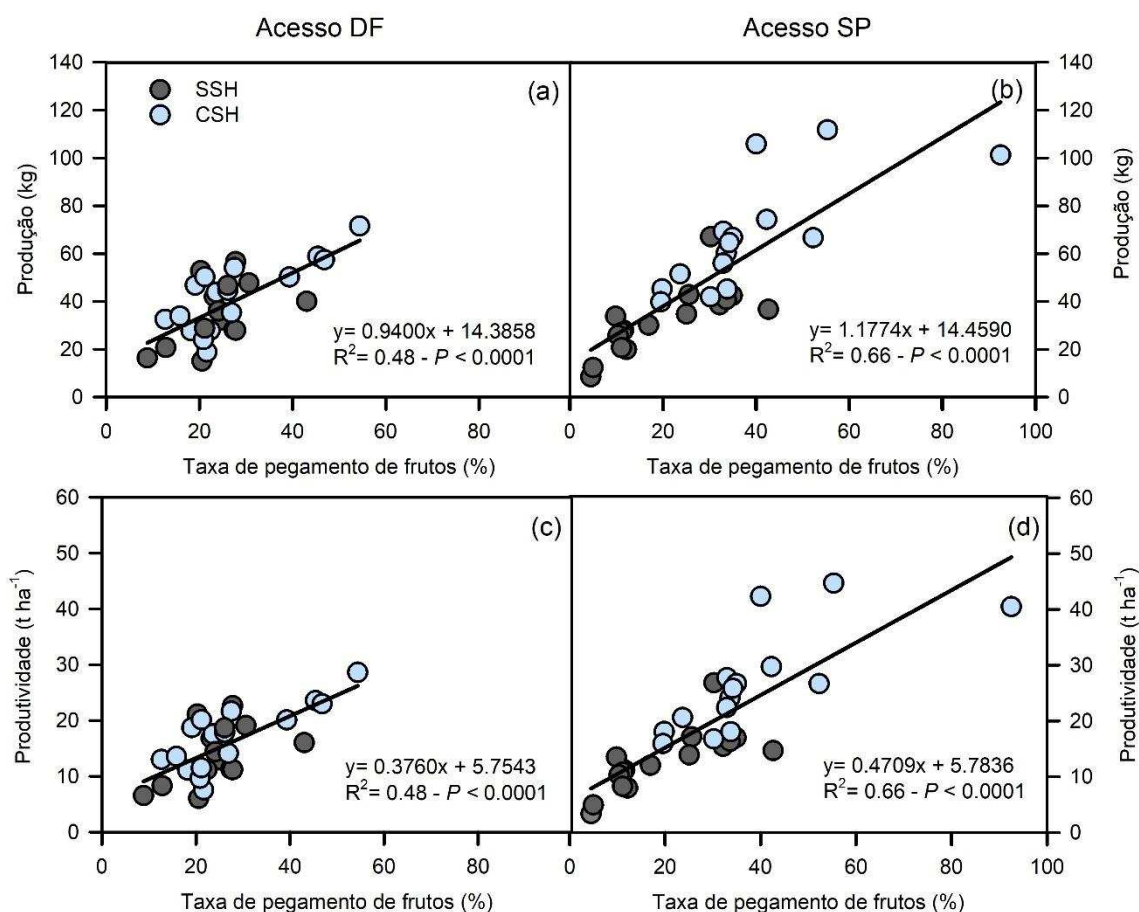
Outros parâmetros de produção como número de frutos por cacho (NFC) e massa de frutos por cacho (MFC) foram incrementados pela condição CSH em ambas as safras, sendo o acesso SP mais beneficiado em comparação com o acesso DF (Tabela suplementar 1).



**Figura 6.** Produção de frutos (A e B) e Produtividade (C e D) das safras de 2017/2018 e 2018/2019 em dois acessos de macaúba (DF e SP) cultivadas sob duas condições hídricas (SSH e CSH) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade ( $P < 0,05$ ) pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da condição hídrica para o mesmo acesso. Letras minúsculas comparam os diferentes acessos para uma mesma condição hídrica. (n=4).

Para os dois acessos estudados, houve ajuste de modelo linear crescente entre a produção de frutos por planta e a produtividade em função da taxa de pegamento de frutos (Figura 7). Para a produção de frutos, foram encontrados incrementos médios em 0.9 e 1.17 kg de frutos para os acessos DF ( $R^2 = 0.48 - P < 0.001$ ) e SP ( $R^2 = 0.48 - P < 0.001$ ), respectivamente, para cada aumento em 1% na taxa de pegamento de frutos (Figuras 7 A e B). A produtividade dos acessos DF ( $R^2 = 0.48 - P < 0.001$ ) e SP ( $R^2 = 0.48 - P < 0.001$ ) foram

incrementadas em média em 0.37 e 0.47 t ha<sup>-1</sup> para cada aumento em 1% na taxa de pagamento de frutos (Figuras 7 C e D).



**Figura 7.** Análise de regressão entre taxa de pagamento de frutos com a produção de frutos (A e B) e produtividade (C e D) para os acessos DF e SP avaliados nas safras de 2017/2018 e 2018/2019 cultivadas em duas condições hídricas: SSH (pontos cinzas) e CSH 2019 (pontos azuis) em Planaltina – DF.

## Discussão

### *A disponibilidade hídrica durante a seca favoreceu o status hídrico e as trocas gasosas nos dois acessos de macaúba*

Durante a estação chuvosa, o potencial hídrico foliar ( $\Psi_w$ ) dos acessos DF e SP foram semelhantes, independentemente dos tratamentos SSH e CSH (valor médio de -0.3 MPa), sendo esses resultados um reflexo das chuvas da estação (Figura 1). Entretanto, durante a estação seca a condição CSH promoveu aumentos no  $\Psi_w$  em ambos acessos de macaúba, em relação a condição de SSH (Figura 2). Uma adequação na disponibilidade hídrica do solo, quer seja de origem natural ou artificial, possibilita o seu armazenamento nos tecidos vegetais que contribui para aliviar os sintomas de estresse hídrico na planta (SANCHES; SILVA, 2013). As palmeiras possuem reservatórios alternativos de água, capazes de manter valores de  $\Psi_w$  satisfatórios em função de suas características anatômicas do caule e da bainha do pecíolo, que em muitas

espécies - como a macaúba - apresenta-se dilatada e suculenta (HOLBROOK; SINCLAIR 1992; SPERLING *et al.* 2015). De maneira particular, a macaubeira possui um estipe subterrânea do tipo saxofone, com alta capacidade de armazenamento de água (SOUZA *et al.* 2017). Além disso, destaca-se como uma planta extremamente eficiente do ponto de vista hidrológico, por favorecer uma maior infiltração de água no solo (DIAS *et al.*, 2011). Todas essas características associadas à condição CSH, certamente contribuíram para a manutenção do  $\Psi_w$  durante a estação seca.

Esses incrementos ou manutenção dos valores de  $\Psi_w$  nos tecidos foliares em ocasião de períodos de seca, são importantes para os processos fisiológicos da planta, como abertura estomática e trocas gasosas (BRODRIBB; COCHARD, 2009; GUSMAO *et al.* 2012). Maiores valores de  $A$  nas plantas em CSH em comparação com as SSH, pode ser associado a ação direta da água sob características estomáticas e não-estomáticas (FLEXAS; MEDRANO, 2002; ZHOU *et al.* 2013). Nesse caso, o suprimento de água contribuiu para a manutenção do turgor das células guarda, promovendo maiores valores de  $g_s$  (especialmente para o acesso SP), e conseqüentemente, maior influxo de  $CO_2$  que associado a ausência de limitações bioquímicas (relação  $A/C_i$ ), permitiu maiores valores de  $A$  para essas plantas (Figura 3; tabela 2) (BUCKLEY, 2005). Adicionalmente, também ocorreu aumento na  $E$  em função dos maiores valores de  $g_s$  e disponibilidade de água, cujo processo é importante para o transporte de água e solutos da raiz para a parte aérea (MATIMATI; VERBOOM; CRAMER, 2014).

Importante destacar que, embora a condição CSH tenha favorecido as trocas gasosas na estação seca, não houve um restabelecimento total em seus valores quando comparado a estação chuvosa. Como exemplo, a concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) não foi alterada pela condição CSH na estação seca (tabela 2), com uma provável relação aos valores de  $g_s$ , pois embora a suplementação hídrica tenha favorecido a abertura estomática na estação seca, não houve um restabelecimento total desse parâmetro (Figuras 3 C e D). Em outras palavras, a menor abertura estomática na estação seca, certamente dificultou a liberação do  $CO_2$  das folhas para a atmosfera, e nesse caso, houve um acúmulo desse substrato nos espaços intercelulares em decorrência da respiração noturna – em especial a de manutenção (AZOULAY-SHEMER *et al.*, 2015; ENGINEER *et al.*, 2017). Para muitas espécies, aumentos em  $C_i$  também pode ser atribuído a uma limitação não estomática como ocorrência de fotoinibição, por exemplo (BRODRIBB, 1996). Entretanto, nossos resultados mostraram que os valores de  $A$  em CSH não foram fortemente prejudicados pela seca, e isso se torna evidente quando verificamos que os valores de  $A/C_i$  também foram incrementados, confirmando que não houve dano bioquímico

nas plantas de macaúba, mantendo a atividade de carboxilação da Rubisco sob maior disponibilidade hídrica (SCALON *et al.*, 2015).

A eficiência no uso da água (*EUA*) foi incrementada na estação seca para os acessos DF e SP, especialmente sob condição de SSH. Aumentos na *EUA* durante a estação seca são reflexos da combinação de menor precipitação e aumento no DPV (HATFIELD; DOLD, 2019), que forçosamente levam a decréscimos na  $g_s$  (BEER *et al.*, 2009). Sob essas condições, as perdas de água por transpiração são menores, porém, limita o ganho de carbono para os processos fotossintéticos. Quando há incrementos na *EUA*, significa aumento no ganho de carbono para cada unidade de água usada pela planta (HATFIELD; DOLD, 2019) que em condições de seca, é tida como uma importante estratégia de conservação de água (BLANKENAGEL *et al.*, 2018). Trabalhos anteriores já haviam confirmado que a macaúba apresenta incremento na *EUA* em condição de déficit hídrico (MOTA; CANO, 2016), e que existe variabilidade genética para essa característica entre diferentes famílias de macaúba (DOMICIANO *et al.*, 2015). Em todo caso, a macaúba pode ser caracterizada como uma palmeira resistente à seca, principalmente por exigir baixa precipitação anual e apresentar ampla distribuição nos trópicos da América (MOTTA *et al.* 2002; OLIVEIRA *et al.* 2016).

Apesar da suplementação hídrica ter sido vantajosa para as trocas gasosas de ambos os acessos de macaúba, houve nitidamente uma maior propensão do acesso SP se beneficiar da condição CSH, com percentuais de incrementos das variáveis diretamente relacionadas ao ganho de carbono ( $A$ ,  $g_s$  e  $A/C_i$ ) sempre maiores do que aqueles observados no acesso DF. Tais resultados podem ser explicados pelo fato de que o acesso SP evoluiu em ambiente com maiores médias mensais de precipitação e umidade relativa do ar nas estações chuvosa e seca, como observado na tabela 1 e possivelmente favoreceu uma maior plasticidade nessas plantas ao maior suprimento de água (GÉNARD *et al.*, 2017).

Não é surpreendente que o acesso DF tenha demonstrado menor responsividade ao aumento no fornecimento de água na estação seca, já que os vegetais tendem a adaptar-se às condições climáticas do seu ambiente de origem, e conseqüentemente, refletindo sob suas respostas à ambientes estressantes (HAWORTH *et al.*, 2017). Assim, o aumento na suplementação hídrica durante a estação seca, favoreceu de maneira mais contundente os aspectos fisiológicos do acesso SP, e conseqüentemente, levou a repercussões positivas sob as fenofases reprodutivas da macaúba. Obviamente que um desempenho fisiológico mais robusto pode influenciar de forma positiva o sucesso reprodutivo e conseqüentemente a produção, como de fato ocorreu para o material procedente de São Paulo.

***A maior disponibilidade hídrica contribuiu para a manutenção satisfatória das variáveis fisiológicas, refletindo numa melhor taxa de pegamento de frutos***

A condição CSH promoveu aumento na taxa de pegamento de frutos dos acessos DF e SP em comparação com SSH nas duas safras avaliadas (2017/2018 e 2018/2019), sendo esse resultado mais expressivo para o acesso SP (Figuras 4 A e B). A disponibilidade de água durante o período reprodutivo é crucial para o sucesso de qualquer cultura, sobretudo, durante a fase de diferenciação floral, florescimento e enchimento dos frutos (LIU *et al.*, 2019). Para a macaúba, já foi descrito que a fase de florescimento coincide com a estação chuvosa (Capítulo 1), sendo importante para impulsionar a floração após um período de estiagem (REICH; BORCHERT, 1984). Logo, a água não é um fator limitante nessa fase. Entretanto, é possível que uma ocorrência de déficit hídrico na estação que antecede o florescimento e durante o período de desenvolvimento dos frutos, aumente significativamente o aborto de flores e frutos (VALLIYODAN; NGUYEN, 2012).

As implicações dos aspectos fisiológicos avaliados na estação seca com a taxa de pegamento de frutos, revelou que para o acesso DF as variáveis  $\Psi_w$ ,  $A$  e  $g_s$ , não exercem influência sob o pegamento de frutos (Figuras 5 A, C e E). Já para o acesso SP, essas mesmas variáveis fisiológicas estão relacionadas ao aumento na taxa de pegamento de frutos, especialmente em decorrência ao tratamento CSH (Figuras 5 B, D e F). Assim, há um reforço de que as plantas de SP mantidas em condição CSH na estação seca, mantiveram um maior aporte de assimilados para garantir o pegamento dos frutos até a colheita.

Para a maioria das espécies perenes, a estação seca pode refletir em período crítico no acúmulo de reservas pela planta, devido a maior inibição das taxas fotossintéticas (NOOR *et al.* 2011). Desse modo, ocorre redução da quantidade de fotoassimilados que são translocados para os tecidos reprodutivos, aumentando a taxa de aborto nos frutos que irão surgir na estação chuvosa (WUBS; HEUVELINK; MARCELIS, 2009). De fato, nossos resultados mostraram que as plantas que não receberam suplementação hídrica durante a estiagem, apresentaram taxas fotossintéticas menores independente do acesso. Por outro lado, quando o suprimento de água é suficiente durante todas as estações climáticas, os processos fisiológicos são mantidos, e a oferta de metabólitos torna-se suficiente para a demanda de frutos, reduzindo perdas por aborto (PATANÈ; TRINGALI; SORTINO, 2011). Este resultado foi mais pronunciado no acesso SP em comparação com o acesso DF (Figura 5). Em concordância com nossos resultados, Noor *et al.* (2011) observaram que a água também é o fator de maior influência sobre a fase reprodutiva da palma africana (*Elaeis guineenses*), sendo associado principalmente a condição fisiológica da planta.

***O tratamento CSH favoreceu a produção de frutos e a produtividade dos acessos estudados, com maior prevalência para o acesso de SP***

A maior disponibilidade hídrica proporcionada pela condição CSH, carrou em melhor desempenho produtivo na macaúba (Figura 6; Tabela suplementar 1). A produção de frutos do acesso SP foi mais favorecida pelo tratamento CSH em comparação com o DF (Figuras 6 A e B), e essa superioridade do acesso SP pode ser atribuída às características fisiológicas inerentes ao próprio acesso. Apesar do  $\Psi_w$  de ambos acessos no tratamento CSH terem sido similares, a assimilação líquida de carbono foi expressivamente maior para plantas de SP ( $A_{SP} \sim 69\% > A_{DF}$ ). Assim, é provável que ecótipos oriundos de locais onde as características microclimáticas são mais favoráveis, apresentem uma maior plasticidade fisiológica/morfológica à suplementação hídrica, respondendo de forma mais eficiente (PIRES, 2017); em contrapartida, aqueles materiais oriundos de regiões mais secas, apresentam efeitos menos severos à escassez hídrica (HAWORTH *et al.*, 2017; VELIKOVA *et al.*, 2018). Ciconini *et al.* (2013) trabalhando com plantas de macaúba de diferentes biomas, encontraram valores de produção na ordem de 18 kg de frutos por planta, sendo inferiores aos nossos achados. Em dendezeiro, a maior produção de frutos é favorecida pelo fornecimento hídrico durante todas as fenofases, havendo uma forte relação entre o volume de água aplicado e o rendimento da planta, principalmente por reduzir o aborto de inflorescências imaturas (WOITTIEZ *et al.* 2017).

De maneira geral, a manutenção na disponibilidade hídrica é eficaz para amenizar os efeitos da seca e promover maiores rendimentos de frutos (CARR, 2011b). Os resultados desse estudo mostram claramente o benefício do fornecimento hídrico sobre a produtividade da macaúba (Figuras 6 C e D). Entretanto, os acessos DF e SP responderam de maneira diferenciada ao aumento na suplementação hídrica. Os valores médios de produtividade encontrados para o acesso DF nas condições SSH e CSH foram respectivamente, 14.3 t ha<sup>-1</sup> e 18 t ha<sup>-1</sup> na safra 2017/2018, e na safra 2018/2019 os valores foram de 13.7 t ha<sup>-1</sup> e 16 t ha<sup>-1</sup>. Para o acesso SP, os valores médios de produtividade nas condições SSH e CSH, foram respectivamente, 13.5 t ha<sup>-1</sup> e 25.8 t ha<sup>-1</sup> na safra 2017/2018 e 12 t ha<sup>-1</sup> e 26 t ha<sup>-1</sup> na safra 2018/2019. Tais resultados podem ser associados ao favorecimento do tratamento CSH nessas plantas, que promoveu uma cascata de respostas, iniciando pela melhoria no status hídrico, seguindo para o favorecimento às trocas gasosas, e conseqüentemente, carrou para maiores ganhos de carbono e aporte de assimilados (ZÚÑIGA *et al.*, 2018). Os valores de produtividade na condição SSH para ambos acessos, estão bem abaixo da produtividade média estimada por Pimentel *et al.* (2011) que é na ordem de 22 t ha<sup>-1</sup> para plantas com a mesma idade (9 anos).

Entretanto, sob a condição CSH as produtividades médias de ambos acessos, foram próximos ou superiores ao valor proposto por esses autores.

