



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DENIS DE PINHO SOUSA**

**ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA E DAS NECESSIDADES  
TERMOHÍDRICAS DO AÇAIZEIRO IRRIGADO NO LESTE DA AMAZÔNIA**

**BELÉM – PA**

**2020**

**DENIS DE PINHO SOUSA**

**ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA E DAS NECESSIDADES  
TERMOHÍDRICAS DO AÇAIZEIRO IRRIGADO NO LESTE DA AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia,  
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: Produção vegetal em sistemas agrícolas

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

Coorientador: Samuel Ortega-Farias

**BELÉM – PA**

**2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia  
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

S725e Sousa, Denis de Pinho  
ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA E DAS NECESSIDADES TERMOHÍDRICAS DO  
AÇAIZEIRO IRRIGADO NO LESTE DA AMAZÔNIA / Denis de Pinho Sousa. - 2020.  
107 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - 0, , Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2020.  
Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte Souza

1. Índice de atividade fenológica . 2. Necessidades térmicas e graus dias . 3. Balanço de energia em superfícies vegetadas. 4. Evapotranspiração. 5. Manejo de irrigação. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte, *orient.* II. Título

---

CDD

**DENIS DE PINHO SOUSA**

**ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA E DAS NECESSIDADES  
TERMOHÍDRICAS DO AÇAIZEIRO IRRIGADO NO LESTE DA AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências deste para o título de Doutor.

Orientador: Profº Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

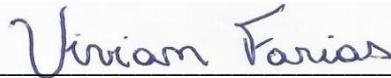
Coorientador: Profº Dr. Samuel Ortega-Farias

**BANCA EXAMINADORA**



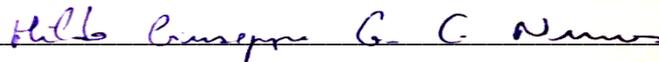
---

Profº Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza – Presidente  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA



---

Profª. Dra. Vivian Dielly da Silva Farias - 1º Examinadora  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ



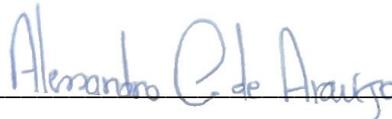
---

Pesq. Dr. Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes - 2º Examinador  
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI



---

Profº Dr. Claudio Jose Reis de Carvalho - 3º Examinador  
EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL



---

Dr. Alessandro Carioca de Araújo - 4º Examinador  
EMBRAPA AMAZONIA ORIENTAL

## **DEDICO**

*Aos meus pais,*

*Celina de Pinho Sousa & Mario Corrêa de Sousa,*

*Por todo o amor incondicional, ensinamentos, torcida, incentivos em tudo o que eu me proponha a fazer e por me proporcionarem o privilégio de poder somente me dedicar aos estudos, me guiando na contramão de uma realidade vivida por vocês e por tantas outras famílias, onde os estudos são deixados de lado ainda na adolescência para que se busque o pão de cada dia.*

*Ao meu irmão, cunhada e sobrinhos,*

*Diego de Jesus de Pinho Sousa, Renata Soares Sousa, Rayssa Sousa & Derick Sousa,  
por toda torcida, companheirismo, amor, carinho e amizade.*

*Aos meus avós,*

*Benedito de Pinho e Lourença Corrêa,  
carinhosamente chamados de “Seu Biluca” e “Dona Güita”,  
por toda sabedoria repassada, amor e carinho.*

*Ao meu tio e minha tia,*

*Isaias Marinho de Pinho e Sandra Helena Marinho de Pinho,  
por todos os ensinamentos, amor, carinho e por serem meus segundos pais.*

*Família, vocês são o que tenho de mais precioso, é tudo por vocês e pra vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Em especial a Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, pela força e pela fé, que faz brotar dentro de cada um de nós, em cada momento das nossas vidas;

A minha família, em especial as minhas tias Sandra, Alessandra e Katia; e aos tios Isaias, Jorge e Ailson, por todo o incentivo, que apesar dos poucos momentos que temos convivido nos últimos anos, sei que torcem incondicionalmente para meu sucesso;

A minha grande incentivadora, Surama Costa, por estar ao meu lado em vários momentos, me apoiando e me dando forças nessa gangorra que é a vida;

Aos amigos Adriano Mendes e Gheryte Alonso por se fazerem presentes na minha vida! Obrigado por toda a força, torcida, incentivo e amizade durante todos esses anos;

Aos irmãos que ganhei na Universidade Denilson Pontes, Richard de Nixon e Wagner Lopes Filho, que são fundamentais em minha vida desde o início da graduação;

Aos meus amigos do sagrado vôlei de sábado: Rafael, Eduardo, Hysab, Mônica, Carlinhos, Neto e Michel que fazem do momento de descontração a recarga de energia para todas as semanas;

As queridas Jessica e Elizabeth pelo convívio, carinho e toda ajuda principalmente na fase final de elaboração dessa tese;

Aos amigos que fiz em Capitão Poço e que foram essenciais na execução dessa pesquisa: Thiago, Mauricio, Ana Flávia, Guilherme, Fabinho, Otavio e Lucas. Sem a ajuda de vocês eu não teria conseguido;

Aos amigos Lucas Belém e Jaime Borges por toda ajuda prestada nas análises em laboratório e no campo, vocês foram demais;

Aos amigos e colegas do grupo de pesquisa Interações solo-planta-atmosfera na Amazônia: por toda a ajuda durante a elaboração dessa Tese;

Aos amigos que fiz no PGAgro: Ana Carla (in memoriam), William Aviz, Helane Aguiar, Lucas Bastos, Carol Jucá e Lana Carvalho pelas discussões científicas, trocas de ideias e amizade;

Ao produtor Cid Ornela por abrir as portas de sua fazenda para a realização desta pesquisa e aos seus funcionários por todo o apoio em campo;

Ao Prof. Marcus Lima e a direção da UFRA – Capitão Poço, por me receberem de braços abertos e me ajudarem logisticamente sempre que solicitado;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza, pela oportunidade e confiança depositada em mim e pelo exemplo de ética profissional;

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho científico.

**Muito Obrigado!**

1

## LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

- 2 **AF** - Área foliar
- 3 **C<sub>p</sub>** - Calor específico à pressão constante
- 4 **CV** - Coeficiente de variação
- 5 **d** - Índice de concordância de Wilmott
- 6 **DPd** - Desvio padrão em dias
- 7 **DPgd** - Desvio padrão em graus dias
- 8 **E** - Evaporação de água do solo
- 9 **e** - Gradiente vertical de pressão do vapor d'água
- 10 **ET<sub>c</sub>** - Evapotranspiração da cultura
- 11 **ET<sub>o</sub>** - Evapotranspiração de referência
- 12 **G** - Fluxo de calor no solo
- 13 **g<sub>a</sub>** - Condutância aerodinâmica
- 14 **g<sub>s</sub>** - Condutância do dossel ao transporte de vapor
- 15 **h** - Altura do dossel
- 16 **H** - Fluxo de calor sensível
- 17 **IA** - Índice de atividade fenológica
- 18 **IAF** - Índice de área foliar
- 19 **K<sub>c</sub>** - Coeficiente da cultura
- 20 **K<sub>cb</sub>** - Coeficiente de cultivo basal
- 21 **K<sub>e</sub>** - Coeficiente de evaporação
- 22 **K<sub>h</sub>** - Coeficiente de transporte turbulento de calor
- 23 **K<sub>v</sub>** - Coeficiente de transporte turbulento de vapor d'água
- 24 **LE** - Fluxo de calor latente de evaporação
- 25 **ML** - Microlisímetro
- 26 **PAC** - Produtividade de água da cultura
- 27 **R<sub>g</sub>** - Radiação global
- 28 **RMSE** - Raiz quadrado do erro quadrático médio
- 29 **R<sub>n</sub>** - Saldo de radiação
- 30 **r<sub>s</sub>** - Resistência do dossel ao transporte de vapor
- 31 **S<sub>d</sub>** - Fluxo de calor sensível armazenado no dossel
- 32 **S<sub>dv</sub>** - Fluxo de calor armazenado no dossel
- 33 **T<sub>ar</sub>** - Temperatura média do ar

- 1 **T<sub>b</sub>** - Temperatura basal inferior
- 2 **T<sub>B</sub>** - Temperatura basal superior
- 3 **u<sub>2</sub>** - velocidade do vento
- 4 **UR** - Umidade relativa
- 5 **Y** - Produtividade dos frutos
- 6 **β** - Razão de Bowen
- 7 **γ** - Coeficiente psicrométrico
- 8 **Δ** - Inclinação da curva de pressão de saturação
- 9 **Δe** - Diferença de pressão de vapor de água
- 10 **ΔQ<sub>a</sub>** - Fluxo de calor latente armazenado no dossel
- 11 **ΔT** - Diferença de temperatura do ar
- 12 **θ<sub>us</sub>** - Conteúdo volumétrico de água no solo
- 13 **λ** Calor latente de evaporação
- 14 **ρ** - Densidade do ar seco
- 15 **Ω** - Fator de desacoplamento

## SUMÁRIO

1		
2	<b>RESUMO</b> .....	11
3	<b>ABSTRACT</b> .....	12
4	<b>1. CONTEXTUALIZAÇÃO</b> .....	13
5	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	16
6	<b>2. TEMPERATURAS BASAIS E NECESSIDADES TÉRMICAS DO AÇAIZEIRO</b>	
7	<b>NA AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL</b> .....	20
8	<b>RESUMO</b> .....	20
9	<b>ABSTRACT</b> .....	21
10	<b>2.1 INTRODUÇÃO</b> .....	22
11	<b>2.2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	23
12	2.2.1 Localização da área experimental .....	23
13	2.2.2 Análises física e químicas do solo das áreas experimentais .....	24
14	2.2.3 Implantação do plantio e instrumentação das áreas experimentais .....	25
15	2.2.4 Monitoramento fenológico .....	26
16	2.2.5 Temperaturas basais e necessidades térmicas .....	28
17	<b>2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
18	<b>2.4 CONCLUSÃO</b> .....	39
19	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	40
20	<b>3. BALANÇO DE ENERGIA EM PLANTIO DE AÇAIZEIRO IRRIGADO NO</b>	
21	<b>NORDESTE PARAENSE</b> .....	44
22	<b>RESUMO</b> .....	44
23	<b>ENERGY BALANCE IN AN IRRIGATED ACAI PALM PLANTING IN THE</b>	
24	<b>NORTHEAST OF PARÁ STATE</b> .....	45
25	<b>ABSTRACT</b> .....	45
26	<b>3.1 INTRODUÇÃO</b> .....	46
27	<b>3.2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	47
28	3.2.1 Área experimental .....	47
29	3.2.2 Instrumentação .....	49
30	3.2.3 Balanço de energia .....	50
31	3.2.4 Calor armazenado no dossel vegetal .....	51
32	3.2.5 Razão de Bowen, fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) .....	52
33	3.2.6 Critério para rejeição de dados inadequados do método da razão de Bowen .....	53
34	<b>3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	55
35	<b>3.4 CONCLUSÃO</b> .....	66
36	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67

1	<b>4. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE</b>	
2	<b>CULTIVO SIMPLES E DUAL DO AÇAIZEIRO NA AMAZÔNIA ORIENTAL</b>	
3	<b>(BRASIL) USANDO O SISTEMA DE RAZÃO BOWEN</b> .....	73
4	<b>RESUMO</b> .....	73
5	<b>ABSTRACT</b> .....	74
6	<b>4.1 INTRODUÇÃO</b> .....	75
7	<b>4.2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	77
8	4.2.1 Descrição da área .....	77
9	4.2.2 Medições de plantas .....	78
10	4.2.3 Medições das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração da cultura.....	79
11	4.2.4 Critério para rejeição de dados inadequados do método de razão de Bowen.....	82
12	4.2.5 Estimativa da evapotranspiração de referência e dos coeficientes simples e dual. .	84
13	<b>4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	86
14	4.3.1 Análise da consistência dos dados pelo método da razão de Bowen.....	86
15	4.3.2 Variabilidade fenológica .....	88
16	4.3.3 Condições ambientais.....	89
17	4.3.4 Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo .....	91
18	4.3.5 Evapotranspiração .....	93
19	4.3.6 Coeficientes de cultivo simples e dual .....	97
20	<b>4.4 CONCLUSÃO</b> .....	100
21	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	101
22		

## 1 RESUMO

2 A valorização econômica, a crescente demanda pelos produtos oriundos do açaizeiro e a  
3 busca pela redução na pressão sobre os ecossistemas de várzea vem promovendo desde a década  
4 de 90 a expansão do cultivo de açaí para áreas de terra firme. Entretanto, diversos  
5 questionamentos foram criados durante o processo de expansão da cultura, dentre os quais, se  
6 pode destacar: quais seriam as exigências térmicas e hídricas para a cultura, bem como qual  
7 seria a variabilidade sazonal do particionamento do balanço de energia em um plantio de açaí  
8 irrigado. Para elucidar estes questionamentos, foi realizado um experimento no município de  
9 Capitão Poço em um plantio de açaí de 10 hectares entre os anos de 2017 e 2019, onde foi  
10 instalada uma torre micrometeorológica no centro da área experimental para o monitoramento  
11 de diversas variáveis meteorológicas. Posteriormente, avaliaram-se as temperaturas basais  
12 inferiores (Tb) e superiores (TB) através do método dos graus-dias, bem como, as durações e  
13 as necessidades térmicas para os diferentes estádios fenológicos. O consumo hídrico e o  
14 coeficiente de cultivo (Kc) foram obtidos pelo balanço de energia através do método da razão  
15 de Bowen, onde particionou-se a energia disponível em calor no solo (G), calor sensível (H),  
16 calor latente (LE) e calor armazenado no dossel vegetal (Sdv). As temperaturas basais variaram  
17 ao longo do ciclo, sendo o estágio de floração o mais sensível com amplitude térmica entre Tb  
18 e TB de 18,73 °C. A duração média do ciclo reprodutivo do açaizeiro foi de 316 dias com  
19 necessidade térmica total de 4545,98 graus-dias. No plantio de açaí, a energia disponível  
20 particiona-se em média de 67% para evapotranspiração, 29% para aquecer o ar e 4% para  
21 aquecer o solo. O efeito do calor armazenado no dossel do açaizeiro é irrelevante por representar  
22 menos de 0,2% da energia disponível. Observou-se que o açaizeiro apresenta variação no  
23 consumo hídrico durante todo o ciclo, com média diária de 3,48 mm dia<sup>-1</sup> e consumo médio  
24 total de 1064,85 mm, já o Kc do açaí é máximo durante o estágio de fruto verde, quando se tem  
25 o crescimento dos frutos e mínimo durante a pré-floração. Os resultados da pesquisa mostram  
26 a importância do correto manejo da irrigação no açaizeiro, pois permitem projetar de forma  
27 adequada protocolos de gerenciamento de água mais adequados as necessidades hídricas da  
28 cultura, aumentando o uso eficiente da água pela cultura o que conseqüentemente acarreta em  
29 ganhos econômicos para o produtor.

30

31 **Palavra-chave:** *Euterpe Oleracea* Mart., temperaturas cardinais, graus-dia, razão de Bowen,  
32 evapotranspiração, coeficiente de cultivo.

1 **ABSTRACT**

2 The economic appreciation, the growing demand for products from the acai tree and the  
3 seeking for reducing pressure on the floodplain ecosystems have been promoting the expansion  
4 of acai cultivation to upland areas since the 90's. However, several questions were created  
5 during the expansion process of the crop, between which, some stand out: what would be the  
6 thermal and water requirements for the crop? As well as what would be the seasonal variability  
7 of the energy balance partitioning in a plantation of irrigated acai? In order to approach these  
8 questions, an experiment was carried out in the municipality of Capitão Poço, over a 10-hectare  
9 acai plantation between 2017 and 2019, where a micrometeorological tower was installed in  
10 the center of the experimental area to monitor several meteorological variables. Subsequently,  
11 the lower (Tb) and upper (TB) basal temperatures were evaluated through the degree-days  
12 method, as well as the thermal durations and requirements for the different phenological stages.  
13 The water consumption and the crop coefficient (Kc) were obtained by the energy budget  
14 through the Bowen ratio method, in which the energy available in heat in the soil (G), the  
15 sensitive heat (H), the heat latent (LE) and the heat stored in the plant canopy (Sdv) were  
16 partitioned. Basal temperatures varied throughout the cycle, with the flowering stage being the  
17 most sensitive with thermal amplitude between Tb and TB of 18.73 ° C. The average duration  
18 of the acai tree reproductive cycle was 316 days with a total thermal requirement of 4,545.98  
19 degree-days. In the acai planting, the available energy is divided by an average of 67% for  
20 evapotranspiration, 29% for heating the air and 4% for heating the soil. The effect of the heat  
21 stored in the acai tree canopy is irrelevant because it represents less than 0.2% of the available  
22 energy. Regarding the results, the acai tree presents a variation in water consumption  
23 throughout the cycle, with a daily average of 3.48 mm day<sup>-1</sup> and a total average consumption  
24 of 1064.85 mm, whereas the Kc of acai is maximum during the green fruit stage, when there is  
25 the fruit growth, and minimal during the pre-flowering. Therefore, the research results show  
26 the importance of the correct irrigation management for the acai trees, as they allow us to design  
27 water management protocols more adequately to the water needs of the crop. Thus, increasing  
28 the efficient use of water by the crop which consequently leads to economic gains for the  
29 producer.

30

31 **Keywords:** *Euterpe Oleracea* Mart., cardinal temperatures, degree-day, Bowen ration,  
32 evapotranspiration, crop coefficient.

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.), também conhecido por açai, açai-do-pará, açai-do-baixo-amazonas, açai-de-touceira, açai-de-planta, açai-da-várzea e açai-verdadeiro, é considerado a espécie mais importante do gênero *Euterpe*, dentre as dez registradas no Brasil e as sete que ocorrem na Amazônia (OLIVEIRA et al., 2007).

É uma palmeira que produz touceira com até 25 estipes, com perfilhos em diferentes estádios de desenvolvimento (OLIVEIRA et al., 2002). Em razão de seus diversos caules o açazeiro passou a ser utilizado na indústria de processamento de palmito, em substituição ao palmito (*E. edulis* Mart.), espécie que enfrentava risco de extinção (PAULA, 2007).

O açazeiro a partir da década de 90, começou a ganhar espaço no mercado nacional e mundial, se firmando como uma das mais importantes frutíferas da Amazônia devido a sua grande valorização econômica, e em função de sua rica composição nutricional e ampla versatilidade na utilização do açai in natura, como bebida energética, sorvete, geleias, etc. (FALESI et al., 2010).

Em decorrência do aumento na comercialização do fruto, a oferta do produto que provinha exclusivamente das áreas de várzea em populações naturais não foi suficiente para atender o mercado interno e externo (SILVA et al., 2006). Isso despertou o interesse de diversos produtores que passaram a produzir o açai em escala comercial, passando a cultivá-lo em áreas de terra firme, representando uma ótima alternativa na recuperação de áreas desmatadas, além de amenizar a pressão sobre o ecossistema de várzea que estava se transformando em bosques homogêneos com o açazeiro, em função do desbaste de outras espécies (HOMMA et al., 2006; CONFORTO; CONTIN, 2009).

Com o avanço dos açais para as áreas de terra firme e em razão da ausência de informações técnicas para o seu cultivo neste novo ambiente, diversos questionamentos foram criados durante o processo de expansão da cultura, dentre os quais destacam-se: quais seriam as necessidades térmicas e hídricas, bem como as possíveis alterações sazonais no balanço de energia em decorrência da mudança do uso da terra pelo açazeiro.

O conhecimento das necessidades térmicas do açazeiro em diferentes etapas de desenvolvimento é essencial para compreender a variabilidade e a tolerância da cultura em condições consideradas não habituais para a espécie, como as previstas pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) que indicam um provável aumento na temperatura média do ar entre 1,1 e 6,4 °C até o final do século XXI (IPCC, 2007).

A temperatura do ar por ser um elemento climático crucial para se entender a adaptabilidade das culturas (GRAY; BRADY, 2016) vem sendo o tema central de diversas

1 pesquisas como, por exemplo, as que estudam o método de graus dias proposto por Arnold  
2 (1959) para estimar a duração dos estádios e ciclos de desenvolvimento das culturas (STRECK  
3 et al., 2008; TRENTIN et al., 2013; RENATO et al., 2013; FREITAS et al., 2017; SCHMIDT  
4 et al., 2018), permitindo programar manejos culturais e fitossanitários, além de servir como  
5 parâmetro de entrada em pesquisas com foco em modelagem de culturas agrícolas que visam  
6 descobrir os efeitos causados pelo aumento da temperatura nas plantas (COSTA et al., 2009).

7 O entendimento da variabilidade da demanda hídrica das culturas ao longo do ciclo é  
8 essencial para que se criem estratégias de manejo que visem à melhoria da produção e  
9 produtividade. No caso do açaizeiro que tem sua origem natural em áreas alagadas é importante  
10 que a cultura seja instalada em locais que apresentem elevados níveis pluviométricos durante o  
11 ano, haja vista que o açaizeiro é uma cultura muito exigente em água (SOUZA et al., 2013).  
12 Entretanto, em regiões com altas concentrações de chuvas em determinados meses do ano e que  
13 apresentem período de estiagem prolongados é fundamental a realização da suplementação  
14 hídrica através da irrigação (MARQUES; FRIZZONE, 2005), uma vez que a disponibilidade  
15 de água no solo é fator importante que favorece a sobrevivência do açaizeiro (SOUZA;  
16 JARDIM, 2007).

17 Ao longo, desses 30 anos de expansão dos açazais para a áreas de terra firme, os  
18 produtores que fazem o uso da irrigação aplicam lâminas “empíricas”, em função da ausência  
19 de estudos sobre a demanda real de água para a cultura, inclusive, alguns chegam a utilizar  
20 lâminas de irrigação baseadas no consumo hídrico de outras espécies, estudadas em outras  
21 localidades, como acontece, por exemplo, na utilização por alguns produtores da lâmina diária  
22 de 5 mm dia<sup>-1</sup>, determinada por Foong (1993) ao longo de 15 anos de estudo para a palma de  
23 óleo na Malásia.

24 A determinação da evapotranspiração do açaizeiro ( $ET_c$ ) e dos coeficientes da cultura  
25 ( $K_c$ ) em diferentes estádios de desenvolvimento, são imprescindíveis para que se tenha um  
26 sistema de irrigação muito bem planejado e manejado, evitando assim possíveis desvantagens  
27 econômicas com a utilização de lâminas inadequadas. Atualmente existem diversas técnicas  
28 que auxiliam na determinação real da  $ET_c$ , como a lisimetria (PETERS et al., 2017; SILBER et  
29 al., 2019), a covariância de vórtices turbulentos (ORTEGA-FARIAS et al., 2010; PRUEGER  
30 et al., 2018), o balanço da água do solo (ABDELKHALIK et al., 2019; DOMÍNGUEZ-NIÑO  
31 et al., 2020) e o balanço de energia pelo método da razão de Bowen (SOUZA et al., 2016;  
32 CHEBBI et al., 2018).

33 O método do balanço de energia pela razão de Bowen – BERB é um método indireto de  
34 determinação da  $ET_c$  (TODD et al., 2000), que contabiliza os fluxos de energia responsáveis

1 por aquecer o ar (fluxo de calor sensível - H), o solo (fluxo de calor do solo - G) e por  
2 transformar a água líquida em gasosa (fluxo de calor latente – LE) em uma área de controle  
3 representada pela vegetação (ANDRÉ et al., 2010), constituindo-se em uma alternativa simples  
4 e prática na determinação do consumo hídrico das culturas (TEIXEIRA et al., 2003).

5 O BERB vem sendo amplamente utilizado para definir a curva do Kc (EUSER et al.,  
6 2014; MUNIZ et al., 2014; CONSOLI et al., 2018, NIAGHI et al., 2019), Ke (coeficiente de  
7 evaporação do solo) e Kcb (coeficiente de transpiração basal da cultura), em razão de requerer  
8 medições de poucas variáveis como os gradientes de temperatura e umidade do ar, saldo de  
9 radiação e fluxo de calor no solo para estimar a real necessidade hídrica das plantas (HOU et  
10 al., 2010).

11 A geração de dados sobre o modelo de uso da terra para o cultivo do açaizeiro através  
12 do BERB é essencial para compreender e quantificar a variabilidade sazonal da partição dos  
13 fluxos de energia que ocorrem no sistema, verificando suas possíveis consequências na gestão  
14 dos recursos hídricos (GRAY; BRADY, 2016), e quais as medidas paliativas que podem ser  
15 adotadas.

16 Portanto, levando em consideração a falta de informações técnicas e científicas sobre a  
17 utilização dos recursos hídricos pelo açaizeiro e buscando condições para o manejo sustentável  
18 dos recursos naturais da água e do solo, bem como a elucidação de possíveis alterações sazonais  
19 no balanço de energia em plantio irrigado, esta pesquisa tem por objetivo principal determinar  
20 a variabilidade e o particionamento do balanço energético, bem como as necessidades  
21 termohídricas do açaizeiro irrigado nas condições climáticas no leste da Amazônia.  
22 Especificamente objetivou-se:

- 23
- 24 a) Determinar a duração dos principais estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro;
  - 25 b) Determinar as exigências térmicas do açaizeiro em diferentes estádios fenológicos;
  - 26 c) Determinar os graus-dias acumulados para cada estágio reprodutivo do açaizeiro;
  - 27 d) Determinar o índice de área foliar e o fator de desacoplamento do açaizeiro;
  - 28 e) Determinar a partição de energia nos fluxos de calor latente, sensível, do solo e o calor  
29 armazenado no dossel em um plantio de açaizeiro;
  - 30 f) Determinar a evapotranspiração diária e o consumo hídrico do açaizeiro ao longo do ciclo  
31 pelo método Razão de Bowen;
  - 32 g) Determinar os coeficientes da cultura simples (Kc) e dual (Ke e Kcb).

## 1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2 ABDELKHALIK, A.; PASCUAL, B.; NÁJERA, I.; DOMENE, M. A.; BAIXAULI, C.;  
3 PASCUAL-SEVA, N. Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use  
4 efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean  
5 conditions. **Irrigation Science**, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>
- 6 ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, V. S.; MARQUES,  
7 J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 2: balanço de energia e  
8 parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 4, 535 - 542, 2010.  
9 <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000400012>
- 10 ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat  
11 unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, p. 430-  
12 445, 1959.
- 13 CHEBBI, W.; BOULET, G.; DANTEC, V. L.; CHABAANE, Z. L.; FANISE, P.;  
14 MOUGENOT, B.; AYARI, H. Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive  
15 orchard during three contrasting years in a semi-arid climate. **Agricultural and Forest**  
16 **Meteorology**, v. 256, p. 159 – 178, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.020>
- 17 CONFORTO, E. C.; CONTIN, D. R. Desenvolvimento do açaizeiro de terra firme, cultivar  
18 Pará, sob atenuação da radiação solar em fase de viveiro. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p.  
19 979-983, 2009. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052009000400018>
- 20 CONSOLI, S.; MILANI, M.; CIRELLI, G.; BARBAGALLO, S.; MARZO, A.; VANELLA,  
21 D.; TOSCANO, A. Energy and water balance of a treatment wetland under mediterranean  
22 climatic conditions. **Ecological Engineering**, v. 116, p. 52 – 60, 2018.  
23 <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.029>
- 24 COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P.  
25 M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea*  
26 *mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research**  
27 **Letters**, Bristol, v. 4, n. 1, p. 1 - 10, 2009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>
- 28 DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J.  
29 Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by  
30 capacitance-type soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105880,  
31 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105880>
- 32 EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A.  
33 D.; BASTIAANSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution  
34 vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18,  
35 p. 2021 - 2032, 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2021-2014>
- 36 FALESI, L. A.; SANTANA, A. C.; HOMMA, A. K. O.; GOMES, S. C. Evolução e interação  
37 entre a produção o preço das frutas no Estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém,  
38 v. 53, n. 1, p. 69 - 77, 2010.
- 39 FOONG, S. F. Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil palm. In  
40 Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Module-Agriculture. **Palm**  
41 **Oil Research Institute**, Malaysia, Kuala Lumpur, p. 105–119, 1993.

- 1 FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf  
2 development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa**  
3 **Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 5, p. 283 - 292, 2017.  
4 <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000500001>
- 5 GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change.  
6 **Developmental Biology**, v. 419, p. 64–77, 2016. [http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023)  
7 07.023
- 8 HOMMA, A. K. O.; NOGUEIRA, O. L.; MENEZES, A. J. E. A. Açaí: novos desafios e  
9 tendências. **Amazônia: Ciência e desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 7 - 23, 2006.
- 10 HOU, L. G.; XIAO, H. L.; Si, J. H.; ZHOU, M. X.; YANG, Y. G. Evapotranspiration and crop  
11 coefficient of *Populus euphratica* Oliv forest during the grow in season in the extreme arid  
12 region northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 2, p. 351 - 356, 2010.  
13 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.022>
- 14 IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. Climate change 2007: **The physical**  
15 **Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the**  
16 **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: University, 2007. 989p.
- 17 MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A. Modelo computacional para determinação do risco  
18 econômico em culturas irrigadas. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringa, v. 27, n. 4, p. 719  
19 - 727, 2005. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v27i4.1347>
- 20 MUNIZ, R. A.; SOUSA, E. F.; MENDONÇA, J. C.; ESTEVES, B. S.; LOUSADA, L. L.  
21 Balanço de energia e evapotranspiração do capim Mombaça sob sistema de pastejo rotacionado.  
22 Revista Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v. 29, n. 1, p. 47-54, 2014.  
23 <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000100005>
- 24 NIAGHI, A. R.; JIA, X.; STEELE, D. D.; SCHERER, T. F. Drainage water management effects  
25 on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. **Agricultural**  
26 **Water Management** v. 225, p. 105760, 2019. [https://doi.org/10.1016/j. agwat.2019.105760](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760)
- 27 OLIVEIRA, M. S. P.; CARVALHO, J. E. U.; NASCIMENTO, W. M. O.; MÜLLER, C. H.  
28 Cultivo do açaizeiro para produção de frutos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. **Circular**  
29 **técnica** 26, 2002. 17 p.
- 30 OLIVEIRA, M. S. P.; NETO, J. T. F.; PENA, R. S. P. Açaí: técnicas de cultivo e  
31 processamento, **Belém instituto Frutal**, 2007. 104 p.
- 32 ORTEGA-FARIAS, S.; POBLETE-ECHEVERRIA, C.; BRISSON, N. Parameterization of a  
33 two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological  
34 measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 276 – 286, 2010.  
35 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.012>
- 36 PAULA, G. A. de. Caracterização físico-química e estudo do escurecimento enzimático em  
37 produtos derivados de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Dissertação Mestrado**. Universidade  
38 Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará. Ano 2007.
- 39 PETERS, A.; GROH, J.; SCHRADER, F.; DURNER, W.; VERECKEN, H.; PÜTZ, T.  
40 Towards an unbiased filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high

- 1 precision lysimeter measurements. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 731 - 740, 2017.  
2 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.015>
- 3 PRUEGER, J. H.; PARRY, C. K.; KUSTAS, W. P.; ALFIERI, J. G.; ALSINA, M.M.; NIETO,  
4 H.; WILSON, T. G.; HIPPS, L. E.; ANDERSON, M. C.; HATFIELD, J. L.; GAO, F.; LYNN,  
5 G.; MCKEE, L. G.; MCELRONE, A.; AGAM, N.; LOS, S. A. Crop Water Stress Index of an  
6 irrigated vineyard in the Central Valley of California. **Irrigation Science**, v. 37, p. 297–313,  
7 2018. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0598-4>
- 8 RENATO, N. S.; SILVA, J. B. L.; SEDIYAMA1, G. C.; PEREIRA, E. G. Influência dos  
9 métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de  
10 milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382 - 388, 2013.  
11 <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>.
- 12 SCHMIDT, D; CARON, B. O.; VALERA, O.; MEIRA, D.; FONTANA, D. C.; ZANATTA,  
13 T. P.; WERNER, C. J.; BREZOLIN, P. Base temperature, thermal time and phyllochron of  
14 escarole cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 466 – 472, 2018.  
15 <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180407>
- 16 SILBER, A.; NAOR, A.; COHEN, H.; BAR-NOY, Y.; YECHIELI, N.; LEVI, M.; NOY, M.;  
17 PERES, D.; DUARI, K.; NARKIS, S.; ASSOULINE, S. Irrigation of “Hass” avocado: effects  
18 of constant vs. temporary water stress. **Irrigation Science**, v. 37, p. 451 – 460, 2019.  
19 <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>
- 20 SILVA, I.M.; SANTANA, A.C.; REIS, M.S. Análise dos retornos sociais oriundos de adoção  
21 tecnológica na cultura do açaí no Estado do Pará. Amazônia: **Ciência & Desenvolvimento**,  
22 Belém, v.2, n.3, p.25-37, 2006.
- 23 SOUZA, L. A. S.; JARDIM, M. A. G. Produção foliar de mudas de açaizeiro (*Euterpe oleracea*  
24 Mart.) em área de vegetação secundária no Nordeste Paraense. **Revista Brasileira de**  
25 **Biociências**, Porto Alegre, v. 5, supl. 1, n. 2, p. 225 - 227, 2007.
- 26 SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; LIMA, R. T.; ROCHA, E. J. P.;  
27 ORTEGA-FARIAS, S. Water requirement estimate for the reproductive period of mango  
28 orchards in the Northeast of the state of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38,  
29 n. 3, e311, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>
- 30 SOUZA, R. O. R. M.; AMARAL, M. A. C. M.; SILVESTRE, W. V. D.; SACRAMENTA, T.  
31 M. Avaliação econômica da irrigação em pomares de açaí. **Revista Brasileira de Agricultura**  
32 **Irigada** v.7, nº. 1, p. 54 - 65, 2013. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n100004>
- 33 STRECK, N. A.; LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize  
34 phenology as a function of air temperature with a linear and a non linear model. **Pesquisa**  
35 **Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 449 - 455, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>
- 37 TEIXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H. B.; REIS, V. C. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, M. N.  
38 L.; MAIA, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações  
39 meteorológicas: automáticas e convencional. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal,  
40 v. 25, n. 3, p. 457 - 460, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452003000300024>.

- 1 TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for  
2 estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid, advective environment.  
3 **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 335 - 348, 2000.  
4 [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00139-8)
- 5 TRENTIN, R.; HELDWEIN, A. B.; STRECK, N. A.; TRENTIN, G.; SILVA, J. C. Subperíodos  
6 fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa**  
7 **Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 703 - 713, 2013. doi:10.1590/s0100-  
8 204x2013000700002

1 **2. TEMPERATURAS BASAIS E NECESSIDADES TÉRMICAS DO AÇAIZEIRO NA**  
2 **AMAZÔNIA ORIENTAL, BRASIL.**

3  
4 **RESUMO**

5 Objetivou-se determinar as temperaturas basais, as necessidades térmicas e a duração dos  
6 estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro na Amazônia Oriental, Brasil. O experimento  
7 foi realizado em um plantio de açaizeiro de 10 hectares em Capitão Poço e de 0,5 hectare em  
8 Castanhal, entre os anos de 2017 e 2019. Realizou-se o monitoramento das condições  
9 meteorológicas diariamente e o acompanhamento fenológico semanalmente em ambos os  
10 municípios. Verificou-se que as temperaturas basais inferiores e superiores variaram,  
11 respectivamente, de 12,92 °C e 32,46 °C para o estágio de pré-floração; 13,50 °C e 32,23 °C  
12 para floração; 12,14 °C e 32,55 °C para o estágio de frutos verdes; 11,64 °C e 32,78 °C para o  
13 estágio de mudança de cor dos frutos e 11,23 °C e 32,94 °C para o estágio de maturação. A  
14 exigência térmica e a duração média encontrada para o ponto ideal de colheita do açaí foi de  
15 4545,94 graus-dias e duração de 316 dias. A simulação da fenologia reprodutiva do açaizeiro  
16 pela teoria dos graus dias provou ser um método eficiente para as condições de estudo, com  
17 erros máximos de 11,89% para o ciclo da cultura.

18  
19 **Palavras-chave:** *Euterpe Oleraceae* Mart., Simulação fenológica. Temperaturas cardinais.  
20 Graus-dia.

1 **AÇAÍ PALM BASE TEMPERATURES AND THERMAL TIME REQUIREMENTS IN**  
2 **THE EASTERN AMAZON, BRAZIL.**

3  
4 **ABSTRACT**

5 The objective was to determine the base temperatures, the thermal time requirements and the  
6 length of the main reproductive growth stages of the açai palm in the Northeast of the state of  
7 Pará, Eastern Amazon, Brazil. The research was carried out in a 10 hectare açai plantations in  
8 Capitão Poço and Castanhal where the plant phenology and the meteorological conditions were  
9 daily monitored between 2017 and 2019. Lower and upper base temperatures were found,  
10 respectively, to be 12.92 °C and 32.46 °C for the pre-flowering stage; 13.50 °C and 32.23 °C  
11 for flowering; 12.14 °C and 32.55 °C for the stage of green fruit; 11.64 °C and 32.78 °C for the  
12 stage of fruit color changing and 11.23 °C and 32.94 °C for the maturation stage. The thermal  
13 time requirement and the average cycle length found for the açai's ideal harvest time was  
14 4545.94 degree days and 316 days with an average. The simulation of the reproductive  
15 phenology of the açai palm by the degree day's theory proved to be an efficient method for the  
16 study conditions, with maximum errors of 11.89% for the crop cycle.

17

18 **Keywords:** *Euterpe oleracea* Mart., simulation of phenological development, cardinal  
19 temperatures, degree days

## 1 2.1 INTRODUÇÃO

2 O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira de origem amazônica que produz  
3 touceiras, que se constituem pela planta mãe e por perfilhos (TREVISAN et al., 2015), com  
4 diferentes estádios de desenvolvimento. A espécie é considerada a mais importante do gênero  
5 *Euterpe* dentre as dez registradas no Brasil e entre as sete que ocorrem na Amazônia  
6 (QUEIROZ; MELÉM JUNIOR, 2001).

7 O açazeiro nos últimos anos ganhou grande expressão econômica no mercado,  
8 expandindo sua comercialização para além das fronteiras da Amazônia, muito em função da  
9 sua composição nutricional, rica em fibras, lipídeos, fenóis e a antocianina que podem estar  
10 relacionados à prevenção de doenças cardiovasculares (YAMAGUCHI et al., 2015). Em  
11 virtude da amplificação comercial do açaí, produtores brasileiros vêm expandindo o seu cultivo  
12 em áreas de terra firme (RUFINO et al., 2011), com o uso de tecnologias como o manejo de  
13 irrigação (MARTINOT et al., 2017). Entretanto, para o sucesso de expansão desta cultura para  
14 outras regiões, precisa-se conhecer como a cultura se comporta em condições ambientais  
15 diferentes daquelas que são consideradas habituais para a mesma, haja vista que o açazeiro é  
16 natural de áreas de várzea.

17 Diversos elementos climáticos são considerados quando se analisa a adaptabilidade e o  
18 desenvolvimento das culturas fora dos seus centros de origem (GRAY; BRADY, 2016), dentre  
19 os quais, se destaca a temperatura do ar que é a principal variável meteorológica que afeta e  
20 melhor explica, de forma estatística, o crescimento e desenvolvimento (GRAMIG;  
21 STOLTENBERG, 2007) das espécies anuais e perenes.

22 Pesquisas sobre mudanças climáticas como as divulgadas pelo IPCC  
23 (Intergovernmental Panel on Climate Change), indicam um provável aumento na temperatura  
24 média do ar entre 1,1 e 6,4 °C até o final do século XXI. Caso essa previsão se confirme, muitos  
25 produtores rurais sofrerão prejuízos econômicos em suas lavouras, em função do aumento da  
26 temperatura reduzir a taxa fotossintética e o ganho líquido de carbono pela planta, ocasionando  
27 perda de produção e produtividade (HATFIELD; PRUEGER, 2015). Para que se possa mitigar  
28 os efeitos causados pelo aumento da temperatura nas plantas, diversos pesquisadores tem  
29 realizados pesquisas focadas na modelagem de culturas agrícolas (COSTA et al., 2009).

30 Os estudos sobre modelagem de culturas levam em consideração as fases de  
31 desenvolvimento e o ciclo total da cultura, pois são aspectos fundamentais para definição dos  
32 estádios fenológicos (RENATO et al., 2013). Desta forma, o método dos graus-dia é uma  
33 técnica muito usada para definir o estágio de desenvolvimento das culturas, que representa a

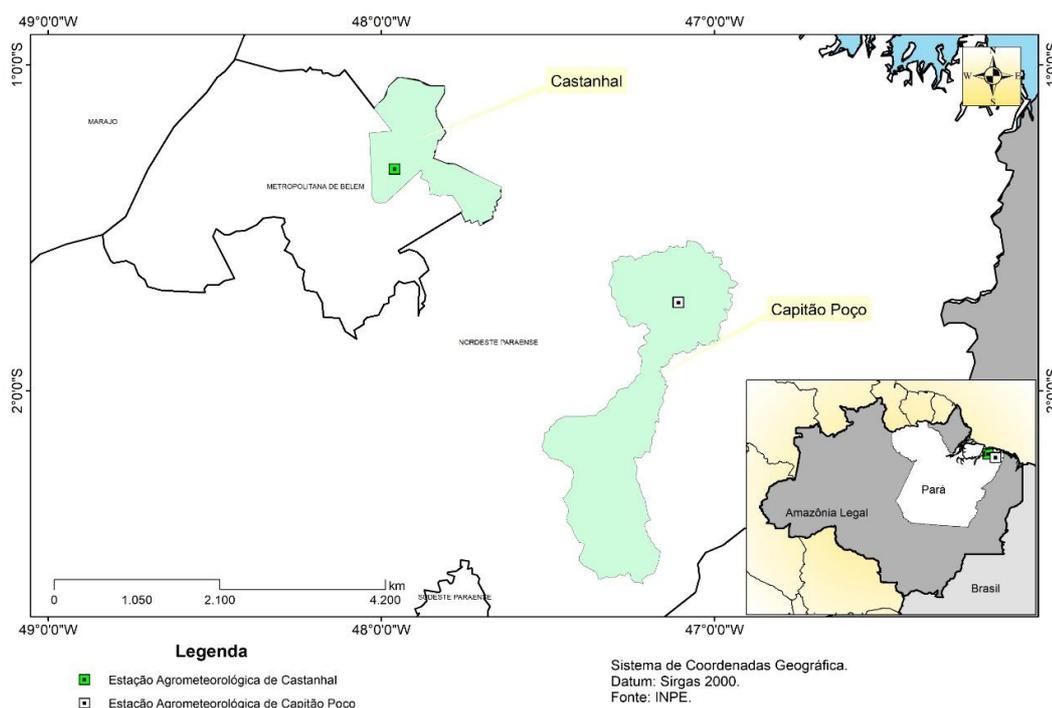
1 necessidade térmica em função das temperaturas basais que a planta suporta e utiliza em seus  
2 processos fisió-metabólicos durante o dia (STRECK, et al., 2008; SOUZA et al., 2013).

3 Portanto, tendo em vista a carência de informações técnicas e científicas sobre a  
4 produção de açaí e visando contribuir para o desenvolvimento e expansão da cultura no estado,  
5 se faz necessário conhecer as necessidades térmicas do desenvolvimento reprodutivo do  
6 açaizeiro, desde a pré-floração até a maturação dos frutos para que se possa otimizar as  
7 estratégias de manejo auxiliando na tomada de decisão em função das condições climáticas a  
8 qual a cultura possa ser submetida. Neste sentido, o trabalho teve como objetivo determinar as  
9 temperaturas basais, as necessidades térmicas e a duração dos principais estádios fenológicos  
10 reprodutivos do açaizeiro na Amazônia Oriental, Brasil.

## 11 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 12 2.2.1 Localização da área experimental

13 O experimento foi realizado na região Nordeste do estado do Pará, entre os anos de 2017  
14 e 2019 em duas áreas, sendo uma de dez hectares localizada nas dependências da fazenda  
15 Ornela no município de Capitão Poço (01°43'44,4"S latitude, 47°06'39,3"W longitude e  
16 altitude de 71 m), e outra de meio hectare no município de Castanhal, nas dependências da  
17 fazenda escola da Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA (1°19'24,48"S latitude,  
18 47°57'38,20"W longitude e altitude de 41 m) (Figura 1).



19  
20

**Figura 1.** Área experimental no plantio de açaí irrigado em Capitão Poço e Castanhal - PA.

1 2.2.2 Análises física e químicas do solo das áreas experimentais

2 Nas áreas experimentais, foram realizadas duas coletas de amostras de solo nas  
 3 profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm, correspondentes à profundidade efetiva do sistema  
 4 radicular do açazeiro. Sendo uma coleta de amostras indeformadas para a caracterização física  
 5 e uma coleta de amostras deformadas para análise química. As amostras de Capitão Poço foram  
 6 encaminhadas e posteriormente analisadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia  
 7 Oriental, enquanto que as amostras do experimento de Castanhal foram analisadas nos  
 8 Laboratórios de solos da UFRA, com sede na cidade de Belém. Os dados obtidos de densidade  
 9 do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e os resultados químicos do solo  
 10 para os dois experimentos estão presentes na tabela 1.

11 **Tabela 1.** Propriedades químicas e físicas do solo das áreas experimentais de Capitão Poço e Castanhal.

Cidade	Profundidade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
			--mg·dm <sup>-3</sup> --			-----cmol <sub>c</sub> ·dm <sup>-3</sup> -----	
Castanhal	0-20	5,9	11	21	0,85	1,35	0,40
	20-40	5,7	1	15	0,35	0,45	1,10
Capitão Poço	0-20	4,1	45	65	0,90	1,30	0,20
	20-40	4,8	51	10	0,50	0,90	0,50

Cidade	Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds <sup>1</sup>	CC <sup>2</sup>	PMP <sup>3</sup>
		----(g·kg <sup>-1</sup> )----			(g·cm <sup>-3</sup> )	-- (m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ) --	
Castanhal	0-20	865	94	41	1,54	0,24	0,07
	20-40	740	111	149	1,62	0,32	0,08
Capitão Poço	0-20	792	68	140	1,43	0,37	0,23
	20-40	633	87	280	1,68	0,32	0,21

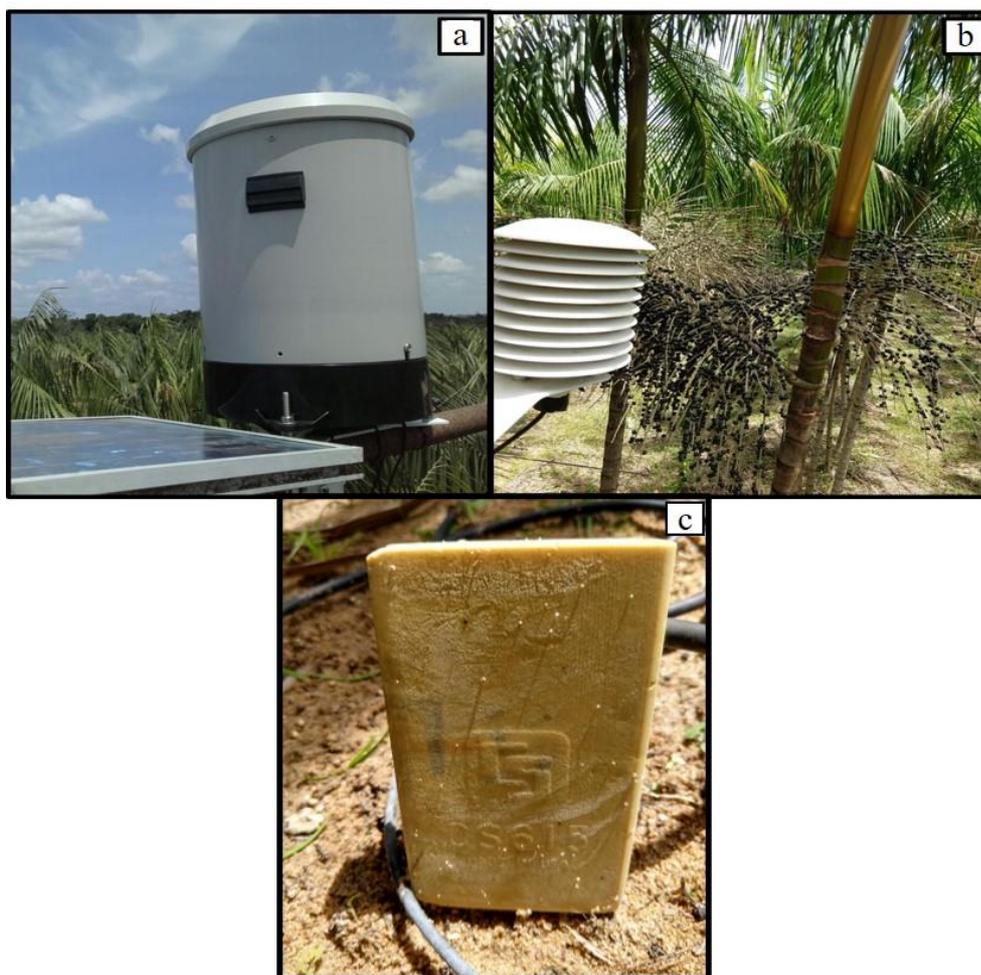
12 <sup>1</sup>Densidade do solo, <sup>2</sup>Capacidade de campo, <sup>3</sup>Ponto de murcha permanente.

13 Os solos das áreas experimentais foram classificados como latossolo amarelo distrófico,  
 14 com textura arenosa com 4% de argila na camada de 0-20 cm e de textura franco arenosa na  
 15 camada de 20-40 cm com 15% de argila, em Castanhal, já em Capitão Poço a textura na camada  
 16 de 0-20 cm foi franco arenosa com 14% de argila e de textura franco argilo arenosa na camada  
 17 de 20-40 com 28% de argila (Tabela 1). O clima local para as duas cidades é caracterizado  
 18 como tipo Am, clima tropical, apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial  
 19 média anual de 2500 a 3000 mm, onde o trimestre mais seco do ano em Castanhal ocorre entre  
 20 julho e setembro (FARIAS et al., 2017) e entre setembro e novembro em Capitão Poço  
 21 (OLIVEIRA et al., 2016).

### 1 2.2.3 Implantação do plantio e instrumentação das áreas experimentais

2 O plantio foi implantado para fins comerciais em 2011 em Castanhal e 2012 em Capitão  
3 Poço, utilizando a cultivar BRS-Pará e o ecotipo chumbinho, em espaçamento de 4,0 x 4,0 e  
4 6,0 x 4,0 m, respectivamente, com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em  
5 terra firme com irrigação diária por meio de um sistema de microaspersão, com uma lâmina  
6 bruta média de 2,81 mm (Castanhal) e 3,64 mm (Capitão Poço) durante o período seco.

7 Dentro da área total no experimento de Capitão Poço, foi demarcado um hectare que  
8 correspondeu à área monitorada para o estudo, enquanto que a área monitorada no experimento  
9 de Castanhal foi de 0,5 hectare. No centro da área experimental em ambos os municípios, foi  
10 instalada uma torre metálica de 12 m de altura e nela foi acoplada uma estação meteorológica  
11 automática, onde foram conectados um pluviômetro (TB4) acima do dossel vegetal (Figura 2a),  
12 um termohigrômetro (HMP45, Vaisala) ao nível das inflorescências e infrutescências do  
13 açazeiro(Figura 2b) e um reflectômetro do conteúdo de água (CS616) a 0,3 m de profundidade  
14 (Figura 2c).

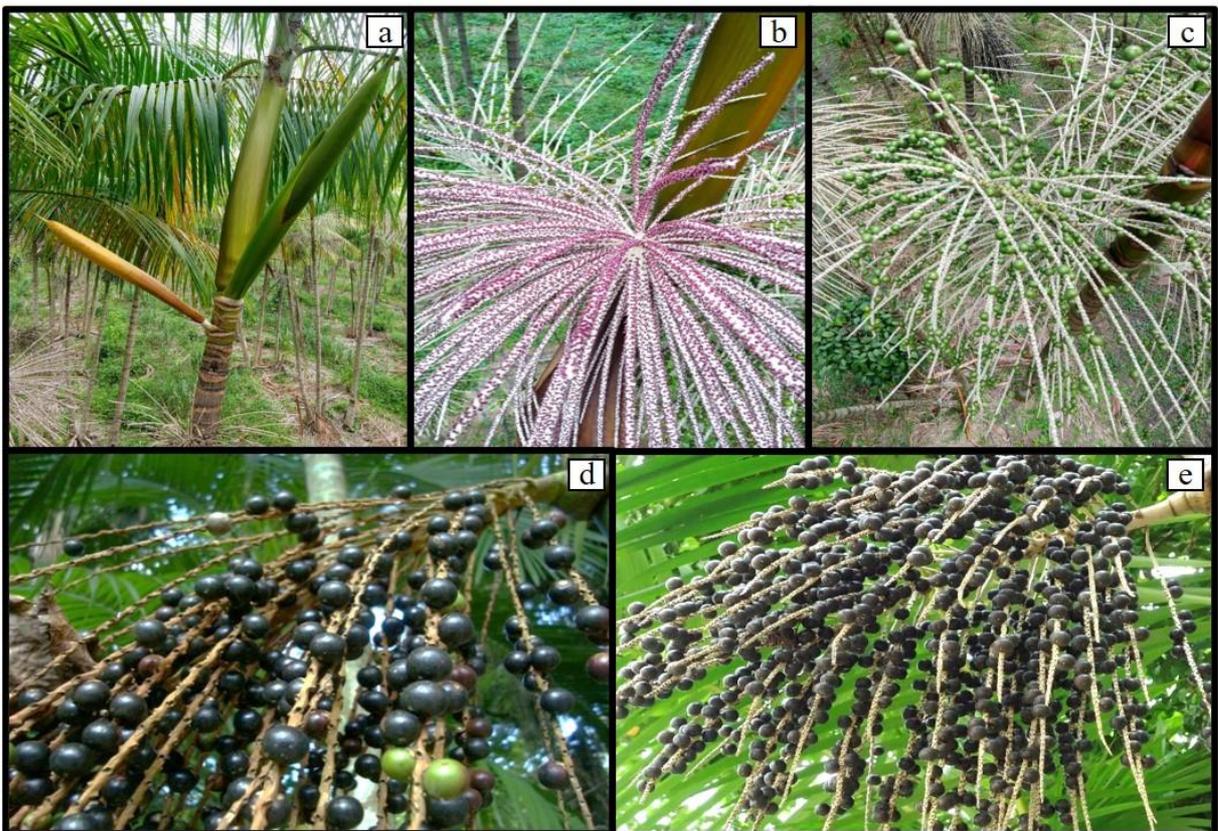


15 **Figura 2.** Sensores de precipitação (a), de temperatura e umidade do ar (b) e de conteúdo volumétrico de água do  
16 solo (c) instalados nas duas áreas experimentais entre 2017 e 2019.  
17

1 Os sensores foram conectados a um Datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc.),  
2 com programação de leitura a cada dez segundos, e médias totais a cada 20 minutos. A  
3 localização da torre obedeceu às exigências mínimas de bordadura da área, apresentando  
4 “fetch” disponível (superior a razão 1:100) e a predominância da direção do vento, a fim de que  
5 as medidas obtidas fossem representativas da área experimental, não sofrendo influência do  
6 calor advectivo (RANA; KATERJI, 2000).

#### 7 2.2.4 Monitoramento fenológico

8 Os dados meteorológicos e fenológicos foram coletados entre os meses de setembro de  
9 2017 e janeiro de 2019. O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açaizeiro foi analisado  
10 adaptando a escala proposta por Garcia e Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases  
11 reprodutivas que são: pré-floração (Figura 3a), floração (Figura 3b), frutos verdes (Figura 3c)  
12 e frutos pretos (Figura 3d), acrescentando a fenofase de maturação (Figura 3e) que é descrita  
13 por Homma et al (2005) conforme tabela 2.



14  
15

**Figura 3.** Fenologia reprodutiva do açaizeiro em Capitão Poço-PA.

1 **Tabela 2.** Descrição dos estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro.

Estádios fenológicos	Descrição dos estádios
Pré-floração	Aparecimento da espata floral, considerou-se o período em que a inflorescência se manteve coberta por brácteas.
Floração	Considera-se desde a abertura da espata, presença dos botões florais, até a queda das flores.
Fruto verde	Estádio de fruto imaturo considerado a partir da visualização dos primeiros e pequenos frutos em formação, até o início do seu amadurecimento.
Fruto preto	Aparecimento dos primeiros frutos com coloração roxo escuro.
Maturação	Frutos com coloração roxo-escuro intenso e brilho na superfície da casca, mas não estando no ponto exato de colheita (açai parau) até ele apresentar uma casca de coloração roxo escuro intenso, recoberta por uma camada de pó com tonalidade branco-acinzentada, estando no ponto ideal de colheita (açai tuíra).

2 O acompanhamento fenológico foi realizado a cada sete dias, em ambos experimentos,  
 3 onde foram previamente demarcadas 300 plantas em Capitão Poço (correspondente a  
 4 aproximadamente 24% dos indivíduos de um hectare) e 10 plantas em Castanhal.  
 5 Posteriormente, os indivíduos demarcados foram observados a olho nu com a finalidade de  
 6 registrar a presença ou ausência dos eventos de florescimento (espata e floração) e de eventos  
 7 de frutificação (cachos verdes, cachos pretos e maturação), além da contagem total de estruturas  
 8 reprodutivas presentes em cada indivíduo.

9 Avaliou-se o índice de atividade - IA (equação 1) de caráter quantitativo em nível  
 10 populacional, que indica a porcentagem de indivíduos da população observada que manifestou  
 11 determinado evento fenológico, sendo classificado como não sincrônico ou assincrônico  
 12 quando < 20% de indivíduos encontravam-se na fenofase; pouco sincrônico ou sincronia baixa  
 13 quando entre 20-60% dos indivíduos na fenofase; e sincronia alta quando < 60% de indivíduos  
 14 na fenofase (BENCKE; MORELLATO, 2002).

$$15 \quad IA = \frac{NIF}{NTI} \times 100 \quad (1)$$

16 Em que: NIF é o número de indivíduos na fenofase e NTI o número total de indivíduos  
 17 observados.

1 A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos foi estabelecida de acordo com a  
2 ocorrência predominante de determinado estágio fenológico em relação ao total da população.

### 3 2.2.5 Temperaturas basais e necessidades térmicas

4 Para a estimativa da temperatura basal inferior ( $T_b$ ) determinou-se primeiramente os  
5 graus-dia (GD), que foi obtido para cada estágio fenológico e para cada planta em estudo, de  
6 acordo com as necessidades térmicas, sendo dado pela expressão equação 2 (ARNOLD, 1959):

$$7 \quad GD = \sum \left[ \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \right] - T_b \quad (2)$$

8 em que: GD é os graus-dia ( $^{\circ}\text{C}$  dia),  $T_{máx}$  é a temperatura máxima diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{mín}$  é a  
9 temperatura mínima diária do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $T_b$  é a temperatura basal inferior.

10 Para o cálculo do GD foi utilizada uma série de  $T_b$  variando de  $0^{\circ}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ , em intervalos  
11 de  $0,5^{\circ}\text{C}$ . A partir das necessidades térmicas encontradas para cada estágio fenológico,  
12 determinou-se o desvio-padrão em graus-dias (DPgd) para cada temperatura, considerando  
13 como temperatura basal inferior à de menor desvio-padrão em dias (DPd), semelhante aos  
14 trabalhos de Yang et al. (1995) e Schmidt et al. (2018) conforme a equação 3 a seguir:

$$15 \quad DPd = \frac{DPgd}{T_{ar} - T_b} \quad (3)$$

16 em que: DPd = desvio padrão em dias; DPgd = desvio padrão em graus-dia utilizando uma série  
17 de  $T_b$ ;  $T_{ar}$  = temperatura média do ar de todas as épocas ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_b$  = temperatura basal inferior  
18 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

19 Posterior a determinação da  $T_b$ , determinou-se a temperatura basal superior (TB),  
20 utilizando os casos dois e quatro descritos por Ometto (1981) conforme as Equações (4) e (5),  
21 pois ambos abrangem as condições térmicas no período do experimento. Considerou-se para a  
22 TB o valor de temperatura do ar, em que o coeficiente de variação (CV) se tornou constante  
23 (SOUZA et al., 2009; SCHMIDT et al., 2018). Para os cálculos da TB utilizou-se para esta  
24 estimativa as temperaturas variando de  $0,5$  em  $0,5$  graus, compreendidos de  $20$  a  $40^{\circ}\text{C}$ .

25 **Caso 2:**  $T_b < T_{mín}$ ;  $T_{máx} < TB$

$$26 \quad GD = \left[ \frac{T_{máx} - T_{mín}}{2} \right] + (T_{mín} - T_b) \quad (4)$$

27 **Caso 4:**  $T_b < T_{mín}$ ;  $TB < T_{máx}$

1 
$$GD = \frac{2 \times (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) \times (T_{\text{mín}} - T_b) + (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^2 - (T_{\text{máx}} - TB)}{2 \times (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})} \quad (5)$$

2 em que: TB é a temperatura basal superior (°C).

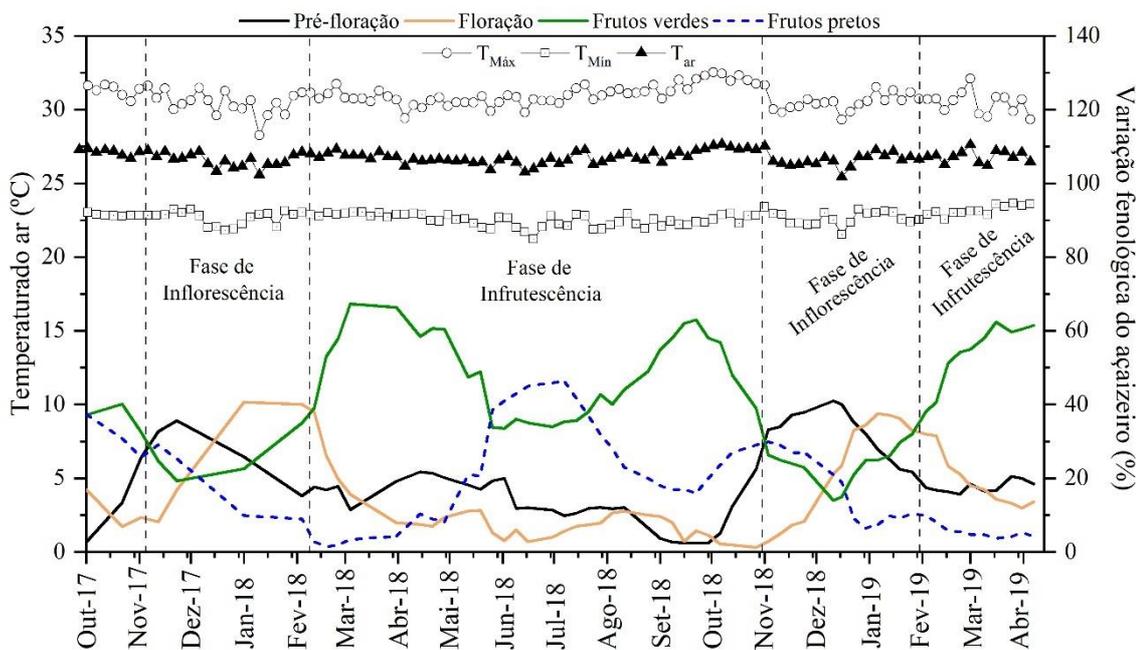
3 De posse das temperaturas basais superiores e inferiores, foi realizada a caracterização  
4 da necessidade térmica de cada estágio fenológico reprodutivo do açaizeiro, onde utilizou-se  
5 repetições (plantas) escolhidas aleatoriamente, que não foram utilizadas para os cálculos das  
6  $T_b$  e  $TB$ , considerando quatro diferentes épocas (meses) em que o estágio de pré-floração é  
7 evidenciado, que são: novembro (época 1), dezembro (época 2), janeiro (época 3) e fevereiro  
8 (época 4).