Aumentos na taxa de pegamento de frutos também refletiram em aumentos na produção por planta e produtividade nas duas safras avaliadas para ambos os acessos (Figura 7), especialmente para o acesso SP com maiores valores de  $R^2$ . As diferenças entre as respostas dos acessos frente ao aumento na suplementação hídrica, pode ser explicado pelo fato de que na condição CSH, o acesso SP apresentou maiores ganhos percentuais de  $A$ ,  $g_s$  e  $A/C_i$  em relação ao acesso DF, sendo isso fortemente relacionado com a taxa de pegamento de frutos (GIULIANI *et al.*, 2018). Nos processos evolutivos, as plantas sofrem pressões seletivas em função dos agentes abióticos do local de origem, sendo capaz de modular geneticamente alguns atributos estruturais e funcionais (adaptação) em ambientes desfavoráveis (VALLADARES; GIANOLI; GÓMEZ, 2007). Dessa maneira, é possível que o acesso SP por ser de procedência de um local com maior precipitação, tenha um maior desenvolvimento do seu sistema radicular – em especial nas camadas mais superficiais do solo – resultando em maior capacidade de absorção de água, um aporte mais expressivo de fotoassimilados via assimilação líquida de carbono, e conseqüentemente, maior produtividade (SÁNCHEZ-BLANCO *et al.* 2014).

Esse aumento na produtividade associado à diferentes respostas entre os acessos em condição de maior disponibilidade hídrica, podem atuar como peças fundamentais no estabelecimento da cadeia produtiva da macaúba, impulsionando para o desenvolvimento de estudos sobre zoneamento climático, e posteriormente, na escolha de materiais genéticos ideias para cada ambiente de cultivo.

## Conclusões

No presente estudo, o status hídrico e as trocas gasosas dos acessos DF e SP foram favorecidos pela suplementação hídrica durante a estação seca, demonstrando a responsividade fisiológica da macaúba ao maior suprimento de água. Contudo, as respostas mais positivas foram observadas nos acessos provenientes de São Paulo.

O abortamento de frutos foi reduzido pelo tratamento CSH, como verificado pelos maiores valores de taxa de pegamento de frutos em ambos acessos, sendo o material de SP mais beneficiado do que o DF. Maiores taxas de pegamento de frutos foram influenciadas positivamente pelos aumentos nos valores de  $\Psi_w$ ,  $A$  e  $g_s$  ocasionado por CSH na estação seca, evidenciando que o abortamento de frutos em macaúba está associado aos aspectos fisiológicos da planta. Da mesma forma, a produção e produtividade da macaúba foram incrementadas pela condição CSH, especialmente para o acesso SP.

Esses achados indicam que há um diferencial genotípico da macaúba em relação à suplementação hídrica e que aponta para um direcionamento de futuros programas de compatibilização de cultivares e agro-zoneamento.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA CERRADOS – especialmente ao doutor Leo Duc Haa Carson Schwartzaupt da Conceição por toda colaboração na realização desse trabalho.

### Referências

- BEER, C. *et al.* Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 2, p. 1–13, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1029/2008GB003233>
- BLANKENAGEL, S. *et al.* Generating plants with improved water use efficiency. **Agronomy**, v. 8, n. 194, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy8090194>
- BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. **Plant Physiology**, v. 149, n. 1, p. 575–584, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1104/pp.108.129783>
- BUCKLEY, T. N. The control of stomata by water balance. **New Phytologist**, v. 168, n. 2, p. 275–292, 2005. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01543.x>
- CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coconut (*Cocos nucifera*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 27–51, 2011a. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479710000931>
- CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of oil palm (*Elaeis guineensis*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 4, p. 629–652, 2011b. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479711000494>
- CICONINI, G. *et al.* Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 208–214, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.008>
- COLOMBO, C. A. *et al.* Macaúba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v. 25, n. 1, p. 4–9, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1051/ocl/2017038>
- DIAS, A. N. *et al.* Acclimation responses of macaw palm seedlings to contrasting light environments. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33553-1>

DIAS, H. C. T. *et al.* Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 52–60, 2011.

DOMICIANO, G. P. *et al.* Genetic parameters and diversity in progenies from macaw palm based on morphological and physiological traits. **Ciência Rural**, v. 45, n. 9, p. 1599–1605, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140909>

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Serviço de Produção de Informação; Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 1999.

ENGINEER, C. *et al.* CO<sub>2</sub> sensing and CO<sub>2</sub> regulation of stomatal conductance: advances and open questions. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 1, p. 16–30, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.08.014>

EVARISTO, A. B. *et al.* Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571–577, 2016. Available at: <https://doi.org/10.5902/1980509822757>

FLEXAS, J.; MEDRANO, H. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. **Annals of Botany**, v. 89, n. 2, p. 183–189, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf027>

GÉNARD, M. *et al.* Genotype-by-environment interactions emerge from simple assemblages of mathematical functions in ecological models. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, p. 1–4, 2017. Available at: <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00013>

GIULIANI, M. M. *et al.* Combined effects of deficit irrigation and strobilurin application on gas exchange, yield and water use efficiency in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 233, p. 149–158, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.052>

GUSMAO, M. *et al.* Water deficit during the reproductive period of grass pea (*Lathyrus sativus* L.) reduced grain yield but maintained seed size. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 198, n. 6, p. 430–441, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2012.00513.x>

HATFIELD, J. L.; DOLD, C. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>

HAWORTH, M. *et al.* Xylem morphology determines the drought response of two *Arundo donax* ecotypes from contrasting habitats. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 1, p. 119–131, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12322>

HOLBROOK, N. M.; SINCLAIR, T. R. Water balance in the arborescent palm, *Sabal palmetto*. I. Stem structure, tissue water release properties and leaf epidermal conductance. **Plant, Cell & Environment**, v. 15, n. 4, p. 393–399, 1992. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1992.tb00989.x>

JONES, H. G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge University Press, 1992. v. 2

- KITCHA, S.; CHEIRSILP, B. Screening of oleaginous yeasts and optimization for lipid production using crude glycerol as a carbon source. **Energy Procedia**, v. 9, n. 1, p. 274–282, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.029>
- LANES, É. C. M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the macaw palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex situ germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102–112, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>
- LIU, Q. *et al.* Drip irrigation elevated olive productivity in Southwest China. **Hort Technology**, v. 29, n. 2, p. 122–127, 2019. Available at: <https://doi.org/10.21273/HORTTECH04211-18>
- MATIMATI, I.; VERBOOM, G. A.; CRAMER, M. D. Nitrogen regulation of transpiration controls mass-flow acquisition of nutrients. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 1, p. 159–168, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/ert367>
- MD NOOR, M. R.; HARUN, M. H.; JANTAN, N. M. Physiological plant stress and responses in oil palm. **Oil Palm Bulletin**, v. 62, n. May, p. 25–32, 2011.
- MONTOYA, S. G. *et al.* Registro da presença e danos causados por coleopteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.763>
- MOTA, C. S.; CANO, M. A. O. Matter accumulation and photosynthetic responses of macaw palm to cyclical drought. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 4, p. 850–858, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n409rc>
- 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.
- MOTOIKE, S. Y. *et al.* **Processo de germinação e produção de sementes pré-germinadas de palmeiras do gênero *Acrocomia***. BR n° PI 0703180-7 A2. Concessão: 2007.
- MOTTA, P. E. F. *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002.
- OLIVEIRA, D. *et al.* Ecophysiological leaf traits of native and exotic palm tree species under semi-arid conditions. **Bragantia**, v. 75, n. 2, p. 128–134, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.364>
- PATANÈ, C.; TRINGALI, S.; SORTINO, O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 129, n. 4, p. 590–596, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.04.030>
- PETERLE, G. **Determinação do consumo de água e do desenvolvimento de mudas (pré-viveiro) de macaúba (*Acrocomia aculeata*) em ambiente controlado com base n evapotranspiração de referência**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 28 p. 2018.

PIMENTEL, L. D. *et al.* Recomendação de adubação e calagem para o cultivo da macaúba: 1ª aproximação. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 256, p. 20–30, 2011.

PIMENTEL, L. D. *et al.* Coeficientes técnicos e custos de produção do cultivo da macaúba. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 61–69, 2011.

PIMENTEL, L. D. *et al.* Effect of nitrogen and potassium rates on early development of macaw palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1671–1680, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140352>

PIRES, T. P. **Diversidade genética, fisiológica e anatômica em populações de macaúba provenientes de diferentes biomas**. Universidade Federal de Viçosa, 100 p. 2017

PIRES, T. P. *et al.* 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. Available at: <http://www.r-project.org/>

RAMOS, M. I. L. *et al.* Qualidade nutricional da polpa de bocaiúva *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 90–94, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1590/s0101-20612008000500015>

REICH, P. B.; BORCHERT, R. Water stress and tree phenology in a tropical dry forest in the lowlands of Costa Rica. **Journal of Ecology**, v. 72, n. 1, p. 61–74, 1984.

ROSA, B. L. Alterações fotossintéticas e metabólicas em respostas a variação sazonal e manipulação fonte-dreno em *Acrocomia aculeata* (Jacquin) Loddies ex Martius (Arecaceae), Universidade Federal de Viçosa, 42 p. 2018

SANCHES, R. F. E.; SILVA, E. A. Changes in leaf water potential and photosynthesis of *Bauhinia forficata* Link under water deficit and after rehydration. **Hoehnea**, v. 40, n. 1, p. 181–190, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1590/s2236-89062013000100010>

SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. *et al.* Root system response to drought and salinity: root distribution and water transport. In: **ROOT ENGINEERING: BASIC AND APPLIED CONCEPTS**, v. 40, p. 325–352, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54276-3>

SCALON, S. de P. Q. *et al.* Gas exchange and photosynthetic activity in *Hancornia speciosa* gomes seedlings under water deficit conditions and during rehydration. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 4, p. 1124–1132, 2015.

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and fruiting phenologies of the palm *Acrocomia aculeata*: patterns and consequences. **Biotropica**, v. 27, n. 2, p. 168, 1995. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388992>

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 52, p. 119–125, 1964. Available at: <http://www.pnas.org/content/pnas/52/1/119.full.pdf>

- SIMIQUÉLI, G. F. *et al.* Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 652–659, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.068>
- SOUZA, J. N.; RIBEIRO, L. M.; MERCADANTE-SIMÕES, M. O. Ontogenesis and functions of saxophone stem in *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Annals of botany**, v. 119, n. 3, p. 353–365, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1093/aob/mcw215>
- SPERLING, O. *et al.* Direct in vivo evidence of immense stem water exploitation in irrigated date palms. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 1, p. 333–338, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru421>
- SURESH, K.; NAGAMANI, C. Variations in photosynthetic rate and associated parameters with age of oil palm leaves under irrigation. **Photosynthetica**, v. 44, n. 2, p. 309–311, 2006. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11099-006-0023-8>
- TURNER, N. C. Measurement of plant water status by the pressure chamber technique. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 289–308, 1988. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00296704>
- VALLADARES, F.; GIANOLI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New Phytologist**, v. 176, n. 4, p. 749–763, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x>
- VALLIYODAN, B.; NGUYEN, H. T. Biological mechanisms that influence soy protein concentration and composition. **AOCS Press**, 2012. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-9830791-0-1.50012-1>
- VELIKOVA, V. *et al.* Physiological and structural adjustments of two ecotypes of platanus orientalis l. from different habitats in response to drought and re-watering. **Conservation Physiology**, v. 6, n. 1, p. 1–18, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1093/conphys/coy073>
- WOITTIEZ, L. S. *et al.* Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors. **European Journal of Agronomy**, v. 83, p. 57–77, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.002>
- WUBS, A. M.; HEUVELINK, E.; MARCELIS, L. F. M. Abortion of reproductive organs in sweet pepper (*Capsicum annuum* L.): A review. **Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 84, n. 5, p. 467–475, 2009. Available at: <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512550>
- ZHIÑA, D. *et al.* Climate change influences of temporal and spatial drought variation in the andean high mountain basin. **Atmosphere**, v. 10, n. 9, p. 558, 2019. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos10090558>
- ZHOU, S. *et al.* How should we model plant responses to drought? An analysis of stomatal and non-stomatal responses to water stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182–183, n. December, p. 204–214, 2013. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.009>
- ZÚÑIGA, M. *et al.* Effects of three irrigation strategies on gas exchange relationships, plant water status, yield components and water productivity on grafted carménère grapevines.

**Frontiers in Plant Science**, v. 9, n. July, p. 1–13, 2018. Available at:  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00992>

## Material Suplementar

**Tabela Suplementar 1.** Valores médios de número de frutos por cacho (NFC), massa de frutos no cacho (MFC) de dois acessos de macaúba (DF e SP) sob duas condições hídricas (SSH e CSH) avaliadas durante duas safras consecutivas (2017/2018 e 2018/2019) em Planaltina – DF.

Acessos/suplementação hídrica	Safra 2017/2018	
	NFC	MFC (kg)
DF/SSH	177.15 ± 18.36 Aa	6.00 ± 0.79 Aa
DF/CSH	187.89 ± 27.05 Ab	6.82 ± 1.08 Ab
SP/ SSH	146.48 ± 30.97 Ba	6.00 ± 0.77 Ba
SP/ CSH	368.97 ± 68.92 Aa	13.5 ± 2.49 Aa
Acessos/suplementação hídrica	Safra 2018/2019	
	NFC	MFC (kg)
DF/SSH	153.24 ± 12.71 Aa	5.36 ± 0.44 Aa
DF/CSH	170.64 ± 23.47 Ab	6.49 ± 1.12 Ab
SP/ SSH	135.29 ± 8.22 Ba	5.13 ± 0.37 Ba
SP/ CSH	347.15 ± 68.47 Aa	13.6 ± 2.90 Aa

Letras maiúsculas diferentes na coluna comparam o efeito da condição hídrica (SSH e CSH) para o mesmo acesso. Letras minúsculas na coluna comparam os diferentes acessos (DF e SP) para uma mesma condição hídrica. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de significância. Médias ± erro padrão da média, n = 4.

---

## CAPÍTULO IV - REVISÃO

---

### **Fatores de influência na produção de frutos em macaúba: Revisão**

Maria Antonia Machado Barbosa<sup>1\*</sup>; Leonardo Duarte Pimentel<sup>1\*\*</sup>; Kacilda Naomi Kuki<sup>1</sup>; José Antônio Saraiva Grossi<sup>1</sup>;

#### **Afiliações**

<sup>1</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, CEP 36570-900, Viçosa, MG, Brasil

#### **\*Autor correspondente**

Maria Antonia Machado Barbosa

E-mail: mabarbosa483@gmail.com

Endereço: Avenida Peter Henri Rolfs, s/nº, Viçosa, Minas gerais, Brasil.

Departamento de Agronomia

Universidade Federal de Viçosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-0599>

#### **\*\* Coordenador geral do estudo**

## Resumo

O cultivo da macaubeira é influenciado pelas condições ambientais. Apesar da rusticidade da planta, observa-se em cultivos comerciais efeito direto do ambiente de produção na produtividade da cultura, sugerindo que se trata de uma espécie altamente responsiva ao manejo. Entretanto, não há estudos suficientes correlacionando efeitos ambientais à produtividade a fim de subsidiar o planejamento agroindustrial. Neste sentido, essa revisão reúne informações sobre as respostas fisiológicas e produtivas da macaubeira aos fatores edafoclimáticos e manejo da cultura. Entre os fatores já investigados, é decisivo que a disponibilidade hídrica e a densidade de plantio assumem papel fundamental e são determinantes para produtividade, estando relacionadas com a melhor condição fisiológica da planta, redução de aborto de frutos e incrementos de produção. Além dos fatores já bem investigados e apontados como sendo decisivos, outros também precisam ser considerados e melhor justificados em futuras pesquisas. A condição topográfica do terreno pode alterar a umidade do solo e beneficiar a produtividade da cultura quando favorece melhor disponibilidade hídrica no período seco, como observado nas áreas de baixadas. A variabilidade genética e a modulação do acesso ao ambiente também influenciam na produtividade e um provável comportamento de bienalidade observado nos trabalhos de pesquisa. Outros fatores podem influenciar a produtividade da macaubeira, como: polinização, fitossanidade, textura e fertilidade do solo. Essas informações são fundamentais para o entendimento dos fatores relacionados com a produtividade da cultura e poderão nortear os planejamentos agroindustriais baseados nesta matéria-prima. Do ponto de vista técnico, estes empreendimentos poderão ocupar áreas marginais à agricultura, em recuperação de áreas degradadas, plantios em áreas de encosta, porém, com provável redução de produtividade. Práticas conservacionistas no uso de solo, população de plantas adequadas e materiais genéticos mais adaptados, poderão minimizar os efeitos negativos desses ambientes mais limitantes viabilizando esses empreendimentos.

**Palavras-chave:** *Acrocomia*. Densidade de plantio. Ecofisiologia. Manejo. Disponibilidade hídrica. Planejamento.

## Abstract

The cultivation of macaw palm is influenced by environmental conditions. Despite the plant's rusticity, it is observed in commercial crops a direct effect of the production environment on the crop's productivity, suggesting that it is a highly responsive species to management. However, there are no studies correlating environmental effects to productivity, in order to support agro-industrial planning. In this sense, this review gathers information on the physiological and productive responses of macaw palm to edaphoclimatic factors and crop management. Among the factors already investigated, it is decisive that water availability and planting density play a fundamental role and are determinant for productivity, being related to the best physiological condition of the plant, reduction of fruit abortion and increases in production. In addition to the factors already well investigated and pointed out as being decisive, others also need to be considered and better justified in future research. The topographic condition of the terrain can change soil moisture and benefit crop productivity when it favors better water availability in the dry period, as observed in lowland areas. Genetic variability and modulation of access to the environment also influence productivity and a probable biennial behavior observed in research works. Other factors can influence macaw palm productivity, such as: pollination, plant health, texture and soil fertility. Other factors can influence macaw palm productivity, such as: pollination, plant health, texture and soil fertility. This information is essential for understanding the factors related to crop productivity and may guide agro-industrial planning based on this raw material. From a technical point of view, these projects may occupy areas that are marginal to agriculture, in the recovery of degraded areas, plantations in hillside areas, however, with a probable reduction in productivity. Conservation practices in the use of soil, population of adequate plants and genetic materials more adapted, will be able to minimize the negative effects of these more limiting environments making these projects viable.

**Keywords:** *Acrocomia*. Plant density. Ecophysiology. Management. Water availability. Planning.

## Introdução

A demanda por alimentos e fontes alternativas de energia, tem aumentado constantemente diante das projeções de crescimento populacional e aquecimento global. Esses cenários tem se mostrado preocupantes, e vem abrindo caminho para a busca de outras fontes de óleos vegetais, que sejam mais bem adaptadas à ambientes extremos e com menor emissão de gases poluentes (KITCHA; CHEIRSILP, 2011). Atualmente, a principal fonte de óleo vegetal é proveniente da palma africana (*Elaeis guineensis*), sendo líder mundial em comércio e consumo, com 72% da sua produção destinado ao setor de alimentos (BRASIL, 2018). Entretanto, o cultivo dessa oleaginosa, requer índices pluviométricos mínimos de 2000 mm anuais, tornando-se restrita às regiões equatoriais do globo, como as áreas de florestas tropicais (CHAGAS *et al.*, 2019).

A macaubeira (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius) é uma palmeira oleaginosa que vem se destacando como promissora para atender a demanda dos setores agroenergético e alimentício (RAMOS *et al.* 2008; MOTOIKE & KUKI 2009; EVARISTO *et al.* 2016). Características como alto rendimento de óleo, e riqueza de ácidos graxos insaturados (extraídos tanto da polpa como na amêndoa), se assemelham às da palma africana. Todavia, a macaubeira se difere por apresentar maior rusticidade e adaptabilidade às condições mais extremas de solo e clima, o que permite ser cultivada em maior amplitude de áreas e sem competir com outras grandes culturas (TELES *et al.*, 2011; FALASCA; ULBERICH; PITTA-ALVAREZ, 2017). Isso é extremamente relevante do ponto de vista econômico e ambiental, por permitir o aproveitamento de áreas pouco agricultáveis, reduzir o desmatamento e as pressões negativas sobre a biodiversidade (PLATH *et al.*, 2016).

Variáveis climáticas como precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, irradiância, além de características de solo, são conhecidas por influenciar a fenologia e capacidade reprodutiva de algumas palmeiras de interesse comercial, como a palma africana (CHAGAS *et al.*, 2019) e o coqueiro (*Cocos nucifera*) (CARR, 2011). No caso da macaubeira, esta é considerada adaptável à diversos ambientes, uma vez que é possível encontrar maciços naturais em locais com condições edafoclimáticas distintas (MOTTA *et al.*, 2002; COELHO *et al.*, 2019). Entretanto, como já verificado em alguns trabalhos, as diferentes condições ambientais resultantes das regiões de cultivo ou das práticas agrícolas, são capazes de alterar a fisiologia e produtividade dessas plantas. Logo, por se tratar de uma cultura em ascensão, o conhecimento das influências de fatores edafoclimáticos sobre seu desempenho produtivo se torna fundamental para definir estratégias de manejo e subsidiar o planejamento agroindustrial.

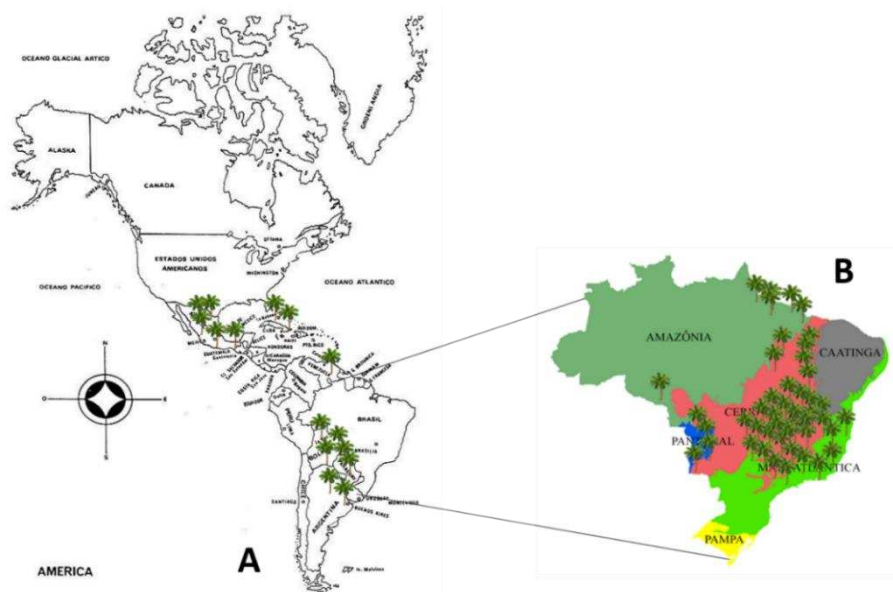
Diante do exposto, o objetivo dessa revisão foi apresentar informações sobre os principais fatores que influenciam a resposta produtiva da macaúba, com destaque para as

respostas fisiológicas e produtivas em diferentes condições edafoclimáticas. Acredita-se que essas informações poderão ser úteis na escolha do local de cultivo e direcionar o seu manejo, visando sua exploração econômica em instalações agroindustriais.

### **Fatores climáticos sobre a fisiologia e produção da macaubeira**

A macaubeira é considerada uma espécie pioneira, capaz de colonizar ambientes inóspitos para outras espécies, em que as condições são pouco favoráveis para a sobrevivência (LORENZI, 2006). Nativa das áreas savânicas, cerrados e florestas abertas da América Tropical, essa palmeira possui ampla distribuição geográfica, com ocorrência natural desde o México até a Argentina, sendo Antilhas, Costa Rica, Paraguai e Brasil, os países de maior abundância (Figura 1A). No território brasileiro, é a palmeira de maior dispersão com ocorrência natural em quatro biomas: Cerrado, Mata Atlântica, Floresta Amazônica e Pantanal (Figura 1B) (HENDERSON; GALEANO; BERNAL, 1995; MOTOIKE *et al.*, 2013).

Quanto aos aspectos fisiológicos, a macaubeira apresenta metabolismo do carbono do tipo C3, porém com altas taxas fotossintéticas, semelhante às espécies com metabolismo C4 (PIRES *et al.*, 2013). Logo, trata-se de uma espécie que apresenta eficientes mecanismos de captura de luz e altas taxas fotossintéticas sob alta irradiância, sem que haja danos à maquinaria fotossintética (DIAS *et al.*, 2018). Em condições de déficit hídrico, plantas jovens apresentam redução da fotossíntese, porém, há considerável restabelecimento após a rehidratação, indicando aclimatação fotossintética quando a seca ocorre de maneira intermitente (MOTA; CANO, 2016). Os impactos negativos do déficit hídrico sobre plantas jovens de macaubeira, também são minimizados em associação com altas [CO<sub>2</sub>], ocorrendo ajustes morfológicos e fisiológicos nessas plantas, como regulação positiva da fotossíntese, melhor eficiência na captura de luz e produção de biomassa (ROSA; SOUZA; PEREIRA, 2019).



**Figura 1.** Locais de ocorrência natural da macaúba nas Américas (A) e no território brasileiro (B), abrangendo quatro biomas: Cerrado, Mata Atlântica, Floresta Amazônica e Pantanal. *Fonte:* Adaptado de Berton (2013).

Dessa forma, com a manutenção das taxas fotossintéticas relativamente altas, a sustentação dos frutos tende a ser favorecida, especialmente porque para a macaubeira – assim como para a palma africana e o coqueiro – há uma alta demanda por carboidratos na fase reprodutiva, devido a intensa produção de inflorescência e infrutescências. Para um melhor entendimento sobre esses aspectos, uma descrição das respostas fisiológicas e produtivas da macaúba ao ambiente e solo, são descritas na Figura 2 e abordadas em maiores detalhes nos tópicos a seguir.

### ***Água e Produtividade***

A macaúba pode ser encontrada em regiões com distintos volumes anuais de chuvas, variando desde locais de clima tropical úmido como a floresta Amazônica, até locais com alta sazonalidade pluviométrica, como o bioma de cerrado e de transição do cerrado-caatinga. Precipitações variando entre 1000 mm/ano e 1500 mm/ano são ideais para o bom desenvolvimento da macaúba (MOTTA *et al.*, 2002), o que a torna uma candidata ideal para cultivo em regiões que são desfavoráveis para outras culturas (MOTOIKE *et al.*, 2013).

Um zoneamento agroclimático para a macaúba foi realizado na Argentina, demonstrando a existência de uma grande área com aptidão para o seu cultivo (FALASCA *et al.*, 2017). Nesse estudo, foi considerado que as regiões com índices pluviométricos anuais variando de 500 a 1000 mm são adequadas para o cultivo, sendo que acima de 1000 mm, podem ser consideradas como ótimas. Contudo, apesar do estudo realizado na Argentina sinalizar ocorrências naturais

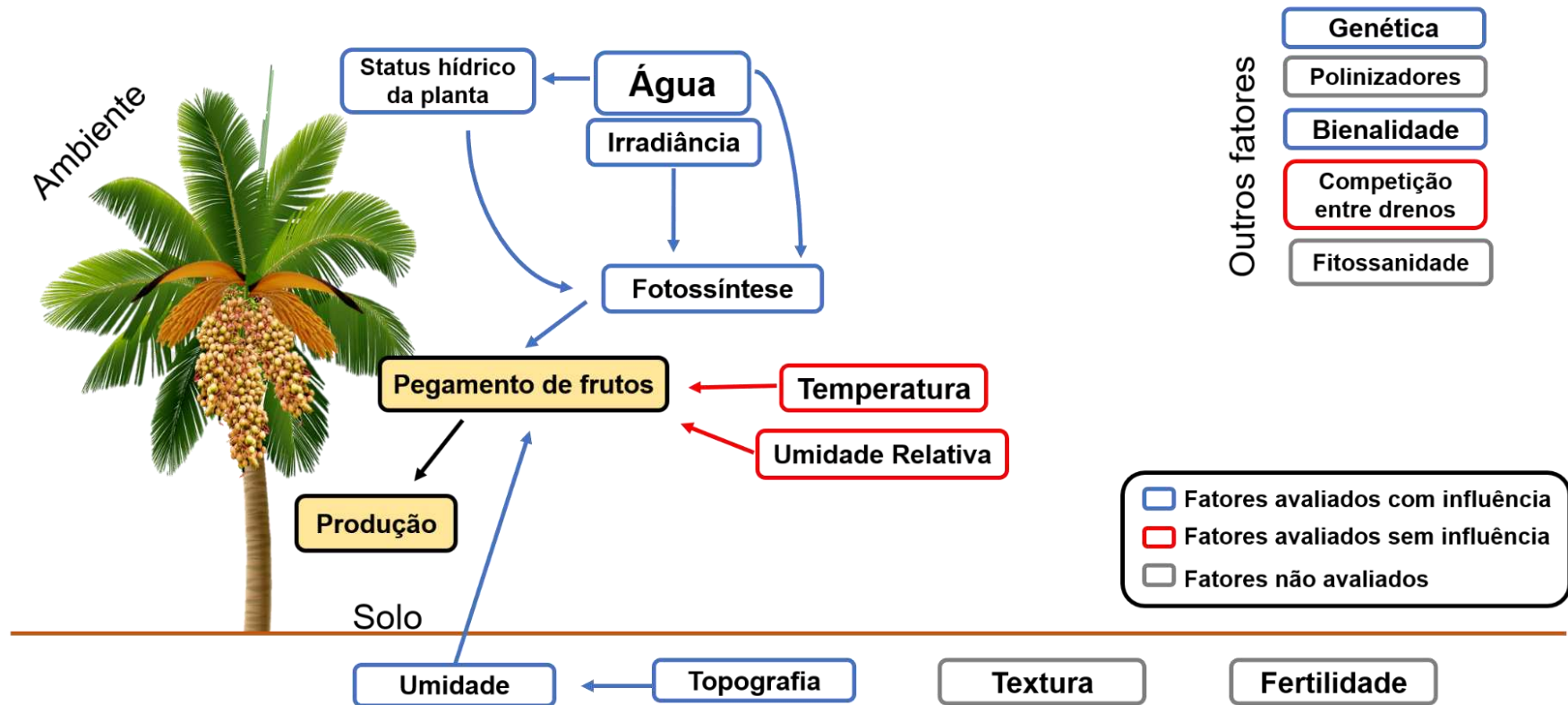
da macaubeira em regiões com precipitações mínimas de 500 mm, é preciso analisar essa informação com cautela visto que se trata de um ecotipo diferente do predominante no Brasil.

Embora a macaubeira seja uma espécie bem adaptada à ambientes de baixa precipitação e classificada como tolerante a seca (MOTA; CANO, 2016), estudos recentes vem demonstrando que se trata de uma espécie responsiva ao fator água, através de maiores volumes de precipitação anual (Capítulo I), manutenção da umidade do solo (Capítulo II) e suplementação hídrica artificial (Capítulo III). Conforme observado na Figura 2, a água destaca-se como um dos principais fatores de relevância no sistema, capaz de melhorar as condições fisiológicas da planta, como o status hídrico e taxas fotossintéticas, e conseqüentemente, o pegamento de frutos e produção final.

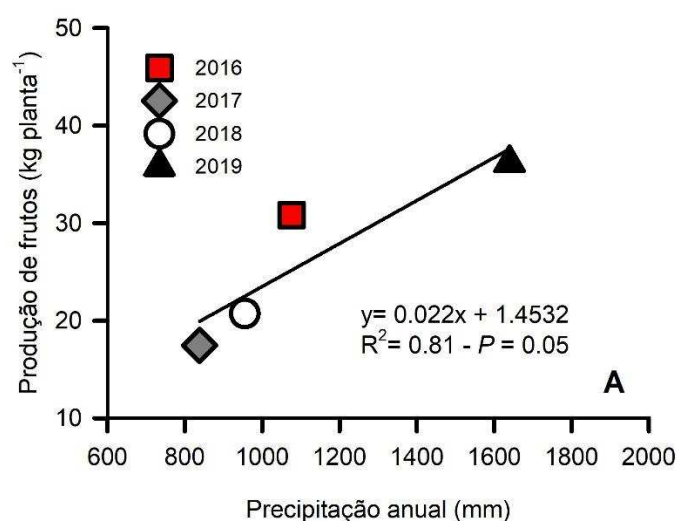
Como demonstrado no Capítulo I deste estudo, houve uma forte correlação positiva entre os níveis de precipitação anual e a produção de frutos de macaúba em plantios localizados no município de Araponga – MG (Figura 3). O estudo realizado num período de quatro anos com plantas em plena idade reprodutiva (10 anos), revelou uma variação na precipitação anual, com acumulados de 1076 mm, 838 mm, 955 mm e 1640 mm para os anos de 2016, 2017, 2018 e 2019, respectivamente. Uma diferença em 800 mm de chuvas entre os anos de menor e maior precipitação, levou a incrementos em cerca de 19 kg de frutos por planta. Além disso, os anos com maior precipitação acumulada, também apresentaram melhor distribuição de chuvas ao longo do ano, evitando períodos de veranicos.

Decréscimos na disponibilidade hídrica podem configurar-se como condição de estresse para as plantas e se tornar o fator ambiental de maior impacto sobre a produtividade agrícola (WEI *et al.*, 2017). De fato, a produção da macaúba é favorecida pela maior suplementação hídrica, especialmente quando mantida de maneira contínua ao longo das etapas do seu ciclo. Para todas as regiões de ocorrência natural, o período de florescimento coincide com a estação chuvosa, sinalizando que há um requerimento hídrico para o rompimento das espatas (SCARIOT; LLERAS; HAY, 1991; BRITO, 2013). Além disso, uma maior produção de frutos também foi obtida quando os efeitos negativos da estação seca foram amenizados, com benefícios mútuos à fisiologia e produção dessas plantas.

## FATORES DE INTERFERÊNCIA NA PRODUÇÃO DA MACAÚBA



**Figura 2. Diagrama dos fatores edafoclimáticos com interferência na produção de frutos de macaúba.** O pegamento de fruto tem relação direta com a produção da planta (caixas amarelas) e sofre influência de alguns fatores edafoclimáticos e condição fisiológica da planta. Fatores avaliados nesse estudo que influenciam o pegamento de frutos são mostrados em caixa azul. Fatores avaliados nesse estudo que não influenciam o pegamento de frutos são mostrados em caixas vermelhas. Fatores não avaliados nesse estudo e descritos com base na literatura são mostrados em caixas cinzas. Outros fatores também considerados importantes na produção de frutos de macaúba, estão em destaque no lado superior direito da figura. *Fonte:* Elaborada pela autora.



**Figura 3.** Análise de regressão para a produção de frutos em função da precipitação anual acumulada durante quatro anos de avaliação experimental (2016 a 2019) na Estação Experimental de Araçonga – MG (UFV). Cada símbolo representa um ano de avaliação. *Fonte:* Capítulo I.

Conforme o Capítulo II, com uma umidade do solo mantida em 27% na estação seca, plantas de macaúba produziram em média até 68 kg de frutos, enquanto que sob uma umidade do solo de 15%, houve uma produção média de apenas 47 kg de frutos. Logo, uma diferença de cerca de 80% na umidade do solo entre duas áreas de cultivo de macaúba, promoveu incrementos em 21 kg de frutos nas plantas sob maior umidade do solo, que é o equivalente a um aumento de 45% na produção de frutos. De maneira semelhante, o uso de sistema de suplementação hídrica artificial durante os períodos de estiagem no verão e durante toda a estação seca, promoveu incrementos na produção final de frutos em plantio experimental na condição de cerrado (Capítulo III). Plantas mantidas em suplementação hídrica produziram em média até 51 kg de frutos por planta, enquanto que, a ausência de suplementação hídrica, houve produção média de 34 kg de frutos.

Para todos os casos acima mencionados, o fator água esteve relacionado à incrementos nas taxas fotossintéticas e status hídrico da macaúba, e embora não houvesse um restabelecimento total nesses parâmetros durante a estação seca, a manutenção hídrica no sistema foi eficiente para melhor restabelecer os processos relacionados ao ganho de carbono. Esses resultados demonstram que, apesar da rusticidade e adaptação às condições de baixa precipitação, a produtividade em cultivos comerciais de macaúba, poderá ser altamente correlacionada com uma maior disponibilidade hídrica no sistema.