9 Os dados fenológicos e climáticos coletados no experimento implantado no município  
10 de Castanhal-PA seguindo a mesma metodologia empregada no município de Capitão Poço,  
11 foram utilizados para validar a ocorrência dos estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro  
12 (em dias do ano) simulados pelo método de Graus-dias. O erro da raiz quadrada média (RMSE)  
13 e o índice de concordância (d) foram os critérios estatísticos utilizados para avaliar o  
14 desempenho da simulação do desenvolvimento do açaizeiro.

### 15 **2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

16 Na figura 4 é apresentada a evolução fenológica reprodutiva do açaizeiro no  
17 experimento de Capitão Poço - PA, onde se verifica estações bem definidas de modo que em  
18 todos os meses do ano o açaizeiro produz inflorescências e infrutescências, sendo que de  
19 novembro a fevereiro é observado a predominância de dois estádios sendo o de pré-floração  
20 com pico de produção entre novembro e dezembro; e do estágio de floração com pico de  
21 produção de janeiro a fevereiro.

22 Entre os meses de março e outubro predomina a frutificação do açaizeiro, nesse período  
23 observa-se que o estágio de fruto verde apresenta dois picos de produção, sendo o primeiro  
24 entre março e abril e o segundo em setembro; os estádios de fruto preto e maturação predominam  
25 no mesmo período com pico de produção entre julho e agosto prolongando-se até o final da  
26 safra do fruto que vai até o mês de dezembro.



**Figura 4.** Variabilidade da temperatura máxima ( $T_{máx}$ ), média ( $T_{méd}$ ) e mínima ( $T_{mín}$ ) do ar e variação fenológica do açaizeiro irrigado ao longo da fase reprodutiva em Capitão Poço - PA, entre outubro de 2017 e abril de 2019. Estádios de — Pré-floração; — Floração; — Fruto verde; e - - - Fruto preto.

A temperatura média do ar próximo as inflorescências e infrutescências durante o experimento foi de  $26,75^{\circ}\text{C}$ , com mínima e máxima ocorrendo no ano de 2018 nos meses de janeiro ( $22,57^{\circ}\text{C}$ ) e outubro ( $30,92^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente (Figura 4). A menor temperatura instantânea foi registrada no dia 19 de janeiro ( $20,25^{\circ}\text{C}$ ) e a maior ocorreu no dia 28 de outubro ( $33,80^{\circ}\text{C}$ ). As épocas 2 e 3 passaram por esse período de mínima e máxima temperaturas durante o estágio pré-floração para ambas as épocas e de maturação (época 2) e fruto preto (época 3), respectivamente.

A época 1 registrou a temperatura mínima instantânea de  $20,25^{\circ}\text{C}$  na pré-floração e máxima de  $32,87^{\circ}\text{C}$  na maturação, enquanto que a época 4 experimentou mínima de  $20,66^{\circ}\text{C}$  na pré-floração e máxima de  $33,80^{\circ}\text{C}$  no estágio de fruto verde. As variações de temperaturas observadas ao longo de todo o experimento (figura 4) permitem maior confiabilidade na estimativa das temperaturas basais, propiciando que a planta se desenvolva de forma diferenciada (SOUZA; MARTINS, 2014).

O padrão fenológico reprodutivo do açaizeiro se demonstra anual, onde os estípes apresentaram atividade reprodutiva em todo período de observação de forma interrompida, com intensidade diferenciada entre cada estágio fenológico. Os picos de máxima atividade fenológica ocorrem de forma sequencial, onde primeiramente evidencia-se o estágio de espata com pico entre os meses de novembro e janeiro, seguido do estágio de floração que apresenta pico de atividade fenológica concentrada entre os meses de janeiro e março.

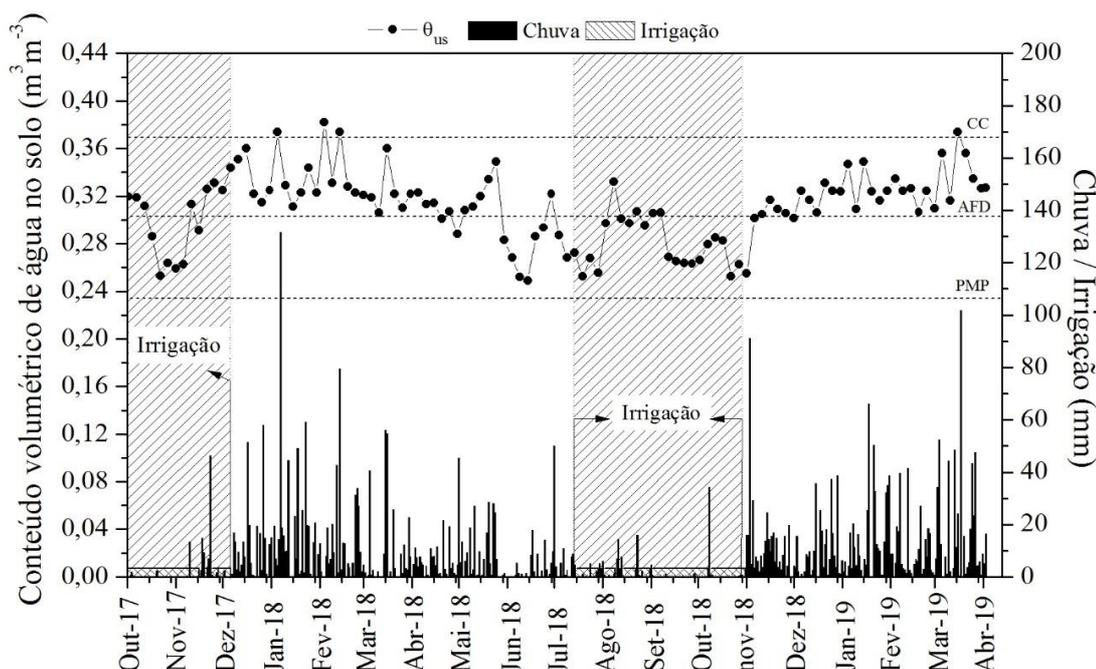
1 Os estádios de inflorescência (pré-floração e floração) apresentaram índice de atividade  
2 fenológica com baixa sincronia, o que de acordo com Garcia e Barbedo (2016) favorece o  
3 prolongamento da safra do fruto, uma vez que permite maior distribuição da maturação do açaí  
4 durante um maior período de tempo.

5 Entre os meses de março e outubro predominam os estádios de infrutescência (fruto  
6 verde, fruto preto e maturação) do açaizeiro, nesse período observa-se que o estágio de fruto  
7 verde apresenta dois picos de produção, sendo o primeiro entre março e abril e o segundo em  
8 setembro, ambos com índice de atividade fenológica com alta sincronia.

9 Os estádios de fruto preto e maturação predominam no mesmo período, apresentando  
10 dois picos de produção que ocorrem com baixa sincronia fenológica entre julho-agosto e entre  
11 outubro-novembro prolongando-se até o final da safra do fruto que vai até o mês de dezembro.

12 Os resultados fenológicos encontrados neste experimento corroboram com os estudos  
13 de Cifuentes et al. 2013 que estudaram o comportamento fenológico do açaizeiro na província  
14 biogeográfica de Chocó na Colômbia entre os anos de 1999 e 2001 e de 2006 a 2009 e obtiveram  
15 índice de atividade fenológica com baixa sincronia para a pré-floração, floração e maturação; e  
16 alta sincronia para o estágio de frutos verdes.

17 O conteúdo volumétrico de água no solo durante todo o experimento se manteve acima  
18 do ponto de murcha permanente - PMP ( $0,24 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), variando entre  $0,245$  e  $0,385 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , com  
19 média de  $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  o que corresponde a uma quantidade média de água disponível de 54,7%  
20 (figura 5). Entre dezembro e abril a precipitação ocorrida nesse período fez com que a  
21 quantidade de água no solo ficasse acima do conteúdo volumétrico de água no solo  
22 correspondente à faixa de água facilmente disponível (AFD) com média de 65,2%, condição  
23 essa que acarreta suprimento hídrico adequado para o pleno desenvolvimento para cultura.



**Figura 5.** Variação do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_{us}$ ), chuva e irrigação durante a fase reprodutiva do açaizeiro entre outubro de 2017 e abril de 2019 em Capitão Poço - PA. Barras pretas representam a chuva e a área hachurada representa o início e final do período de irrigação.

Durante o período menos chuvoso, entre julho e novembro, o conteúdo volumétrico de água no solo atingiu em média  $0,288 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  que representa 40,2% da capacidade total de água do solo, estando, portanto, abaixo das condições hídricas satisfatórias (água facilmente disponível) para o pleno desenvolvimento da cultura, o que acarreta alterações fisiometabólicas da planta e conseqüentemente influência na produtividade final.

A safra definida pela época 1, foi onde ocorreu a maior incidência de chuva totalizando 2217 mm no ciclo, enquanto que o menor volume de chuva foi observado na época 4 com 1986 mm. As safras correspondentes às épocas 2 e 3 apresentaram total de chuvas de 2179 e 2068 mm, respectivamente (tabela 3). O maior evento chuvoso em Capitão Poço-PA foi registrado no dia 03 de fevereiro de 2018 no estágio de floração que correspondeu a uma precipitação de 131,60 mm.

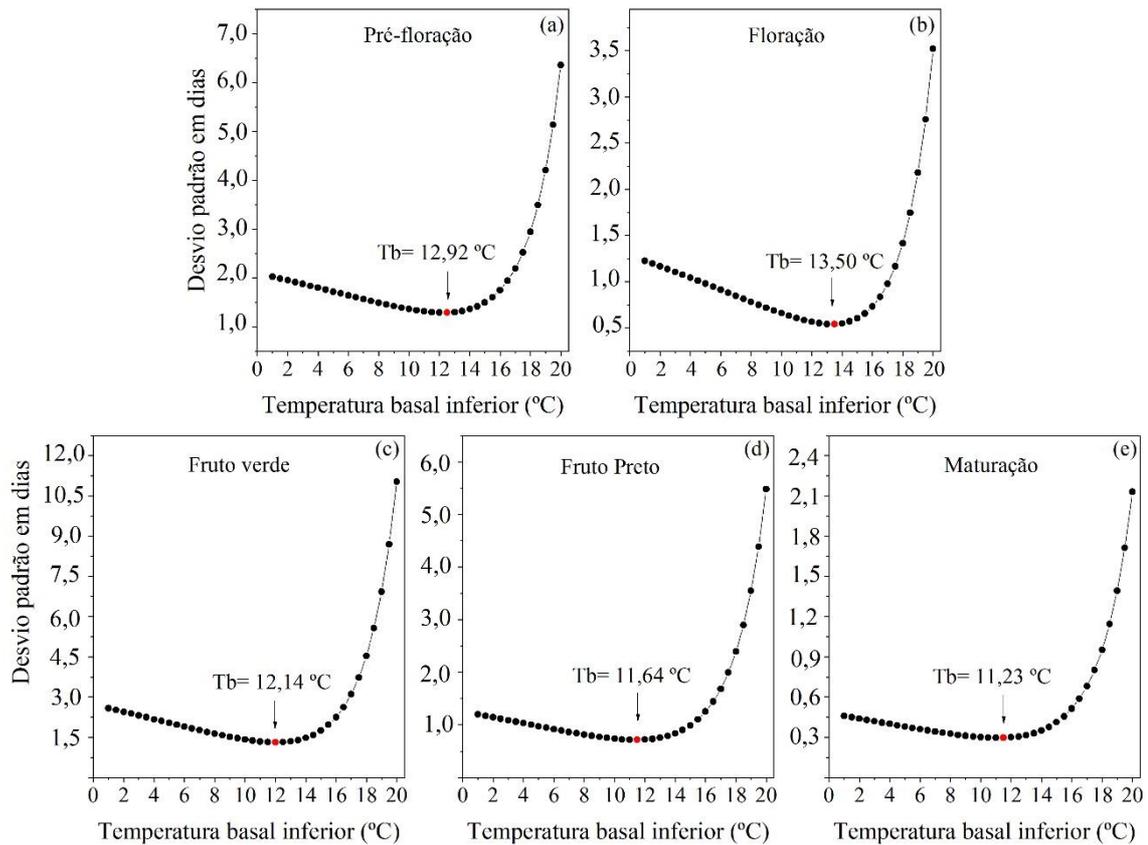
**Tabela 3.** Condições meteorológicas, irrigação total e duração do ciclo do açaizeiro durante o experimento em diferentes épocas de início da pré-floração em Capitão Poço - PA.

Épocas	Duração do ciclo (dias)	Irrigação (mm)	Variáveis meteorológicas			
			Chuva (mm)	Tar (°C)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)
E1	320	292	2217	26,73	32,87	20,25
E2	317	292	2179	26,63	33,80	20,25
E3	315	328	2068	26,81	33,80	20,25
E4	314	328	1986	26,93	33,80	20,66

1            Nas épocas 1 e 2, durante a fase de inflorescência (pré-floração e floração) a entrada de  
2 água total acumulada (chuva + irrigação) para o período foi de 1263 e 1394 mm, onde deste  
3 total 8 e 3%, respectivamente, corresponderam a irrigação que ocorreu até o início de dezembro  
4 de 2017 coincidindo com o estágio de pré-floração das épocas 1 e 2. Já a quantidade total de  
5 água durante a fase de infrutescência (fruto verde, fruto preto e maturação) foi de 1246 e 1077  
6 mm, onde 16 e 23% corresponderam a irrigação que foi realizada entre os meses de agosto e  
7 novembro de 2018.

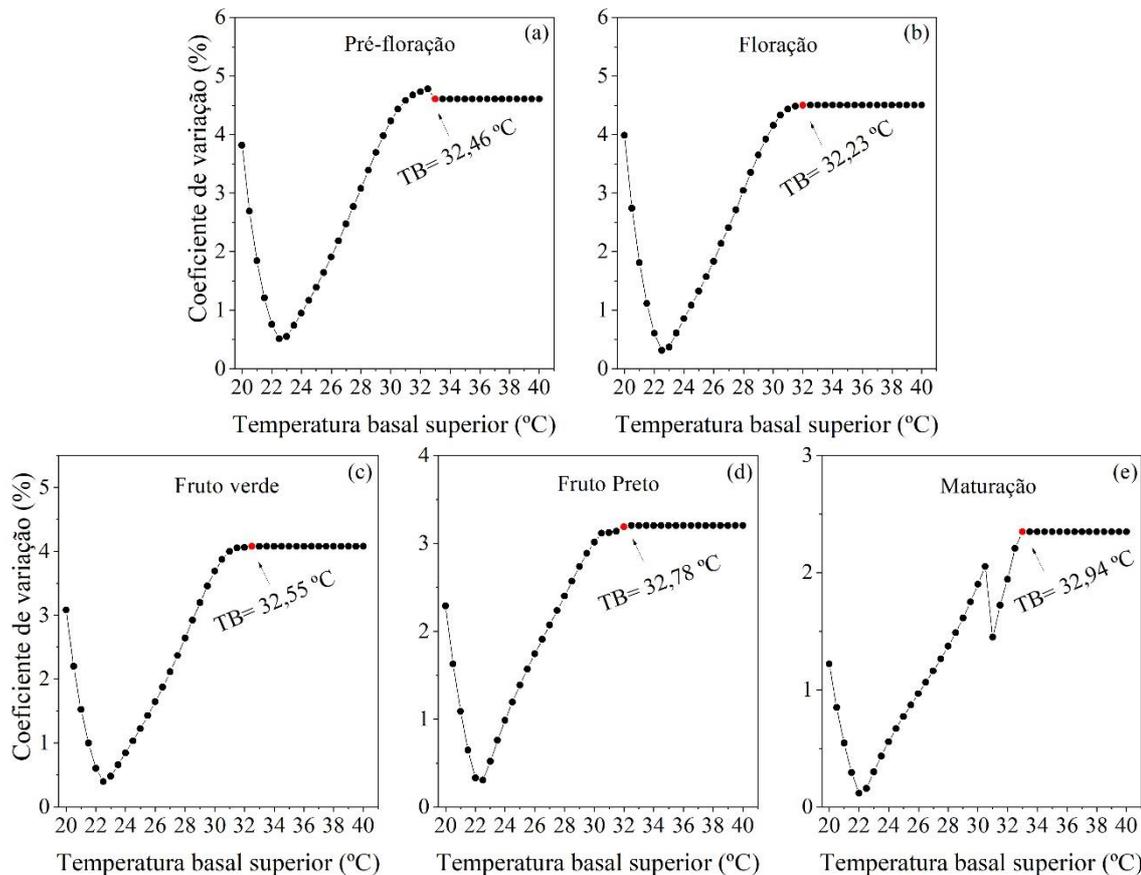
8            Nas épocas 3 e 4 a fase de inflorescência recebeu apenas o quantitativo de chuva que  
9 correspondeu a 1285 e 1129 mm, respectivamente, em virtude de iniciarem no ano de 2018  
10 (janeiro época 3 e fevereiro época 4), ambas não receberam suprimento hídrico através da  
11 irrigação durante esta fase. No período de infrutescência o suprimento hídrico total foi de 1111  
12 e 1186 mm, com 30 e 28% sendo realizados pela irrigação para as épocas 3 e 4, respectivamente.

13            Foram obtidos valores de Tb para cada um dos cinco estádios fenológicos, onde se  
14 observou que o menor desvio-padrão em graus dias foi obtido para a Tb de 12,92 °C no estágio  
15 de pré-floração. Já para o estágio de floração o valor de Tb foi de 13,50 °C, enquanto que para  
16 os estádios de fruto verde, fruto preto e maturação os valores de Tb foram de 12,14, 11,64 e  
17 11,23 °C, respectivamente (Figura 6). As diferenças nos valores de Tb para distintos estádios  
18 fenológicos são comumente verificadas nas mais variadas espécies e materiais genéticos, pois  
19 a maioria das culturas apresenta um estágio mais sensível, que no caso do açaizeiro é o período  
20 de floração, onde nesse estágio ao passar por estresses abióticos o açaizeiro acaba abortando as  
21 flores dando origem a cachos secos, fato esse que desencadeia a queda da produtividade  
22 (AGUIAR et al., 2018).



1  
2 **Figura 6.** Temperaturas basais inferiores dos estádios de pré-floração, floração, fruto verde, fruto preto e  
3 maturação do açazeiro pelo método do menor desvio padrão em dias (DPd).

4 Assim como realizado para a  $T_b$ , foram obtidos valores de TB para cada estágio  
5 fenológico, onde se observou que o coeficiente de variação se tornou constante na TB de 32,46  
6 °C no estágio de pré-floração, enquanto que para o estágio de floração o valor de TB foi de  
7 32,23 °C. Nos demais estádios de fruto verde, fruto preto e maturação os valores de TB foram  
8 de 32,55, 32,78 e 32,94 °C, respectivamente (Figura 7).



1 **Figura 7.** Temperaturas basais superiores dos estádios de pré-floração, floração, fruto verde, fruto preto e  
 2 maturação do açaizeiro pelo método do coeficiente de variação.  
 3

4 Elevados valores de TB são esperados em função de representarem o limite máximo de  
 5 temperatura, acima do qual a planta tem seus processos fisio-metabólicos prejudicados  
 6 (FREITAS et al., 2017), podendo induzir anomalias no crescimento e desenvolvimento da  
 7 planta, favorecendo a redução de emissão de novas folhas, redução de novas inflorescências, o  
 8 abortamento floral, e redução expressiva da taxa fotossintética (SOLTANI; SINCLAIR, 2012).

9 O açaizeiro apresenta o estágio de floração como o mais sensível entre os estádios  
 10 reprodutivos, por apresentar uma menor amplitude térmica entre as basais (18,73 °C) para seu  
 11 pleno desenvolvimento. Já o estágio de maturação apresenta a maior amplitude térmica que é  
 12 de 21,71°C, seguido dos estádios de fruto preto, fruto verde e pré-floração com 21,14; 20,41 e  
 13 19,54°C. Estudos sobre as temperaturas basais para espécies perenes como os de Lima e Silva  
 14 (2008) para o café, o de Rodrigues et al. (2013) para mangueira e o de Freitas et al. (2017) para  
 15 o eucalipto, ainda são escassos, principalmente para espécies nativas da Amazônia em função  
 16 da dificuldade de se avaliar frequentemente a duração fenológica de cada estágio por um longo  
 17 período de tempo. Essas informações são essenciais para que se possa determinar as  
 18 necessidades térmicas e suas adaptações às condições climáticas do local de cultivo  
 19 (TRUDGILL et al., 2005), além de serem fundamentais nos dados de entrada nas funções de

1 temperatura de modelos de desenvolvimento e modelos de produtividade (TRENTIN et al.,  
2 2013).

3 Considerando-se os valores de Tb e TB obtidos respectivamente a partir do método do  
4 menor desvio-padrão e do método do coeficiente de variação para cada estágio fenológico,  
5 calculou-se a soma térmica necessária para o desenvolvimento desde a pré-floração até a  
6 maturação, onde verificou-se o acúmulo médio de 4545,98 °C dia<sup>-1</sup>, variando de 4355,13 a  
7 4724,73 °C dia<sup>-1</sup>. As necessidades térmicas para os estádios de pré-floração, floração, fruto  
8 verde, fruto preto e maturação encontram-se na tabela 2, cujos valores podem ser usados em  
9 modelos de simulação do crescimento do açazeiro para o nordeste paraense como  
10 identificadores do desenvolvimento dessa cultura.

11 **Tabela 4.** Duração em dias, graus-dias por estágio e graus-dias acumulados nos estádios reprodutivos do açazeiro  
12 irrigado em Capitão Poço - PA.

Estádio	Duração (dias)	Graus-dia por estágio	Graus-dia acumulado	Desvio-padrão	Erro padrão	CV (%)
Pré-floração	78±6,12	1069,44	1069,44	86,53	±27,36	8,09
Floração	30±3,16	395,69	1465,13	24,60	±7,78	6,22
Fruto verde	131±5,27	1901,87	3367,00	102,23	±32,33	5,38
Fruto preto	60±3,01	913,04	4280,04	51,04	±16,14	5,59
Maturação	17±1,63	265,94	4545,98	16,26	±5,14	6,11

13 As quatro diferentes épocas utilizadas no estudo influenciaram na duração dos estádios  
14 fenológicos em função das diferentes condições meteorológicas que cada época foi submetida,  
15 logo verificou-se uma relação inversa entre a duração dos estádios e a temperatura do ar, pois  
16 quanto menores foram as temperaturas maior foi a duração de cada estágio (tabela 3).

17 O ciclo reprodutivo do açazeiro apresentou em média duração de 316 dias, onde 78 dias  
18 equivaleram a duração do estágio de pré-floração, 30 dias para a floração, 131 dias para o  
19 estágio de fruto verde, 60 dias para o estágio de fruto preto e os últimos 17 dias para o estágio  
20 de maturação dos frutos (tabela 4). A Duração média (em dias) da ocorrência dos estádios  
21 fenológicos obtidos neste estudo são superiores aos encontrados por Oliveira (2002), que  
22 estudando o tipo de açazeiro violáceo (comum) em terra firme sem irrigação na cidade de  
23 Belém-PA observou um período de 58 dias para a pré-floração, 26 dias para a floração, 110  
24 dias para estágio de fruto verde e 65 dias para a o estágio de fruto preto/maturação.

1 A discordância encontrada entre os resultados pode estar relacionada a diferença de  
 2 material genético utilizado nos estudos quanto à precocidade, bem como, em função das  
 3 condições ambientais as quais os experimentos foram submetidos, tendo em vista que o estudo  
 4 de Oliveira (2002) foi submetido as condições ambientais naturais o que pode ter aceleração e  
 5 encurtado a duração dos estádios fenológicos em função de algum déficit hídrico que tenha  
 6 ocorrido durante o período menos chuvoso do ano, uma vez que ele inibe o crescimento celular  
 7 reduzindo o crescimento das plantas, afetando vários processos fisiológicos como a fotossíntese  
 8 (MAR et al., 2013), enquanto que o estudo realizado em Capitão Poço recebia diariamente  
 9 suprimento hídrico através da irrigação durante o período menos chuvoso.

10 Verifica-se que o maior coeficiente de variação dos graus-dias (8,09) é encontrada no  
 11 estágio fenológico de pré-floração (tabela 4), o que deve estar associado ao fato desse estágio  
 12 ocorrer no período de transição entre o período menos chuvoso e o período mais chuvoso (figura  
 13 5), ocasionando maior variação entre as temperaturas e conseqüentemente no acúmulo de  
 14 energia pela planta e sua duração total.

15 As temperaturas basais inferiores e superiores e as necessidades térmicas encontradas  
 16 para cada estágio de desenvolvimento do açaizeiro nas quatro diferentes épocas de avaliação  
 17 em Capitão Poço - PA, foram utilizadas na simulação da fenologia e duração do ciclo  
 18 reprodutivo do açaizeiro observados em um segundo experimento independente realizado no  
 19 município de Castanhal-PA, cujos resultados estão presentes na tabela 5 e figura 8.

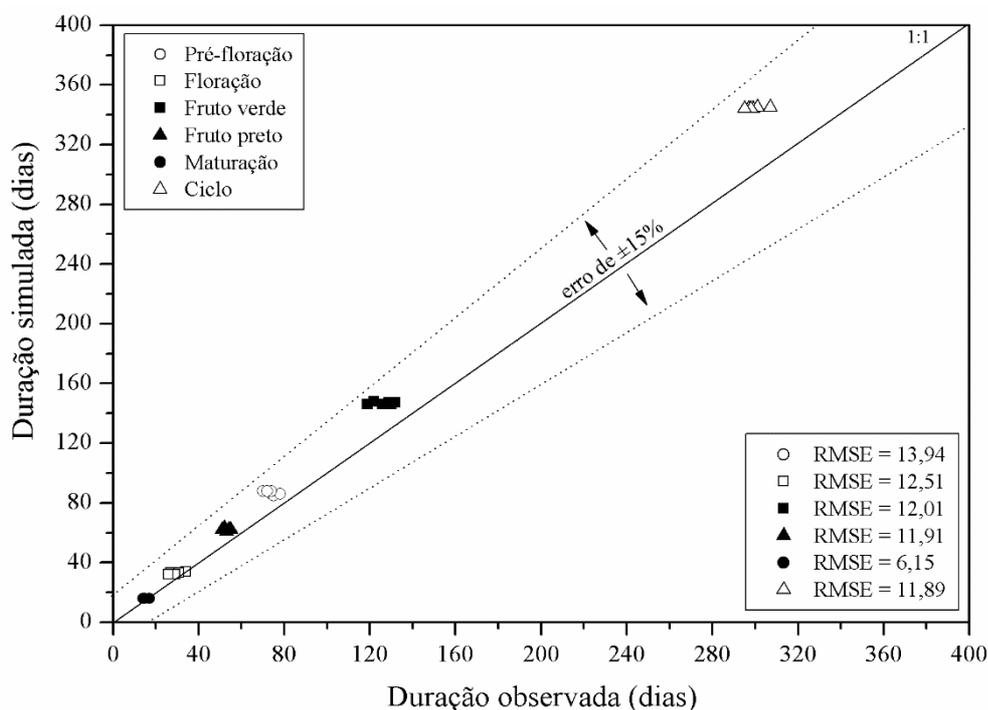
20 **Tabela 5.** Desempenho estatístico da simulação da duração dos estádios reprodutivos do açaizeiro em Castanhal-  
 21 PA durante o processo de validação.

Estádio	Chuva (mm)	Irrigação (mm)	Duração observada (dias)	N	Duração simulada (dias)	d	Dif (%)
Pré-floração	322,63	7,61	73,83±2,71	6	84,17±1,33	0,34	+0,14
Floração	238,23	0,00	29,00±3,03	6	32,16±0,75	0,63	+0,11
Fruto verde	642,20	0,00	126,33±5,01	6	141,16±0,82	0,36	+0,12
Fruto preto	175,49	4,79	53,33±1,63	6	59,67±0,63	0,33	+0,12
Maturação	26,46	24,43	15,00±1,10	6	16,00±0,57	0,61	+0,04

22 A simulação baseou-se nos graus-dia necessários para atingir cada estágio reprodutivo  
 23 do açaizeiro desde o início da safra (pré-floração) até o ponto ideal de colheita do fruto  
 24 (maturação), cujos resultados indicaram duração média (em dias) de 84, de 32, de 141, de 59 e  
 25 de 16 dias para a pré-floração, floração, estágio de fruto verde, estágio de fruto preto e para a  
 26 maturação dos frutos, respectivamente. Os resultados foram considerados satisfatórios, devido

1 aos baixos erros de estimativa, com raiz quadrada média dos erros (RMSE) variando entre 6  
2 dias na fase de maturação a cerca de 14 dias para o estágio de pré-floração (Figura 8).

3 Ao contrastar o regime pluviométrico durante os experimentos dos dois municípios,  
4 verificou-se que o experimento de Capitão Poço recebeu em média 2112mm de chuva,  
5 enquanto que o experimento de Castanhal recebeu 1405mm de chuva, ou seja, o solo contou  
6 com cerca de 33,5% menos água em Castanhal, o que resultou em uma quantidade de água  
7 disponível no solo média de 17,3%.



8  
9 **Figura 8.** Duração observada e simulada dos estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro irrigado em plantio  
10 comercial no município de Castanhal-PA.

11 A diferença na quantidade de água no solo dos dois experimentos influenciou na  
12 simulação da duração dos estádios fenológicos e consequentemente na duração do ciclo total,  
13 o que culminou em uma superestimativa dos dados simulados apresentando erro de 11,89%  
14 para o ciclo total do açaizeiro (figura 8). Esse fator pode ter sido determinante na contribuição  
15 dos erros gerados pela simulação no experimento de Castanhal, haja visto que as condições  
16 pluviométricas foram distintas das de Capitão Poço, e que a disponibilidade de água no solo é  
17 o principal fator que interfere no crescimento do açaizeiro em terra firme (NOGUEIRA;  
18 SANTANA, 2016).

## 1    **2.4 CONCLUSÃO**

2            As temperaturas basais encontradas variaram em função dos diferentes estádios de  
3 desenvolvimento, com as basais inferiores variando de 11,23 a 13,5 °C, e as basais superiores  
4 variando de 32,23 a 32,94 °C.

5            O ciclo fenológico reprodutivo do açaizeiro irrigado em terra firme variou entre 304 e  
6 328 dias, com média de 78 dias para a pré-floração, 30 dias para a floração, 131 dias para o  
7 estágio de fruto verde, 60 dias para o estágio de fruto preto e 17 dias para a maturação.

8            A necessidade térmica total para o ciclo reprodutivo do açaizeiro cultivado em terra  
9 firme varia de 4355,13 a 4724,73 °C dia<sup>-1</sup>, com necessidade térmica média de 1069,44 °C dia<sup>-1</sup>  
10 para o estágio de pré-floração, de 395,69 °C dia<sup>-1</sup> para a floração, de 1901,87 °C dia<sup>-1</sup> para o  
11 estágio de fruto verde, de 913,04 °C dia<sup>-1</sup> para o estágio de fruto preto e de 265,94 °C dia<sup>-1</sup> para  
12 a maturação.

13           A simulação da fenologia reprodutiva do açaizeiro pela teoria dos graus dias evidencia  
14 ser um método eficiente para as condições da Amazônia Oriental com erros de estimativa de  
15 no máximo de 11,89% para o ciclo total da cultura.