### ***Irradiância e capacidade fotossintética***

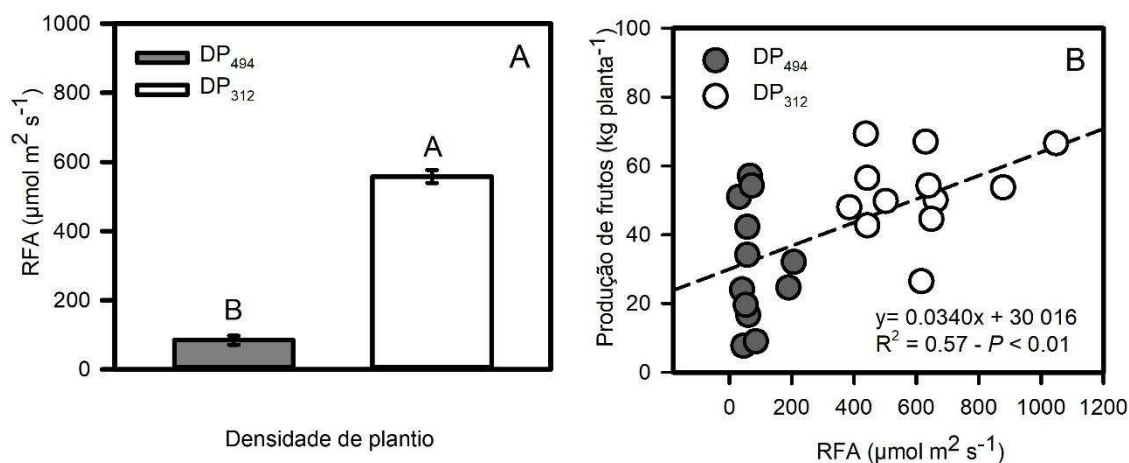
A irradiância disponível para as plantas tem relação direta com a assimilação de carbono e, portanto, com o acúmulo de biomassa e produção. Sob baixa irradiância, as taxas

fotossintéticas são inevitavelmente muito baixas, limitando o crescimento da planta e o suprimento de energia para os processos metabólicos essenciais (PONS; POORTER, 2014). Entretanto, esse quadro pode ser revertido quando o suprimento de luz é adequado, ou a depender do nível de tolerância da espécie.

Conforme observado no Capítulo II, a irradiância teve fundamental importância para a produção de frutos da macaúba, favorecendo os processos fotossintéticos e taxa de pegamento de frutos (Figura 2). A macaúba caracteriza-se como uma espécie heliófila, ou seja, tem preferência a áreas abertas e com alta incidência solar, fato comprovado pela presença de macaubais nativos em áreas de pastagem e com cobertura vegetal menos densa (MOTOIKE *et al.*, 2013). Em fase juvenil (viveiro), a macaúba possui uma elevada capacidade fotossintética em diferentes ambientes luminosos (variando de 235 a 1000  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), com mecanismos eficientes de captura de luz em ambientes mais sombreados e capacidade de dissipação do excesso de energia sob alta irradiância, além de ajustes morfológicos à nível de folha (DIAS *et al.*, 2018). Por exemplo, mudas de macaúba mantidas em condição de sombreamento, apresentaram incrementos na área foliar e teor de clorofila, que permitiu a maximização na captura de luz.

Pires *et al.* (2013) demonstraram que plantas de macaúba com idade de 2,5 anos em condição de campo, apresentaram uma alta eficiência na utilização da luz, ao manter altas taxas fotossintéticas em irradiância superior a 2000  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esses ajustes fisiológicos da macaúba em ambientes contratantes de luz, são importantes para as etapas de aclimação das mudas em condição de viveiro, assim como, para o estabelecimento da planta no campo, ao enfrentar variações temporal e espacial no fluxo de fótons.

Já na fase adulta (reprodutiva), a macaúba tem comportamento fotossintético diferenciado em ambientes distintos de luminosidade. Como observado no Capítulo II, a oferta de luz às plantas variou em função da densidade de plantio, sendo determinante na produção de frutos. Nesse estudo, o plantio menos adensado (densidade de 312 plantas por hectare - DP<sub>312</sub>), acarretou em maior incidência de luz sobre a copa das plantas e no interior do dossel, recebendo uma média anual de 560  $\mu\text{mol}$   $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Por outro lado, uma maior densidade de plantio (494 plantas por hectare - DP<sub>494</sub>), reduziu em 85% a disponibilidade de luz para as plantas (média anual de 85  $\mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) devido a sobreposição das folhas e maior sombreamento no dossel (Figura 4A). Em consequência, as plantas que estiveram sob um melhor ambiente luminoso, foram em média 80% mais produtivas, havendo ajuste de modelo linear crescente entre os níveis de RFA e a produção de frutos (Figura 4B).



**Figura 4.** Níveis de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) (A) e correlação entre RFA e produção de frutos (B) em função da densidade de plantio em cultivo planejado de macaúba. *Fonte:* Capítulo II.

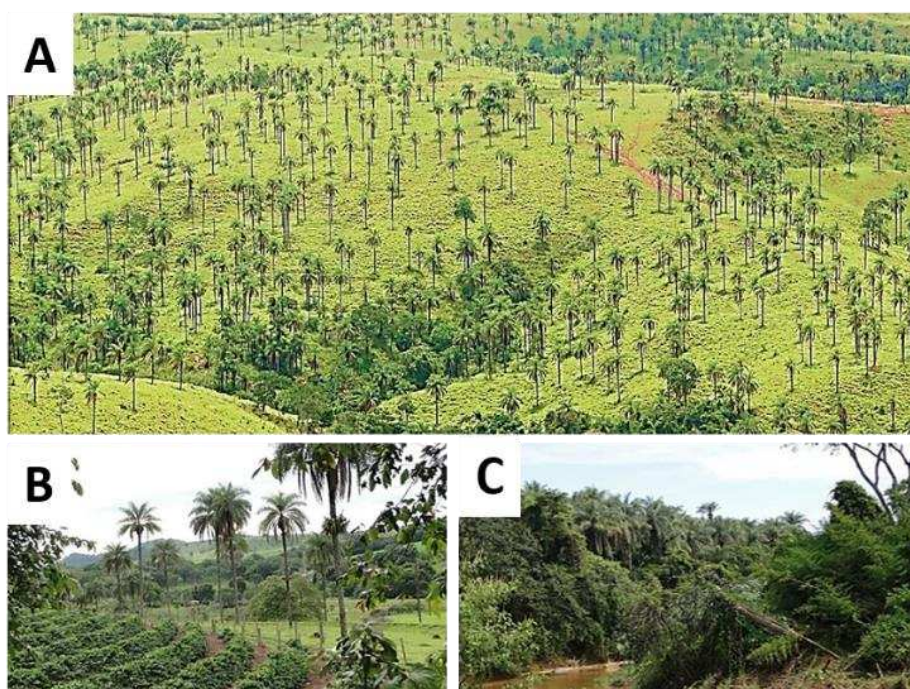
Esses resultados demonstram que a macaúba em fase de produção, se enquadra melhor em ambientes com menor competição por luz, que podem ser obtidos com o ajuste do arranjo espacial utilizado.

#### ***Temperatura, umidade relativa e velocidade do vento***

Informações sobre a influência dos fatores temperatura, umidade relativa do ar e incidência de ventos, para a macaúba ainda são escassos. Entretanto, no que remete a sua dispersão natural, a macaúba tem sido observada em regiões com temperaturas variando entre 15 °C e 35 °C (MOTA *et al.*, 2011; MOTOIKE *et al.*, 2013). Um estudo realizado nas três principais regiões de ocorrência natural de macaúba no estado de Minas Gerais, a saber: Alto Paranaíba, Zona Metalúrgica e Montes Claros (todas com formação de cerrado), apontou diferenças para a temperatura nessas três regiões, variando entre 15 °C a 31 °C nas temperaturas mínima média anual e máxima média anual, respectivamente (MOTTA *et al.*, 2002). Segundo Falasca *et al.* (2017), regiões com temperaturas médias anuais no intervalo de 20 a 25 °C são consideradas adequadas, e acima de 25 °C são consideradas ótimas. Essas informações são confirmadas pelos achados de Pires *et al.* (2013), onde verificaram a resistência fotossintética da macaúba ao calor, uma vez que a fotossíntese líquida permaneceu resiliente ao aumento na temperatura foliar acima de 30 °C. De maneira semelhante, os eventos que ocorrem no florescimento, como a antese e o pegamento de frutos, não são prejudicados pelas variações em temperatura, bem como, pela umidade relativa do ar (Capítulo I). Assim, essas respostas coincidem com o fato da macaúba prosperar em ambientes como o cerrado brasileiro, com temperaturas altas, baixa umidade relativa e sazonalidade de chuvas.

### Importância dos fatores edáficos para a macaúba

Algumas características do solo como fertilidade, textura e declividade, são capazes de influenciar a condição fisiológica e produtiva das plantas, por alterar a disponibilidade de recursos essenciais, como água e nutrientes (SPARKS; MENZEL, 2013). A macaúba por ser uma espécie com ampla dispersão nos diferentes biomas brasileiros, demonstra uma alta capacidade de adaptação aos diferentes tipos de solo. Sua distribuição tem sido fortemente influenciada pelas atividades humanas e segue naturalmente para solos com fertilidade variando de moderada a alta, podendo ser encontrada em áreas de pastagens com vegetação nativa em regeneração (Figura 5A), e de forma espontânea em áreas agrícolas (Figura 5B). A dispersão da macaúba também acompanha vegetação primitiva de fisionomia florestal, mostrando seu avanço como pioneira e evitando extremos de deficiências nutricional e hídrica. Em regiões com precipitações inferiores a 1000 mm/ano, podem ser encontradas ao longo de córregos e riachos que recebem água de drenagem (Figura 5C) (MOTTA *et al.*, 2002; MOTA *et al.*, 2011; COELHO *et al.*, 2019).



**Figura 5.** Dispersão natural da macaúba em diferentes condições edáficas: A - áreas de pastagens e vegetação nativa em regeneração; B – cultivos agrícolas; C – ao longo de córregos e riachos que recebem água de drenagem. Fonte: Coelho *et al.* (2019).

De maneira geral, os estudos pioneiros que tratam das características de solo com a macaúba, diz respeito apenas à sua ocorrência natural (dispersão e sobrevivência) sem mencionar a produção das plantas (MOTTA *et al.*, 2002; TELES *et al.*, 2011). Entretanto, são estudos que enfatizam a presença dessa palmeira em áreas antropizadas, muitos das quais já

passaram por preparo do solo e adubação. Partindo desses pressupostos, outros estudos foram desenvolvidos e alguns deles ainda em andamento, vem demonstrando que a macaúba apresenta ganhos de produtividade quando submetidas à manejos de solo, como adubação, por exemplo.

As principais informações sobre as influências das características edáficas sobre a produtividade da macaúba, serão descritas nos tópicos a seguir, sendo algumas obtidas ainda no presente estudo, e outras através de revisão de literatura.

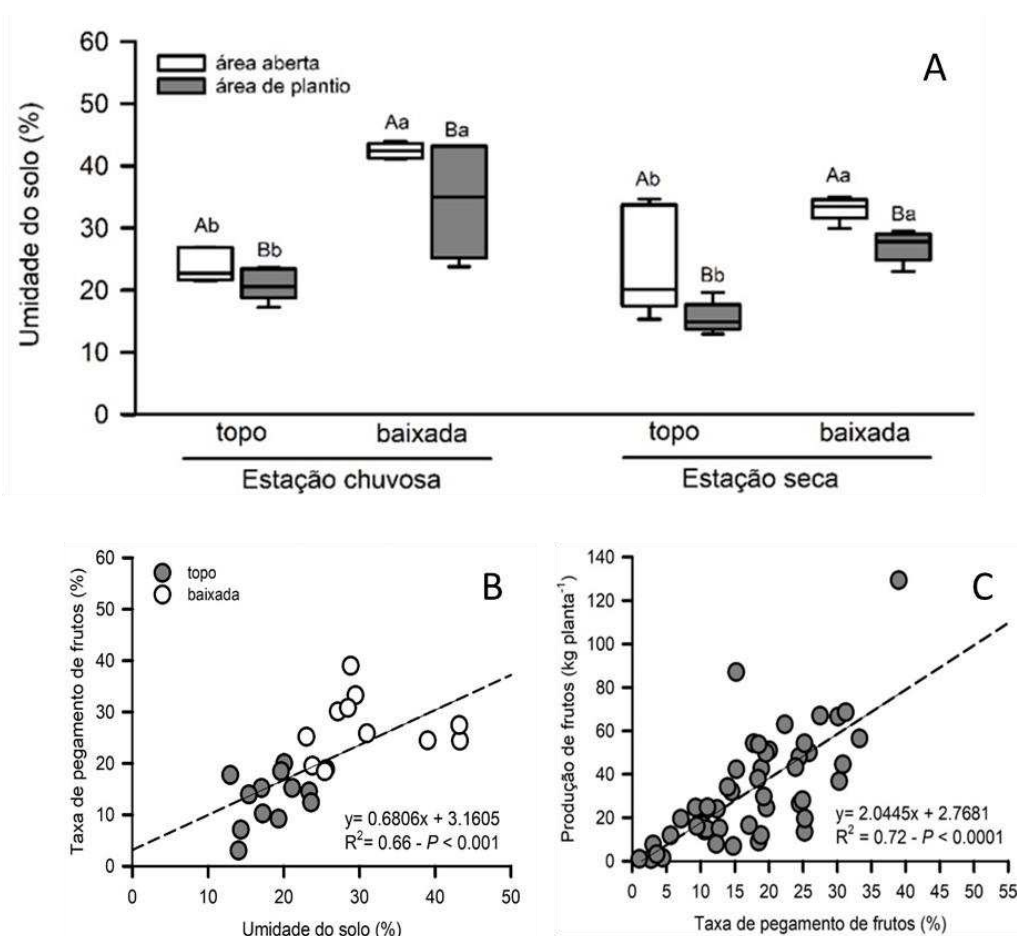
### ***Topografia***

A topografia de uma região, pode configurar-se como uma das principais causas de variação no rendimento das culturas, por vezes relacionada à mudanças em características do solo e microclima (OGWANG *et al.*, 2014). Diferentes gradientes topográficos podem mitigar efeitos de estresses ambientais, como a seca, através de uma melhor redistribuição da umidade do solo, ou ainda, variações nos níveis de temperatura e irradiância no ambiente (HAWTHORNE; MINIAT, 2018). Tais informações podem ser úteis para gerir o ambiente de produção, e sua relação com o rendimento das plantas, podem ser usados para delinear zonas de aptidão agrícola conforme a necessidade da cultura (KUMHÁLOVÁ *et al.*, 2008).

A macaúba predomina em áreas variando de 150 a 1000 m de altitude. Em Minas Gerais, as regiões de maior ocorrência apresentam altitudes variando de 600 a 1100 m, enquanto que no estado de Goiás, as áreas de maior ocorrência se enquadram com altitudes medias entre 600 e 750 m (Tabela 1). Considerando a inclinação do terreno, macaubais nativos ocorrem em áreas com diferentes gradientes topográficos, variando desde encostas e vales de rios, até partes altas da paisagem, como colinas e planaltos elevados (MARKLEY, 1956; MOTTA *et al.*, 2002; BHERING *et al.*, 2010). No estado de Minas Gerais, nas formações primitivas de floresta, a macaúba foi registrada sempre com maior dispersão nas áreas baixas e de meia-encosta da paisagem, mas raramente no topo (MOTTA *et al.* 2002). No estado de Goiás, há forte predominância de macaubais nas porções declive convexo, tálus e declive côncavo da topossequência (TELES *et al.*, 2011).

A topografia do terreno está relacionada não apenas a dispersão da macaúba, mas também, sobre as suas respostas produtivas. Em decorrência da condição topográfica, a umidade do solo poderá ser alterada, sendo uma condição de baixada mais favorecida em comparação às áreas de declive ou topo (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003; JUCKER *et al.*, 2018). Conforme demonstrado no Capítulo II, a umidade do solo foi mantida durante o ciclo da macaúba sob condição de baixada (Figura 6A). Esse resultado contribuiu fortemente para que o potencial hídrico foliar – relacionado ao grau de umidade da planta – e as taxas fotossintéticas

da macaúba fossem mantidos em níveis satisfatórios na época de maior escassez de chuvas, e dessa forma, maior pegamento e produção de frutos (Figuras 6B e 6C).



**Figura 6.** Umidade do solo em dois níveis topográficos (topo e baixada) e nas estações chuvosa e seca em Araponga – MG (A). Correlação entre umidade do solo e taxa de pegamento de frutos (B) e entre taxa de pegamento de frutos com a produção (C). *Fonte:* Capítulo II.

A macaúba quando cultivada na condição de baixada, produziu em média 68 kg de frutos por planta e produtividade média de 12 t ha. Isso representou uma diferença de 31% em relação à condição de topo, onde a macaúba produziu em média 47 kg de frutos. Nesse caso, a umidade do solo foi associada a presença de um córrego d'água, beneficiando especialmente a área da baixada em comparação a área de topo. A associação de macaubais nativos com a umidade do solo, já havia sido descrita por Markley (1956) e Lorenzi (2006), com sua ocorrência preferencial em regiões de vales, ao longo de córregos e riachos que recebem água de drenagem.

Além da umidade do solo, outros fatores importantes, como variações ambientais, fertilidade, textura e profundidade do solo, associados ao gradiente topográfico, também poderão alterar a capacidade produtiva da macaúba, porém, ainda carecem de maiores

investigações. Todavia, as informações obtidas até o presente momento, mostram os efeitos do fator topografia para a macaúba e servem de direcionamento para a instalação de cultivos em diferentes áreas.

### ***Textura, fertilidade do solo e nutrição da planta***

Informações sobre a textura e fertilidade do solo para a macaúba, não foram obtidas no presente estudo, mas serão abordadas com base em dados da literatura. De maneira geral, a ocorrência da macaúba em solos eutróficos e em ambientes com vegetação natural com remanescentes de florestas, demonstra sua exigência à solos com características físico-químicas favoráveis, além de ser indicadora de solos férteis (MOTTA *et al.*, 2002).

A textura e a porosidade do solo também são características importantes pois estão diretamente relacionadas à capacidade de retenção de água no solo e à impedimentos mecânicos ao crescimento do sistema radicular. A presença da macaúba vem sendo associada à solos de textura média a argilosa, podendo ser encontrada também em solos arenosos (MOTTA *et al.*, 2002; LORENZI, 2006). Um levantamento sobre a ocorrência da macaúba em diferentes áreas no estado de Goiás, revelou que esta palmeira está presente em solos com valores médios de 358 g dm<sup>-3</sup> de argila, 186 g dm<sup>-3</sup> de silte e 456 g dm<sup>-3</sup> de areia, com predominância de solos do tipo cambissolo e neossolo e de textura média ou franco argilo-arenosa, com alta permeabilidade (TELES *et al.*, 2011). A macaúba pode ainda, ser cultivada em solos arenosos, porém, necessita de atenção quanto a manutenção da umidade durante a estação seca, especialmente nos primeiros anos de desenvolvimento da planta. O plantio em solos pedregosos e rasos, devem ser evitados, uma vez que a macaúba possui sistema radicular profundo (MOTOIKE *et al.*, 2013; MOREIRA *et al.*, 2019).