## 1 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 2 AGUIAR, AG; MARTINS, PFS; SIMÕES, AV. Efeitos da intensidade do desbaste de estipes  
3 de açazeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) nativos na composição de parcelas de produção em  
4 várzea do estuário amazônico. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 60, n. 4, p. 358-365, out./dez. 2017.  
5 <https://doi.org/10.4322/rca2709>
- 6 ARNOLD, CY. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit  
7 system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.74, p.430-445,  
8 1959.
- 9 COSTA, LC; JUSTINO, F; OLIVEIRA, IJC; SEDIYAMA, GC; FERREIRA, WPM; LEMOS,  
10 CF. Potential forcing of CO<sub>2</sub>, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean  
11 (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 4,  
12 n. 1, p. 1 - 10, 2009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/1/014013>
- 13 FARIAS, VDS; LIMA, MJA; NUNES, HGGC; SOUSA, DP; SOUZA, PJOP. Water demand,  
14 crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, v.  
15 30, p. 190-200, 2017. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>.
- 16 FREITAS, CH; MARTINS, FB; ABREU, MC. Temperaturas cardinais no desenvolvimento  
17 foliar de duas espécies de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 5,  
18 p. 283 - 292, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000500001>
- 19 GARCIA, VA; BARBEDO, CJ. Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe edulis*  
20 Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil. **Hoehnea**, v.  
21 43, p. 135-149, 2016. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>
- 22 GRAMIG, GG; STOLTENBERG, DE. Leaf appearance base temperature and phyllochron for  
23 common grass and broad leaf weed species. **Weed Technology**, v. 21, n. 03, p. 249-254, 2007.  
24 <https://doi.org/10.1614/WT-06-039.1>
- 25 GRAY, SB; BRADY, SM. (2016). Plant developmental responses to climate change.  
26 *Developmental Biology*, v. 419, p. 64–77, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023>
- 27 HATFIELD, JL; PRUEGER, JH. Temperature extremes: Effect on plant growth and  
28 development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, (2015).  
29 <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

- 1 HOMMA, AKO; MULLER, AA; MULLER, CH; FERREIRA, CAP; FIGUEIRÊDO, FJC;  
2 VIEGAS, IJM; LEMOS, WP. Sistema de produção do açaí. Sistema de produção. ISSN 1809  
3 – 4325. Versão eletrônica dez./2005.
- 4 IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. Climate change 2007: The physical  
5 Science Basis – Contribution of Working Group I to the Fourth assessment report of the  
6 Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: University, 2007. 989p.
- 7 LIMA, EP; SILVA, EL. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro  
8 arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.  
9 12, n. 3, p. 266-273, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300007>
- 10 MAR, CC. CONCEIÇÃO, HEO; SANTOS, ABR; VIÉGAS, IJM; SILVA, FSN. Produção de  
11 massa Seca e área foliar do Açaizeiro sob déficit hídrico. **Revista Agroecossistemas**, v. 5, n.  
12 2, p. 14–23, 2013. <https://doi.org/10.18542/ragros.v5i2.1794>
- 13 MARTINOT, JF; PEREIRA, HS; SILVA, SCP. Coletar ou Cultivar: as escolhas dos produtores  
14 de açaí-da-mata (*Euterpe precatoria*) do Amazonas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**,  
15 v. 55, n. 4, p. 751–766, 2017. doi:10.1590/1234-56781806-94790550408
- 16 NOGUEIRA, AKM; SANTANA, AC. Benefícios socioeconômicos da adoção de novas  
17 tecnologias no cultivo do açaí no Estado do Pará. **Revista Ceres**, v. 63, n.1, p. 001-007, 2016.  
18 <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010001>
- 19 OLIVEIRA, FJ; FARIAS, PR; SILVA, AG; RODRIGUES, KC. Distribuição espacial da  
20 leprose dos citros na Amazônia Oriental. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 1, p. 56-68,  
21 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 22 OLIVEIRA, MSP; CARVALHO, JEU; NASCIMENTO, WMO; MÜLLER, CH. Cultivo do  
23 açaizeiro para produção de frutos. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. Circular técnica 26,  
24 2002. 17 p.
- 25 OMETTO, JC. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425p.
- 26 QUEIROZ, JALD; MELÉM JÚNIOR, NJ. Efeito do tamanho do recipiente sobre o  
27 desenvolvimento de mudas de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). **Revista Brasileira de**  
28 **Fruticultura**, v. 23, n. 2, p. 460–462, 2001. <https://doi.org/10.1590/s0100->  
29 [29452001000200054](https://doi.org/10.1590/s0100-29452001000200054)

1 RANA, G; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field  
2 under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy, Kidlington**, v.13,  
3 p.125- 153, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)

4 RENATO, NS; SILVA, JBL; SEDIYAMA1, GC; PEREIRA, EG. Influência dos métodos para  
5 cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão.  
6 **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 382 - 388, 2013.  
7 <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>.

8 RODRIGUES, JC; SOUZA, PJOP; LIMA, RT. Estimativa de temperaturas basais e exigência  
9 térmica em mangueiras no Nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.  
10 35, n. 1, p. 143-150, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452013000100017>.

11 RUFINO, MSM; PÉREZ-JIMÉNEZ, J; ARRANZ, S; ALVES, RE; DE BRITO, ES;  
12 OLIVEIRA, MSP; SAURA-CALIXTO, F. Açaí (*Euterpe oleraceae*) “BRS Pará”: A tropical  
13 fruit source of antioxidant dietary fiber and high antioxidant capacity oil. **Food Research**  
14 **International**, v. 44, n. 7, p. 2100–2106, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.011>

15 SCHMIDT, D; CARON, BO; VALERA, O; MEIRA, D; FONTANA, DC; ZANATTA, TP;  
16 WERNER, CJ; BREZOLIN, P. Base temperature, thermal time and phyllochron of escarole  
17 cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 36, p. 466-472, 2018. [http://dx.doi.org/10.1590/S0102-](http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180407)  
18 [053620180407](http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620180407)

19 SOLTANI, A; SINCLAIR, TR. Modeling Physiology of crop development, growth and yield.  
20 **Oxfordshire: CAB Internacional**, 2012, p. 322.

21 SOUZA, AP; SILVA, AC; LEONEL, S; ESCOBEDO, JF. Temperaturas basais e soma térmica  
22 para a figueira podada em diferentes épocas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, p.314-  
23 322, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000200005>

24 SOUZA, PMB; MARTINS, FB. Estimativa da temperatura basal inferior para as cultivares de  
25 oliveira Grappolo e Maria da Fé. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 29, n. 2,  
26 p. 307-313, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200013>

27 SOUZA, PJOP; SOUSA, AML; SAMPAIO, LS. Soybean development and thermal  
28 requirement under the climatic conditions of Paragominas, Pará state, Brazil. **Revista de**  
29 **Ciências Agrárias**. v. 56, n. 4, p. 371-375, 2013. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.055>

- 1 STRECK, NA; LAGO, I; GABRIEL, LF; SAMBORANHA, FK. Simulating maize phenology  
2 as a function of air temperature with a linear and a non linear model. **Pesquisa Agropecuária**  
3 **Brasileira**, v. 43, p. 449-455, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000400002>
- 4 TRENTIN, R; HELDWEIN, AB; STRECK, NA; TRENTIN, G; SILVA, JC. Subperíodos  
5 fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa**  
6 **Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 703–713, 2013. [https://doi.org/10.1590/s0100-](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000700002)  
7 [204x2013000700002](https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000700002)
- 8 TREVISAN, ACD; FANTINI, AC; SCHMITT-FILHO, AL; FARLEY, J. Market for  
9 Amazonian Açai (*Euterpe oleraceae*) Stimulates Pulp Production from Atlantic Forest Juçara  
10 Berries (*Euterpe edulis*). **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 39, n. 7, p. 762–  
11 781, 2015. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1025461>
- 12 TRUDGILL, DL; HONEK, A; LI, D; STRAALLEN, NM. Thermal time - concepts and utility.  
13 **Annals of Applied Biology**, v. 146, n. 1, p. 1–14. 2005. doi:10.1111/j.1744-  
14 7348.2005.04088.x
- 15 YAMAGUCHI, KKL; PEREIRA, LFR; LAMARÃO, CV; LIMA, ES; VEIGA-JUNIOR, VF.  
16 Amazon acai: Chemistry and biological activities: A review. **Food chemistry**, v. 179, p. 137-  
17 151, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.055>
- 18 YANG, S; LOGAN, J; COFFEY, DL. Mathematical formulae for calculating the base  
19 temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 74, p. 61-74,  
20 1995. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02185-M](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02185-M)

### 3. BALANÇO DE ENERGIA EM PLANTIO DE AÇAIZEIRO IRRIGADO NO NORDESTE PARAENSE

#### RESUMO

O avanço dos cultivos agrícolas sobre áreas de florestas nativas já é evidenciado em diversas pesquisas para espécies anuais, comprovando que a mudança no uso da terra altera o balanço energético no microclima local, entretanto, para cultivos perenes, como o açaizeiro, que passou por processo acelerado de expansão para áreas de terra firme, não se tem informações sobre os possíveis impactos causados ao microclima e conseqüentemente não se sabe a variabilidade dos fluxos de energia que são fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas. Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar o particionamento do balanço de energia no plantio de açaí irrigado durante a fase reprodutiva nas condições climáticas do nordeste do Pará, Brasil. Para tal, uma torre micrometeorológica foi instalada no centro da área experimental para o monitoramento de variáveis meteorológicas entre os anos de 2017 e 2019. O balanço de energia foi obtido através do método da razão de Bowen, e a energia disponível foi particionada em calor para o solo, calor sensível, calor latente e calor armazenado no dossel vegetal. O consumo de energia disponível apresentou variação com o decorrer da evolução fenológica, onde observou-se um máximo de 69% no estágio de floração a um mínimo de 63% na maturação do fruto para o fluxo de calor latente, já o fluxo de calor sensível atingiu máximos valores na maturação com 31% e mínimos de 27% durante a floração. O fluxo de calor no solo apresentou pouca variação ao longo do ano com média de 4% para o ciclo, demonstrando boa cobertura do solo impedindo grandes variações em seu aquecimento. O efeito do calor armazenado no dossel do açaizeiro demonstrasse irrelevante quando comparado com os outros componentes do balanço de energia, representando menos de 0,2% da energia disponível. Os resultados encontrados na partição dos fluxos de energia frente ao avanço dos açaizais para áreas de terra firme evidenciam alterações importantes, principalmente relacionadas ao aumento de temperatura do ar, fazendo-se necessários estudos que monitorem no mesmo período esses dois ecossistemas.

**Palavras-chave:** *Euterpe oleracea* Mart., razão de Bowen, fluxos de calor.

1 **ENERGY BALANCE IN AN IRRIGATED ACAI PALM PLANTING IN THE**  
2 **NORTHEAST OF PARÁ STATE**

3  
4 **ABSTRACT**

5 The advance of agricultural crops over areas of native forests is already evidenced in several  
6 surveys for annual species. This proves that the change in land use alters the energy budget over  
7 a local microclimate. However, for perennial crops, such as acai, which has been undergoing  
8 an accelerated process of expansion to upland areas, there is no information about the possible  
9 impacts caused to the microclimate. Consequently, the variability of energy flows that are  
10 fundamental to the balance of ecosystems is not known. Therefore, the present study aimed to  
11 evaluate the partitioning of the energy balance in the planting of irrigated acai during the  
12 reproductive phase in the climatic conditions of northeastern Pará State, Brazil. Thus, a  
13 micrometeorological tower was installed in the center of the experimental area for monitoring  
14 meteorological variables between the years 2017 and 2019. The energy balance was obtained  
15 through the Bowen ratio method, and the available energy was partitioned into heat for the soil,  
16 sensitive heat, latent heat and heat stored in the plant canopy. The available energy consumption  
17 varied with the course of phenological evolution, in which a maximum of 69% was observed  
18 in the flowering stage and a minimum of 63% in fruit maturation for the latent heat flow. The  
19 flow of sensitive heat reached maximum values in maturation with 31% and minimums of 27%  
20 during flowering. The heat flow in the soil showed little variation throughout the year, with an  
21 average of 4% for the cycle, showing good soil coverage, which prevented great variations in  
22 its heating. The effect of the heat stored in the acai tree canopy is irrelevant when compared  
23 with the other components of the energy balance, since it represents less than 0.2% of the  
24 available energy. The results found in the partition of the energy when taking into account the  
25 advance of acai trees to areas of solid land present important changes, mainly related to the  
26 increase in the temperature and reduction in the humidity of the air. Thus, it is necessary to  
27 carry out studies that monitor these two ecosystems in the same period.

28  
29 **Palavras-chave:** *Euterpe oleracea* Mart., Bowen ratio, heat flux

### 1 3.1 INTRODUÇÃO

2 De origem amazônica, o fruto do açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) nos últimos anos  
3 passou a ser considerado o ouro negro da Amazônia, dada sua alta rentabilidade e versatilidade  
4 dos produtos produzidos a partir desta palmeira. Atualmente, o açaí é exportado para todos os  
5 continentes globais, gerando milhares de empregos diretos e indiretos, constituindo-se como a  
6 principal fonte de renda para muitas famílias (YOKOMIZO et al., 2012).

7 A partir da década de 90, o açazeiro passou a ser cultivado em escala comercial em  
8 áreas de terra firme, em função do significativo aumento na procura pelo fruto que passou a não  
9 ser suficiente para atender a demanda do mercado interno e externo (NOGUEIRA et al., 2013).  
10 Devido a expansão do açazeiro, que antes era oriundo apenas das populações naturais, em áreas  
11 de várzeas para ambientes de terra firme tornou-se indispensável à compreensão dos padrões  
12 de trocas energéticas entre o solo, a planta e a atmosfera, bem como de sua partição no sistema,  
13 para que se possa ponderar os efeitos causados com a mudança no uso da terra, pelas alterações  
14 na cobertura vegetal original, os impactos na dinâmica dos diversos elementos climáticos, no  
15 ciclo hidrológico e conseqüentemente no consumo hídrico que influencia diretamente na gestão  
16 dos recursos naturais (GRAY; BRADY, 2016).

17 Os padrões de trocas energéticas e a quantificação dos componentes de radiação solar  
18 líquida (energia disponível), tem sido amplamente investigado por vários autores nas mais  
19 diversas culturas, através do balanço de energia e de seu particionamento entre os seus fluxos  
20 de calor nas superfícies vegetadas (ALBERTO et al., 2011; SOUZA et al., 2012; LÓPEZ-  
21 OLIVARI et al., 2016; VANOMARK et al., 2018) podemos verificar padrões distintos de  
22 interação com a atmosfera, em função das demandas que variam de região pra região e das  
23 coberturas vegetais que apresentarem diferentes características ópticas sendo determinantes na  
24 variabilidade e particionamento diferenciado da energia disponível para os fluxos de calor  
25 latente (LE), fluxos de calor sensível (H), fluxos de calor no solo (G) e fluxos de calor  
26 armazenados no dossel (Sdv).

27 Os métodos micrometeorológicos mais utilizados na determinação do balanço de  
28 energia são os da covariância de vórtices turbulentos e da razão de Bowen (NIAGHI; JIA,  
29 2019). O primeiro é considerado um método direto e caro, que mede o fluxo de CO<sub>2</sub> decorrente  
30 da interação entre a vegetação e a atmosfera, como também os fluxos de calor latente e sensível  
31 (GEBLER et al., 2015), e o segundo um método indireto (SILVA et al., 2016), que determina  
32 os fluxos de calor latente e sensível a partir de um gradiente vertical de temperatura e de  
33 umidade do ar (IRMAK et al., 2014).

1 Diversos estudos realizados em todo o mundo comprovam a acurácia dos resultados  
2 obtidos pelo método de razão de Bowen - MRB em relação ao método da covariância de  
3 vórtices turbulentos na determinação dos componentes do balanço de energia (BROTZGE;  
4 CRAWFORD, 2003; BILLESBACH; ARKEBAUER, 2012; GONG et al., 2016; TIE et al.,  
5 2018), propiciando que o MRB seja utilizado como uma ferramenta relativamente prática e  
6 confiável.

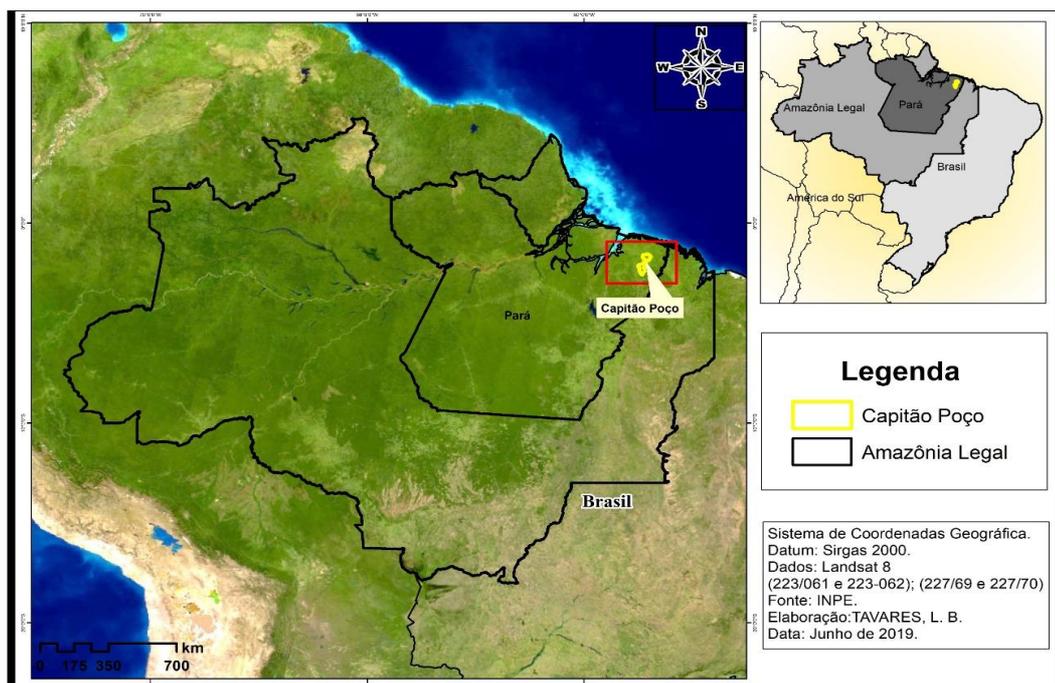
7 A determinação dos fluxos de energia no plantio de açaizeiro possibilitará quantificar  
8 os impactos causados pela mudança no uso da terra, já verificadas por outros autores na  
9 substituição da floresta nativa por áreas agricultáveis (SOUZA et al., 2011; WEBLER et al.,  
10 2013; ANGELINI et al., 2017; WANG et al., 2020), bem como, servirá como guia para a adoção  
11 de práticas que visem minimizar tais impactos.

12 Diante disso, se faz necessário compreender a variabilidade da energia disponível ao  
13 longo do ciclo do açaizeiro e seu particionamento nos fluxos de calor latente, sensível e do solo,  
14 para que se possam criar estratégias de manejo que auxiliem a tomada de decisão na região.  
15 Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar o particionamento do balanço de energia em  
16 plantio de açaizeiro irrigado durante a fase reprodutiva nas condições climáticas do nordeste do  
17 Pará, Brasil.

## 18 **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### 19 3.2.1 Área experimental

20 O experimento foi realizado na região nordeste do estado do Pará, durante duas safras  
21 entre os anos de 2017 e 2019 em uma área de dez hectares localizada nas dependências da  
22 fazenda Ornela no município de Capitão Poço, cujas coordenadas geográficas são 01°43'44,4"S  
23 latitude, 47°06'39,3"W longitude e altitude de 71 m (figura 1).



**Figura 1** – Localização da área experimental em Capitão Poço – PA.

Na tabela 1 são apresentadas as propriedades físico-químicas do solo da área experimental, o qual foi classificado como latossolo amarelo distrófico, com textura franco arenosa com 14% de argila na camada de 0-20 cm e de textura franco argilo arenosa na camada de 20-40 com 28% de argila. O clima local é caracterizado como Am, clima tropical, apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial média anual variando de 2500 a 3000 mm, onde o trimestre mais seco do ano ocorre entre setembro e novembro (OLIVEIRA et al., 2016).

**Tabela 1** - Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
		---mg·dm <sup>-3</sup> ---		-----cmol <sub>c</sub> ·dm <sup>-3</sup> -----		
0-20	4,07	45	65	0,90	1,30	0,20
20-40	4,82	51	10	0,50	0,90	0,50
Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds <sup>1</sup>	CC <sup>2</sup>	PMP <sup>3</sup>
	----(g·kg <sup>1</sup> )----			(g·cm <sup>3</sup> )	---(m <sup>3</sup> ·m <sup>3</sup> )---	
0-20	792	68	140	1,43	0,37	0,23
20-40	633	87	280	1,68	0,32	0,21

<sup>1</sup>Densidade do solo, <sup>2</sup>Capacidade de campo, <sup>3</sup>Ponto de murcha permanente.

1 O plantio foi implantado para fins comerciais em 2012, utilizando o ecotipo chumbinho,  
2 em espaçamento de 6,0 x 4,0 m com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em  
3 terra firme com irrigação diária durante o quadrimestre mais seco do ano por meio de um  
4 sistema de microaspersão, aplicando-se uma lâmina bruta média diária de 3,28 mm.

5 O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açaizeiro foi analisado adaptando a  
6 escala proposta por Garcia e Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases reprodutivas que  
7 são: pré-floração, floração, frutos verdes e frutos pretos, acrescentando a fenofase de maturação  
8 que é descrita por Homma et al. (2005). A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos  
9 foi estabelecida de acordo com a ocorrência predominante de determinado estágio em relação  
10 ao total da população, monitorando-se de forma aleatória 300 plantas dentro do hectare de  
11 controle.

12 Para determinar o índice de área foliar (IAF) do açaizeiro, todas as 11 folhas de 12  
13 plantas da área experimental foram coletadas ao final da primeira e segunda safras (estádio do  
14 fruto preto). Posteriormente, as folhas foram levadas ao laboratório de agrometeorologia da  
15 Universidade Federal Rural da Amazônia e com o auxílio de um integrador de área foliar (AF)  
16 (LI-3100 Li-Cor Inc, Lincoln, Nebraska, USA) determinou-se a AF de cada uma das plantas.  
17 Por fim, o IAF foi determinado pela razão entre a área foliar do dossel e a área de solo disponível  
18 para a planta, com base no espaçamento entre as plantas.

### 19 3.2.2 Instrumentação

20 No centro da área experimental foi instalada uma torre metálica de 12 m de altura e nela  
21 acoplada três estações meteorológicas automáticas, sendo duas da Campbell Scientific  
22 (CR1000, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA), acima e abaixo do dossel vegetal  
23 e uma da Onset Hobo (U30, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA) (tabela 2).

1 **Tabela 2** – Variáveis meteorológicas, instrumentos utilizados e sua disposição em relação ao solo e ao dossel de  
 2 um plantio comercial de açazeiro irrigado em Capitão Poço-PA.

Variáveis meteorológicas	Instrumento, fabricante, modelo	Nível dos sensores (m)
Temperatura do ar	Termohigrômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 e 8,0 acima do solo
Radiação global incidente	Piranômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Radiação global refletida	Piranômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Saldo de radiação	Saldo radiômetro (NR-LITE2, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Velocidade do vento	Anemômetro (05106, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Chuva	Pluviômetro (TB4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,5 acima do dossel
Temperatura do ar	Termohigrômetro (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Umidade relativa do ar	Termohigrômetro (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Temperatura do solo	Sonda de temperatura (108, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,02 e 0,06 de profundidade
Umidade do solo	Reflectômetro do conteúdo de água (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,3 de profundidade
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo de calor (HFP01SC, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,08 de profundidade

3 Os sensores da Campbell Scientific foram conectados a um datalogger CR1000 e a um  
 4 multiplexador AM416 e os sensores da estação Onset Hobo foram conectados a um datalogger  
 5 modelo U30. A programação de leitura foi realizada para obter dados a cada dez segundos, e  
 6 médias totais a cada 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências mínimas de  
 7 bordadura da área, apresentando “fetch” disponível (superior a razão 1:100), a fim de que as  
 8 medidas obtidas fossem representativas da área experimental, não sofrendo influência do calor  
 9 advectivo (RANA; KATERJI, 2000).

### 10 3.2.3 Balanço de energia

11 Os componentes do balanço de energia do açazeiro foram obtidos pela lei de  
 12 conservação de energia para uma superfície vegetada com base na razão de Bowen, de acordo  
 13 com a seguinte expressão (ROSENBERG et al., 1983):

$$14 \quad R_{net} = LE + H + G + S_{dv} + F$$

Eq.1

1 Em que  $R_n$  é o saldo de radiação,  $LE$  e  $H$  são os fluxos verticais de calor latente e sensível,  
2 respectivamente;  $G$  o fluxo de calor no solo,  $S_{dv}$  a energia armazenada no sistema solo dossel  
3 vegetativo e  $F$  é a energia utilizada no processo fotossintético, a qual não foi considerada por  
4 representar menos de 2% do saldo de radiação (HEILMAN et al., 1994). Todos os termos da  
5 Eq. 1 foram expressos em  $W\ m^{-2}$ .

6 O balanço de energia foi efetuado sobre o dossel do açazeiro, para um volume de  
7 controle compreendido entre a profundidade de 8 cm do solo e a altura do psicrômetro mais  
8 elevado (2,0 m acima do dossel do cultivo); consideram-se positivos os fluxos verticais que  
9 chegam e negativos os que saem do volume de controle.

10 A componente  $G$  foi estimada a partir de duas placas de fluxo de calor no solo instaladas  
11 horizontalmente a 0,08 m de profundidade em ambos os lados da linha de plantio (uma na linha  
12 e outra entre as linhas de plantio), de onde se obteve a energia média transportada para o solo.

13 O calor armazenado na camada de solo acima dos fluxímetros foi obtido conforme  
14 (KUSTAS et al., 2000), utilizando dois termopares (TEMP108, Campbell Scientific Instrument,  
15 Logan, UT, USA) instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo  
16 de superfície do solo (Tabela 2).

$$17 \quad G = G_8 + \frac{\Delta T_s C_s z_r}{t} \quad \text{Eq.2}$$

18 Em que  $G_8$  é a medição de fluxo de calor no solo pelo fluxímetro,  $\Delta T_s$  é a diferença média da  
19 temperatura do solo ( $^{\circ}C$ ) durante o período de medição,  $z_r$  é a profundidade do fluxímetro,  $t$  é  
20 o intervalo da medição em minutos e  $C_s$  é a capacidade calorífica volumétrica do solo, obtida  
21 pela expressão:

$$22 \quad C_s = \rho_s (C_{sd} + C_{sw} \theta_v) \quad \text{Eq.3}$$

23 Em que  $\rho_s$  é a densidade do solo ( $g\ cm^{-3}$ );  $C_{sd}$  é o calor específico do solo seco ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ );  $C_{sw}$   
24 é o calor específico da água no solo ( $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ) e  $\theta_v$  é a umidade do solo ( $cm^3\ cm^{-3}$ ).

### 25 3.2.4 Calor armazenado no dossel vegetal

26 O fluxo de calor sensível armazenado no dossel do açazeiro ( $S_d$ ) foi calculado com  
27 base no gradiente vertical de temperatura do ar, em dois níveis, regularmente espaçado em 2 e  
28 6m, a partir da superfície do solo até 8 m, totalizando duas camadas no interior do dossel  
29 vegetativo do açazeiro, pela equação (MCCAUGHEY, 1985):

$$Sd = \frac{\left( \sum \rho c_p \Delta h \left[ \frac{T_i + T_j + 1}{2} \right] \right)_{j+1} - \left( \sum \rho c_p \Delta h \left[ \frac{T_i + T_j + 1}{2} \right] \right)_j}{1200} \quad \text{Eq.4}$$

em que Sd é o fluxo de calor sensível armazenado,  $\rho$  é a densidade do ar ( $1,3 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$ ),  $\Delta h$  é distância vertical entre os sensores térmicos (6 m),  $T_i$  é a temperatura do ar nas alturas “i” e “j” ( $^\circ\text{K}$ ). O calor armazenado no dossel do açazeiro foi obtido pela diferença entre as somas das energias térmica de cada uma das camadas, estimadas entre cada intervalo de 20 minutos, obtendo-se o resultado em segundos, ou seja, 1200 s.

O fluxo de calor latente armazenado no dossel do açazeiro ( $\Delta Q_a$ ), nos mesmos níveis do calor sensível, foi utilizada a seguinte equação (MCCAUGHEY, 1985):

$$\Delta Q_a = \int_0^z \rho L e \frac{\delta e_i}{\delta t} dz \approx \rho L e \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta e_i}{\Delta t} \Delta z_i \right) \quad \text{Eq.5}$$

sendo  $\rho$  densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $L e$  é o fluxo de calor latente de vaporização ( $\text{kJ Kg}^{-1}$ ),  $t$  é a temperatura do ar,  $z$  é a distância entre as medições de temperatura e umidade relativa e  $e$  a pressão parcial do vapor d’água (hPa), calculado a partir da temperatura do ar ( $^\circ\text{K}$ ) e umidade relativa (%) em 2 e 8 m de altura. O fluxo de calor armazenado no dossel do açazeiro ( $S_{dv}$ ) foi determinado a partir da soma de Sd e de  $\Delta Q_a$ .

### 3.2.5 Razão de Bowen, fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H)

A partir da energia disponível ( $R_n - G$ ) o fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível foram determinados em função dos gradientes de temperatura do ar e na pressão de vapor, em dois níveis (0,5 e 2,0 metros acima do dossel).

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{-k_h \frac{d(\rho_a c_p T)}{dz}}{-k_v \frac{d(\rho_a \lambda q)}{dz}} \quad \text{Eq.6}$$

Em que  $K_h$  e  $K_v$  são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d’água, respectivamente,  $c_p$  é o calor específico do ar úmido,  $\rho_a$  é a densidade do ar,  $T$  e  $q$  são as diferenças de temperatura e umidade do ar específica, em respectivo, e  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

1 Considerando-se a igualdade entre Kh e Kv (GAVILAN; BERENGENA, 2007) e  
 2  $(dT/dz)/(de/dz) \approx \Delta T/\Delta e$ ; a equação 6 pode ser simplificada para:

$$3 \quad \beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Eq.7}$$

4 Sendo  $\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$  e  $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$  as diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor  
 5 d'água na camada de ar acima da copa do açazeiro, respectivamente.

6 Com base na razão de Bowen, obteve-se o fluxo de calor latente segundo a expressão  
 7 8:

$$8 \quad LE = \frac{Rn - G - S_{dv}}{1 + \beta} \quad \text{Eq.8}$$

9 Com o resíduo da equação 1, obteve-se o fluxo de calor sensível através da seguinte  
 10 equação:

$$11 \quad H = Rn - LE - G - S_{dv} \quad \text{Eq.9}$$

### 12 3.2.6 Critério para rejeição de dados inadequados do método da razão de Bowen

13 Para rejeitar os valores inconsistentes, incluindo aqueles fora dos limites da resolução  
 14 instrumental, adotou-se os critérios descritos por Perez et al. (1999). Em função de algumas  
 15 vezes, as medidas darem sinais incorretos para os fluxos de calor latente e sensível a tabela 3  
 16 foi levada em consideração, onde os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen foram  
 17 corretos quando atenderam aos critérios abaixo.

18 **Tabela 3** - Limites de aceitabilidade dos valores obtidos pelo método da razão de Bowen sob condições não-  
 19 advectivas.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
Rn - G > 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H ≤ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H > 0 para β > 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H > 0
Rn - G < 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H < 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H ≥ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H < 0 para β > 0

20

Quando as condições da tabela 3 não foram satisfeitas o método da razão de Bowen forneceu um sentido incorreto para os fluxos e obrigatoriamente os dados foram descartados. Esse tipo de erro ocorre no início da manhã e no final da tarde, quando o fluxo de calor muda de sinal, durante a irrigação ou a precipitação, em que  $\Delta e$  apresenta valores baixos quando os valores de energia disponível são baixos.