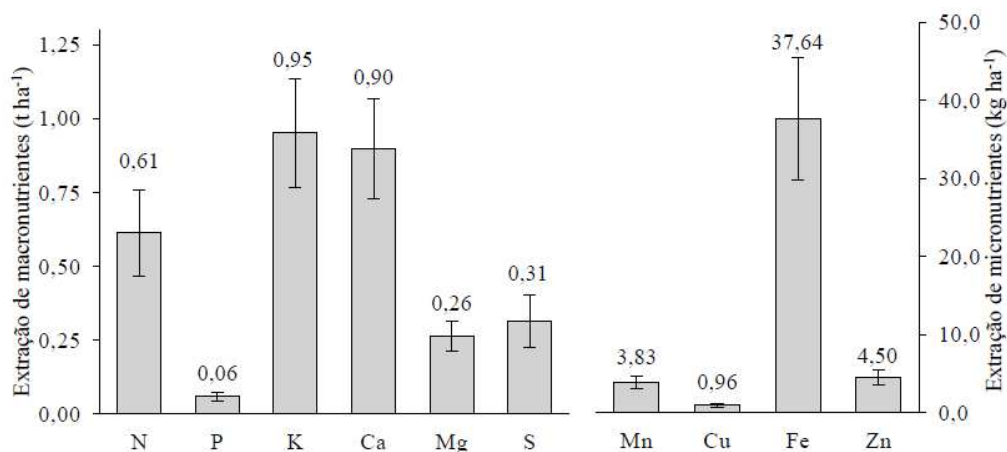
Em Minas Gerais, a presença da macaúba é associada à solos com incrementos nos valores médios de soma de bases (S), saturação por bases (V), além de reduzida valores da saturação por Al (m), sendo observado o oposto para os solos sem a presença da macaúba (Tabela 1). Assim, a distribuição da macaúba ocorre preferencialmente em solos eutróficos, com saturação por base  $\geq 50\%$ , em detrimento de solos álicos, com saturação por Al  $\geq 50\%$ , reforçando o fato de que a macaúba tem sido utilizada como indicadora de solos férteis (MOTTA *et al.*, 2002).

**Tabela 1.** Valores médios de atributos do horizonte superficial e subsuperficial dos solos estudados na presença e ausência de macaúba, no estado de Minas Gerais.

Atributo <sup>1</sup>	Horizonte superficial		Horizonte subsuperficial	
	Com macaúba	Sem macaúba	Com macaúba	Sem macaúba
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	266	422	322	457
Silte/argila	1,5	0,7	1,2	0,7
Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	6,10	0,7	4,21	0,2
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,25	0,18	0,17	0,06
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,01	0,02	0,01	0,01
S (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	6,4	0,86	4,4	0,30
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,2	1,3	0,3	1,5
H <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	4,4	6,7	3,2	3,1
CTC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	11,0	8,8	7,9	4,9
V (%)	59	14	55	10
m (%)	5	60	14	76
P disponível (mg kg <sup>-1</sup> )	10	2	5	1
C orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	1,6	1,8	0,6	0,7
pH em água	5,5	4,9	5,6	5,1

Fonte: Adaptado de Motta et al. (2002).

As pesquisas envolvendo os aspectos nutricionais da macaubeira tem demonstrado efeitos positivos da adubação sobre o seu crescimento, desenvolvimento e produtividade. Um perfil de acúmulo de macro e micronutrientes em diferentes partes da macaubeira, foi realizado por Santos (2015), sendo observado que os teores de macronutrientes nas diferentes partes da planta segue a ordem decrescente de: N > K > Ca > S > Mg > P. Em relação aos micronutrientes observou-se que, de modo geral, a ordem decrescente dos teores foi: Fe > Mn > Zn > Cu. Além disso, os resultados de extração de nutrientes pela macaubeira, mostraram que os elementos K, N e Ca são aqueles extraído em maiores quantidades (Figura 7), o que se caracteriza como uma informação importante para o manejo de adubação e expectativas de aumento de produtividade.

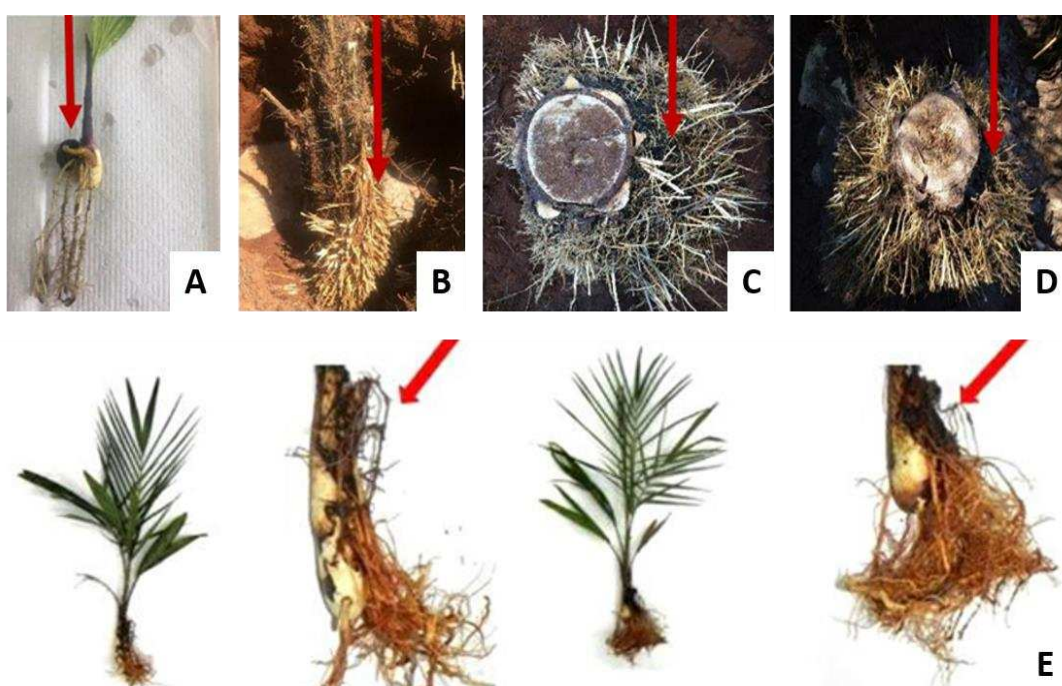


**Figura 7.** Quantidade estimada de macro e micronutrientes extraída por plantas de macaúba adultas e produtivas em área de 1 ha. Fonte: Santos (2015).

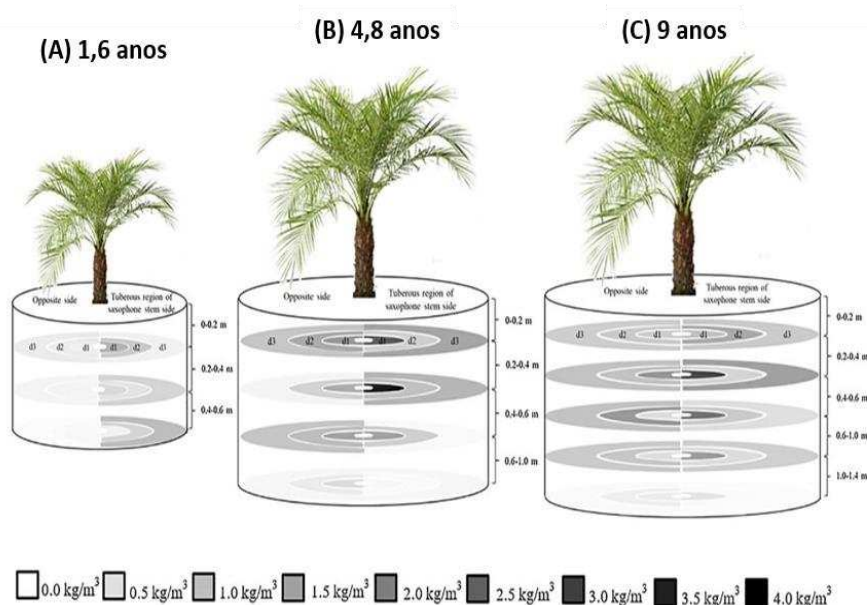
A importância dos elementos N e K para a nutrição da macaubeira, já havia sido documentada por Pimentel *et al.* (2015). Diferentes genótipos de macaúba com idade de dois anos e em condição de campo, apresentaram incrementos em altura das plantas e número de folhas em resposta às maiores doses de ambos nutrientes. Dietrich (2017) também avaliou os efeitos de doses crescentes de N e K em genótipos de macaúba no início da fase reprodutiva (sexto e sétimo ano após o plantio). Nesse trabalho, foi observado um efeito positivo das maiores doses de N e K (1000 g/planta de NK na proporção de 0,42 de N e 0,58 de K) sobre a altura das plantas, resultando em produção de frutos na ordem de 13,2 kg por planta. Semelhante ao observado nos primeiros anos de desenvolvimento da macaubeira, as doses crescentes de N e K também beneficiaram o rendimento dessas plantas, com produção média de 40 kg de frutos em plantas com idade de dez anos (DIETRICH, 2021). Nesse sentido, a macaubeira apresenta sensibilidade à falta dos elementos N e K (principalmente), uma vez que são os nutrientes de maior acúmulo, semelhante à outras palmáceas como a palma africana (VIÉGAS; BOTELHO, 2000).

Um importante estudo realizado por Moreira *et al.* (2019) sobre a distribuição do sistema radicular da macaubeira, trouxe informações relevantes para práticas de adubação. Como observado, a massa das raízes da macaúba aumenta conforme a idade das plantas, variando de 0,0006 kg em mudas (3 meses) a 80,73 kg em plantas adultas (9 anos). Na fase inicial de viveiro (3 meses) e aos 1,6 anos, as raízes aderidas à planta concentram-se na região tuberosa (Figura 8A e B). Entretanto, em plantas com 4,8 e 9,0 anos, ocorre diferença na distribuição do sistema radicular, onde as raízes aderidas tendem a ser igualmente distribuídas em plantas mais velhas (Figuras 8C e D).

A distribuição das raízes quanto a distância do caule, também é diferente entre plantas de macaúba jovens e adultas (Figura 9). Plantas com 1,6 anos, concentram 79% das raízes do lado da região tuberosa (caule saxofone) e apresentam distribuição mais uniforme em relação a profundidade (Figura 9A). Já em plantas com 4,8 e 9 anos de idade, as raízes se tornam mais igualmente distribuídas no entorno da projeção da copa, com maior concentração das raízes no primeiro terço da área de projeção da copa (Figura 9B e C). A profundidade efetiva da raiz de macaúba é crescente com o aumento da idade da planta, atingindo profundidades de 0,4m (1,6 anos), 0,6m (4,8 anos) e 1,0m (9,0 anos). Além disso, a distância efetiva das raízes do caule da planta coincidiu com a projeção da copa área.



**Figura 8.** Distribuição de raízes de macaúbas cultivadas. *Fonte:* Moreira et al. (2019)



**Figura 9.** Densidades de raízes (kg m<sup>3</sup>) de plantas de macaúbas com idade de 1,6 (A), 4,8 (B) e 9 anos (C). Distancias (d1, d2, d3) do caule: 1,6 anos (0–0,67; 0,67–1,34; 1,34–2 m); 4,8 anos (0–0,9; 0,9–1,8; 1,8–2,71 m); and 9 anos (0–1,04 m; 1,04–2,08; 2,08–3,12 m). *Fonte:* Moreira et al. (2019).

Essas informações sobre a densidade, distribuição e profundidades das raízes, são importantes dentro do planejamento de adubação. Por exemplo, nos primeiros anos de desenvolvimento da planta no campo, doses mais altas de nutrientes podem ser direcionadas para o lado da planta com maior densidade de raízes, que no caso é a região tuberosa. Isso tende a ser relevante também para o plantio das mudas no campo, através da padronização de plantio em uma direção cardinal específica e, assim, contribuir para manejos futuros de adubação e irrigação da cultura. Nesse caso, a determinação do lado da região tuberosa da raiz pode ser feita com base no lado de menor quantidade de folhas da muda, conforme observado na Figura 8E, já que é difícil identificar em qual lado se encontra a região tuberosa da raiz quando a muda ainda está em saco de polietileno e com o substrato aderido (MOREIRA *et al.*, 2019).

Assim, dentro do contexto de fertilidade do solo e nutrição, se as plantas apresentarem boas condições nutricionais para suprir a demanda de assimilados dos frutos novos, as falhas reprodutivas nos cachos poderão ser minimizadas. Assim, a nutrição da macaubeira também deve ser considerada para que haja aumentos em produtividade, e embora o status nutricional não tenha sido quantificada nesse estudo, as pesquisas demonstram que se trata de uma espécie responsiva a esse manejo, e que a continuidade dos estudos, certamente contribuirão para atender as suas exigências quanto à fertilidade do solo e o manejo de adubação.

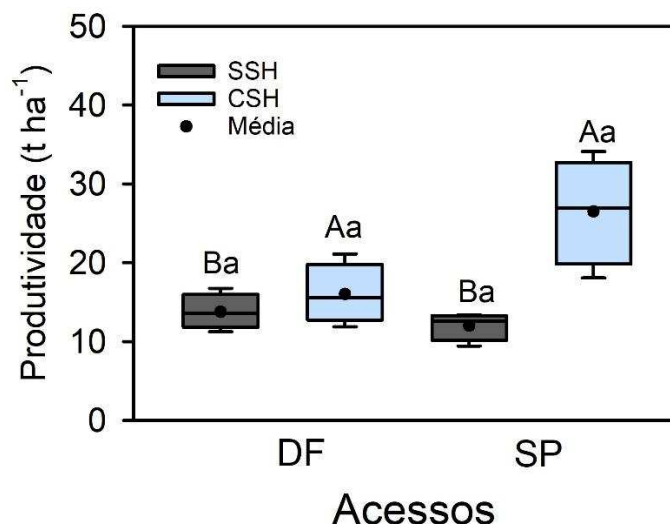
### **Outros fatores**

O presente estudo também revelou que outros fatores também podem estar relacionados ao pegamento e à produção de frutos de macaúba (Figura 2).

#### ***Genética***

Para a macaúba, já foi verificado que a genética da planta tem grande relação com a produção de frutos. Cruzamento entre indivíduos com alto grau de parentesco (meios-irmãos), pode resultar em depressão endogâmica, ou seja, uma baixa variabilidade genética promovendo a consanguinidade e conseqüentemente, o aborto dos frutos (SIMIQUELI *et al.*, 2018). Isso foi reforçado por Silva (2019), observando que cruzamentos dirigidos entre genótipos contrastantes de macaubeira quanto a procedência, resultaram em híbridos F1 e maior pegamento de frutos. Esses resultados reforçam que quanto maior a variabilidade genética, maior a produção de frutos, sendo um ponto importante a se considerar no planejamento de cultivos comerciais.

Um outro ponto interessante é quanto as respostas de diferentes acessos em função do ambiente de origem. Como apresentado no Capítulo III deste estudo, os tratamentos SSH (Sem Suplementação Hídrica) e CSH (Com Suplementação Hídrica) que foram impostos em plantio de macaubeira na condição de cerrado, promoveram diferenças na resposta produtiva dessa palmeira. Os valores médios de produtividade encontrados para o acesso DF nas condições SSH e CSH foram respectivamente, 13.7 t ha<sup>-1</sup> e 16 t ha<sup>-1</sup> (safra 2018/2019), enquanto que para o acesso SP, os valores médios de produtividade nas condições SSH e CSH, foram respectivamente, 12 t ha<sup>-1</sup> e 26 t ha<sup>-1</sup> (Figura 10). Plantas de São Paulo apresentaram melhores respostas fisiológicas e foram mais produtivas em resposta ao aumento na suplementação hídrica. Nos processos evolutivos, as plantas sofrem pressões seletivas em função dos agentes abióticos do local de origem, sendo capaz de modular geneticamente alguns atributos estruturais e funcionais (adaptação) em ambientes desfavoráveis, (VALLADARES; GIANOLI; GÓMEZ, 2007). É possível que o acesso SP, por ser de procedência de um local com maior precipitação, tenha um maior desenvolvimento do seu sistema radicular, em especial nas camadas mais superficiais do solo, resultando em maior capacidade de absorção de água, um aporte mais expressivo de fotoassimilados via assimilação líquida de carbono, e conseqüentemente, maior produtividade (SÁNCHEZ-BLANCO *et al.*, 2014).



**Figura 10.** Produtividade média de dois acessos de macaúba: Distrito Federal (DF) e São Paulo (SP) cultivadas sob duas condições hídricas: Sem Suplementação Hídrica (SSH) e Com Suplementação Hídrica (CSH) em Planaltina – DF (Embrapa Cerrados). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente a nível de 5% de probabilidade pelo teste de Duncan. Letras maiúsculas comparam o efeito da condição hídrica para o mesmo acesso. Letras minúsculas comparam os diferentes acessos para uma mesma condição hídrica. *Fonte:* Capítulo III.

Os primeiros trabalhos envolvendo o melhoramento genético da macaubeira, coincide com a montagem do Banco Ativo de Germoplasma na UFV (BAG) no ano de 2008. Trata-se do maior banco de germoplasma de macaúba do mundo, que foi enriquecido com acessos coletados de diferentes estados do Brasil, a fim de garantir uma grande variabilidade genética e permitir trabalhos de pesquisa envolvendo seleção e cruzamento para essa palmácea (MANFIO *et al.*, 2011). Além da UFV, outras instituições públicas e privadas, também vem se destacando nos trabalhos de melhoramento genético com a macaúba, como a EMBRAPA, EPAMIG, UNB, IAC, Acrotech<sup>®</sup>, Inocas<sup>®</sup>, entre outras.

Por se tratar de uma planta perene, os trabalhos de melhoramento com a macaúba são bastante diferenciados à de outras culturas anuais, em especial pelo fato de requerer muitos anos até obter resultados consolidados. Por esses e outros motivos, ainda não há material genético selecionado para ser cultivado em diferentes ambientes de produção, entretanto, as pesquisas estão avançando para obter genótipos superiores e a curto prazo. O chamado “vigor híbrido” vem sendo o foco dos estudos da REMAPE (Rede Macaúba de Pesquisa, UFV) através de cruzamentos dirigidos em campo (LANES *et al.*, 2016); SIMIQUELI *et al.*, 2018; SILVA, 2019) e em paralelo com pesquisas de laboratório, envolvendo embriogênese somática e avanços para sua clonagem (ANDRADE, 2014; GRANJA *et al.*, 2018).