A estimativa de LE e do H fornecida pelo método razão de Bowen deve ser consistente com a relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de  $\beta$  próximos de -1 pode ser rejeitado, de acordo com a precisão considerada para as medições que no presente estudo, foram de 0,2 °C para a temperatura do ar e de 2% para a umidade relativa do ar. Tais valores foram utilizados para a obtenção do erro ( $\varepsilon$ ), a fim de se determinar o intervalo próximo de -1 a ser excluído.

$$\varepsilon = \frac{\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Eq. 10}$$

O intervalo excluído foram os valores de  $\beta$  próximos de -1:  $-1 - |\varepsilon| < \beta < -1 + |\varepsilon|$

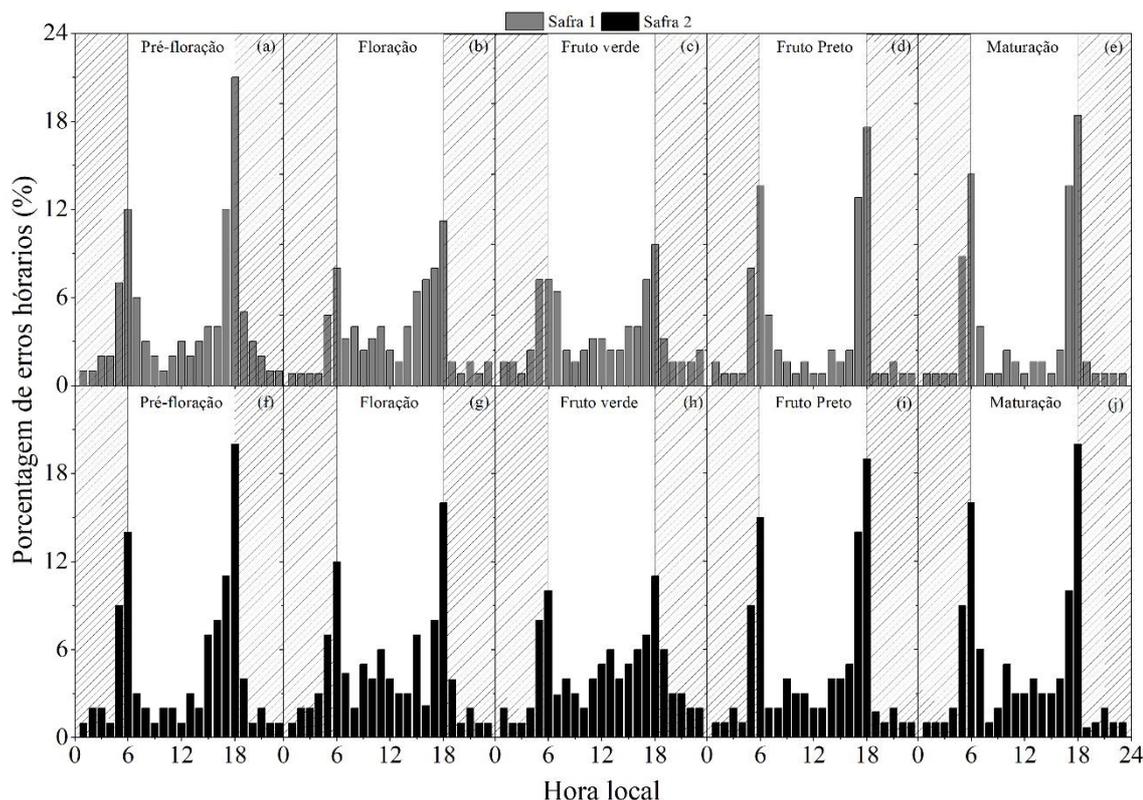
Após o controle de qualidade, o preenchimento das falhas dos dados de fluxo de energia foi realizado através de uma regressão entre o H + LE com o Rn + G para cada estágio reprodutivo do açazeiro (TEIXEIRA; BASTIAASEEN, 2012) de acordo com as correlações obtidas a partir dos dados de cada estágio e de ambos os períodos (Tabela 4).

**Tabela 4** - Coeficiente da análise de regressão da correlação horária entre H + LE (coordenada Y) e Rn + G (coordenada X), ambos em  $W m^{-2}$ , durante os diferentes estádios reprodutivos do açazeiro, Capitão Poço - PA.

Estádios fenológicos	Coeficientes lineares		
	a	b	R <sup>2</sup>
Pré-Floração	41,712	0,9677	0,9985
Floração	54,304	0,9561	0,9976
Fruto verde	11,108	0,9163	0,9957
Fruto preto	17,971	0,8961	0,9951
Maturação	20,161	0,8819	0,9944

### 1 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2 Na figura 2 são apresentados os resultados horários da análise do controle de qualidade  
3 dos dados na série da razão de Bowen para as duas safras, onde verifica-se que 69,77% e  
4 71,95% dos dados coletados na primeira e segunda safras, respectivamente, permitem a  
5 realização do balanço de energia.



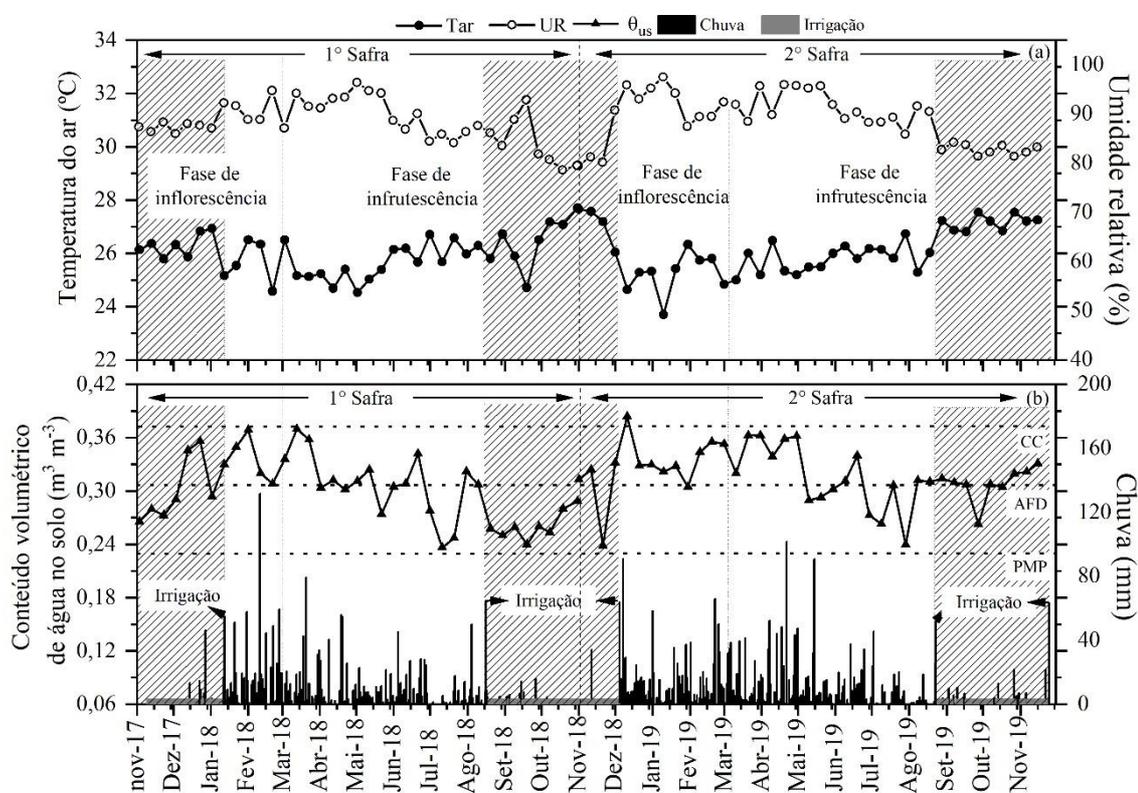
6  
7 **Figura 2** – Porcentagem de erros horários do método de razão de Bowen em diferentes estádios fenológicos do  
8 açaizeiro durante duas safras em Capitão Poço – PA. (a) e (f) Pré-floração; (b) e (g) Floração; (c) e (h) Fruto verde;  
9 (d) e (i) Fruto preto; (e) e (j) Maturação; Safra 1: Barras cinzas; Safra 2: Barras pretas. Área hachurada representa  
10 o período noturno.

11 Ao longo das duas safras e em todos os estádios e horários foram observadas  
12 inconsistências nos dados gerados pelo método de razão de Bowen, em função da baixa  
13 variabilidade nos gradientes de temperatura e umidade do ar (SOUZA et al., 2018), com  
14 predominância no início da manhã entre 05h00min e 08h00min e no final da tarde entre  
15 16h00min e 18h00min (figura 2), principalmente nos estádios de pré-floração, fruto preto e  
16 maturação.

17 Durante os estádio de floração e fruto verde observou-se uma maior homogeneização  
18 dos dados inconsistentes, principalmente durante a segunda safra, quando verifica-se aumento  
19 de erros entre os horários das 11h00min e 15h00min, em função da maior incidência de chuvas  
20 nesses horários que ocasionam redução nos gradientes de temperatura e umidade que não são

1 favoráveis para aplicação da metodologia de razão de Bowen (PEREZ et al., 1999; TEIXEIRA;  
2 BASTIAANSEEN, 2012).

3 Na figura 3a verifica-se ao longo de duas safras as fenofases do açaizeiro, cuja  
4 predominância durante o período mais chuvoso corresponde à fase de inflorescência que integra  
5 os estádios de pré-floração e floração, as quais iniciam em novembro e terminam em meados  
6 de março, apresentando duração média de 78 e 30 dias, respectivamente. Já durante o período  
7 final de março a outubro a fase de infrutescência é a que prevalece, sendo constituída pelos  
8 estádios de fruto verde, fruto preto e maturação que apresentam duração média de 130, 60 e 16  
9 dias, respectivamente.



10  
11 **Figura 3** – Variação dos elementos meteorológicos de temperatura média do ar (Tar) e umidade relativa do ar  
12 (UR) (a); conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_{us}$ ), chuva e da irrigação (b) em diferentes estádios fenológicos  
13 do açaizeiro em Capitão Poço – PA. CC: Capacidade de campo; AFD: Água facilmente disponível; PMP: Ponto  
14 de murcha permanente. Setas indicam o início e final de uma safra; Área hachurada representa o período em que  
15 se utilizou a irrigação.

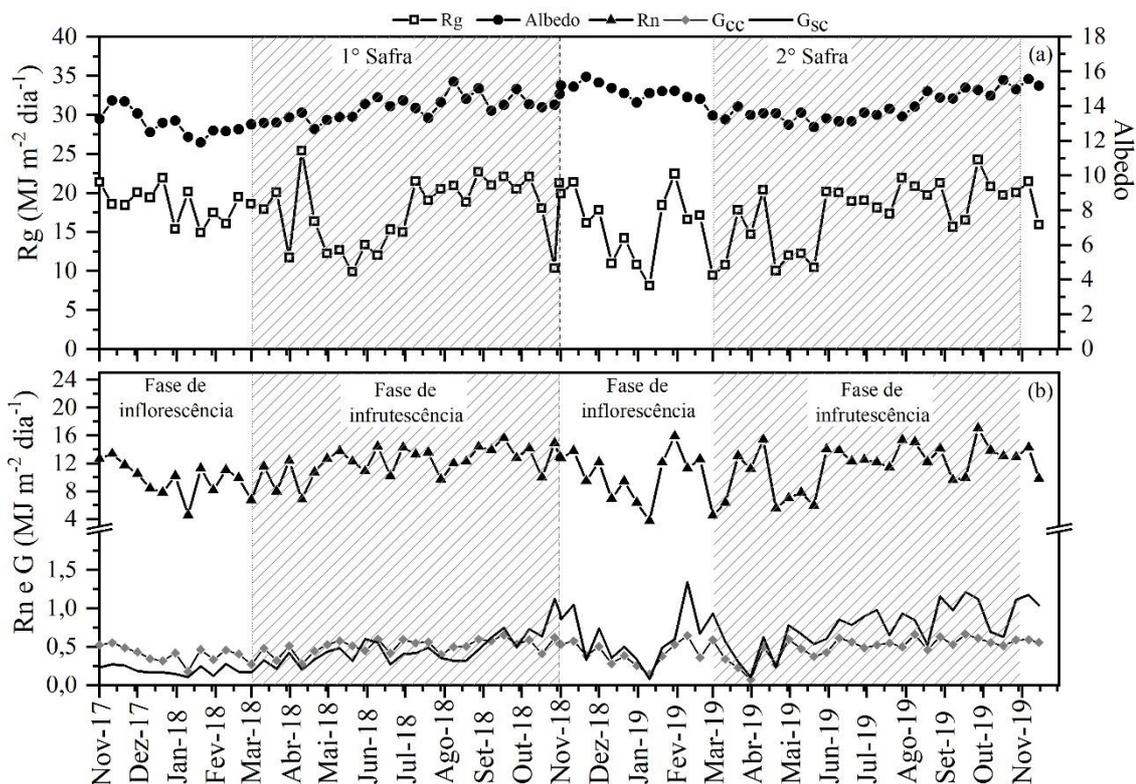
16 A variabilidade das variáveis meteorológicas de temperatura do ar (Tar) e umidade  
17 relativa (UR) (figura 3a), bem como do conteúdo volumétrico de água no solo ( $\theta_{us}$ ) e chuva  
18 (figura 3b) durante o experimento também são apresentadas na figura 3. A temperatura média  
19 do ar foi ligeiramente superior durante a primeira safra (25,88 °C), quando comparado a  
20 segunda safra (25,72 °C), com máxima de 36,47 °C e mínima de 20,27 °C, registradas nos  
21 meses de outubro e janeiro, respectivamente. Assim como a Tar, a umidade relativa demonstrou

1 pequena variação média entre a primeira e a segunda safra com valores de 88,68% e 89,37%,  
2 respectivamente.

3 A figura 3b demonstra a variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo, da  
4 chuva e o período que utilizou-se a irrigação, onde verifica-se que entre os meses de dezembro  
5 e julho em ambas as safras, o solo se manteve com boas condições hídricas, em função desse  
6 período ter concentrado 88,02% dos 2.222,41 mm de chuva ocorridos na primeira safra e  
7 87,72% dos 2.805,80 mm registrados na segunda safra. Tal fato proporcionou que na maior  
8 parte do experimento o conteúdo volumétrico de água no solo se mantivesse acima de 0,306 m<sup>3</sup>  
9 m<sup>-3</sup> que corresponde ao limite de água facilmente disponível – AFD, com nível médio de  
10 capacidade total de água no solo acima dos 50% nas duas safras.

11 Entre os meses de julho e novembro, quando se concentra em média apenas 12,13% do  
12 total de chuvas na região, se faz necessário a utilização da irrigação para prevenir danos que  
13 possam ser causados pelo déficit hídrico. Em função disso realizou-se durante a primeira safra  
14 101 irrigações e 77 irrigações na segunda safra. Observa-se que apesar da utilização da irrigação  
15 durante o período menos chuvoso do ano, o conteúdo volumétrico de água no solo ficou abaixo  
16 da AFD, demonstrando a subestimativa da lâmina de irrigação aplicada para a demanda hídrica  
17 do açaizeiro.

18 Na fase de inflorescência os valores médios da radiação global (Rg) e do saldo de  
19 radiação (Rn) foram, respectivamente, de 16,83 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (figura 4a) e 11,77 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>  
20 (figura 4b) durante a primeira safra e de 17,56 e 11,74 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para a segunda safra com  
21 máximo de 25,42 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e mínimo de 4,74 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para a Rg, já o valor máximo do  
22 Rn foi de 17,73 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e a mínima de 0,10 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.



**Figura 4** – Variação diária da radiação global ( $R_g$ ), albedo, saldo de radiação ( $R_n$ ) e dos fluxos de calor no solo com ( $G_{cc}$ ) e sem correção ( $G_{sc}$ ) em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA. Área hachurada representa a fase de infrutescência.

Na fase subsequente (fase de infrutescência) houve uma elevação na média do saldo de radiação para ambos os anos, em consequência do aumento dos valores de radiação global, uma vez que a redução da incidência de chuvas (principalmente entre agosto e outubro) culminou no aumento da radiação direta em função de mais dias de céu claro. Tanto a  $R_g$  quanto o  $R_n$  se mostraram superiores aos valores obtidos durante a fase de inflorescência, apresentando elevação percentual de 9,48% e 12,05% na primeira safra e de 16,20% na segunda safra, para o  $R_g$  e  $R_n$ , respectivamente.

A variabilidade média do albedo diário ao longo do ciclo reprodutivo do açaizeiro apresentou flutuações no decorrer do experimento, como se pode observar na figura 4a. Em termos de valor médio diário para todo o ciclo da cultura em ambos os anos, registrou-se um albedo de 13,89%, atingindo valores mínimos e máximos durante a fase de inflorescência e infrutescência, respectivamente. O valor médio do albedo nos estádios de desenvolvimento do açaizeiro foi de 14,18% na floração, 13,92% na pré-floração, 13,46% no estágio de fruto verde, 14,40% no estágio de fruto preto e 14,52% na maturação. O índice de área foliar obtido para a primeira e segunda safra foram de 2,02 e 2,12, respectivamente. A superioridade no IAF, da segunda safra, contribuiu para que o conteúdo volumétrico de água no solo sofresse menor

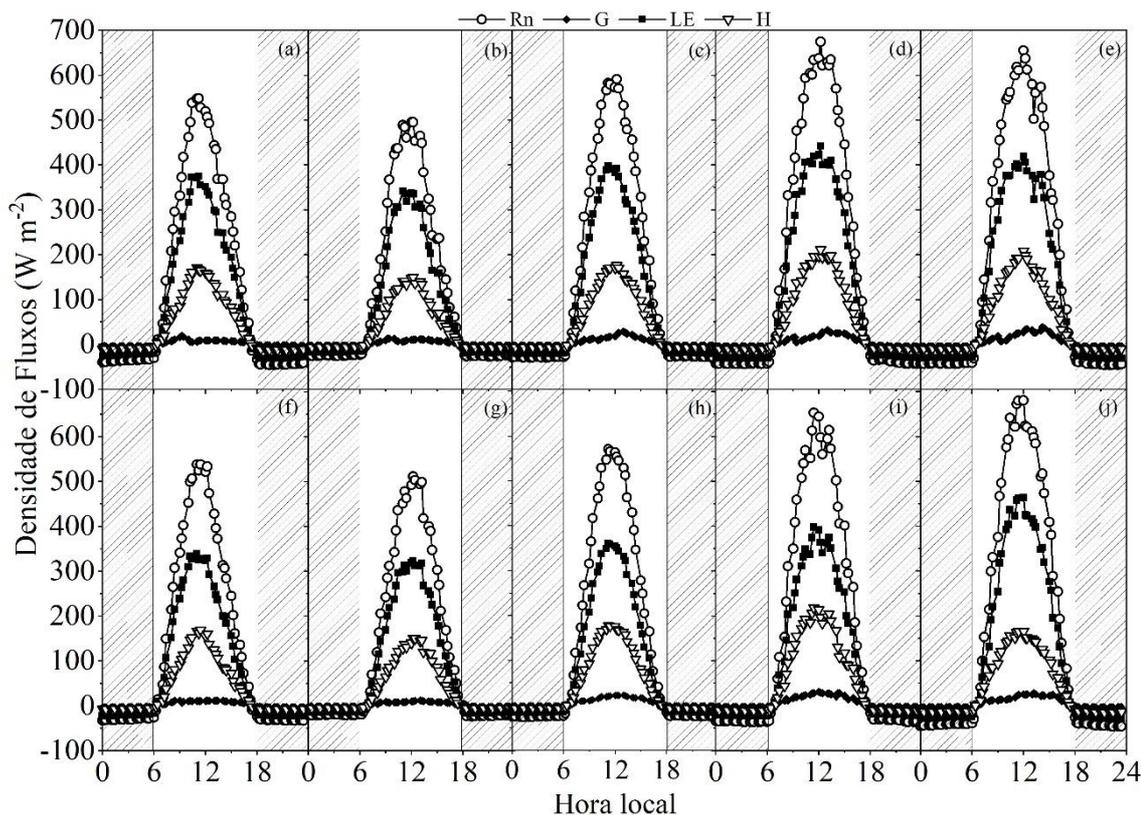
1 influência da radiação direta quando comparado à safra anterior, acarretando em menor perda  
2 de água por evaporação.

3 A Figura 4b demonstra a variabilidade do fluxo de calor no solo sem correção ( $G_{sc}$ ) e  
4 com correção ( $G_{cc}$ ) ao longo do ciclo reprodutivo do açazeiro. Verifica-se que em ambas as  
5 safras os valores de  $G_{sc}$  apresentaram maior variabilidade, com amplitudes instantâneas dos  
6 dados chegando a ser 54,47% maior que a amplitude observada no  $G_{cc}$ .

7 Durante a fase de inflorescência, verificou-se que o  $G_{cc}$  médio foi de  $0,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ,  
8 sendo superior ao  $G_{sc}$  ( $0,22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) na primeira safra, enquanto que na segunda safra a  
9 média do  $G_{cc}$  foi de  $0,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , apresentando-se inferior quando comparado ao  $G_{sc}$  ( $0,58$   
10  $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ). Já durante a fase de infrutescência o  $G_{cc}$  foi de  $0,60$  e  $0,58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e o  $G_{sc}$   
11 foi de  $0,50$  e  $0,78 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  na primeira e segunda safras, respectivamente.

12 Os resultados obtidos demonstram a importância de se calcular o calor armazenado na  
13 camada acima das placas de fluxo de calor no solo, pois verifica-se nesse caso um padrão atípico  
14 do  $G_{sc}$  em relação as condições climáticas durante as fases de inflorescência e infrutescência  
15 em ambas as safras, pois ao comparar o total de chuva ocorrido nas duas fases verifica-se que  
16 na segunda safra ocorreu um aumento de 12,91% (inflorescência) e 24,31% (infrutescência) no  
17 total de chuva, o que acarreta o aumento do teor de umidade no solo, propiciando menor  
18 variabilidade na temperatura do solo e conseqüentemente, menor é a energia disponível para o  
19 seu aquecimento (SANTOS et al., 2010). Mudanças significativas entre  $G_{cc}$  e  $G_{sc}$  foram  
20 verificadas no pomar de mangueiras por Borges et al. (2008) ao observarem valores de partição  
21 de energia de 7,46 % para  $G_{cc}$  e de 1,42% para o  $G_{sc}$ .

22 As variações horárias do saldo de radiação e dos fluxos de calor são apresentadas na  
23 figura 5. Observa-se que durante o período noturno todos os componentes do balanço de energia  
24 são negativos ( $LE < H < G$ ), mas à medida que surgem os primeiros raios solares o  $R_n$  começa  
25 a se elevar, passando a positivo em média a partir das 6h40min nos estádios de maturação e  
26 pré-floração e a partir das 7h00min nos estádios de floração, fruto verde e fruto preto.



1 **Figura 5** – Variabilidade média horária dos componentes do balanço energético no período diário durante a safra  
 2 1 (a) e safra 2 (f) a (j) em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA. Rn:  
 3 Saldo de radiação; G: fluxo de calor no solo; LE: Fluxo de calor latente; H: Fluxo de calor sensível. (a) e (f) Pré-  
 4 floração; (b) e (g) Floração; (c) e (h) Fruto verde; (d) e (i) Fruto preto; (e) e (j) Maturação. Área hachurada  
 5 representa o período noturno.  
 6

7 O saldo de radiação atinge valores máximos em torno das 12h00min, com picos  
 8 instantâneos de até  $900 \text{ W m}^{-2}$  para os diferentes estádios de desenvolvimento. Observou-se nos  
 9 estádios de fruto preto e maturação em ambas as safras valores médios do Rn próximos dos  $700$   
 10  $\text{W m}^{-2}$ , enquanto que nos estádios de pré-floração, floração e fruto verde a média foi próxima  
 11 de  $550 \text{ W m}^{-2}$  (Figura 5).

12 À medida que o açaizeiro se desenvolveu, ocorreu uma diferença de 14,77% no fluxo  
 13 de calor latente entre as fases de inflorescência e de infrutescência, onde se verificou picos  
 14 instantâneos de LE na primeira e segunda safras, respectivamente, atingindo os 597,27 e 594,29  
 15  $\text{W m}^{-2}$  durante o estágio de pré-floração, 689,63 e 645,99  $\text{W m}^{-2}$  na floração, 648,16 e 676,81  
 16  $\text{W m}^{-2}$  no estágio de fruto verde, 603,47 e 618,06  $\text{W m}^{-2}$  no estágio de fruto preto e 542,38 e  
 17 581,69  $\text{W m}^{-2}$  na maturação.

18 O fluxo de calor sensível - H, que culmina na energia utilizada para o aquecimento do  
 19 ar, apresentou valores energéticos menores que o LE, com máximos de energia de 276,58 e  
 20 349,76  $\text{W m}^{-2}$  na pré-floração; 321,53 e 357,33  $\text{W m}^{-2}$  na floração; 319,12 e 343,44  $\text{W m}^{-2}$  no  
 21 estágio de fruto verde; 295,01 e 306,89  $\text{W m}^{-2}$  no estágio de fruto preto; e 367,32 e 304,96  $\text{W}$   
 22  $\text{m}^{-2}$  na maturação, para a 1ª e 2ª safras de modo consequente. Já para o fluxo de calor no solo

1 a energia máxima utilizada atingiu os 42,15 e 42,70 W m<sup>-2</sup> na pré-floração, 49,45 e 47,08 W m<sup>-2</sup>  
 2 na floração, 48,13 e 47,25 W m<sup>-2</sup> no estágio de fruto verde, 49,98 e 47,74 W m<sup>-2</sup> no estágio  
 3 de fruto preto e na maturação chegou aos 52,18 e 48,54 W m<sup>-2</sup>.

4 Verifica-se ao longo do experimento que a maior parte da energia disponível no sistema  
 5 é particionada em fluxo de calor latente (tabela 5), que é a energia utilizada na  
 6 evapotranspiração, apresentando maiores percentuais (LE/Rn) durante a fase de inflorescência  
 7 que apresentou média de 67 e 68% na primeira e segunda safras, respectivamente (tabela 5). O  
 8 maior particionamento em LE nos estádios de floração e fruto verde pode estar diretamente  
 9 associado a baixa resistência do dossel em transportar o vapor d'água (ORTEGA-FARIAS et  
 10 al., 2004; SOUZA et al., 2012), em função da boa disponibilidade hídrica do solo, uma vez que  
 11 o conteúdo volumétrico de água solo apresenta-se nesse período acima da faixa de água  
 12 facilmente disponível para as plantas (figura 3).

13 **Tabela 5** - Média diária dos componentes do balanço de energia e partição diurna em diferentes estádios  
 14 reprodutivos do açaizeiro em Capitão Poço – PA.

Estádios	1º Safra							
	Energia (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )					Partição de energia		
	Rn	LE	H	G	Sd	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
Pré-floração	10,28	6,94	3,09	0,26	-0,01	0,66	0,30	0,04
Floração	10,81	7,38	3,16	0,43	-0,01	0,68	0,29	0,03
Fruto verde	11,99	8,08	3,52	0,48	-0,03	0,67	0,29	0,04
Fruto preto	13,83	9,18	4,16	0,50	-0,01	0,65	0,31	0,04
Maturação	13,95	8,77	4,51	0,67	-0,02	0,63	0,32	0,05
Média	12,17	8,07	3,69	0,47	-0,016	0,66	0,30	0,04
Estádios	2º Safra							
	Energia (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )					Partição de energia		
	Rn	LE	H	G	Sd	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
Pré-floração	10,47	7,01	3,00	0,42	---	0,67	0,29	0,04
Floração	10,40	7,17	2,81	0,42	---	0,69	0,27	0,04
Fruto verde	11,93	8,11	3,34	0,48	---	0,68	0,28	0,04
Fruto preto	13,73	9,20	3,98	0,55	---	0,67	0,29	0,04
Maturação	14,30	9,35	4,19	0,76	---	0,65	0,29	0,05
Média	12,17	8,17	3,46	0,53	---	0,67	0,28	0,04

15

1 Durante a fase de infrutescência, correspondente ao período menos chuvoso, os valores  
2 de energia particionados para o LE continuaram superiores aos fluxos de calor sensível (H e  
3 G), mas com percentual reduzido em 4,60% na primeira safra e 2,97% na segunda safra, quando  
4 comparado a fase de inflorescência, com menor consumo no estágio de maturação.

5 A partição de energia utilizada para H apresenta padrão inverso aos dos valores de LE  
6 durante os dois ciclos de experimento, com menores percentuais na fase de inflorescência e  
7 maiores na fase de infrutescência. No estágio de floração sob ótimas condições hídricas do solo,  
8 29% da energia disponível foi utilizada para o aquecimento diurno do ar na 1º safra e 28% na  
9 2º safra, enquanto que 32% (1º safra) e 29% (2º safra) foram no estágio de maturação os  
10 maiores percentuais utilizados pelo H.

11 Seguindo a mesma tendência do H, o fluxo de calor no solo (G) apresentou percentuais  
12 que aumentam tanto na primeira quanto na segunda safra com mínimos de 3% (floração) e 4%  
13 (pré-floração) e máximos de 5% no estágio de maturação, respectivamente. Um dos motivos  
14 para o aumento nos valores de G é que durante o estágio de fruto verde é realizado o controle  
15 de plantas daninhas, o que deixa o solo mais exposto e conseqüentemente eleva a incidência  
16 direta de radiação ao solo, provocando maior aquecimento.

17 Os resultados da partição dos fluxos de energia (LE e H) obtidos para o açazeiro, ao  
18 serem comparados com os resultados dos fluxos de energia da floresta nativa de Caxiuanã,  
19 obtidos por Silva (2014) durante quatro anos, demonstram redução de 4,35% no valor de LE e  
20 aumento de 48,26% no valor de H na área experimental de Capitão Poço, evidenciando que o  
21 avanço do cultivo do açazeiro para áreas de terra firme, modifica os padrões da partição de  
22 energia.

23 Os impactos causados pela mudança na cobertura vegetal modificam principalmente as  
24 condições climáticas locais, pois quando se compara, por exemplo, a temperatura média do ar  
25 de uma floresta (Costa et al., 2018) com a da área experimental, observa-se aumento de 0,7°C  
26 na temperatura do plantio de açaí. Esse aumento é influenciado pelas modificações das  
27 propriedades biofísicas, como as observadas por Moon et al. (2020), que verificaram reduções  
28 na resistência da superfície e aumentos na resistência aerodinâmica a medida que aumentava o  
29 índice de vegetação da floresta estadual de Morgan-Monroe (EUA).

30 Outra propriedade biofísica que é alterada com a mudança na cobertura vegetal é o  
31 albedo que se correlaciona diretamente com o aumento de temperatura e do déficit de pressão  
32 de vapor à medida que a cobertura vegetal é reduzida (CUNHA et al., 2012). A superioridade  
33 de 63% no índice de área foliar da floresta nativa em relação ao IAF do plantio de açazeiro  
34 (CARSWELL et al., 2002), acarreta o que de acordo com Forzieri et al (2020), é o

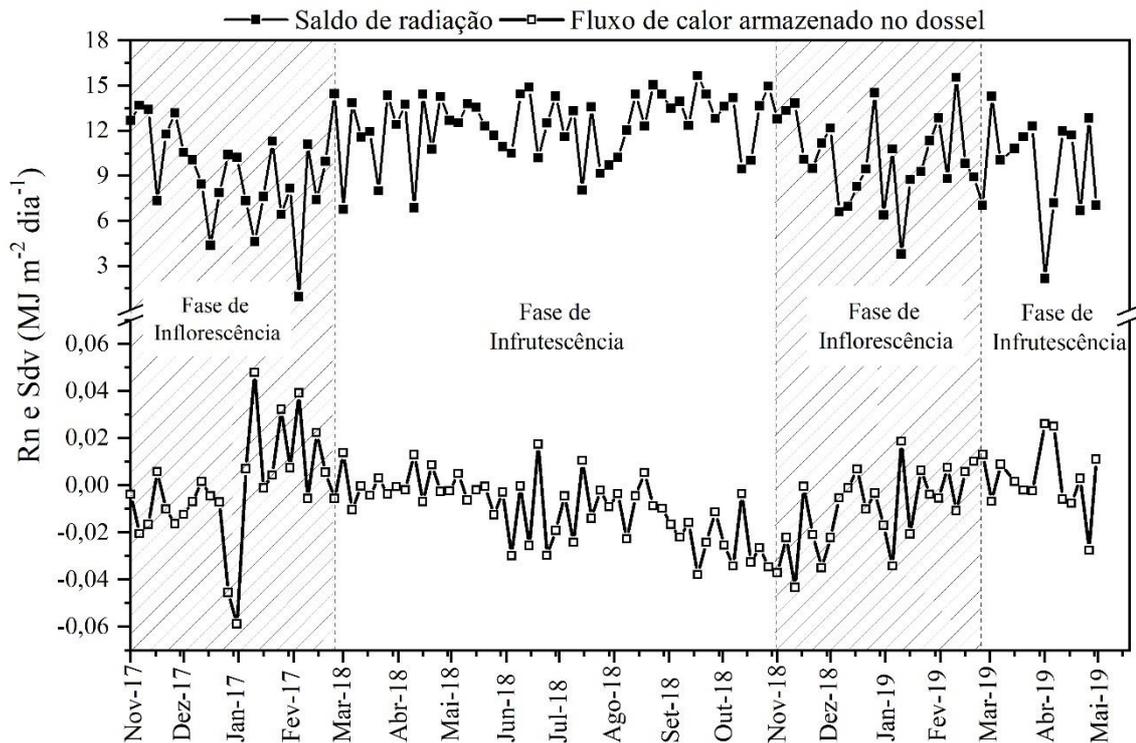
1 aprimoramento do consumo de energia para o LE, que demonstra correlação positiva à medida  
2 que se aumenta o IAF em uma unidade eleva-se em  $3,66 \text{ W m}^{-2}$  a utilização da energia para a  
3 evapotranspiração, enquanto que para o H a correlação com o IAF é negativa, onde o aumento  
4 em uma unidade ocasiona redução de  $3,26 \text{ W m}^{-2}$  para o aquecimento do ar.