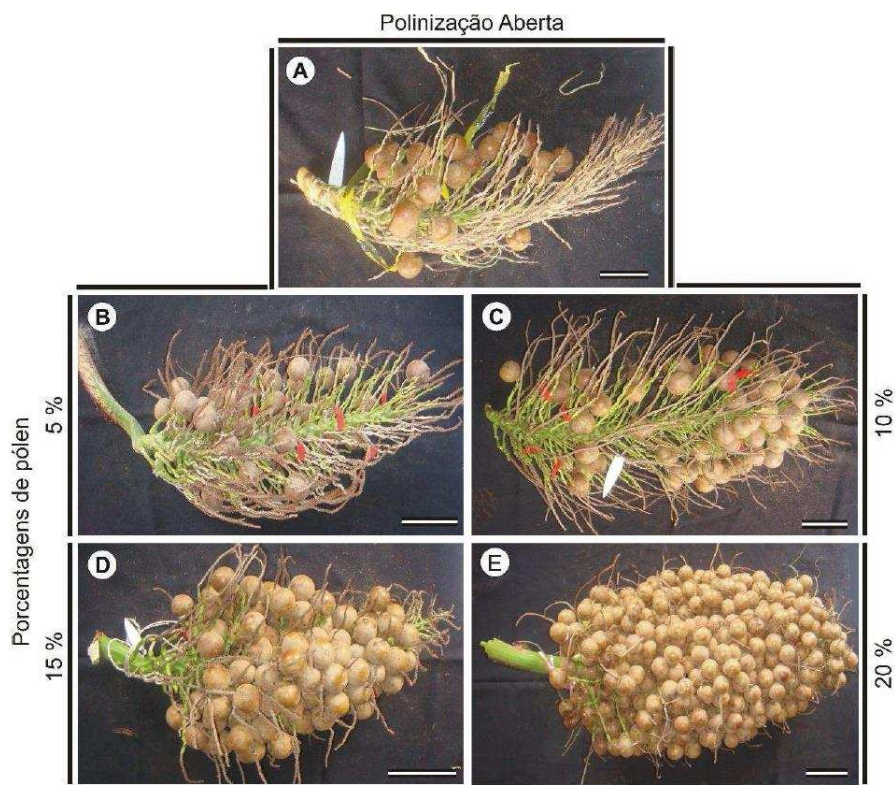
Em um futuro próximo, espera-se que através destes e outros estudos, obtenha-se o ideótipo para a macaúba, cujas características mais desejáveis a se alcançar são: precocidade, produtividade, uniformidade na produção, elevado teor de óleo, menor porte da planta, ausência

de espinhos, maior resistência a possíveis pragas e doenças, e maior adaptabilidade à ambientes de produção diversos.

### ***Polinizadores***

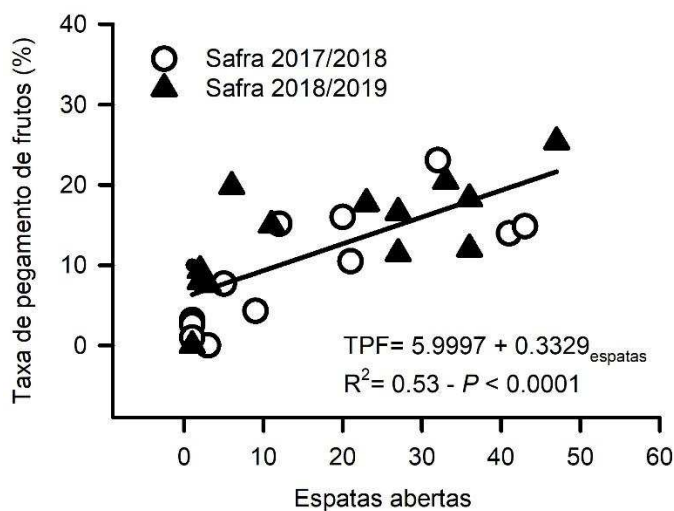
Conforme observado por Lanes *et al.* (2015), além da menor variabilidade genética, as falhas reprodutivas na macaubeira também pode ser ocasionada pela atividade limitada de voo dos polinizadores, reduzindo a dispersão do pólen entre os indivíduos numa mesma área (populações naturais). Os principais polinizadores da macaubeira (*Andranthobius* sp., *Mystrops* cf *Mexicana* e *Cyclocephala forsteri* - SCARIOT *et al.* 1991) são conhecidos por realizar voos a curtas distâncias, além de comportamento gregário e de forrageamento, que levam os insetos a permanecerem em grupos de indivíduos na mesma localidade (ABREU *et al.*, 2012). Esse comportamento *per se*, limita a atividade de polinização, que pode ser ainda mais prejudicada por outros fatores como, chuvas intensas, baixa incidência de luz, fortes ventos, entre outros.

Embora os estudos envolvendo a atividade dos polinizadores na macaubeira ainda sejam incipientes, a taxa de visitação e o comportamento de polinização desses insetos foram monitorados e descritos em Brito (2013). Nesse mesmo estudo, a baixa eficiência dos polinizadores foi confirmada pela obtenção de maiores taxas de pegamento de frutos com o uso da polinização manual. Nascimento (2015) comprovou a eficiência da polinização manual ao utilizar a técnica com a maior proporção de pólen, sendo obtido um maior pegamento de frutos em comparação com a polinização aberta (Figura 11). De maneira semelhante, Silva (2019) também observou maior pegamento de frutos utilizando polinização manual, salientando que essa técnica em macaubeira precisa considerar o grau de parentesco entre os genitores, sendo indicado o cruzamento entre acessos de diferentes procedências, assim como, a técnica de abertura manual da espata visando uma maior receptividade das flores femininas.



**Figura 11.** Comparação do pegamento de frutos de macaúba em função da polinização aberta (A) e polinização manual (B – E) em diferentes porcentagens de pólen (mistura de pólen + talco). *Fonte:* Nascimento (2019).

Conforme demonstrado, problemas com a polinização resultam em baixa produção de frutos de macaúba. No Capítulo I deste estudo, destacamos que a sincronia da abertura das espatas tem relação direta com a produção de frutos, uma vez que as maiores taxas de pegamento ocorreram sob maior concentração de espatas abertas (Figura 12). Esse resultado é um provável efeito da maior eficiência da polinização, quando há uma maior quantidade de espatas abertas simultaneamente, e que são capazes de atrair mais polinizadores pela liberação do odor característico da espécie. (SCARIOT; LLERAS; HAY, 1995; VERDU; GARCIA-FAYOS, 1998; BRITO, 2013). Isso ganha maior reforço, quando observamos que os primeiros cachos da planta apresentam menor pegamento de frutos e que isso não está relacionado a uma competição entre os cachos de uma mesma planta, mas provavelmente, a baixa presença de polinizadores, e menor disponibilidade e variabilidade de pólen, que são recorrentes no início da estação de florescimento (BRITO, 2013).



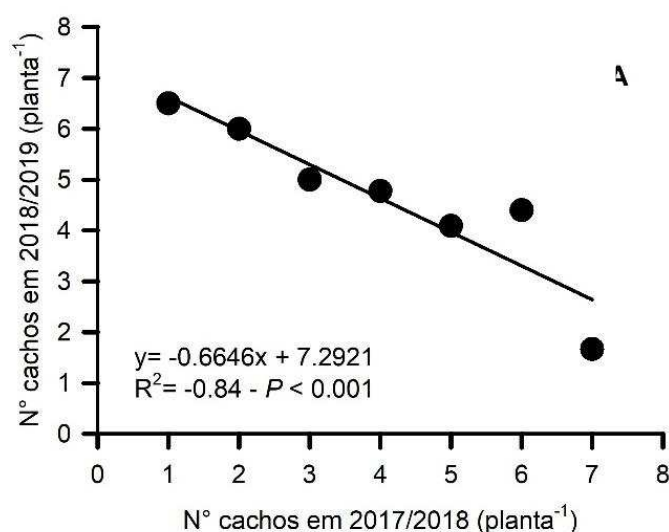
**Figura 12.** Análise de regressão para a taxa de pegamento de frutos em função da quantidade de espatas abertas em 48 plantas de macaubeira durante as safras de 2017/2018 (símbolos abertos) e 2018/2019 (símbolos fechados).  
*Fonte:* Capítulo I

Um fato adicional demonstrado no Capítulo II é sobre um ambiente com maior incidência de luz, que poderia ter beneficiado a atividade dos polinizadores e promover maior pegamento de frutos. Portanto, se a falha de polinização for uma das causas da redução na produção de frutos na macaúba, é possível que a adoção de algumas técnicas e manejos, possam minimizar esse problema. Como exemplos, podemos citar: uso de polinização artificial e rompimento das espatas em momento de viabilidade das flores femininas; uso de materiais genéticos com sincronia de florescimento; adensamento de plantas que favoreça o microambiente para os insetos polinizadores; introdução ou manutenção de vegetação ao redor do cultivo de macaubeira que favoreça a população dos polinizadores. Entretanto, estudos mais esclarecedores sobre a atividade dos polinizadores em função do ambiente, se fazem necessários.

### ***Bienalidade e competição entre frutos***

A macaubeira apresenta uma variação na quantidade de cachos emitidos entre os anos (Figura 13), similar ao comportamento de bienalidade que ocorre em outras culturas. Por exemplo, plantas que emitiram um ou dois cachos em um ano, tiveram a tendência de emitir de seis a sete cachos no ano seguinte, sendo observado também um comportamento inverso. No cafeeiro, é comum que um ano de alta produção seja sucedido por ano de baixa, sendo, portanto, uma cultura que apresenta ciclo bienal. Isso ocorre em decorrência da necessidade de investimento de recursos da planta para o crescimento vegetativo, após ano de alta produção,

fazendo com que a produção de frutos seja baixa no ano seguinte (SILVA; REIS, 2013). Para as palmeiras, a ocorrência dessa bienalidade ainda não foi notificada. No caso da macaubeira, esta parece expressar tal comportamento, porém, o tempo necessário para sua recuperação e se isso ocorre de maneira gradativa, também permanece desconhecido. Em adição, essa variação na produção de cachos pode estar muito mais relacionada à fatores limitantes que ocorrem na etapa de diferenciação floral, como por exemplo, uma seca prolongada, entretanto, são necessários estudos sobre esses aspectos.

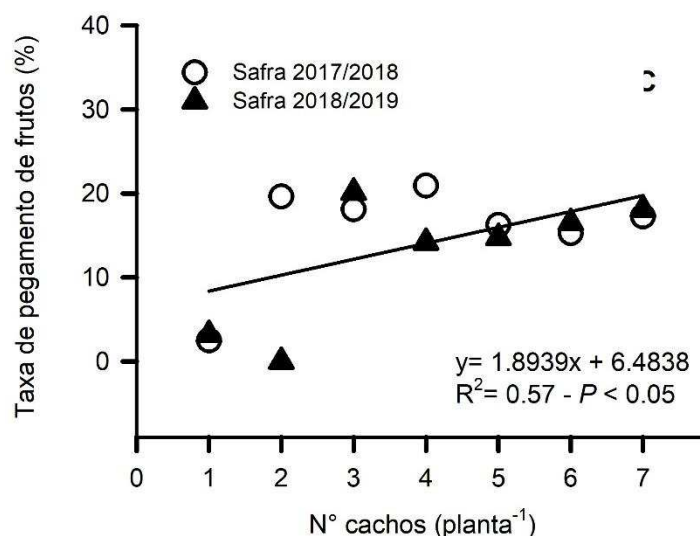


**Figura 13.** Análise de regressão para o número de cachos de macaubeira produzidos em duas safras consecutivas em Araponga – MG. *Fonte:* Capítulo I

Outro ponto relevante, é que embora a macaubeira apresente sobreposição de safras, isso não reflete em competição entre drenos de diferentes idades, sendo que os frutos mais novos dependem mais fortemente dos recursos da planta em comparação com os frutos já em estágio de maturação. Em outras palavras, o pagamento dos frutos recém-formados é independente da quantidade de cachos remanescentes da safra anterior.

As observações de que o número de cachos produzidos, influenciam o pagamento de frutos do mesmo ano (Figura 14), reforçam ainda mais o pressuposto de que, para a macaúba, parece não ocorrer competição entre os drenos (em formação, e com os remanescentes), haja vista que uma maior quantidade de cachos poderia representar maior demanda e competição por assimilados (WUBS; HEUVELINK; MARCELIS, 2009). É possível que a maior quantidade de cachos na planta, tenha ocasionado maior pagamento dos frutos (a nível de planta) devido a um maior sucesso da polinização (WALSH; ARNOLD; MICHAELS, 2014). Isso vai em oposto ao observado em outras espécies, onde a presença de frutos em desenvolvimento na planta, pode inibir o pagamento e crescimento de um fruto jovem, devido

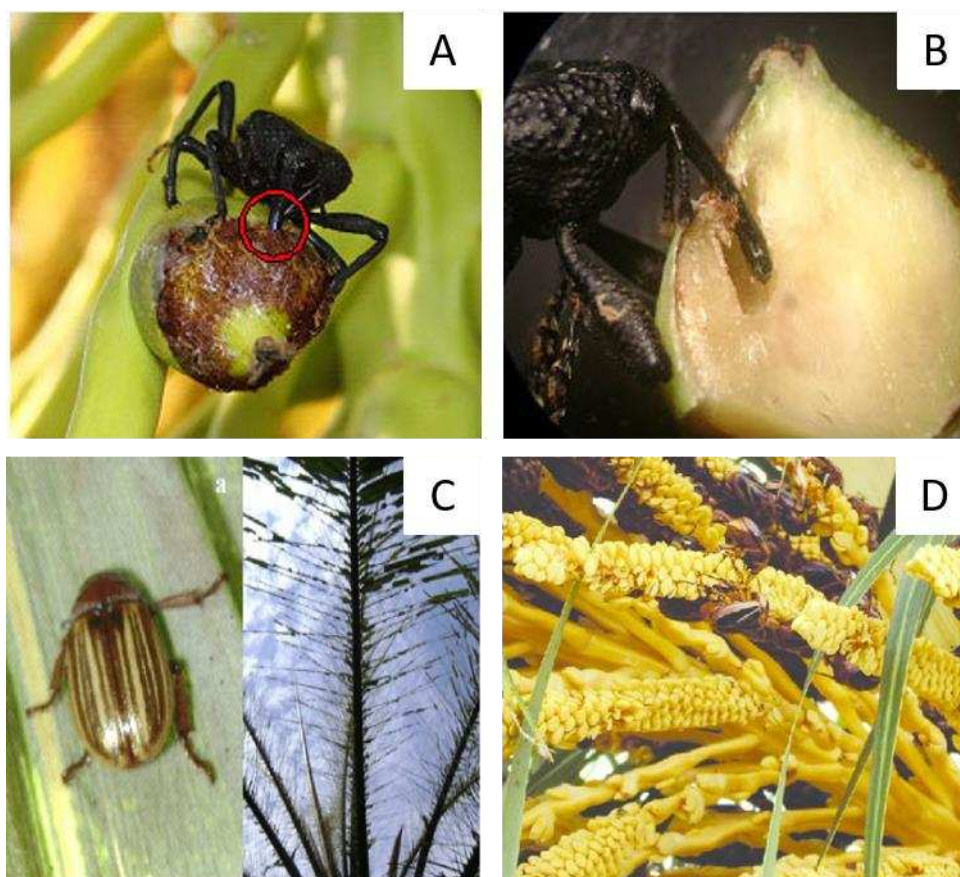
a competição por recursos disponíveis, ou ainda, por estratégia de dominância (STEPHENSON, 1981; GANESHIAH; SHAANKER, 1994; MARCELIS *et al.*, 2004).



**Figura 14.** Análise de regressão para a taxa de pagamento de frutos em função do número de cachos produzidos por planta em macaúba cultivada em Araponga – MG. *Fonte:* Capítulo I

### ***Fitossanidade***

Aspectos fitossanitários, como a ocorrência de insetos-pragas e doenças, também são pontos importantes a serem considerados no cultivo da macaúba, porém, os estudos são praticamente inexistentes. Entre os poucos registros, Montoya *et al.*, (2015), observaram indivíduos adultos de *Parisoschoenus* aff. *Obesulus* (gorgulho dos frutos) perfurando a base de frutos novos e em flores femininas (Figuras 15A e B), assim como, a presença do *Bolax flavolineata* (besouro pardo) alimentando-se dos folíolos novos da macaubeira (Figura 15C). Ambos os insetos, foram apontados como possíveis causadores da redução da produtividade, devido à queda prematura de flores e frutos e ainda, redução de área foliar fotossintetizante na macaubeira. Em adição, um estudo realizado por Oliveira & Ávila (2011) verificou-se a ocorrência do coleóptero *Cyclocephala forsteri*, em uma área com população espontânea de macaúba, no município de Dourados – MS. Esses coleópteros foram observados atacando a inflorescência e causando a queda dos botões florais, com conseqüente redução de frutos nos cachos (Figura 15D).



**Figura 15.** Adulto de *Parisoschoenus obesulus* perfurando fruto jovem (A) e flor feminina da macaubeira (B). Indivíduo de *Bolax flavolineata* causando desfolha em macaubeira (C) e inflorescência atacadas por adultos de *Cyclocephala forsteri* (D). Fonte: Montoya et al. (2015); Oliveira & Ávila (2011).

Outros insetos considerados pragas-chaves na palma e coqueiro, como, a broca-dos-frutos e lagarta das folhas, também já foram encontrados na macaubeira, porém sem causar danos econômicos. Pragas generalistas como, roedores, formigas, cupins, entre outras, também podem ocorrer, porém, isso é mais recorrente em condição de solo arado e quando não há outras culturas. Quanto à ocorrência de doenças, as pesquisas são praticamente inexistentes. Alguns relatos obtidos na prática de algumas empresas do setor – porém sem danos econômicos – destacando que algumas doenças ocorrem em comum entre a macaubeira, a palma e o coqueiro, como: *Phytophthora* sp. (murcha), *Phyllachora torrendiella* (lixa pequena) e *Pseudocercospora* (mancha das folhas). A princípio não há problemas com doenças no campo, salvo em condição de viveiro que tem condições diferenciadas de umidade e temperatura. Na fase de viveiro as plantas estão bem mais susceptíveis, uma vez que se encontram no início do desenvolvimento. Já no campo, por ser uma espécie rústica e se encontrar distribuída de forma mais espaçada na área, a macaúba se torna menos vulnerável ao ataque de patógenos. Nesse caso, as doenças surgem na maioria das vezes associada a outros fatores, como insetos-pragas e plantas daninhas que se tornam vetores do agente patogênico. Na Tabela 2, são descritas as

principais pragas e doenças que ocorrem na macaubeira em condição de viveiro e campo segundo Carvalho *et al.* (2011) e Motoike *et al.* (2013).