5 Ao transformar os valores de LE diurnos em lâmina de água, verifica-se que o consumo  
6 total de água do açazeiro durante a primeira safra foi de 1130,20 mm, enquanto que na segunda  
7 safra o consumo total foi de 999,49 mm. A diferença encontrada de 11,57% entre as safras  
8 refletem a variabilidade da demanda atmosférica entre os anos que foi maior na primeira safra,  
9 influenciada pela redução de 20,79% no total de chuvas e por fatores meteorológicos que  
10 incrementam os valores de consumo hídrico como deficit de pressão de vapor e altas  
11 temperaturas (ZHAO; LIU, 2018).

12 A partir dos valores particionados dos fluxos de energia em função dos diferentes  
13 estádios fenológicos do açazeiro, observa-se a possibilidade de se criar estratégias sazonais  
14 que visem a redução nos valores dos fluxos para o aquecimento do ar e do solo, principalmente  
15 durante o período mais seco do ano, que é quando ocorre uma acentuada redução no conteúdo  
16 volumétrico de água no solo, mesmo fazendo uso da irrigação (figura 3b) em função da lâmina  
17 bruta utilizada, subestimando a demanda hídrica real.

18 Neste sentido a quantificação e reposição exata da água utilizada pela cultura, faz com  
19 que o fluxo de calor latente utilize a maior parte da energia disponível. Este suprimento hídrico  
20 adequado atrelado a utilização de folhas senescidas e cachos secos do próprio açazeiro são  
21 estratégias indispensáveis para evitar que a água disponível no solo fique abaixo do limite de  
22 água facilmente disponível, fazendo com que a planta feche os estômatos, reduzindo a  
23 transpiração e conseqüentemente a evapotranspiração, acarretando que a energia que antes  
24 estava disponível para LE seja utilizada pelo H e/ou G.

25 A variabilidade diária do fluxo de calor armazenado pelo dossel (S<sub>dv</sub>) (sensível +  
26 latente) do açazeiro obtido entre os meses de setembro de 2017 e abril de 2019 é apresentado  
27 na figura 6, onde verifica-se que quanto maior era o saldo de radiação menor era a quantidade  
28 de calor armazenado pelo dossel, em função da perda do calor do dossel para a atmosfera, a  
29 partir da grande quantidade de vapor de água armazenada em seu interior, acarretando na  
30 elevada amplitude de  $-0,15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  nos valores de calor latente quando comparado ao calor  
31 sensível que apresentou amplitude de  $0,004 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , evidenciando variabilidade contrária  
32 ao R<sub>n</sub>.



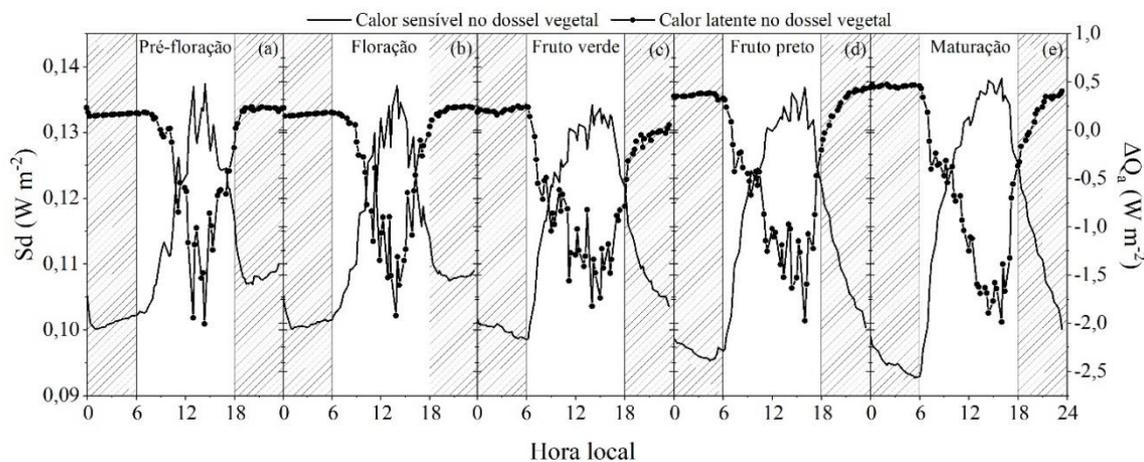
1  
2 **Figura 6** – Densidade do fluxo diário de calor armazenado no dossel (Sdv) e do saldo de radiação (Rn) em  
3 diferentes estádios fenológicos do açazeiro irrigado em Capitão Poço – PA. Área hachurada representa o período  
4 da fase de inflorescência do açazeiro.

5 Durante a fase de inflorescência os valores de calor armazenado no dossel atingiram o  
6 máximo e mínimo de 0,05 e -0,07 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente, com média para o período de  
7 -0,01 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, já durante a infrutescência a média de calor foi de -0,01 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> com  
8 máximo de 0,03 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e mínimo de -0,08 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Os valores de fluxo de calor  
9 armazenado pelo dossel demonstram-se relativamente baixos, representando uma pequena  
10 porcentagem da energia disponível, correspondente a 0,016% do saldo de radiação.

11 Ao avaliar o fluxo de calor armazenado no dossel do açazeiro por estádios, verifica-se  
12 que com exceção do estágio de floração que apresentou média positiva para o valor de fluxo de  
13 calor, todos os demais estádios apresentaram média negativa. Observa-se que o valor médio  
14 positivo do fluxo de calor no dossel durante o estágio de floração, está completamente  
15 correlacionado ao período de maior precipitação (figura 3), que propicia baixa demanda  
16 atmosférica elevando a quantidade de vapor de água presente na atmosfera ao ponto de ser  
17 maior que a do interior do dossel, fazendo com que o dossel receba calor da atmosfera para  
18 utilizar nos seus processos físico-químicos.

19 As variações horárias dos fluxos de calor latente e sensível armazenados no dossel do  
20 açazeiro em diferentes estádios fenológicos estão presentes na figura 7, onde verifica-se que o  
21 fluxo de calor sensível armazenado pelo açazeiro segue o mesmo padrão de variação do saldo  
22 de radiação (figura 5), que se apresenta com valores mínimos durante o período noturno e

1 máximo após as 12h (Figura 7), diferente do fluxo de calor latente armazenado no dossel que  
2 apresenta o padrão contrário ao Rn, com valores máximos e mínimos durante o período diurno  
3 e noturno, respectivamente.



4  
5 **Figura 7** – Variabilidade média horária dos fluxos de calor sensível (Sd) e latente ( $\Delta Q_a$ ) armazenados dentro do  
6 dossel do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA. (a) Pré-floração; (b) Floração; (c) Fruto verde; (d) Fruto preto;  
7 (e) Maturação. Área hachurada representa o período noturno.

8 Na fase de inflorescência, durante as primeiras horas do dia o fluxo de calor sensível  
9 armazenado no dossel apresentou-se com pouca variação até às 8h20min no estágio de pré-  
10 floração e até às 9h20min no estágio de floração, com média de  $0,10 \text{ W m}^{-2}$  para ambos os  
11 estádios (figura 7), a partir dos horários mencionados o H armazenado no dossel começou a  
12 sofrer variações atingindo valor máximo de  $0,14 \text{ W m}^{-2}$  às 14h40min (pré-floração) e 14h00min  
13 (floração), onde em seguida começa a reduzir seus valores, chegando próximo de se tornar  
14 constante em  $0,11 \text{ W m}^{-2}$ .

15 Nos estádios da fase de infrutescência, o H armazenado no dossel apresentou-se com os  
16 mesmos padrões e valores da fase anterior, mas com pouca variação até as 7h00min para todos  
17 os estádios (figura 7) e com valores máximos ocorrendo as 16h00min em torno dos  $0,14 \text{ W m}^{-2}$   
18 e posteriormente a isso ocorreu redução gradativa, porém não atingindo um valor de  
19 constância como nos estádios de inflorescência.

20 O fluxo de calor latente armazenado no dossel durante os estádios de pré-floração e  
21 floração apresentam valores máximos no período noturno de  $0,23 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto que os  
22 estádios da fase de infrutescência apresentaram valores de  $0,25 \text{ W m}^{-2}$  no estágio de fruto verde,  
23  $0,38 \text{ W m}^{-2}$  no estágio de fruto preto e  $0,47 \text{ W m}^{-2}$  no estágio de maturação. Verifica-se aumento  
24 gradativo do LE armazenado no dossel à medida que o açaizeiro evolui fenologicamente, o que  
25 pode ser explicado pelo aumento da demanda atmosférica ao longo do ano, haja visto que a fase  
26 de inflorescência ocorre no período mais chuvoso do ano o que acarreta em elevada quantidade

1 de vapor de água na atmosfera, enquanto que a infrutescência ocorre no período menos chuvoso  
2 que propicia menor quantidade de vapor na atmosfera, fazendo com que as trocas de calor nesse  
3 período sejam superiores a fase de inflorescência.

4 Durante o período diurno verifica-se perda de calor armazenado no dossel para  
5 atmosfera na forma de LE nos estádio de pré-floração e floração com média de  $-0,76$  e  $-0,82$  W  
6  $m^{-2}$ , respectivamente, enquanto que no estádio de fruto verde a média foi de  $-0,83$  W  $m^{-2}$ , no  
7 estádio de fruto preto foi de  $-0,86$  W  $m^{-2}$  e no estádio de maturação a média ficou em  $-0,91$  W  
8  $m^{-2}$ . A fase de inflorescência acaba perdendo maior quantidade de calor armazenado no dossel  
9 para a atmosfera quando comparado com a fase de infrutescência durante o período diurno em  
10 detrimento da temperatura do ar ser mais amena e da umidade do ar ser elevada próximo da  
11 saturação no interior do plantio.

12 Ao contrastar a variabilidade padrão do fluxo de calor no solo horário com o fluxo de  
13 calor latente armazenado no dossel, verifica-se que com a ocorrência dos primeiros raios  
14 solares, o solo se aquece primeiro e posteriormente o ar dentro do dossel começa a se aquecer,  
15 em função disso os valores apresentam uma constância mais prolongada nas primeiras horas do  
16 dia mesmo com o aumento da energia disponível para utilização nos processos físico-químicos  
17 no interior dossel.

### 18 **3.4 CONCLUSÃO**

19 A partição da energia disponível apresentou variação máxima de 6% ao longo do ciclo  
20 para a fração disponível de LE/Rn, variando de 63% no estádio de maturação até um máximo  
21 de 69% no estádio de floração, enquanto que a fração H/Rn apresentou 3% de variação nos  
22 mesmos estádios fenológicos com média de 29%. Já fração de energia destinada a aquecer o  
23 solo apresentou baixa variação, representando em média 4% da energia ao longo do ciclo.

24 O efeito do calor armazenado no dossel do açazeiro irrigado no nordeste paraense é  
25 irrelevante quando comparado com os outros componentes do balanço de energia por  
26 representar menos de 0,2% da energia disponível.

27 Os resultados encontrados na partição dos fluxos de energia frente ao avanço dos açazais  
28 para áreas de terra firme, evidenciam alterações importantes, principalmente relacionadas ao  
29 aumento de temperatura, fazendo-se necessários estudos que monitorem no mesmo período o  
30 ecossistema agrícola (plantio de açazeiro) e de floresta.

31

## 1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2 ALBERTO, M. C. R.; WASSMANNA, R.; HIRANO, T.; MIYATAK, A.; HATANO, R.;  
3 KUMAR, A.; PADRE, A.; AMANTE, M. Comparisons of energy balance and  
4 evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. **Agricultural**  
5 **Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1417–1430, 2011.  
6 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.011>
- 7 ANGELINI, L. P.; SILVA, P. C. B. S.; FAUSTO, M. A. F.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M.  
8 S. Balanço de Energia nas Condições de Mudanças de Uso do Solo na Região Sul do Estado de  
9 Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 353-363, 2017.  
10 <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230003>
- 11 BILLESBACH, D. P.; ARKEBAUER, T. J. First long-term, direct measurements of  
12 evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agricultural and**  
13 **Forest Meteorology**, v. 156, p. 104-110, 2012. [https://doi.org/10.1016/j.agrformet.](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001)  
14 [2012.01.001](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001)
- 15 BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; MOURA, M.  
16 S. B. ; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta  
17 no balanço de energia em pomar de mangueiras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**  
18 **e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 393–399, 2008. [https://doi.org/10.1590/s1415-](https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400010)  
19 [43662008000400010](https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400010)
- 20 BROTZGE, J. A.; CRAWFORD, K. C. Examination of the Surface Energy Budget: A  
21 Comparison of Eddy Correlation and Bowen Ratio Measurement Systems. **J. Hydrometeorol.**,  
22 v. 4, p. 160–178, 2003. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)4<160:EOTSEB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)4<160:EOTSEB>2.0.CO;2)
- 23 CARSWELL, F. E.; COSTA, A. C. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIER, P.; COSTA, J.  
24 P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENTE, R. J.; GRACE, J.  
25 Seasonality in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O flux at an eastern Amazonian Rain Forest. **Journal of**  
26 **Geophysical Research – Atmospheres**, v. 107, p. 1-16, 2002.  
27 <https://doi.org/10.1029/2000JD000284>
- 28 CASAROLI, D.; FAGAN, E. B.; SIMON, J.; MEDEIROS, S. P.; MANFRON, P. A.;  
29 DOURADO NETO, D.; LIER, Q. de J. van; MÜLLER, L.; MARTIN, T. N. Radiação solar e

- 1 aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão. **Rev. da FZVA**. Uruguaiiana, v.14, n.2,  
2 p. 102-120. Ano 2007.
- 3 COSTA, ACL; SILVA JUNIOR, JA; OLIVEIRA, AAR; ROWLAND, L; MEIR, P;  
4 RODRIGUESI, HJB; COSTA, CLR. Variabilidade média do perfil da temperatura e da  
5 umidade relativa do ar em uma floresta tropical chuvosa na Amazônia brasileira. **Bol. Mus.**  
6 **Para. Emílio Goeldi**. Cienc. Nat., Belém, v. 13, n. 2, p. 261-269, 2018
- 7 CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; OLIVEIRA, G. S. Impactos das mudanças de  
8 cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira**  
9 **de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 139–152, 2012. [https://doi.org/doi:10.1590/](https://doi.org/doi:10.1590/s0102-77862013000200003)  
10 [s0102-77862013000200003](https://doi.org/doi:10.1590/s0102-77862013000200003)
- 11 DEMOTES-MAINARD, S.; PÉRON, T.; COROT, A.; BERTHELOOT, J.; GOURRIEREC,  
12 J.L. et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. **Environmental**  
13 **and Experimental Botany**, v. 121, p. 4-21, 2016.  
14 <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.010>
- 15 FORZIERI, G; MIRALLES, D. G.; CIAIS, P.; ALKAMA, R.; RYU, Y.; et al. Increased control  
16 of vegetation on global terrestrial energy fluxes. **Nat. Clim. Chang.**, v. 10, p. 356-362, 2020.  
17 <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0717-0>
- 18 GARCIA. V. A.; BARBEDO, C. J. Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe*  
19 *edulis* Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil.  
20 **Hoehnea**, v. 43, p. 135-149, 2016. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>
- 21 GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for  
22 measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p.  
23 127-140, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0040-1>
- 24 GEBLER, S.; HENDRICKS FRANSSEN, H. J.; PÜTZ, T.; POST, H.; SCHMIDT, M.;  
25 VEREECKEN, H. Actual evapotranspiration and precipitation measured by lysimeters: A  
26 comparison with eddy covariance and tipping bucket. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 19, p. 2145–  
27 2161, 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2145-2015>
- 28 GONG, J.; SHURPALI, N. J.; KELLOMÄKI, S.; WANG, K.; ZHANG, C.; SALAM, M. M.  
29 A.; MARTIKAINEN, P. J.; IMUKOVA, K.; INGWERSEN, J.; HEVART, M.; et al.

1 Comparing different methods for determining forest evapotranspiration and its components at  
2 multiple temporal scales. **Agric. For. Meteorol.**, v. 13, p. 595–605, 2016.  
3 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.082>

4 GRAY, S. B.; BRADY, S. M. Plant developmental responses to climate change.  
5 **Developmental Biology**, v. 419, p. 64–77, 2016. [http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023)  
6 [07.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.ydbio.2016.07.023)

7 HEILMAN, J. L.; MCINNES, K. J.; SAVAGE, M. J.; GESH, R. W.; LASCANO, R. J. Soil  
8 and canopy energy balance in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**,  
9 Amsterdam, v. 71, p. 99-114, 1994. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90102-3)

10 HOMMA, A. K. O.; NOGUEIRA, O. L.; MENEZES, A. J. E. A. Açaí: novos desafios e  
11 tendências. **Amazônia: Ciência e desenvolvimento**, v. 1, n. 1, p. 7 - 23, 2006.

12 IRMAK, S.; KILIC, A.; CHATTERJEE, S. On the Equality Assumption of Latent and Sensible  
13 Heat Energy Transfer Coefficients of the Bowen Ratio Theory for Evapotranspiration  
14 Estimations: Another Look at the Potential Causes of Inequalities. **Climate**, v. 2, p. 181–205.  
15 2014. <https://doi.org/10.3390/cli2030181>

16 KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, H.; HIPPS, L. E.  
17 Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**,  
18 v. 103, n. 3, p. 249-264, 2000. doi:10.1016/s0168-1923(00)00131-3

19 LÓPEZ-OLIVARI, R.; ORTEGA-FARÍAS, S; POBLETE-ECHEVERRÍA, C. Partitioning of  
20 net radiation and evapotranspiration over a superintensive drip-irrigated olive orchard.  
21 **Irrigation Science**, v. 34, p. 17-31, 2016. [http://dx.doi.org/10.1007/ s00271-015-0484-2](http://dx.doi.org/10.1007/s00271-015-0484-2).

22 MCCAUGHEY, J. H. Energy balance storage terms in a nature mixed forest at Petawawa,  
23 Ontario – a case study. **Boundary Layer Meteorological**, v.31, n.1, p.89-101, 1985.  
24 <https://doi.org/10.1007/BF00120036>

25 MOON, M.; LI, D.; LIAO, W.; RIGDEN, A. J.; FRIEDL, M. A. Modification of surface energy  
26 balance during springtime: The relative importance of biophysical and meteorological changes.  
27 **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 284, 2020.  
28 <https://doi.org/doi:10.1016/j.agrformet.2020.107905>

- 1 NIAGHI, A. R.; JIA, X. New Approach to Improve the Soil Water Balance Method for  
2 Evapotranspiration Estimation. **Water**, v. 11, n. 12, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11122478>
- 3 NOGUEIRA, A. K. M.; SANTANA, A. C.; GARCIA, W. S. A dinâmica do mercado de açaí  
4 fruto no Estado do Pará: de 1994 a 2009. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 60, n.3, p. 324-331, 2013.  
5 <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2013000300004>
- 6 OLIVEIRA, F. J.; FARIAS, P. R.; SILVA, A. G.; RODRIGUES, K. C. Distribuição espacial  
7 da leprose dos citros na Amazônia Oriental. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, p. 56-68,  
8 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 9 ORTEGA-FARIAS, S. O.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of  
10 the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, v.  
11 23, p. 1-9, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00271-003-0087-1>
- 12 PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of  
13 Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**,  
14 Amsterdam, v. 97, n. 3, p. 141-50, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5)
- 15 RANA, G; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field  
16 under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Kidlington, v.13,  
17 p.125- 153, 2000. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- 18 ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological**  
19 **environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.
- 20 SANTOS, T. V.; FONTANA, D. C.; ALVES, R. C. M. Avaliação de fluxos de calor e  
21 evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER. **Pesquisa**  
22 **Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 488-496, 2010. [https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500008)  
23 [204X2010000500008](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500008).
- 24 SILVA, F. M. Evapotranspiração de uma floresta de terra firme no oeste da Amazônia.  
25 **Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia, 82  
26 f. 2014.
- 27 SILVA, L. D. B.; LYRA, G. B.; SILVA, J. B. G.; PINHO, C. F.; NASCENTES, A. L.;  
28 ALMEIDA, G. V.; FOLEGATTI, M. V. Desempenho do método do balanço de energia - razão

1 de bowen na estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p.  
2 516-529, 2016. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p516-529>

3 SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; BOTELHO, M. D. N.; SOUSA, A. M.  
4 L.; SOUZA, E. B.; FARIAS, J. R. B. Impacts of soyabean expansion on the Amazon energy  
5 balance: a case study. **Experimental Agriculture**, v. 47, p. 553–567, 2011.  
6 <https://doi.org/doi:10.1017/s0014479711000391>

7 SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Impactos do avanço da soja no balanço  
8 de radiação no leste da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 43 n. 2, p. 169-178, 2012.  
9 <https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200006>.

10 SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B. Diurnal Energy  
11 Balance in a Mango Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Revista Brasileira de**  
12 **Meteorologia**, v. 33, p. 537-546, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333012>

13 TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W. G. M. Five methods to interpret field  
14 measurements of energy fluxes over a micro-splinkerirrigated mango orchard. **Irrigation**  
15 **Science**, v.30, p.13-28, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>

16 TIE, Q.; HU, H.; TIAN, F.; HOLBROOK, N. M. Comparing different methods for determining  
17 forest evapotranspiration and its components at multiple temporal scales. **Science of The Total**  
18 **Environment**, v. 633, p. 12–29, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.082>

19 VANOMARK, G. M. M. S.; SOBRINHO, J. E.; BEZERRA, J. R. C.; SANTOS, C. A. C.;  
20 AZEVEDO, P. V.; SILVA, S. T. A.; BEZERRA, B. G. Energy balance partitioning and  
21 evapotranspiration from irrigated Muskmelon under Semi-Arid Conditions. **Bragantia**,  
22 Campinas, v. 77, n. 1, p. 168-180, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2016453>

23 WANG, X.; HUO, Z.; SHUKLA, M. K.; WANG, X.; GUO, P.; XU, X.; HUANG, G. Energy  
24 fluxes and evapotranspiration over irrigated maize field in an arid area with shallow  
25 groundwater. **Agricultural Water Management**, v. 228, 2019.  
26 <https://doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2019.105922>

27 WEBLER, A. D.; GOMES, J. B.; AGUIAR, R. G.; ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR L. J. G.  
28 Mudanças no uso da terra e o particionamento de energia no sudoeste da Amazônia. **Revista**

- 1 **Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 868–876, 2013.  
2 <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000800011>.
- 3 YOKOMIZO, G. K.; QUEIROZ, J. A. L.; CAVALCANTE, E. S.; PINHEIRO, I. N.; SILVA,  
4 P. A. R.; MOCHIUTTI, S. Caracterização Fenotípica e Genotípica de Progenies de *Euterpe*  
5 *oleracea* coletados no Afuá-Pará nas condições do Amapá. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 205–213,  
6 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000200004>
- 7 ZHAO, X.; LIU, Y. Variability of surface heat fluxes and its driving forces at different time  
8 scales over a large ephemeral lake in China. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 123, n. 10, p. 4939–  
9 4957, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JD027437>.

#### 1 4. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DOS COEFICIENTES DE 2 CULTIVO SIMPLES E DUAL DO AÇAIZEIRO NA AMAZÔNIA ORIENTAL 3 (BRASIL) USANDO O SISTEMA DE RAZÃO BOWEN

4 \*Artigo aceito para publicação na revista Irrigation Science em 13 de novembro de 2020.

#### 5 RESUMO

6 O açaizeiro é uma frutífera de origem amazônica encontrada em áreas alagadas, que nos últimos  
7 anos tem ganhado expressiva força no mercado nacional e internacional devido seu potencial  
8 agrônômico, nutricional e econômico. Entretanto o seu cultivo em escala comercial em áreas  
9 de terra firme ainda é baseado no empirismo, devido à escassez de informações técnico-  
10 científicas para a cultura durante sua fase reprodutiva, onde se destaca, por exemplo, a ausência  
11 de pesquisas sobre o consumo hídrico. Portanto o objetivo do trabalho foi determinar o consumo  
12 hídrico do açaizeiro (evapotranspiração -  $ET_c$ ), coeficientes de cultivo simples ( $K_c$ ) e dual ( $K_{cb}$   
13 +  $K_e$ ) na Amazônia Oriental, Brasil, usando o sistema de razão de Bowen. Para tal, uma torre  
14 micrometeorológica foi instalada e instrumentada no centro da área experimental para o  
15 monitoramento de variáveis meteorológicas. O monitoramento do desenvolvimento fenológico  
16 do açaizeiro foi realizado semanalmente durante duas safras. A evaporação de água no solo foi  
17 determinada em escala diária usando microlisímetros de pesagem. Os valores de  $K_e$  e  $K_{cb}$   
18 foram determinados pela razão entre evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), evaporação da  
19 superfície do solo e da transpiração, respectivamente. A  $ET_c$  foi obtida pelo método de razão  
20 de Bowen e a  $ET_o$  pelo método de Penman-Monteith utilizando-se os dados coletados numa  
21 estação automática localizada próxima à área experimental. O consumo hídrico total do  
22 açaizeiro foi em média de 1164,86 mm, sendo a média diária para o ciclo de 3,49 mm dia<sup>-1</sup>. Os  
23 valores médios do  $K_c$ ,  $K_e$  e  $K_{cb}$  do açaizeiro foram, respectivamente, de 1,08; 0,21 e 0,84,  
24 respectivamente. Os resultados da pesquisa mostram a importância do correto manejo da  
25 irrigação no açaizeiro, pois permitem projetar de forma adequada protocolos de gerenciamento  
26 de água mais adequados as necessidades hídricas da cultura, aumentando o uso eficiente da  
27 água pela cultura o que conseqüentemente acarreta em ganhos econômicos para o produtor.

28 **Palavra-chave:** *Euterpe Oleracea*, Consumo Hídrico, Calor Latente.

1 **ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION AND SINGLE AND DUAL CROP**  
2 **COEFFICIENTS OF ACAI PALM IN THE EASTERN AMAZON (BRAZIL) USING**  
3 **THE BOWEN RATIO SYSTEM**

4  
5 **ABSTRACT**

6 The acai palm (*Euterpe oleracea* Mart.) is a fruit from the Amazon that is originally found in  
7 flooded areas. Over recent years, its marketability has gained significant interest in Brazil and  
8 abroad because of its agronomic, nutritional and economic potential. However, there is a lack  
9 of technical-scientific information about crop water requirements for irrigation management  
10 during the reproductive phase of acai palm. Therefore, the aim of this research was to estimate  
11 the water requirements (crop evapotranspiration ( $ET_c$ ), single ( $K_c$ ) and dual ( $K_{cb} + K_e$ ) crop  
12 coefficients) of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. A  
13 micrometeorological tower was installed in the center of an experimental area to monitor  $ET_c$   
14 and meteorological variables. Phenological development was monitored during two growing  
15 seasons. Soil water evaporation was determined on a daily scale using weighing  
16 microlysimeters.  $K_e$  and  $K_{cb}$  values were calculated by the ratio of soil surface evaporation  
17 and transpiration to reference evapotranspiration ( $ET_o$ ), respectively. Total water requirements  
18 of the acai palms were 1165 mm, with a daily average of 3.49 mm day<sup>-1</sup> for the growing season.  
19 The average values of  $K_c$ ,  $K_e$  and  $K_{cb}$  for the acai palm were 1.08; 0.21 and 0.84, respectively.  
20 The findings will assist the design of irrigation management protocols for acai trees that are  
21 better tailored to satisfy crop water requirements. This will allow improved water use  
22 efficiency, ensuring tree crop sustainability.

23 **Keywords:** *Euterpe Oleracea*, Water Consumption, Latent Heat.

## 1 4.1 INTRODUÇÃO

2 O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira encontrada ao longo do estuário  
3 amazônico, principalmente nos estados do Pará, Amapá e Maranhão (Nogueira et al. 2013) que  
4 apresenta grande importância socioeconômica para as famílias destas regiões em função de  
5 representar a principal fonte de alimento que é consumido diariamente, como também de renda  
6 através da comercialização do fruto (Nygren et al. 2006).

7 Nos últimos anos a comercialização do açaí se expandiu para o mercado nacional e  
8 internacional, passando a ser vendido em diversos estabelecimentos, com o intuito de atender  
9 novos mercados que envolvem consumidores de maior poder aquisitivo (Santana et al. 2007).  
10 Em função do aumento na comercialização do fruto, o sistema de produção extrativista do açaí  
11 não conseguiu suprir as demandas de mercado e por isso começou a ser cultivado em áreas de  
12 terra firme (Conforto e Contin 2009).

13 Entretanto, por ser uma palmeira e ter sua ocorrência natural em área de várzea, o  
14 açazeiro é muito exigente em água e de acordo com Souza e Jardim (2007) a disponibilidade  
15 de água no solo é fator importante que favorece a sobrevivência do açazeiro. Dessa forma, os  
16 produtores têm utilizado a tecnologia da irrigação para fazer o suprimento hídrico,  
17 principalmente nos locais onde o período de estiagem é prolongado (SouzaSOUZA et al. 2013),  
18 sendo, porém, adotado uma lâmina de irrigação empírica sem qualquer informação técnica  
19 sobre sua eficiência.

20 O manejo da irrigação deve ser feito pelos produtores para que haja um suprimento  
21 hídrico adequado que vise a produção agrícola de alto nível, fazendo-se necessário conhecer a  
22 demanda hídrica da cultura (evapotranspiração - ET), em seus diferentes estádios de  
23 desenvolvimento (Souza et al. 2013). O uso racional da água para fins de irrigação, bem como  
24 o correto dimensionamento dos sistemas de irrigação e o gerenciamento da água dependem,  
25 entre outros requisitos, do conhecimento da demanda precisa de água das culturas (Canales-Ide  
26 et al. 2019).

27 A evapotranspiração da cultura -  $ET_c$  é uma importante variável usada para calcular e  
28 monitorar o consumo hídrico em diferentes períodos, e que pode ser mensurada por diversas  
29 técnicas, como pela lisimetria (Peters et al. 2017; Xu et al. 2018; Silber et al. 2019), pela  
30 covariância de vórtices turbulentos (Ortega-Farias et al. 2010; Prueger et al. 2018), pelo balanço  
31 da água do solo (Abdelkhalik et al. 2019; Domínguez-Niño et al. 2020) e pelo balanço de  
32 energia pelo método da razão de Bowen (Souza et al. 2016; Chebbi et al. 2018).

1 O método micrometeorológico do balanço de energia baseado na razão de Bowen  
2 (BERB) é relativamente prático e confiável e tem sido amplamente utilizado para a  
3 determinação da  $ET_c$  (Silva et al. 2007, Dicken et al. 2013, Fun et al. 2015, Wijewardana et al.  
4 2019), apresentando diversas vantagens (Nizinski et al. 2014) em relação aos métodos de  
5 medida direta (lisímetro e eddy covariance), como a possibilidade de ser empregado com  
6 elevado grau de mobilidade, proporcionando medidas simples e contínuas sobre extensas áreas  
7 sem que haja alteração da superfície, fornece medidas em pequeno espaço de tempo, exige  
8 poucos parâmetros de entrada, além de ser menos oneroso (Hu et al. 2013).

9 Billesbach e Arkebauer. (2012) ao compararem os fluxos de calor sensível e latente  
10 determinados a partir BERB com os obtidos pelo método da covariância de vórtices turbulentos,  
11 verificaram valores muito próximos entre os métodos, o que demonstra a acurácia e  
12 confiabilidade do BERB (Gavilán e Berengena 2007), principalmente em períodos curtos, que  
13 de acordo com Dicken et al. (2013) os desvios de leituras dos instrumentos são mínimos. O  
14 BERB apresenta como desvantagem a exigência de leituras contínuas dos elementos climáticos  
15 essenciais na determinação da evapotranspiração (Silva et al. 2016) e limitações próximo do  
16 nascer e pôr do sol, devido à baixa variabilidade nos gradientes de temperatura e umidade do  
17 ar (Souza et al. 2018).

18 Esse método já foi utilizado em alguns estudos para culturas perenes como nos trabalhos  
19 de Teixeira e Bastiaanssen (2012) para cultura da manga em Petrolina-PE, de Consoli e Papa  
20 (2013) para um pomar de laranja em Sicília na Itália e de Souza et al. (2016) para um pomar de  
21 manga na região nordeste do Pará, cujos resultados da aplicação do método apresentaram-se  
22 satisfatórios para todos os estudos.

23 Em alguns estudos a  $ET_c$  obtida através do balanço de energia tem sido utilizada para  
24 definir a curva do coeficiente da cultura ( $K_c$ ) (Euser et al. 2014; Consoli et al. 2018, Niaghi et  
25 al. 2019). A grande utilização deste método é atribuída a sua praticidade e precisão (Silva et al.  
26 2007; Guo e Sun 2011), pois são requeridas apenas medições dos gradientes de temperatura e  
27 umidade do ar, saldo de radiação e fluxo de calor no solo para estimar a evapotranspiração real  
28 (Hou et al. 2010).

29 Allen et al. (1998) seguindo outros consideram que o  $K_c$  deve ser dividido em outros  
30 dois coeficientes devido apresentar contribuições independentes da evaporação do solo e da  
31 transpiração das plantas, os quais são o coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ) e o coeficiente  
32 de transpiração basal da cultura ( $K_{cb}$ ). Essa abordagem fornece uma análise do consumo  
33 hídrico de uma forma desacoplada, fornecendo ao produtor informações sobre a real  
34 necessidade da planta.

1 Pesquisas sobre a evapotranspiração de espécies perenes como fruteiras vem sendo  
2 desenvolvidas desde a década de 50 (Pereira 1957, Rogers et al. 1983, Rao 1989) e mais  
3 recentemente como os trabalhos de Hou et al. (2010) para a oliveira, Silva et al. (2011) para o  
4 coqueiro e Meijide et al. (2017) para a palma de óleo, assim como as pesquisas para  
5 determinação do Ke e do Kcb realizadas por Girona et al. (2011) na Espanha para a maçã, a de  
6 Paço et al. (2011) em Portugal para pêsego, a de Abrisqueta et al. (2013) na Espanha para o  
7 pessegueiro e a de Taylor et al. (2015) para o citros na África do Sul. Entretanto, para espécies  
8 de origem amazônica como o açazeiro, os estudos sobre a demanda hídrica ao longo do seu  
9 ciclo reprodutivo ainda são inexistentes, em função da dificuldade de implantação de unidades  
10 experimentais e da carência de instrumentos agrometeorológicos.

11 Portanto, levando em consideração a falta de informações técnicas e científicas,  
12 juntamente com a necessidade de ferramentas de tomada de decisão para criar estratégias de  
13 manejo da irrigação, o objetivo deste trabalho é estimar  $ET_c$ , coeficientes de cultura simples  
14 ( $K_c$ ) e dual ( $K_e$  e  $K_{cb}$ ) usando o sistema de razão Bowen durante a fase reprodutiva do açazeiro  
15 irrigado na Amazônia Oriental, Brasil.

## 16 **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### 17 4.2.1 Descrição da área

18 O experimento foi realizado na região Nordeste do estado do Pará, durante duas safras  
19 do açazeiro 2017/2018 e 2018/2019 entre novembro e outubro. A área experimental ficou  
20 localizada nas dependências de uma fazenda de 100 ha (Fazenda Ornela) no município de  
21 Capitão Poço, nordeste Paraense, cujas coordenadas geográficas são 01°43'44,4"S latitude,  
22 47°06'39,3"W longitude e altitude de 71 m.

23 Na tabela 1 são apresentadas as propriedades físico-químicas do solo da área  
24 experimental, o qual foi classificado como latossolo amarelo distrófico, com textura franco-  
25 arenosa, com 14% de argila na camada de 0-20 cm, e de textura franco-argilo-arenosa na  
26 camada de 20-40, com 28% de argila. O clima local é caracterizado como Am, clima tropical,  
27 apresentando moderada estação seca com precipitação pluvial média anual de 2500 a 3000 mm,  
28 onde o trimestre mais seco do ano ocorre entre setembro e novembro (Oliveira et al. 2016).

1 **Tabela 1** - Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental.

Profundidade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> + Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>
		mg·dm <sup>-3</sup>			cmolc·dm <sup>-3</sup>	
0-20	4,1	45	65	0,90	1,30	0,20
20-40	4,8	51	10	0,50	0,90	0,50
Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila	Ds <sup>1</sup>	CC <sup>2</sup>	PMP <sup>3</sup>
	(kg·kg <sup>-1</sup> )			(g·cm <sup>-3</sup> )	(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	
0-20	792	68	140	1,43	0,37	0,23
20-40	633	87	280	1,68	0,32	0,21

2 <sup>1</sup>Densidade do solo, <sup>2</sup>Capacidade de campo, <sup>3</sup>Ponto de murcha permanente.

3 O plantio comercial de açazeiro utilizado no experimento, tinha 8 anos de implantação  
 4 com estipes do ecótipo “chumbinho” de 12 metros de altura em espaçamento de 6,0 x 4,0 m,  
 5 com o manejo de três estipes/plantas por touceira, cultivado em terra firme com irrigação diária  
 6 durante o quadrimestre mais seco do ano por meio de um sistema de microaspersão, que  
 7 aplicava diariamente uma lâmina empírica bruta de 3,28 mm.

#### 8 4.2.2 Medições de plantas

9 O desenvolvimento fenológico reprodutivo do açazeiro foi analisado adaptando a  
 10 escala proposta por Garcia e Barbedo (2016), que apresenta quatro fenofases reprodutivas que  
 11 são: pré-floração, floração, frutos verdes e frutos pretos, acrescentando a fenofase de maturação  
 12 que é descrita por Homma et al. (2005). A determinação dos estádios fenológicos reprodutivos  
 13 foi estabelecida de acordo com a ocorrência predominante de determinado estágio em relação  
 14 ao total da população, monitorando-se de forma aleatória 300 plantas dentro do hectare de  
 15 controle.

16 Avaliou-se a sincronia fenológica de acordo com o índice de atividade - IA (equação 1),  
 17 que indica a porcentagem de indivíduos da população observada que manifestou determinado  
 18 evento fenológico, sendo classificado como não sincrônico ou assincrônico quando IA < 20%,  
 19 pouco sincrônico ou sincronia baixa quando IA entre 20-60% e sincronia alta quando IA < 60%  
 20 (Bencke e Morellato 2002).

$$21 \quad IA = \frac{NIF}{NTI} \times 100$$

Eq.1

1 Em que: NIF é o número de indivíduos em determinado estágio fenológico e NTI o número  
2 total de indivíduos observados.

3 Para determinação do índice de área foliar (IAF) do açaizeiro foram coletadas, ao final  
4 da primeira e da segunda safra (estádio de fruto preto) todas as 11 folhas de 12 plantas da área  
5 experimental. Após a coleta, as folhas foram levadas ao laboratório de agrometeorologia da  
6 Universidade Federal Rural da Amazônia para a determinação da área foliar (AF) de cada planta  
7 com auxílio de um integrador de área foliar (AF) (LI-3100 Li-Cor Inc, Lincoln, Nebraska,  
8 USA). Posteriormente, o IAF foi determinado considerando a razão entre a área foliar do dossel  
9 e a área de solo disponível para a planta, de acordo com o espaçamento do plantio.

10 A avaliação de produtividade comercializável do açaí (Y) foi realizada durante as duas  
11 safras, onde eram colhidos e pesados diariamente todos os cachos com frutos maduros, e ao  
12 final de cada safra determinou-se a produtividade em kg ha<sup>-1</sup>, em função da razão entre a  
13 quantidade de frutos colhidos (kg) e a área útil do experimento (ha).

14 A produtividade da água da cultura - PAC (kg m<sup>-3</sup>), que é definida como o rendimento  
15 comercializável por unidade de evapotranspiração da cultura, foi determinada de acordo com  
16 Zwart e Bastiaanssen (2004) usando a equação 2:

$$17 \quad PAC = \frac{Y}{ET_c} \quad \text{Eq.2}$$

18 Em que ET<sub>c</sub> é o consumo de água por evapotranspiração da cultura (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>). Ao considerar  
19 essa relação do ponto de vista físico, apenas a transpiração foi levada em consideração.

#### 20 4.2.3 Medições das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração da cultura

21 No centro do local experimental (10 ha), localizado dentro da fazenda comercial, foi  
22 instalada uma torre metálica de 12 m de altura que foi instrumentada com três estações  
23 meteorológicas automáticas distribuídas ao longo do dossel (duas CR1000, Campbell Scientific  
24 Instrument, Logan, UT, USA; e uma U30, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA). A  
25 tabela 2 mostra os sensores instalados nas três estações meteorológicas automáticas utilizadas  
26 no experimento, bem como sua disposição em relação ao solo ou ao dossel.

1 **Tabela 2** – Variáveis e instrumentos utilizados no experimento, assim como, a disposição dos mesmos em relação  
 2 ao solo e o dossel vegetal.

Variáveis meteorológicas	Instrumento, fabricante, modelo	Nível dos sensores (m)
Radiação global incidente	Piranômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Radiação global refletida	Piranômetro (CMP6, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Saldo de radiação	Saldo radiômetro (NR-LITE2, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Velocidade do vento	Anemômetro (05106, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	2,0 acima do dossel
Chuva	Pluviômetro (TB4, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,5 acima do dossel
Temperatura do ar	Termohigrômetro (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Umidade relativa do ar	Termohigrômetro (STHB-M002, Onset computer corporation, Bourne, MA, USA)	0,5 e 2,0 acima do dossel
Temperatura do solo	Sonda de temperatura (108, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,02 e 0,06 de profundidade
Umidade do solo	Reflectômetro do conteúdo de água (CS615, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,3 de profundidade
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo de calor (HFP01SC, Campbell Scientific Instrument, Logan, UT, USA)	0,08 de profundidade

3 Para o monitoramento da variabilidade sazonal do conteúdo volumétrico de água no  
 4 solo, dentro da profundidade efetiva do sistema radicular do açazeiro, descrita por Vieira et al.  
 5 2018, foram instalados verticalmente entre as linhas de plantio e entre as plantas, dois  
 6 reflectômetros do conteúdo de água (CS615, Campbell Scientific, Instrument, Logan, UT,  
 7 USA) na profundidade de 0,3 m.

8 Os sensores da estação da Campbell Scientific foram conectados a um datalogger  
 9 CR1000 (Campbell Scientific, Logan, Utah) e os sensores da estação Onset computer  
 10 corporation foram conectados a um datalogger modelo U30-NRC (Onset computer corporation,  
 11 Bourne, MA, USA), com programação de leitura a cada dez segundos, e médias totais a cada  
 12 20 minutos. A localização da torre obedeceu às exigências mínimas de bordadura da área,  
 13 apresentando “fetch” disponível (superior a razão 1:100) para que as medidas obtidas fossem  
 14 representativas da área experimental sem a influência de energia advectiva (Rana e Katerji  
 15 2000).

16 A evapotranspiração do açai (ET<sub>c</sub>) foi obtida usando apenas valores positivos do fluxo  
 17 de calor latente (LE) de um sistema de razão de Bowen. Neste caso, valores de LE obtidos entre

1 as 6:00 e as 18:00 h, foram utilizados neste estudo quando o Rn-G era maior que zero (Perez et  
2 al. 1999). Os valores de  $ET_c$  foram estimados da seguinte forma:

$$3 \quad ET_c = \sum_{i=1}^{n=36} \frac{LE_i}{\lambda} \quad \text{Eq.3}$$

4 em que  $ET_c$  é a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $LE_i$  é o fluxo de calor latente em  
5 intervalos de 20 minutos ( $\text{W m}^{-2}$ ) e  $\lambda$  é o calor latente em vaporização ( $\text{J kg}^{-1}$ ).

6 Os valores de  $LE_i$  foram determinados pela lei de conservação de energia para uma  
7 superfície vegetada com base na razão de Bowen, usando a seguinte expressão.

$$8 \quad Rn = LE + H + G + Sdv + F \quad \text{Eq.4}$$

9 em que Rn é o saldo de radiação, LE e H são os fluxos verticais de calor latente e sensível,  
10 respectivamente; G o fluxo de calor no solo, Sdv a energia armazenada no sistema solo dossel  
11 vegetativo e F é a energia utilizada no processo fotossintético. O componente F não foi  
12 considerado por representar menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al. 1994).

13 O componente G foi estimado a partir de duas placas de fluxo de calor no solo instaladas  
14 horizontalmente a 0,08 m de profundidade em ambos os lados da linha de plantio (uma abaixo  
15 da linha de plantio e a outra entre as linhas de plantio), de onde se obteve a energia media  
16 transportada para o solo.

17 O calor armazenado na camada de solo acima dos fluxímetros foi obtido conforme  
18 (Kustas et al., 2000), utilizando dois termopares (TEMP108, Campbell Scientific Instrument,  
19 Logan, UT, USA) instalados acima do fluxímetro a uma profundidade de 0,02 e 0,06 m abaixo  
20 de superfície do solo (Table 2).

$$21 \quad G = G_8 + \frac{\Delta T_s C_s z_r}{t} \quad \text{Eq.5}$$

22 Em que  $G_8$  é a medição de fluxo de calor no solo pelo fluxímetro,  $\Delta T_s$  é a diferença média da  
23 temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ ) durante o período de medição,  $z_r$  é a profundidade do fluxímetro,  $t$  é  
24 o intervalo da medição em minutos e  $C_s$  é a capacidade calorífica volumétrica do solo, obtida  
25 pela expressão:

$$26 \quad C_s = \rho_s (C_{sd} + C_{sw} \theta_v) \quad \text{Eq.6}$$

1 Em que  $\rho_s$  é a densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $C_{sd}$  é o calor específico do solo seco ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );  $C_{sw}$   
2 é o calor específico da água no solo ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e  $\theta_v$  é a umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

3 A partir da energia disponível ( $Rn-G$ ) o fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível  
4 puderam ser obtidos, em função de diferenças na temperatura do ar e na pressão de vapor, em  
5 dois níveis (0,5 e 2,0 metros acima do dossel).

$$6 \quad \beta = \frac{H}{LE} = \frac{-k_h \frac{d(\rho_a c_p T)}{dz}}{-k_v \frac{d(\rho_a \lambda q)}{dz}} \quad \text{Eq.7}$$

7 Em que  $K_h$  e  $K_v$  são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água,  
8 respectivamente,  $c_p$  é o calor específico do ar úmido,  $\rho_a$  é a densidade do ar,  $T$  e  $q$  são as  
9 diferenças de temperatura e umidade do ar específica, em respectivo, e  $\gamma$  é o fator psicrométrico  
10 ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

11 Considerando-se a igualdade entre  $K_h$  e  $K_v$  (Gavilan e Berengena, 2007) e  
12  $(dT/dz)/(dq/dz) \approx \Delta T/\Delta e$ ; a equação 7 pode ser simplificada para:

$$13 \quad \beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad \text{Eq.8}$$

14 Sendo  $\Delta T = T_{0,5} - T_{2,0}$  e  $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$  as diferenças de temperatura do ar e pressão de vapor  
15 d'água na camada de ar acima da copa do açazeiro, respectivamente.

16 Com base na razão de Bowen, obteve-se o fluxo de calor latente segundo a expressão  
17 9:

$$18 \quad LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad \text{Eq.9}$$

#### 19 4.2.4 Critério para rejeição de dados inadequados do método de razão de Bowen

20 Para rejeitar valores inconsistentes, adotou-se os critérios descritos por Perez et al.  
21 (1999). Nesse procedimento, os dados fornecidos pelo método da razão de Bowen foram  
22 corretos quando atenderam aos critérios conforme a tabela 3, enquanto que para análise e a  
23 exclusão de valores de  $\beta$  inconsistentes, utilizou-se as condições da tabela 4.

1 **Tabela 3** - Condições satisfatórias em que os dados gerados pelo método da razão de Bowen, são considerados  
 2 consistentes, sob condições não advectiva.

Energia disponível	Gradiente de pressão de vapor	Razão de Bowen	Fluxos de calor
Rn - G > 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H ≤ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H > 0 para β > 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H > 0
Rn - G < 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H < 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H ≥ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H < 0 para β > 0

3 Fonte: Perez et al. (1999).

4 A estimativa de LE e do H fornecida pelo método razão de Bowen deve ser consistente  
 5 com a relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de β próximos de -1  
 6 podem ser rejeitados, de acordo com a precisão considerada para as medições que no presente  
 7 estudo foi de 0,2 °C para a temperatura do ar e de 2% para a umidade relativa do ar (Souza et  
 8 al. 2016). Tais valores foram utilizados para a obtenção do erro – ε (equação 10), a fim de se  
 9 determinar o intervalo próximo de -1 a ser excluído.

$$10 \quad \varepsilon = \frac{(\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T)}{\Delta e} \quad \text{Eq.10}$$

11 **Tabela 4** – Tipos de erros (equação 10) em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente

Tipo de erro	Condição
A	Rn - G > 0, Δe > 0 e β < -1 +  ε
B	Rn - G > 0, Δe < 0 e β > -1 -  ε
C	Rn - G < 0, Δe > 0 e β > -1 -  ε
D	Rn - G < 0, Δe < 0 e β < -1 -  ε
E	Mudança rápida de temperatura e pressão de vapor

12 Fonte: Perez et al. (1999).

13 Após o controle de qualidade, realizou-se o preenchimento de falhas dos dados de fluxos  
 14 de energia, de acordo com a correlação entre (H + LE) e (Rn + G) para cada estágio fenológico  
 15 (Teixeira e Bastiaanssen 2012), utilizando os dados dos coeficientes de correlação obtidos em  
 16 cada estágio (tabela 5).

1 **Tabela 5** - Coeficiente da análise de regressão da correlação entre H + LE (coordenada Y) e Rn + G (coordenada  
 2 X), ambos em W m<sup>-2</sup>, durante os diferentes estádios reprodutivos do açazeiro, Capitão Poço - PA, Brasil.

Estádios fenológicos	Coeficientes lineares		
	a	b	R <sup>2</sup>
Pré-Floração	41,712	0,9677	0,9985
Floração	54,304	0,9561	0,9976
Fruto verde	11,108	0,9163	0,9957
Fruto preto	17,971	0,8961	0,9951
Maturação	20,161	0,8819	0,9944

3 4.2.5 Estimativa da evapotranspiração de referência e dos coeficientes simples e dual.

4 Posteriormente à determinação da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), obteve-se o  
 5 coeficiente da cultura simples (K<sub>c</sub>), por meio da razão entre a ET<sub>c</sub> e a ET<sub>o</sub>, conforme equação  
 6 11:

$$7 \quad K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad \text{Eq.11}$$

8 A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi obtida de acordo com o método de Penman-  
 9 Monteith-FAO 56 do seguinte modo (Allen et al. 1998):

$$10 \quad ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900}{T_{ar} + 273} \right) u_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Eq.12}$$

11 Em que ET<sub>o</sub> é a evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>); Rn é o saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  
 12 G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); T<sub>ar</sub> é a temperatura média do ar (°C); u<sub>2</sub> é a  
 13 velocidade do vento (m s<sup>-1</sup>); es é a pressão de saturação do vapor (kPa); ea é a pressão de vapor  
 14 de ar (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor vs temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>) e o γ é o  
 15 coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>). Os dados climáticos utilizados para estimar o ET<sub>o</sub> foram  
 16 obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET),  
 17 localizada a 7 km do local experimental.

18 A determinação da evaporação de água do solo foi realizada utilizando 25  
 19 microlisímetros de pesagem (ML), distribuídos aleatoriamente na área experimental, conforme  
 20 proposto por Flumignan et al. (2012). Os microlisímetros foram constituídos de tubos de PVC  
 21 com 100 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, telados na parte inferior com uma tela de  
 22 2 micrometros para que se evitasse a perda de solo.

23 As medições foram realizadas diariamente em todos os estágios fenológicos ao longo  
 24 dos dois anos experimentais, exceto em dias chuvosos, quando a evaporação de água do solo

1 não pôde ser determinada, pois o peso final do ML era maior que o peso inicial. A evaporação  
 2 foi mensurada pela diferença diária de massa do microlisímetro, obtida sempre no mesmo  
 3 horário (17:00) com auxílio de uma balança de precisão de 0,01 g. A conversão da massa de  
 4 água perdida diariamente (kg) em evaporação (mm) foi realizada conforme a equação 13:

$$5 \quad E = \frac{\Delta M_{ML}}{A_{ML}} \quad \text{Eq.13}$$

6 Em que E é a evaporação do solo em mm dia<sup>-1</sup>,  $\Delta M_{ML}$  a diferença de massa em quilogramas do  
 7 microlisímetro de um dia para o outro (kg),  $A_{ML}$  é a área cilíndrica do microlisímetro (m<sup>2</sup>), que  
 8 foi obtida:

$$9 \quad A_{ML} = 2\pi r(r + h) \quad \text{Eq.14}$$

10 Em que  $\pi$  é 3,14, r é o raio (0,05 m) e h é a altura do microlisímetro (0,15 m).

11 Finalmente, os coeficientes de evaporação (Ke) e de cultivo basal (Kcb) foram  
 12 determinados de acordo com as seguintes equações (Allen et al. 1998):

$$13 \quad Ke = \frac{E}{ET_0} \quad \text{Eq.15}$$

$$14 \quad Kcb = \frac{ET_c}{ET_0} - Ke \quad \text{Eq.16}$$

15 Para a compreensão dos mecanismos de controle da evapotranspiração do açazeiro foi  
 16 calculado o fator de desacoplamento -  $\Omega$  por meio da equação 17 (McNaughton e Jarvis, 1983),  
 17 baseado na equação de Penman-Monteith, cujos valores são compreendidos entre 0 e 1. Valores  
 18 de  $\Omega$  mais próximos de 0 indicam que a transferência de vapor d'água para a atmosfera está  
 19 sendo controlada pelas variáveis de  $u_2$ , UR e DPV, caso em que se diz que a superfície vegetada  
 20 está acoplada com a atmosfera. Já quando  $\Omega$  apresenta valores próximos de 1 verifica-se a maior  
 21 contribuição da energia na forma de radiação solar no processo de evapotranspiração,  
 22 caracterizando a superfície como desacoplada com a atmosfera.

$$23 \quad \Omega = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{\gamma}{\Delta \times \gamma} \right) \times \left( \frac{g_a}{g_s} \right) \right]} \quad \text{Eq.17}$$

24 Em que  $g_a$  e  $g_s$  – são as condutâncias aerodinâmicas e da superfície (s m<sup>-1</sup>), respectivamente.

1 Para determinação da  $g_a$  levou-se em consideração fatores microclimáticos,  
2 considerando a equação 18:

$$3 \quad g_a = \frac{0.4^2 u(z)}{\left[ \ln \left( \frac{z-d}{z_0} + \phi_m \right) \right]^2} \quad \text{Eq.18}$$

4 Em que  $u$  é a velocidade do vento ( $\text{s m}^{-1}$ ) na altura de medição  $z$  (m),  $d$  o deslocamento do plano  
5 zero (m),  $z_0$  a rugosidade da superfície (m) e  $\Phi_m$  corresponde ao fator de correção do perfil do  
6 vento, conforme Fraga et al. (2015).

7 Para determinação da  $g_s$  que indica um controle biológico da evapotranspiração, levou-  
8 se em consideração a equação invertida de Penman-Monteith (equação 19), conforme a  
9 metodologia descrita por Fraga et al. (2015).

$$10 \quad g_s = (r_s)^{-1} = \left[ \frac{\rho_a c_p DPV}{\gamma LE} - \frac{1}{g_a} \left( 1 - \frac{\Delta H}{\gamma LE} \right)^{-1} \right] \quad \text{Eq.19}$$

11 Em que  $g_s$  é a resistência da superfície ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $\rho_a$  é a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor  
12 específico do ar úmido ( $1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### 13 **4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### 14 4.3.1 Análise da consistência dos dados pelo método da razão de Bowen

15 Na tabela 6 são apresentados os resultados da análise da consistência dos dados e a  
16 percentagem dos dados falhos distribuídos por classe, que foi realizada utilizando o critério  
17 proposto por Perez et al. (1999), que leva em consideração os valores de  $\beta$  que se em quadraram  
18 nas classificações de erros ( $\epsilon$ ) presentes na tabela 4.

1 **Tabela 6** – Análise da consistência dos dados para o cálculo da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen  
 2 em diferentes estágios fenológicos reprodutivos do açaizeiro em Capitão Poço – PA.

Safrá 1						
Estádios fenológicos	PDC <sup>a</sup>	Tipos de erros (%)				
		A	B	C	D	E
Pré-floração	70,58	0,00	19,82	5,54	0,38	3,68
Floração	58,10	0,00	25,62	10,01	0,46	5,81
Fruto verde	63,08	0,00	25,04	7,60	0,46	3,82
Fruto preto	77,12	0,00	18,27	2,15	1,06	1,40
Maturação	79,97	0,00	16,74	0,87	1,51	0,92
Média	69,77	0,00	21,09	5,23	0,77	3,13
Safrá 2						
Estádios fenológicos	PDC <sup>a</sup>	Tipos de erros (%)				
		A	B	C	D	E
Pré-floração	84,99	0,00	3,41	10,50	0,00	1,37
Floração	50,35	0,00	28,79	4,05	5,49	11,32
Fruto verde	72,18	0,00	19,64	3,73	1,52	2,93
Fruto preto	76,99	0,00	18,40	2,42	1,06	1,12
Maturação	75,51	0,00	19,31	1,78	1,89	1,50
Média	72,00	0,00	17,91	4,50	1,99	3,65

3 <sup>a</sup>PDC – Porcentagem de dados consistentes

4 Verifica-se que o PDC para as safras 1 e 2 apresentaram similaridade em seus valores  
 5 totais, permitindo a realização do balanço de energia em mais de 70% dos dados coletados.  
 6 Esse resultado é superior aos obtidos por Silva et al. (2007) para o ciclo do maracujá, que  
 7 apresentaram 51,36% de dados consistentes e aos resultados encontrados por Pereira et al.  
 8 (2017) para o gergelim atingiram um percentual 62,3% de dados consistentes para a realização  
 9 do balanço de energia.

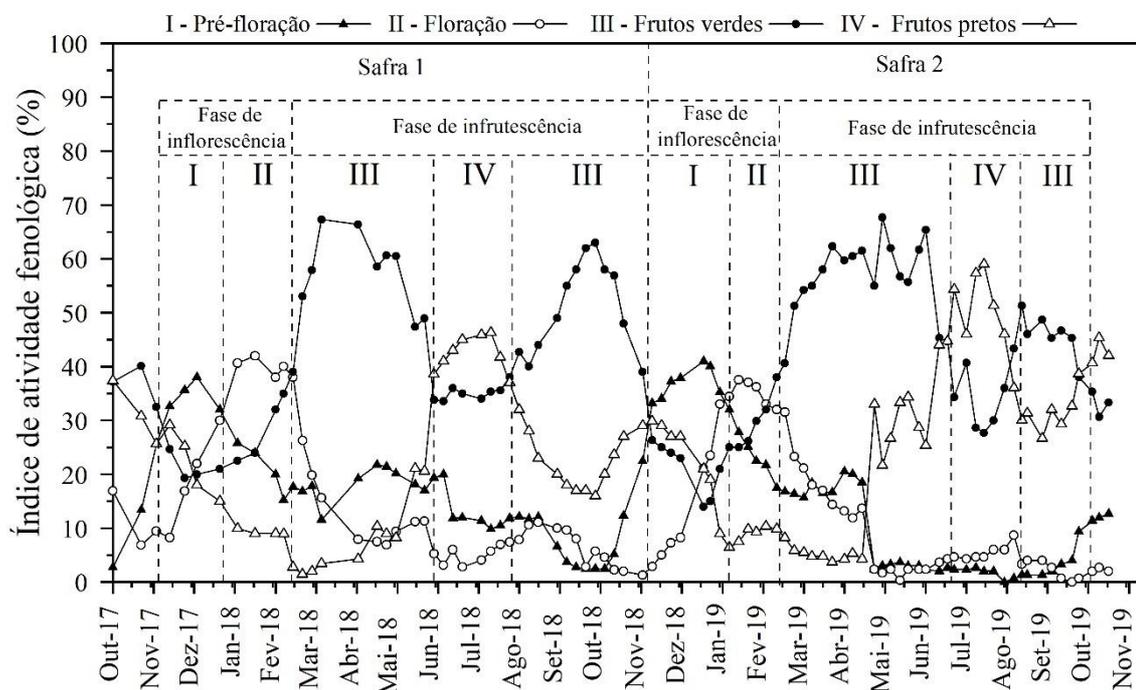
10 Apesar de durante o dia a atmosfera apresentar menor instabilidade, verificou-se a  
 11 ausência de erros do tipo A em ambas as safras do açaizeiro, pois quando a condição mais  
 12 comum ocorria ( $R_n - G > 0$  e  $\Delta e > 0$ ), o valor de  $\beta$  sempre foi superior a  $-1 + |\epsilon|$ . Por outro lado,  
 13 observou-se que em média 28,92% dos intervalos amostrados apresentaram algum tipo de erro  
 14 e desses 69,80% (safra 1) e 63,84% (safra 2) foram erros do tipo B que ocorreram  
 15 principalmente nos estádios de fruto preto e maturação, que era quando se fazia uso da irrigação,  
 16 fazendo com que o  $\beta$  fosse superior a  $-1 - |\epsilon|$ .

17 Os erros do tipo C e E representaram em média nas duas safras 4,87 e 3,39%,  
 18 respectivamente, ocorrendo em maior quantidade nos estádios de pré-floração, floração e fruto  
 19 verde, período no qual se tem a maior concentração de chuvas nas duas safras. Os erros do tipo  
 20 C ocorreram quando o  $R_n - G$  passou a ser menor que zero, durante os eventos de precipitação  
 21 que influenciavam a inversão do  $\Delta e$ , já os erros do tipo E ocorriam em função da mudança  
 22 brusca da temperatura e da pressão de vapor. Os erros do tipo D representaram menos do que

1 2% em ambas as safras e surgiram quando  $R_n - G$  foram menores que zero e os valores de  $\beta$  |  
 2 superiores a  $-1 - |\epsilon|$ .

### 3 4.3.2 Variabilidade fenológica

4 A figura 1 apresenta variabilidade nos estádios fenológicos reprodutivos do açaizeiro ao  
 5 longo das duas safras, onde se verifica um período com predominância da fase de inflorescência  
 6 e outro com a fase de infrutescência do açaizeiro, uma vez que o açaizeiro flora e frutifica  
 7 durante todo o ano. Estas duas fases ocorrem em estações bem definidas, de modo que durante  
 8 o período mais chuvoso do ano (entre novembro e março), considerado período de entressafra  
 9 do fruto, a fase que predomina é a de inflorescência, composta pelos estádios de pré-floração  
 10 que ocorre principalmente entre novembro e janeiro e tem duração média de 78 dias, e pelo  
 11 estágio de floração que tem seu ápice entre os meses de janeiro e fevereiro, durando em média  
 12 30 dias. Ambos estádios apresentam IA com baixa sincronia, o que favorece o prolongamento  
 13 da safra do fruto, uma vez que permite maior distribuição da maturação do açaí durante um  
 14 maior período de tempo (Garcia e Barbedo 2016).



15  
 16 **Figura 1** – Variação da atividade fenológica do açaizeiro ao longo das duas safras de açaí irrigado em Capitão  
 17 Poço – PA.