Até o momento, a macaúba pode ser considerada uma espécie com boa tolerância a pragas e doenças. Em todos os casos, as evidências são pouco claras se problemas fitossanitários estariam causando a queda de produção de frutos, principalmente porque os cultivos com macaubeira ainda ocorrem em pequena escala; entretanto, com o avanço de plantios para grandes áreas, é possível que esses problemas ganhem maiores proporções e possam representar prejuízos ao produtor.

Um passo importante sobre esses aspectos, é que estudos relacionados à fitossanidade da macaubeira possam se tornar prioridade de algumas instituições de pesquisa em conjunto com empresas privadas, a fim de levantar com exatidão as principais pragas e doenças dessa cultura emergente. Tais informações serão úteis para que a macaubeira seja inserida como uma Cultura com Suporte Fitossanitário Insuficiente (CSFI) também conhecida como “Minor Crops”, denominadas como culturas para as quais existe falta ou número reduzido de agrotóxicos registrados; Logo, uma vez que a macaubeira seja agrupada como uma CSFI, os processos de registro de produtos fitossanitários poderão ser agilizados, e garantir suporte para o controle de pragas e doenças.

**Tabela 2.** Principais pragas de ocorrência na macaúba, e seus danos associados em condição de viveiro e no campo.

<b>PRINCIPAIS PRAGAS NO VIVEIRO</b>	
<b>Praga</b>	<b>Danos</b>
<i>Tetranychus mexicanus</i> (Ácaro vermelho)	Amarelecimento dos folíolos
<i>Cerataphis</i> sp. (Pulgão)	Ataque ao ponteiro da planta sugando a seiva; escurecimento das folhas devido surgimento da fumagina
<i>Aspidiotus</i> sp. (Cochonilha)	Amarelecimento, clorose e secamento dos folíolos
<i>Agrotis ipisilon</i> (Lagarta rosca)	Folíolos raspados e cortados; perfurações na base do caule das mudas
Roedores	Alimentam-se das sementes na fase de pré-viveiro
<b>PRINCIPAIS PRAGAS NO CAMPO</b>	
<i>Nasutitermes</i> (Cupins)	Danos no coleto da planta; secamento das folhas
<i>Formicidae</i> (Formigas cortadeiras)	Desfolhamento parcial ou total das plantas
<i>Brassolis</i> sp. (Lagarta das folhas)	Desfolhamento parcial ou total das plantas
<i>Rhynchophorus palmarum</i> (Broca-do-olho)	Murcha e amarelecimento de folhas internas; destacamento de folhas verdes na copa
<i>Rhinostomus</i> (Broca-da-estipe)	Galerias pelo estipe e quebra devido os forte ventos;
<i>Coraliomela</i> sp. (Falsa barata)	Danos às folhas de plantas jovens ainda fechadas
<b>PRINCIPAIS DOENÇAS NO VIVEIRO</b>	
<b>Doença</b>	<b>Sintoma</b>
<i>Bipolaris incurvata</i> (Helmintosporiose)	Ocorrência de pontos pequenos com tom de ferrugem, rodeados por anéis de cor amarelada; folhas secas em estágios mais avançados da doença
<i>Phytophthora</i> sp. (Podridão do olho ou murcha)	Folhas amareladas e secas; desprendimento fácil dos folíolos; podridão do caule saxofone
<i>Pseudocercospora</i> sp. (mancha angular)	Manchas elípticas e alongadas de cor marrom nos folíolos
<b>PRINCIPAIS DOENÇAS NO CAMPO</b>	
<i>Phytophthora</i> sp. (Podridão do olho ou murcha)	Folhas amareladas e emissão de mais de uma flecha por vez; desprendimento fácil das folhas; morte da gema apical
<i>Pseudocercospora</i> sp. (mancha angular)	Manchas elípticas e alongadas de cor marrom nas folíolos; manifestação inicial nas folhas inferiores progredindo para as superiores
<i>Phyllachora torrendiella</i> (Lixa pequena)	Pequenos pontos negros nos folíolos (verruca)
<i>Bursaphelenchus</i> sp. (Anel vermelho)	Bronzeamento das folhas

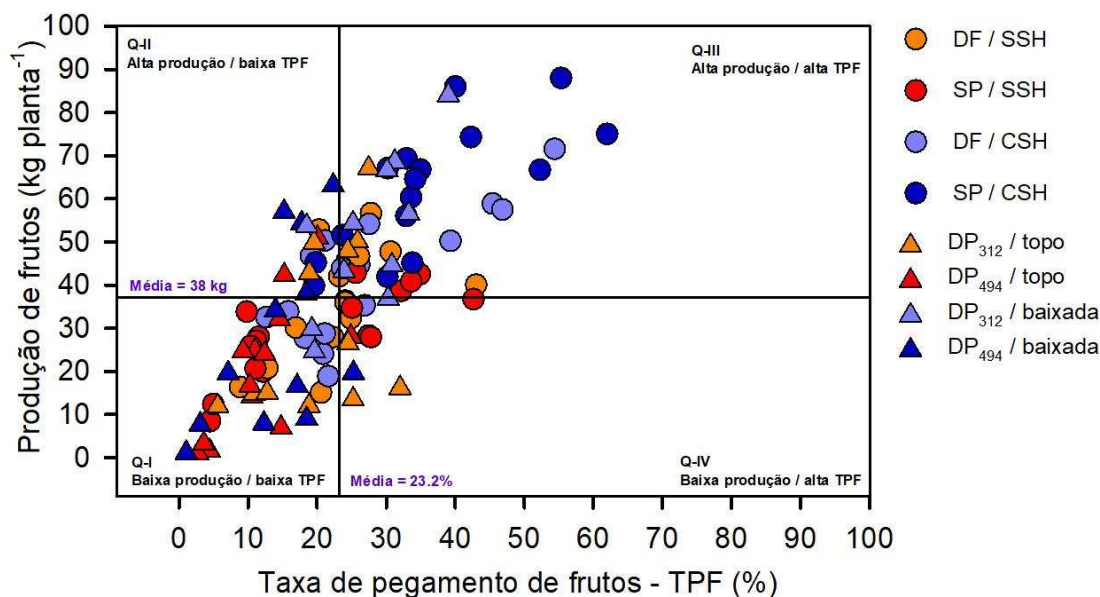
Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2011); Motoike et al. (2013).

## Disponibilidade hídrica e população de plantas como fatores decisivos na produção da macaubeira

A macaubeira é uma espécie bem adaptada à diversas condições edafoclimáticas, porém, é responsiva a uma melhor disponibilidade de recursos. Como observado nos tópicos anteriores, fatores como água, luz, topografia do terreno, genética da planta, fitossanidade, polinizadores e fertilidade do solo têm substancial importância no rendimento de frutos e devem ser trabalhados dentro do planejamento agrícola dessa cultura.

Com base em resultados já conclusivos, a disponibilidade hídrica e a população de plantas são consideradas decisivas para incrementos na produção de frutos da macaubeira. Na Figura 16, são apresentados os dados de produção e taxa de pegamento de frutos (TPF) obtidos em dois experimentos sob cultivos planejados. Em ambos experimentos, as plantas foram adubadas periodicamente e encontravam-se em plena fase de produção (9 anos de idade). Para o experimento cujos dados são representados pelos círculos (●●●●), os fatores de variação foram: material genético (acesso de Distrito Federal [DF] e acesso de São Paulo [SP]) e a suplementações hídricas (sem suplementação hídrica [SSH] e com suplementação hídrica [CSH]). Já no experimento com os dados representados pelos triângulos (▲▲▲▲), os fatores avaliados foram a densidade de plantio, sendo: 494 plantas por hectare (DP<sub>494</sub> – alta densidade) e 312 plantas por hectare (DP<sub>312</sub> – baixa densidade) e duas condições topográficas do terreno: topo e baixada. Informações complementares das condições de cultivos de ambos experimentos são encontrados nos capítulos II e III deste estudo.

Conforme apresentado no gráfico de dispersão (Figura 16), as linhas de corte na horizontal e vertical representam, respectivamente, as médias gerais da produção de frutos como sendo 38 kg por planta, e os valores médios de TPF como sendo de 23.2%. A partir das médias gerais, os dados de produção e TPF foram agrupados em quatro quadrantes, sendo: Q-I – plantas com valores de produção e TPF abaixo da média; Q-II – plantas com valores de produção acima da média e TPF abaixo da média; Q-III – plantas com valores de produção e TPF acima da média; Q-IV – plantas com valores de produção abaixo da média e TPF acima da média.



**Figura 16.** Diagrama de dispersão para produção de frutos e taxa de pagamento de frutos (TPF) em plantas adultas de macaúba em diferentes condições experimentais. Dados obtidos a partir dos capítulos II e III deste estudo.

Na Tabela 3 são apresentados os dados para número de plantas e o percentual de distribuição das plantas dentro dos quatro quadrantes, sendo observado uma variação quanto aos dados de produção de frutos e TPF em função das oito condições experimentais. No Q-I agrupou-se as plantas menos produtivas, sendo em maior proporção as plantas que estavam sob as condições DP<sub>494</sub> / topo (75%) e DP<sub>494</sub> / baixada (58.3%), evidenciando que uma alta densidade de plantas representa um problema na produção de frutos de macaúba. Para diversas culturas, uma alta população de plantas resulta em menor intensidade de luz no dossel e limita a eficiência no uso da luz entre as plantas (ZHANG *et al.*, 2021). Tal limitação de luz têm reflexos sobre a capacidade produtiva das culturas, uma vez que interfere no ganho de carbono pela planta e em processos ecológicos vitais, como atividade de polinizadores, por exemplo. Conforme observado e discutido no Capítulo II desse estudo, a condição DP<sub>494</sub> (maior densidade de plantio) levou a diminuição da capacidade fotossintética a nível de folha com prejuízos na assimilação de carbono e produtividade por planta. Dessa forma, a densidade de plantio configura-se como um tipo de manejo que precisa ser adequado em cultivos planejados de macaúba, visando incremento de produção por planta e por área.

Esse quadro pode tornar-se ainda mais agravante quando outros recursos também são limitados, como a disponibilidade hídrica no sistema, por exemplo. Em se tratando de diferenças topográficas, há uma prevalência de que em áreas de topo ou em topossequência, a disponibilidade hídrica seja mais limitante, ocasionando déficit hídrico para as plantas em alguma época do ano. Isso ocorre porque, em terrenos com declividade as chances de ocorrer

escoamento laminar e erosão hídrica, são maiores quando comparado com terrenos planos ou de baixada, resultando em outros agravantes, como a lixiviação de nutrientes e arraste de partículas do solo (COGO; LEVIEN; SCHWARZ, 2003; JUCKER *et al.*, 2018). Logo, um excesso de plantas nessa área pode refletir em maior competição entre as plantas pelos recursos já limitados, especialmente luz, água e nutrientes. Assim, fica evidente que a densidade de plantio para a macaúba é um fator importante a ser pesquisado, e poderá ser otimizado em futuros estudos com diferentes densidades de plantas e arranjos espaciais.

**Tabela 3.** Número de plantas (N) e percentual de distribuição das plantas (%) dentro dos quadrantes conforme as variáveis de produção de frutos e taxa de pegamento de frutos (TPF) e em função das condições experimentais no cultivo da macaúba.

Condição experimental	Q-I*		Q-II*		Q-III*		Q-IV*	
	N	%	N	%	N	%	N	%
<b>DF / SSH</b>	7	43.7	1	6.2	5	31.2	3	18.7
<b>SP / SSH</b>	8	50	0	0	4	25	4	25
<b>DF / CSH</b>	6	37.5	2	12.5	7	43.7	1	6.2
<b>SP / CSH</b>	0	0	2	12.5	14	<b>87.5</b>	0	0
<b>DP<sub>494</sub> / topo</b>	9	<b>75</b>	2	16.6	0	0	1	8.3
<b>DP<sub>312</sub> / topo</b>	4	33.3	2	16.6	3	25	3	25
<b>DP<sub>494</sub> / baixada</b>	7	<b>58.3</b>	4	33.3	0	0	1	8.3
<b>DP<sub>312</sub> / baixada</b>	2	16.6	1	8.3	9	<b>75</b>	0	0

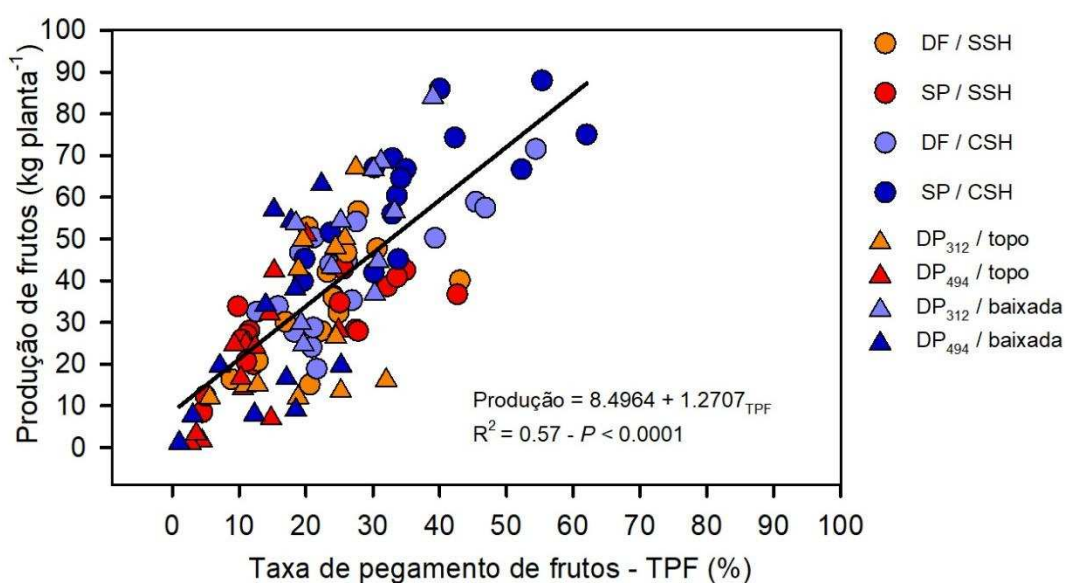
\*Quadrantes do gráfico de dispersão apresentados na Figura 16: Q-I: Baixa produção + baixa TPF; Q-II: Alta produção + baixa TPF; Q-III: Alta produção + alta TPF; Q-IV: Baixa produção + alta TPF; Valores destacados em negrito correspondem às condições experimentais com menor e maior desempenho produtivo.

Por outro lado, o Q-III – que corresponde as plantas com produção e TPF acima da média – agrupou em maior proporção as plantas cultivadas nas condições SP / CSH (87.5%) e DP<sub>312</sub> / baixada (75%), trazendo a maior disponibilidade hídrica como um fator em comum entre essas condições e, portanto, como sendo importante para a produção da macaúba. Isso demonstra que, mesmo em se tratando de uma planta rústica, a disponibilidade hídrica tem substancial importância para o aumento na produção de frutos, sendo um fator de grande importância no ambiente de produção (ROSSATO, 2017). Para a macaúba, uma maior entrada de água no sistema – seja por irrigação ou pela condição topográfica do terreno – está relacionada a melhorias na condição hídrica da planta e maior assimilação de carbono. Além disso, os níveis de precipitação também assumem papel importante, refletindo positivamente na produção de frutos dessa oleaginosa (Capítulo I).

Outros fatores como, material genético e população de plantas também precisam ser destacados nesses resultados de produção e TPF acima da média. O acesso de São Paulo (SP)

demonstrou maior responsividade a suplementação hídrica na estação seca quando comparado ao acesso DF, demonstrando que diferentes acessos de macaúba divergem quanto a sua resposta ao fornecimento hídrico. Essa poderá ser uma informação importante e que poderá ser repensada estrategicamente na escolha de materiais genéticos para plantio em ambientes diversos. Em adição, a menor densidade de plantas ( $DP_{312}$ ) associada a condição de baixada, também resultaram em produção e TPF acima das médias, justamente porque para essa condição de cultivo, os fatores água e luz não foram limitantes. Entretanto, vale destacar que a disponibilidade de ambos recursos dependerá da otimização da densidade de plantio, que por sua vez, depende de novos estudos.

O conjunto de dados referente aos dois experimentos avaliados, revelou através da análise de regressão que a relação entre a produção de frutos e a TPF ajustou-se a um modelo linear crescente ( $R^2 = 0.57 - P < 0.0001$  - Figura 17), com incremento médio de 1.27 kg de frutos por planta para cada aumento em 1% na TPF. Esses valores são válidos para as condições experimentais que foram testadas, porém, é importante para nortear futuros trabalhos quanto ao nível de produção que poderá ser alcançada a depender do tipo de manejo adotado.



**Figura 17.** Relação entre produção por planta e taxa de pagamento de frutos em plantas adultas de macaúba em diferentes condições experimentais. Dados obtidos a partir dos capítulos II e III deste estudo.

Outro ponto importante a ser mencionado é a grande variação observada na produção de frutos entre as plantas, com variação de 0 a 90 kg de frutos e valor médio de 38 kg (Figuras 16 e 17). Essa amplitude na produção das plantas confirma que os fatores envolvidos no ambiente de produção, ainda exercem forte influência sobre a macaúba. Entretanto, com o aprimoramento das técnicas e o avanço no desenvolvimento da cadeia produtiva dessa

palmácea, é esperado que a produção de frutos se torne mais homogênea à medida que outros fatores também vão sendo otimizados como: demanda hídrica, material genético, condição topográfica, densidade de plantio, adubação, temperatura, umidade relativa, vento, fitossanidade, entre outros.

### **Perspectivas para futuros ambientes de produção da macaúba**

Os alicerces importantes para exploração comercial da macaúba, aos poucos vem sendo identificados e como qualquer outra grande cultura, demonstra exigir condições ideais para seu cultivo, visando o máximo ganho em produtividade. De maneira geral, essa revisão lançou as bases do que seria importante para compor futuros ambientes de produção para a macaúba, especialmente quanto aos fatores edafoclimáticos, genética, manejo, fitossanidade e polinização. Como exemplo, o cultivo da cana-de-açúcar tem se baseado na classificação de ambientes de produção quanto ao tipo de solo e disponibilidade hídrica. Esses cuidados tem facilitado o planejamento das operações agrícolas, como preparo do solo, uso de variedades mais adaptadas, entre outros, refletindo em maiores produtividades (CAVALCANTE; PRADO, 2010).

Para a macaúba, fica evidente que a água se constitui como um dos fatores mais importantes para a produção. A escolha de terrenos com maior capacidade de armazenamento de água no solo, locais com precipitação médias não inferiores a 1500 mm e uso de sistemas de irrigação, poderão ser considerados em futuros plantios. Adicionalmente, as condições microclimáticas resultantes da densidade de plantio, também vem se mostrando decisiva para a produtividade, especialmente por influenciar a disponibilidade de luz para as plantas, e por conseguinte, alterar as relações ecofisiológicas. Para ambos fatores, há necessidade de maiores estudos para o alinhamento de práticas agrícolas e definir a real demanda hídrica e luminosa da macaúba, considerando sempre a viabilidade econômica dos plantios.

A espontaneidade da macaúba em ambientes diversos, e seu local de origem que remete à ambientes inóspitos, como é o caso do Cerrado, também precisam ser levados em conta na escolha do local de plantio. Diferente de outras culturas, a macaubeira é indicada para plantio em áreas de morro e pastagens degradadas devido sua maior rusticidade e adaptabilidade (VIANA *et al.*, 2011). Do ponto de vista técnico, os cultivos comerciais de macaúba poderão ocupar regiões com terras de menor custo e que são limitantes à agricultura convencional, semelhante ao que ocorre em cultivos florestais. A título de exemplo, poderão ser utilizadas áreas marginais como: pastagens degradadas, áreas com solos arenosos e de baixa fertilidade, encosta e topo de morro, além de locais com menor precipitação anual. Entretanto, é esperado

que a capacidade produtiva da macaúba também seja limitada, tornando-se proporcional a esses ambientes.

Como estratégias para minimizar os efeitos negativos dessas áreas marginais, a implantação dos macaubais poderá incorporar técnicas de conservação do solo como cultivo mínimo, cobertura do solo, consorcio com outras culturas, cordão vegetativo, cordão em contorno e curva de nível (MOTOIKE *et al.*, 2013). A implantação de cobertura no solo, por exemplo, poderá ser uma alternativa viável para melhorar a condição hídrica no sistema em anos ou regiões de baixa precipitação. A manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, o cultivo de espécies forrageiras, e o baixo grau de mobilização do solo, são tidos como métodos conservacionista que reduz o impacto da chuva no solo, diminui a perda de água por evaporação, aumenta o teor de matéria orgânica, melhorando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (VIANA *et al.*, 2011). Em adição, também é importante considerar a população de plantas que será introduzida nessas áreas, de modo que haja o mínimo de competição por água, luz e nutrientes entre as plantas.

Além do cultivo solteiro, a macaúba tem potencial para ser inserida em sistemas agrossilvipastoris, em consórcios com espécies forrageiras (pastagens), anuais (feijão, soja, milho) e perenes (café) (VIANA *et al.*, 2011). Nesses sistemas, a macaúba é introduzida como componente arbóreo, trazendo melhorias no desenvolvimento das demais culturas e da pastagem, através do aumento na fertilidade do solo, melhorias para a ambiência animal, além da diversificação da produção na fazenda. A adoção desses sistemas tem se mostrado promissor como práticas agropecuárias sustentáveis, através da recuperação de solos degradados, renovação de pastagens, diversificação da produção e ganhos ambientais. Além disso, a própria presença da macaubeira nessas áreas pode melhorar os aspectos hidrológicos do sistema, uma vez que possui eficiência na retenção de água das chuvas (DIAS *et al.*, 2011).

Considerando a importância da macaubeira como promissora fonte de óleo vegetal para atender diversos setores agroindustriais, é importante destacar a necessidade da construção de ambientes de produção que maximizem a produção dessa oleaginosa. Além dos fatores já bem investigados e apontados como sendo decisivos, outros também precisam ser considerados e melhor justificados em futuras pesquisas. Assim como ocorre com a palma africana, é muito provável que o potencial produtivo da macaubeira também seja alterado por fatores fitossanitários, como pragas e doenças, e que esses entraves possam ganhar maior proporção à medida que a macaúba vai sendo cultivada em larga escala. Futuramente, com a obtenção de materiais genéticos mais homogêneos, também será possível explorar o seu máximo potencial produtivo e introduzir materiais mais bem adaptados à diferentes ambientes de produção.

### Considerações finais

De maneira geral, essa revisão trouxe um compilado de informações sobre fatores associados à resposta produtiva da macaúba. Houve grandes avanços quanto às variáveis edafoclimáticas, porém, outros fatores como genética, bienalidade das plantas, atividade dos polinizadores e aspectos fitossanitários, também são decisivos e precisam de maiores esclarecimentos para entender o quanto cada fator pode estar influenciando na produção. A partir desse estudo, foi observado que a disponibilidade hídrica no sistema – que pode ser alterada pela precipitação, condição topográfica ou pelo manejo – tem importante destaque como fator que pode beneficiar a condição hídrica e capacidade fotossintética da macaubeira, beneficiando a taxa de pegamento de frutos e a produção das plantas. A densidade de plantio também se constitui como um fator-chave por alterar a disponibilidade de luz e eficiência fotossintética dessas plantas, e conseqüentemente, sua produção.

Importante entender que plantios de macaubeira poderão ocupar os mais diversos tipos de cenários, porém, com rendimentos proporcionais para cada condição de cultivo. Os efeitos negativos do ambiente poderão ser minimizados com práticas conservacionistas no solo, controle da população de plantas, e uso de materiais genéticos com vigor híbrido e adaptável à ambientes específicos. Dessa forma, a macaubeira poderá ser incorporada em projetos agrícolas sustentáveis, como recuperação de áreas degradadas, pastagens em regeneração e áreas de encosta, sem competir por terras com a produção de alimentos. Isso tende a ser estrategicamente eficiente para diversificar a produção agrícola na fazenda e produzir óleo vegetal de forma sustentável e com uma oleaginosa genuinamente da flora brasileira.

### Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

### Referências

- ABREU, A. G. *et al.* The genetic structure and mating system of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae). **Genetics and Molecular Biology**, v. 35, n. 1, p. 119–121, 2012.
- ANDRADE, A. P. de S. **Propagação clonal da palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex Mart.) via embriogenese somática e estimativas de parametros genéticos.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- BHERING, L. L. *et al.* Mapeamento de maciços naturais de ocorrência de macaúba (*Acrocomia aculeata*) visando à exploração sustentável. **IV Congresso Brasileiro de Mamona e I**

**Simpósio Internacional de Oleaginosas Energéticas, João Pessoa, PB**, p. 143–148, 2010.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo no Brasil**. 1ª Edição, Brasília, 2018.

BRITO, A. N. A. C. Biologia reprodutiva de macaúba: floração, polinizadores, frutificação e conservação de pólen. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa**, p. 47, 2013.

CARR, M. K. V. The water relations and irrigation requirements of coconut (*Cocos nucifera*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 27–51, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1017/S0014479710000931>

CARVALHO, K. J.; SOUZA, A. L.; MACHADO, C. C. Ecologia, Manejo, Silvicultura e Tecnologia da Macaúba. **Macaúba *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lood. ex. Mart.**, p. 35, 2011.

CAVALCANTE, E. P.; PRADO, H. do. Ambientes de produção de cana-de-açúcar de latossolos da região de Araxá-MG. **Nucleus**, v. 7, n. 2, p. 115–124, 2010.

CHAGAS, K. P. T. *et al.* Fenologia do dendezeiro e correlações com variáveis climáticas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1701–1711, 2019. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/1980509822640>

COELHO, R. M. *et al.* Non-biotic factors determining plasticity of the prospective oil-rich macauba palm (*Acrocomia aculeata*). **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 3, p. 771–782, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0173-7>

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 743–753, 2003.

DIAS, A. N. *et al.* Acclimation responses of macaw palm seedlings to contrasting light environments. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33553-1>

DIAS, H. C. T. *et al.* Cultivo da macaúba: ganhos ambientais em áreas de pastagens. Informe Agropecuário, [s. l.], v. 32, n. January, p. 52–60, 2011.

DIETRICH, O. H. S. **Época de amostragem foliar e efeito de doses de nitrogênio e potássio em plantas adultas de macaúba**. 73 f. 2017. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2017.

EVARISTO, A. B. *et al.* Potencial energético dos resíduos do fruto da macaúba e sua utilização na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 571–577, 2016. Available at: <https://doi.org/10.5902/1980509822757>

FALASCA, S.; ULBERICH, A.; PITTA-ALVAREZ, S. Development of agroclimatic zoning model to delimit the potential growing areas for macaw palm (*Acrocomia aculeata*). **Theoretical and Applied Climatology**, [s. l.], v. 129, n. 3–4, p. 1321–1333, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1850-6>

GANESHIAH, K. N.; SHAANKER, R. U. Seed and fruit abortion as a process of self organization among developing sinks. **Physiologia Plantarum**, v. 91, n. 1, p. 81–89, 1994. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00662.x>

GRANJA, M. M. C. *et al.* Explant origin and culture media factors drive the somatic embryogenesis response in *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., an emerging oil crop in the tropics. **Industrial Crops and Products**, v. 117, n. July 2017, p. 1–12, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.074>

HAWTHORNE, S.; MINIAT, C. F. Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient. **Ecohydrology**, v. 11, n. 1, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1002/eco.1825>

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

JUCKER, T. *et al.* Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes. **Ecology Letters**, v. 21, n. 7, p. 989–1000, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1111/ele.12964>

KITCHA, S.; CHEIRSILP, B. Screening of oleaginous yeasts and optimization for lipid production using crude glycerol as a carbon source. **Energy Procedia**, v. 9, n. 1, p. 274–282, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.029>

KUMHÁLOVÁ, J. *et al.* Topography impact on nutrition content in soil and yield. **Plant, Soil and Environment**, v. 54, n. 6, p. 255–261, 2008. Available at: <https://doi.org/10.17221/257-pse>

LANES, É. C. M. *et al.* Mating system and genetic composition of the macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding and genetic conservation programs. **Journal of Heredity**, v. 107, n. 6, p. 527–536, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esw038>

LANES, É. C. M. *et al.* Molecular characterization and population structure of the Macaw Palm, *Acrocomia aculeata* (Arecaceae), Ex Situ Germplasm collection using microsatellites markers. **Journal of Heredity**, v. 106, n. 1, p. 102–112, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1093/jhered/esu073>

LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Arecaceae: bases para o extrativismo sustentável**. 156 f. 2006. - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2006.

MANFIO, C. E. *et al.* Repetibilidade em características biométricas do fruto de macaúba. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, p. 70–76, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000100012>

MARCELIS, L. F. M. *et al.* Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 406, p. 2261–2268, 2004. Available at: <https://doi.org/10.1093/jxb/erh245>

MARKLEY, K. S. Mobocayá or Paraguay coco palm: an important source of oil. **Economic Botany**, v. 10, n. 1, p. 3–32, 1956.

MONTOYA, S. G. *et al.* Registro da presença e danos causados por coleópteros em macaúba. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 159, 2015. Available at: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.763>

MOREIRA, S. L. S. *et al.* Root distribution of cultivated macauba trees. **Industrial Crops and Products**, v. 137, n. May, p. 646–651, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.064>

MOTA, C. S. *et al.* Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel : colheita , pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. January 2011, p. 41–51, 2011.

MOTA, C. S.; CANO, M. A. O. Matter accumulation and photosynthetic responses of macaw palm to cyclical drought. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 4, p. 850–858, 2016. Available at:

<https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n409rc>

MOTOIKE, S. Y. *et al.* **A cultura da macaúba: implantação e manejo de cultivos racionais**. Viçosa: Editora UFV, 2013.

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, P. E. F. da *et al.* Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: Relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, 2002. Available at: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000700017>

NASCIMENTO, H. R. **Viabilidade polínica e polinização controlada em macaúba (*Acrocomia aculeata*)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 49p, 2015.

OGWANG, B. A. *et al.* The influence of topography on East African October to December climate: Sensitivity experiments with RegCM4. **Advances in Meteorology**, v. 2014, 2014. Available at: <https://doi.org/10.1155/2014/143917>

OLIVEIRA, H. N. de; ÁVILA, C. J. Ocorrência de *Cyclocephala forsteri* in *Acronomia aculeata*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, 2011. Available at: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i2.8769>

PIMENTEL, L. D. *et al.* Effect of nitrogen and potassium rates on early development of macaw palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1671–1680, 2015. Available at: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140352>

PIRES, T. P. *et al.* 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. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.029>

PLATH, M. *et al.* A novel bioenergy feedstock in Latin America? Cultivation potential of *Acrocomia aculeata* under current and future climate conditions. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 186–195, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.009>

PONS, T. L.; POORTER, H. The effect of irradiance on the carbon balance and tissue characteristics of five herbaceous species differing in shade-tolerance. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, n. FEB, p. 1–14, 2014. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00012>

RAMOS, M. I. L. *et al.* Qualidade nutricional da polpa de bocaiúva *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 90–94, 2008. Available at: <https://doi.org/10.1590/s0101-20612008000500015>

ROSA, B. L.; SOUZA, J. P.; PEREIRA, E. G. Increased atmospheric CO<sub>2</sub> changes the photosynthetic responses of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) to drought. **Acta Botanica Brasílica**, v. 33, n. 3, p. 486–497, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1590/0102-33062019abb0056>

ROSSATO, L. Impact of Soil Moisture on Crop Yields over Brazilian Semiarid, v. 5, n. November, p. 1–16, 2017. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00073>

SÁNCHEZ-BLANCO, M. J. *et al.* Root system response to drought and salinity: root distribution and water transport. *In: Root engineering : basic and applied concepts*, 2014. v. 40, p. 325–352. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54276-3>

SCARIOT, A.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Flowering and Fruiting Phenologies of the Palm

- Acrocomia aculeata*: Patterns and Consequences. **Biotropica**, v. 27, n. 2, p. 168, 1995. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388992>
- SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive Biology of the Palm *Acrocomia aculeata* in Central Brazil. **Biotropica**, v. 23, n. 1, p. 12, 1991. Available at: <https://doi.org/10.2307/2388683>
- SILVA, B. A. de O.; REIS, E. A. dos. A bionalidade da cafeicultura e o resultado econômico da estocagem. **Custos e Agronegócio**, v. 9, n. 3, p. 2–26, 2013.
- SILVA, T. C. Cruzamentos dirigidos e caracterização de híbridos F1 de plantas de macaúbas. **Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa**, p. 88, 2019.
- SIMIQUELI, G. F. *et al.* Inbreeding depression as a cause of fruit abortion in structured populations of macaw palm (*Acrocomia aculeata*): Implications for breeding programs. **Industrial Crops and Products**, v. 112, n. August 2017, p. 652–659, 2018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.068>
- SPARKS, T.; MENZEL, A. **Plant Phenology Changes and Climate Change**: Elsevier Ltd., 2013. v. 6 Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00229-X>
- STEPHENSON, A. G. Flower and fruit abortion: proximate causes and ultimate functions. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 12, n. 1, p. 253–279, 1981. Available at: <https://doi.org/10.1146/annurev.es.12.110181.001345>
- TELES, H. D. F. *et al.* Ambientes De Ocorrência Natural De Macaúba. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 4, p. 595–601, 2011. Available at: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i4.11851>
- VALLADARES, F.; GIANOLI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New Phytologist**, v. 176, n. 4, p. 749–763, 2007. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02275.x>
- VIANA, M. C. M. *et al.* Cultivo da macaúba em Sistemas Agroddilvipastoris. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. January, p. 41–51, 2011.
- VIÉGAS, I. J. M.; BOTELHO, S. M. Nutrição e adubação do dendezeiro. *In*: A CULTURA DO DENDEZEIRO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA: EMBRAPA Amazônia oriental, 2000. p. 374.
- ZHANG, Y.; XU, Z.; LI, J.; WANG, R. Optimum planting density improves resource use efficiency and yield stability of rainfed maize in semiarid climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021.
- WEI, J. *et al.* Influence of irrigation during the growth stage on yield and quality in mango (*Mangifera indica* L). **PLOS ONE**, v. 12, n. 4, p. e0174498, 2017. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174498>

## CONSIDERAÇÕES GERAIS

De maneira geral, o presente estudo trouxe informações inéditas sobre os fatores relacionados a capacidade produtiva da macaúba, desvendando algumas lacunas sobre a influência dos fatores ambientais, supra-anualidade, ecofisiologia, frutificação, genética e práticas agrícolas. Conforme os trabalhos desenvolvidos no Capítulo I, foi possível chegar ao entendimento de que a produção de frutos da macaúba é favorecida pelo incremento da precipitação anual, porém, os demais fatores climáticos que ocorrem na fase de florescimento, como temperatura e umidade relativa do ar, não exercem influência no pegamento de frutos. Quanto à característica de supra-anualidade da espécie que reflete em sobreposição de safras, esta não exerce influência no pegamento dos frutos novos, indicando que para a macaubeira, não há competição de recursos da planta entre frutos de diferentes safras. Entretanto, apresenta variação de produção entre as safras, semelhante ao comportamento de bienalidade que ocorrem em outras frutíferas.

Os resultados do Capítulo II envolvendo as práticas agrícolas, demonstraram que a produção de frutos é incrementada quando a macaúba é cultivada sob menor densidade de plantio, através de melhorias nas taxas fotossintéticas e aumento na disponibilidade de luz para as plantas. A macaúba quando cultivada em condição de baixada, apresentou melhorias quanto ao status hídrico e trocas gasosas, que refletiram positivamente sobre as taxas de pegamento de frutos. Esse resultado foi associado a maior umidade do solo nesse ambiente topográfico, ressaltando que o fator água é primordial para a produção da macaúba.

A importância do fator hídrico foi confirmada no Capítulo III, onde a condição com suplementação hídrica artificial na estação seca favoreceu conjuntamente o status hídrico, trocas gasosas e a produção de frutos da macaubeira em condição de cerrado, destacando ainda que essa resposta é diferenciada para diferentes materiais genéticos (acessos). Os principais resultados obtidos nos três capítulos foram reunidos com informações da literatura para compor o Capítulo IV de revisão. Nesse estudo foi destacado que a disponibilidade hídrica e a densidade de plantio, são decisivas na produção da macaúba, além de outros fatores como genética, fertilidade, polinização, topografia, bienalidade e fitossanidade.

A partir de novos estudos, todos esses fatores poderão ser melhor justificados e alinhados para o plantio comercial da macaúba, tornando-se fundamentais para nortear a instalação de projetos agroindustriais com a macaubeira em diferentes condições edafoclimáticas, sobretudo, em áreas mais limitantes de clima e solo. Acredita-se que diversos outros fatores também podem influenciar a produção de frutos da macaúba, entretanto, carecem de estudos mais

aprofundados e que possam esclarecer o quanto cada fator pode influenciar na sua capacidade produtiva.