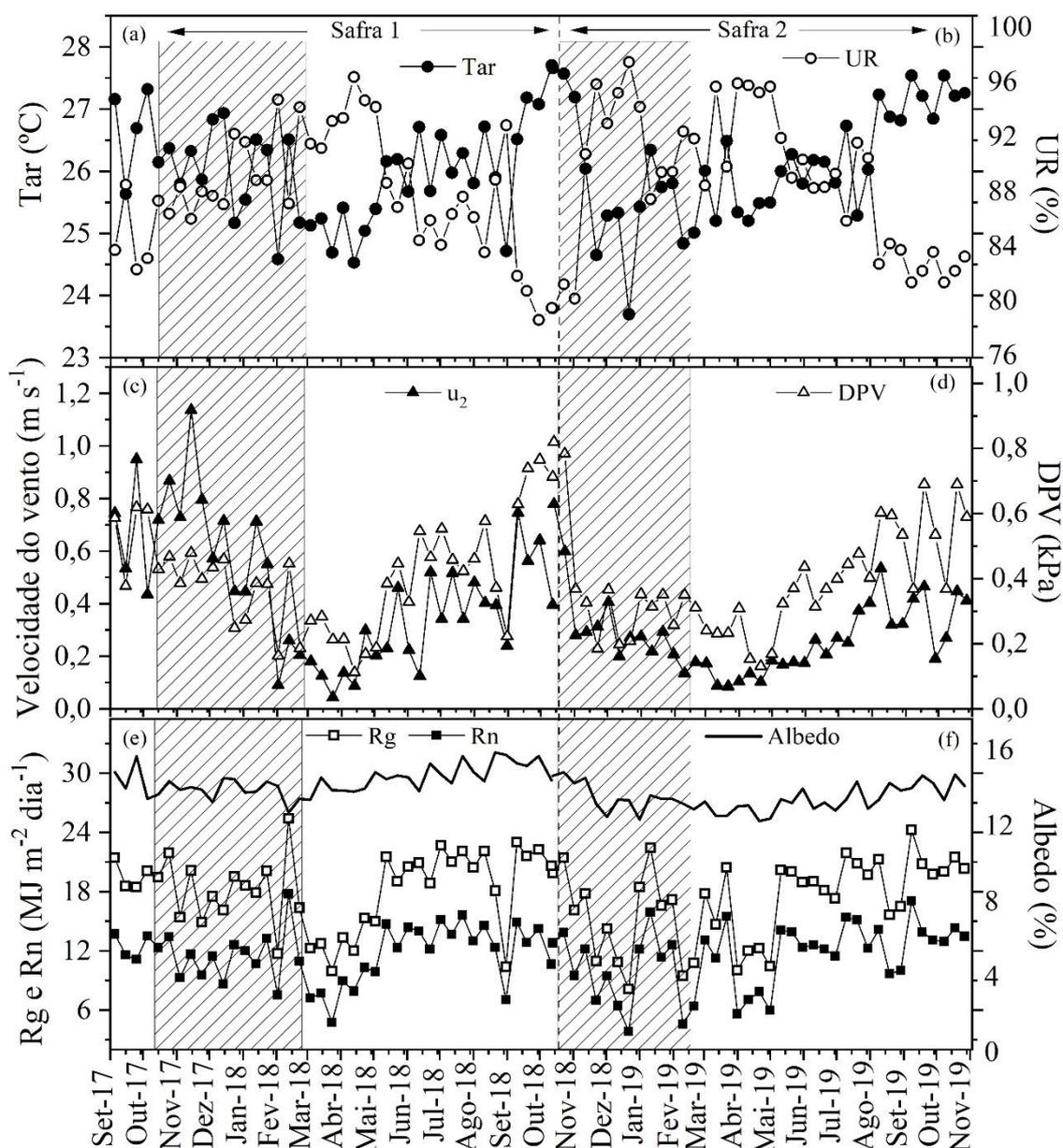
18 Já durante o período de março a outubro ocorre a fase de infrutescência, composta pelos  
 19 estádios de fruto verde, entre meados de março a julho, com duração média de 130 dias com  
 20 índice de atividade fenológica com alta sincronia; e pelos estádios de fruto preto e de maturação  
 21 do açaizeiro que tem duração média de 60 e 16 dias, respectivamente, e ocorrem sob baixa

1 sincronia fenológica predominando no mesmo período já que a maturação ocorre poucos dias  
2 após o estágio de fruto preto, entre os meses de agosto e outubro, período em que ocorre a safra  
3 do açaí.

4       Ao longo das duas safras observou-se em campo que as plantas apresentavam em média  
5 11 folhas durante todos os estádios, influenciada pelo lançamento de uma nova folha que ocorre  
6 em média a cada 24 dias que coincide com a queda da folha mais velha. Esse fato permite que  
7 o açaizeiro apresente durante sua fase de reprodução uma pequena taxa de variação em sua área  
8 foliar, dada a paridade entre o lançamento e a queda de uma folha (Oliveira 2002). Esse fato  
9 contribuiu diretamente para que as diferenças entre o IAF da primeira e segunda safras fosse de  
10 apenas 4,7% (tabela 7).

#### 11 4.3.3 Condições ambientais

12       As temperaturas médias do ar durante o experimento (figura 2a) foram de 25,88 e 25,72  
13 °C, para a primeira e segunda safra, respectivamente, com amplitude térmica variando entre  
14 20,27 °C a 36,47. A umidade relativa do ar (UR) média para a primeira safra foi de 88,68  
15 enquanto que a segunda safra a média foi de 89,37% (figura 2b). A UR foi inversamente  
16 proporcional a variabilidade da T, DPV e  $u_2$  que apresentaram seus máximos valores quando a  
17 UR decrescia em função de condições atmosféricas mais exigentes por vapor d'água, de modo  
18 que, propiciou a ocorrência de valores de déficit de pressão de vapor (DPV) e de velocidade do  
19 vento ( $u_2$ ) máximos de 0,87 kPa e 1,51 m s<sup>-1</sup> na primeira safra e de 0,84 kPa e 1,13 m s<sup>-1</sup> na  
20 segunda safra 2 (figura 2d).



**Figura 2** – Variação dos elementos climáticos de temperatura do ar – Tar, umidade relativa do ar - UR, velocidade do vento –  $u_2$ , déficit de pressão de vapor de água – DPV, radiação solar global incidente – Rg, saldo de radiação - Rn e albedo em diferentes estádios fenológicos do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA.

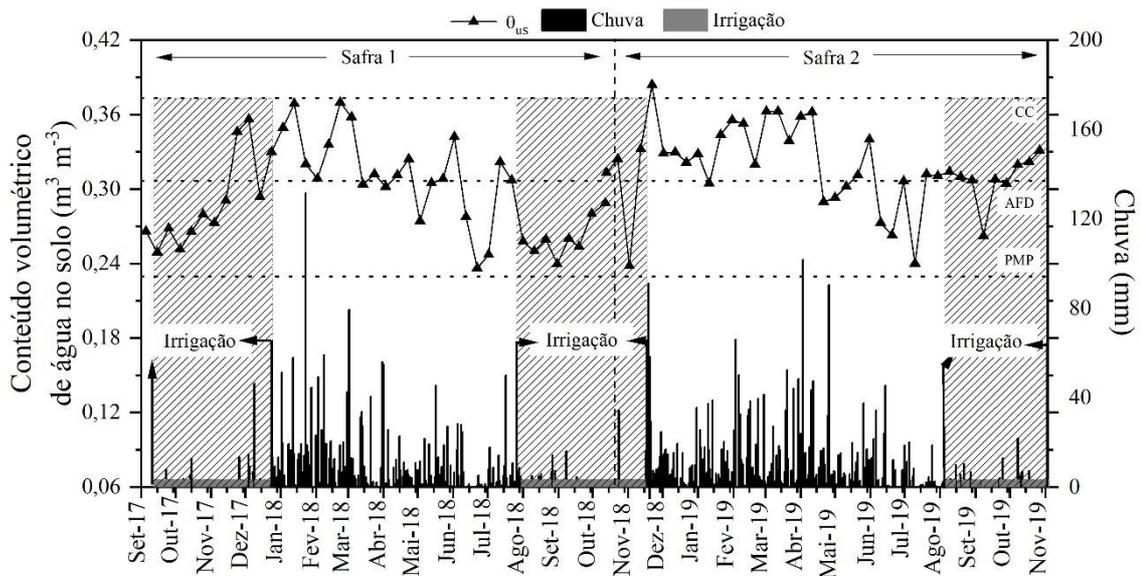
Os valores médios do Rg e do Rn foram, respectivamente, de  $17,74$  e  $11,78 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (primeira safra) e de  $17,48$  e  $11,69 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  (segunda safra) (figura 2e), com variabilidade de  $20,78 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para o Rg e de  $16,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  para o Rn, em decorrência da transição da estação mais chuvosa para a estação menos chuvosa, que acarretou intensa redução de radiação difusa em função de mais dias de céu claro, favorecendo a incidência da radiação direta.

O albedo médio diário correspondeu a  $14,31\%$  para a safra 1 e  $13,47\%$  para a safra 2. As características ópticas do açaizeiro influenciam consideravelmente a quantidade de energia disponível no ecossistema (Machado et al. 2016), uma vez que durante a estação menos chuvosa

1 o albedo tende a ser maior do que no período mais chuvoso, em função do aumento de  
 2 superfícies lisas, secas e com cores claras que incrementam seu poder de reflexão e diminuem  
 3 a absorção da radiação (Fausto et al. 2014). Já durante o período mais chuvoso a albedo tende  
 4 a ser menor em função da maior quantidade de água disponível no sistema que influencia em  
 5 menor reflexão e maior absorção da radiação (Silva et al. 2011).

#### 6 4.3.4 Variabilidade do conteúdo volumétrico de água no solo

7 O conteúdo volumétrico de água no solo apresentou um padrão esperado (figura 3)  
 8 mantendo-se durante a maior parte do ciclo em ambas as safras, entre a umidade correspondente  
 9 ao limite da água facilmente disponível – AFD (umidade crítica de  $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e a umidade  
 10 de capacidade de campo – CC ( $0,370 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), mantendo um nível médio correspondente a  
 11 52,86% e 62,86% da capacidade total de água – CTA no solo (60 mm) na primeira e segunda  
 12 safra, respectivamente.



13 **Figura 3** – Média semanal da variação sazonal do conteúdo volumétrico de água no solo –  $\theta_{us}$ , chuva e do período  
 14 de irrigação durante duas safras do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA. 1º safra: (a); 2º safra: (b); CC:  
 15 Capacidade de campo; AFD: Água facilmente disponível; PMP: Ponto de murcha permanente; Área hachurada  
 16 indica o início e final do período de irrigação.

18 Percebe-se que em ambos os anos, a precipitação pluviométrica ocorrida entre os meses  
 19 de dezembro e abril, proporcionou que a quantidade total da AFD (27,03 mm) não fosse  
 20 completamente utilizada, acarretando que a CTA para o período ficasse sempre acima dos  
 21 65,2% (39,16 mm), condicionando o suprimento hídrico adequado para o pleno  
 22 desenvolvimento para cultura (Sinclair et al. 2005).

23 Durante o período menos chuvoso, entre julho e novembro, o conteúdo volumétrico de  
 24 água no solo atingiu em média  $0,275 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  na primeira safra, correspondente a 32,42% (19,47

1 mm) da CTA, enquanto que na segunda safra a média foi de  $0,301 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , equivalente a 50,49%  
2 (30,32 mm) da CTA. Verifica-se que nas duas safras as condições hídricas atingiram níveis  
3 considerados prejudiciais ( $\text{CTA} < 33,03 \text{ mm}$ ) para o crescimento e desenvolvimento das plantas  
4 (Montesano et al. 2018).

5 Esta condição pode explicar o fato de que apesar do açazeiro florar durante todo o ano,  
6 a quantidade percentual de espatas e flores nesse período ser menor que 10% (figura 1), devido  
7 esses estádios serem mais sensíveis a estresses abióticos o que faz com que o açazeiro aborte  
8 suas inflorescências acarretando alterações fisio-metabólicas da planta e consequentemente  
9 influência na produtividade final (Aguiar et al. 2018).

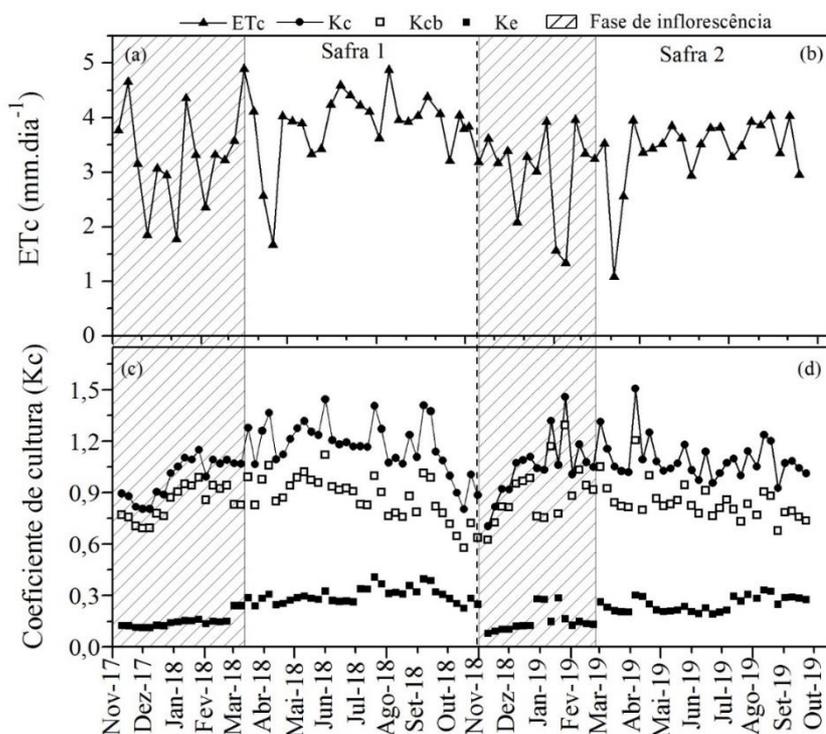
10 Durante a safra 1 (novembro de 2017 e outubro de 2018) o total de chuva observado foi  
11 de 2222,41 mm, sendo que deste total, 88,02% ocorreram entre os meses de dezembro de 2017  
12 a junho de 2018. Já na segunda safra (novembro de 2018 a outubro de 2019) o total de chuva  
13 acumulada correspondeu a 2805,80mm, com concentração de 87,72% entre os meses de  
14 dezembro de 2018 e junho de 2019.

15 Ao se comparar as duas safras, verifica-se que durante o período menos chuvoso do ano  
16 (agosto a novembro) a safra 2 acumulou 344,60 mm de chuva, enquanto que na safra 1 o  
17 quantitativo de chuva foi de 243,18 mm. Apesar da quantidade total de chuvas neste período  
18 ser quase que suficiente para suprir adequadamente o açazeiro (necessidade de 484,24 mm na  
19 safra 1 e 393,21 mm na safra 2 durante o período, resultados a seguir), sua má distribuição  
20 (figura 3) fez com que fosse necessário a utilização da irrigação para que se minimizassem  
21 possíveis danos fisiometabólicos causados pelo déficit hídrico que pudessem comprometer o  
22 desenvolvimento do açazeiro. Logo, aplicou-se uma lâmina de irrigação total de 331,28 mm  
23 na safra 1 dividida em 101 irrigações, enquanto que no experimento 2 a lâmina total  
24 correspondeu a 252,56 mm durante 77 irrigações.

25 Observa-se que próximo ao período de transição entre a fase de infrutescência e  
26 inflorescência o conteúdo volumétrico de água no solo apresentou-se abaixo da umidade crítica  
27 correspondente a  $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (figure 3), motivado pela redução das chuvas nesse período e  
28 pela utilização de uma lâmina de irrigação empírica fixa, que em alguns momentos do  
29 experimento esteve abaixo da demanda de água necessária para o açazeiro. Este manejo  
30 inadequado provocou uma baixa disponibilidade de água no solo, sugerindo a ocorrência de  
31 déficit hídrico neste período, o que é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento  
32 do açazeiro, pois ocasiona modificações nos processos fisiometabólicos da planta (Barbosa et  
33 al. 2017), podendo ter reduzido o grau de abertura dos estômatos e consequentemente as perdas  
34 de água por transpiração (Jazayeri et al. 2015).

1 4.3.5 Evapotranspiração

2 A Variabilidade da  $ET_c$  ao longo do ciclo é apresentada na figura 4, onde verifica-se que  
3 durante a fase de inflorescência e infrutescência na safra 1 a  $ET_c$  média foi de 3,26 e 3,80 mm  
4  $dia^{-1}$ , respectivamente, enquanto que no mesmo período na segunda safra a média da  $ET_c$  foi de  
5 3,03 mm  $dia^{-1}$  para a inflorescência e de 3,27 mm  $dia^{-1}$  na infrutescência. A redução da  $ET_c$   
6 tanto na fase de inflorescência (4,72%) quanto na fase de infrutescência (14,30%), está  
7 diretamente relacionada com as condições atmosféricas observadas entre as safras (figura 2) e  
8 com o total de chuva nesses períodos (Figura 3). A primeira safra recebeu em média 21,90%  
9 menos chuva do que a safra 2, sugerindo uma redução da UR e da nebulosidade,  
10 consequentemente aumentando os valores de T,  $u_2$ , DPV, Rg e Rn que acarretaram em maior  
11 demanda energética da atmosfera.



12 **Figura 4** – Média semanal da variabilidade da evapotranspiração do açaizeiro ( $ET_c$ ) e dos coeficientes de cultura  
13 simples ( $K_c$ ) e dual ( $K_e$  e  $K_{cb}$ ) durante duas safras do açaizeiro irrigado em Capitão Poço – PA. 1ª safra: (a) e (c);  
14 2ª safra: (b) e (d). Área hachurada representa a fase de inflorescência e área branca representa a fase de  
15 infrutescência.  
16

17 Quando se analisa os valores médios por ciclo fenológico (tabela 3), observa-se que o  
18 menor valor de  $ET_c$  em ambas as safras ocorreu durante o estágio de floração e a máxima  $ET_c$   
19 durante o estágio de maturação dos frutos, com índice de área foliar (IAF) sempre próximo de  
20 2. Devido a fase de floração ocorrer predominante no período mais chuvoso do ano as trocas  
21 gasosas são limitadas principalmente pela elevada quantidade de vapor de água presente na  
22 atmosfera, enquanto que durante o estágio de maturação observa-se que as maiores trocas

1 gasosas entre a atmosfera e as plantas de açazeiro ocorrem em uma época do ano em que se  
 2 tem os menores valores de UR e um incremento nos percentuais de T,  $u_2$ , Rg e Rn, facilitada  
 3 também pelo suprimento hídrico por meio da irrigação.

4 **Tabela 7** –Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), coeficientes de cultura simples (Kc) e dual (Ke e Kcb), índice de  
 5 área foliar (IAF), produtividade de frutos (Y), produtividade de água da cultura (PAC) e fator de desacoplamento  
 6 ( $\Omega$ ) do açazeiro irrigado durante a fase reprodutiva em Capitão Poço - PA.

Estádios fenológicos	Safrá 1									
	Consumo hídrico	$ET_c$	Kc	Ke	Kcb	IAF	Y	PAC	$\Omega$	
									1º fase*	2º fase**
Pré-floração	262,14	3,36	0,89	0,12	0,72					
Floração	89,66	2,99	1,07	0,14	0,84					
Fruto verde	467,5	3,6	1,2	0,24	0,94	2,02	7052	0,76	0,65	0,54
Fruto Preto	244,56	4,08	1,17	0,25	0,78					
Maturação	66,36	4,42	1,19	0,33	0,82					
Média/Total	1130,22	3,69	1,1	0,22	0,82					

Estádios fenológicos	Safrá 2									
	Consumo hídrico	$ET_c$	Kc	Ke	Kcb	IAF	Y	PAC	$\Omega$	
									1º fase*	2º fase**
Pré-floração	239,19	3,03	0,96	0,11	0,85					
Floração	90,65	3,02	1,05	0,13	0,92					
Fruto verde	401,75	3,09	1,14	0,23	0,91	2,12	7469	0,88	0,66	0,56
Fruto Preto	207,54	3,26	1,04	0,24	0,8					
Maturação	60,36	4,02	1,06	0,29	0,77					
Média/Total	999,49	3,28	1,05	0,2	0,85					

7 \*Fase de inflorescência, \*\*Fase de infrutescência, Consumo hídrico (mm),  $ET_c$  (mm dia<sup>-1</sup>), Kc (adimensional), Ke  
 8 (adimensional), Kcb (adimensional), Y – produtividade dos frutos (Kg ha<sup>-1</sup>), PAC – produtividade de água (Kg m<sup>-3</sup>)  
 9 e  $\Omega$  (adimensional).

10 Observou-se durante a primeira safra, maior variabilidade nos valores máximos e  
 11 mínimos da  $ET_c$  nos estádios de pré-floração, floração e fruto verde quando comparados a safra  
 12 seguinte, em função do decréscimo de 20,52% na quantidade de chuvas que contribui para a  
 13 amplitude de 4,91 mm nos valores de  $ET_c$ . Isso ocorre principalmente por conta da maior  
 14 variabilidade nos valores de Rg e Rn (figura 2e) aliado a condições hídricas satisfatórias (figura  
 15 3) influenciam o maior consumo hídrico em dias de céu claro sem que houvesse limitações por  
 16 parte de mecanismos de fisiológicos. Já os estádios de fruto preto e maturação apresentaram  
 17 maior amplitude (2,57 mm) na  $ET_c$  durante a segunda safra, o que está relacionado com a alta  
 18 demanda energética da atmosfera para o período, que é reduzida à medida que se tem um  
 19 aumento na nebulosidade em função das chuvas, acarretando maior variabilidade para o  
 20 período.

1 O consumo hídrico do açazeiro durante a primeira safra foi de 1130,22 com  $ET_c$  média  
2 3,70 mm dia<sup>-1</sup> e máxima de 5,37 mm dia<sup>-1</sup>. Já na segunda safra o consumo total foi de 999,49  
3 mm, com  $ET_c$  média e máxima de 3,28 e 4,86 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Destes totais cerca  
4 de 23,56% é consumido na pré-floração, 8,50% na floração, 40,78% no estágio de fruto verde,  
5 21,20% no estágio de fruto preto e 5,96% no estágio de maturação dos frutos.

6 Verifica-se que a  $ET_c$  do açazeiro apresentou menores valores na segunda safra  
7 impulsionada pela menor demanda da atmosfera quando comparado a primeira safra, mesmo  
8 apresentando índice de área foliar - IAF superior ao da safra 1 (tabela 7) o que está relacionado  
9 com o aumento da UR e redução da  $u_2$  e do DPV que fizeram com que a  $ET_c$  deixasse de sofrer  
10 efeito direto da cobertura foliar passando a ser influenciada principalmente pela radiação solar,  
11 caracterizando o estado de desacoplamento da superfície com a atmosfera ( $\Omega > 0,5$ ).

12 Embora existam inúmeras pesquisas sobre a evapotranspiração de culturas anuais (Fun  
13 et al. 2015, Xu et al. 2018, Wijewardana et al. 2019), os estudos sobre culturas perenes ainda  
14 são raros em função da dificuldade de se empregar as diferentes metodologias devido ao grande  
15 porte que essas culturas atingem. A utilização do método da razão de Bowen, pode ser  
16 empregado em qualquer tipo de cultura, desde que os instrumentos sejam instalados acima do  
17 dossel vegetal em um perfil vertical onde os gradientes de temperatura e umidade do ar estejam  
18 dentro da camada limite interna de equilíbrio (Perez et al. 1999).

19 A precisão do método de razão de Bowen na determinação da evapotranspiração das  
20 culturas é comprovada em diversos estudos que comparam métodos diretos como o caso de  
21 Sousa et al (2011) e indiretos como os estudos de Barr et al (1994), Rana e Katerji (1996) e  
22 Billesbach e Arkebauer (2012).

23 Sousa et al (2011) compararam as medidas de  $ET_c$  do coqueiro obtidas por lisímetro de  
24 pesagem com as obtidas pelo método de razão de Bowen. Os autores verificaram índice de  
25 concordância de 0,92 e índice de desempenho de 0,81 entre os dois métodos, classificando o  
26 comparativo como muito bom, o que sugere que o método pode ser usado com precisão na  
27 estimativa da evapotranspiração de plantas de grande porte.

28 Barr et al. (1994) ao compararem os métodos de Eddy covariance (MEC) e razão de  
29 Bowen (MRB) na estimativa dos fluxos de calor sensível e latente acima de uma floresta  
30 decídua madura, verificaram diferença de medição de 11% no período diurno, enquanto que  
31 Billesbach e Arkebauer (2012) também realizaram a comparação entre os fluxos de calor  
32 sensível e latente determinados a partir BERB com os obtidos pelo método de eddy covariance,  
33 verificaram precisão de 90% entre os métodos. Já Rana e Katerji (1996) ao compararem o MEC  
34 com o MRB em três gradientes de temperatura e pressão verificaram que em escala diária a

1 diferença entre os métodos foi de 2%. Os autores afirmam que o MRB pode ser utilizado como  
2 método padrão na estimativa da evapotranspiração em culturas com alta rugosidade superficial.

3 O sucesso na precisão e exatidão do método de razão de Bowen em estimar os fluxos  
4 de calor sensível e latente, é determinado por alguns fatores como as condições da atmosfera  
5 (Teixeira e Bastiaanssen, 2012), a rigidez com que se aplica o controle de qualidade dos dados  
6 (Perez et al. 1999) e erros intrínsecos do sensor utilizado (Savage et al., 2010).

7 Savage et al. (2010) em seus resultados sobre a comparação de sensores mais baratos  
8 com equipamentos mais caros para a estimativa dos fluxos de energia, verificaram que é  
9 possível manter a alta precisão com a utilização de sensores mais acessíveis economicamente,  
10 como os utilizados neste estudo com o açazeiro. Os autores verificaram erros de  $38 \text{ W m}^{-2}$   
11 (RMSE), quando compararam com os resultados obtidos por um sistema de eddy covariance e  
12 um sensor similar ao utilizado no experimento com açai, o que se considera aceitável. Conforme  
13 sugerido pelos autores, utilizou-se médias de 20 minutos das variáveis, afim de reduzir o ruído  
14 nos dados de pressão de vapor de água.

15 De acordo com Tsai et al (2010) a heterogeneidade da superfície encontrada em tais  
16 culturas torna-se um importante fator pois influencia na rugosidade da superfície como também  
17 na viabilidade do método da razão de Bowen (Friedrich et al. 2000). No entanto, a  
18 heterogeneidade do terreno só tem significativa influencia em situações onde o fetch da área é  
19 menor que 100 m (Friedrich et al. 2000; Gavilan e Berengena 2007).

20 A produtividade dos frutos do açazeiro apresentou aumento de 5,58% na segunda safra  
21 quando comparado a safra primeira. Essa diferença está relacionada com as condições  
22 climáticas mais acentuadas na primeira safra que proporcionaram aumento de 6,86% na  
23 demanda de água pela atmosfera, o que ocasionou em 18,07% menos água disponível no solo.  
24 Nestas condições as plantas reduzem a abertura estomática (Viana et al. 2019) e  
25 conseqüentemente a assimilação de  $\text{CO}_2$  (Jazayeri et al. 2015), impactando negativamente na  
26 produtividade (Taiz e Zeiger 2009).

27 Os resultados médios de  $\text{ET}_c$  encontrados para o açazeiro estão próximos dos  
28 encontrados para outras palmeiras como a cultura da palma de óleo no Mato Grosso, região  
29 centro-oeste do Brasil, que apresentou  $\text{ET}_c$  média de  $3,74 \text{ mm dia}^{-1}$  (Viana et al. 2019) e para o  
30 coqueiro cultivado em Sergipe, nordeste Brasileiro, com  $\text{ET}_c$  média de  $3,90 \text{ mm dia}^{-1}$ . (Sousa  
31 et al. 2011) além da cultura da manga cultivada próximo à região de estudo, na Amazônia  
32 oriental, que apresentou  $\text{ET}_c$  média de  $3,73 \text{ mm dia}^{-1}$  (Souza et al. 2016).

49 Embora os resultados da  $\text{ET}_c$  obtidos por outras palmeiras sejam próximos aos  
50 encontrados nesta pesquisa, a utilização destes dados para fins de manejo e uso da água em

1 outras culturas devem ser criteriosamente avaliados em função de cada região apresentar  
2 diferentes variabilidades no clima, das espécies apresentarem diferentes estádios de  
3 desenvolvimento e os distintos manejos empregados nos cultivos influenciarem no consumo de  
4 água pelas plantas (Doorenbos e Pruitt 1977, Allen et al. 1998).

5 No estado do Pará, em detrimento da ausência de informações sobre o consumo hídrico  
6 do açaizeiro, a maioria dos produtores utilizam uma lâmina de irrigação diária de 5 mm dia<sup>-1</sup>  
7 baseada no trabalho de Foong (1993) que ao longo de 15 anos estudou a ET<sub>c</sub> da palma de óleo  
8 na Malásia. Ao contrastar a lâmina de irrigação utilizada pelos produtores com os resultados  
9 obtidos nesta pesquisa verifica-se superestimativa de 43,27% entre a lâmina de irrigação ideal  
10 para o açaizeiro e a lâmina utilizada atualmente pelos produtores, o que pode causar  
11 desvantagens econômicas.

12 Várias pesquisas que foram desenvolvidas com frutíferas correlacionando diferentes  
13 regimes hídricos e o desempenho produtivo, comprovaram que nem sempre a aplicação de  
14 maiores lâminas de irrigação refletem em aumento significativo na qualidade ou na  
15 produtividade dos frutos (Dag et al. 2008, Kiggundu et al. 2012, Dinc et al. 2018), uma vez que  
16 quanto maiores são os níveis de água aplicada no solo, maiores serão as chances de ocorrer a  
17 lixiviação de nutrientes para fora do alcance do sistema radicular, acarretando na redução do  
18 potencial produtivo da cultura e na eficiência de produtividade da água e conseqüentemente  
19 aumentando os custos de produção (Chai et al. 2015).

#### 20 4.3.6 Coeficientes de cultivo simples e dual

21 Os valores de K<sub>c</sub> variaram de um mínimo no estágio de pré-floração a um máximo no  
22 estágio de fruto verde nas duas safras. Na pré-floração observa-se que a demanda hídrica da  
23 atmosférica é maior que a demanda hídrica da cultura (K<sub>c</sub> < 1), o que pode estar relacionado  
24 com uma série de fatores, como o fato de ser um período de transição da época menos chuvosa  
25 para a mais chuvosa (figura 3), onde a quantidade de água no solo ainda é um fator limitante  
26 (conteúdo volumétrico de água no solo abaixo da faixa de umidade crítica), o que reduz as  
27 trocas gasosas entre o açaizeiro e a atmosfera, aliado também a menor área foliar em razão do  
28 lançamento de novas inflorescências que ficam localizadas nas bainhas foliares e são lançadas  
29 a partir da abscisão das folhas.

30 O estágio de fruto verde se inicia com o aparecimento dos primeiros frutos do açaizeiro,  
31 após a queda das flores, nesse estágio a demanda hídrica da cultura supera a demanda da  
32 atmosfera (K<sub>c</sub> > 1) em função de boas condições hídricas do solo e da maior necessidade  
33 energética da cultura para a produção e destinação de fotoassimilados para o crescimento e

1 desenvolvimento do fruto. Os valores de  $K_c$  encontrados para o açazeiro ao serem contrastados  
2 com outras frutíferas perenes como o cacauzeiro e a bananeira apresentam grandeza de valores  
3 semelhantes, variando de 0,90 a 1,10 (Allen et al. 1998).

4 Os resultados de  $K_c$  para palmeiras tropicais obtidos nos estudos de Sousa et al. (2011)  
5 e Meijide et al. (2017) para o coqueiro (0,90) e a palma de óleo (1,06), respectivamente, ainda  
6 são incipientes, dada a importância social e econômica de muitas espécies. Os principais  
7 entraves para se gerar dados sobre os coeficientes de cultivo se dão em função do grande porte  
8 das espécies que geram dificuldade de instalação dos equipamentos capazes de monitorar com  
9 precisão a evapotranspiração das culturas e a demanda da atmosfera, além dos elevados custos  
10 para aplicação de alguns métodos.

11 O  $K_e$  mostrou-se crescentes em função dos diferentes estádios fenológicos, com  
12 mínimos valores durante o estágio de pré-floração, que é quando se tem uma maior cobertura  
13 do solo em detrimento da maior abscisão das folhas para que ocorra o lançamento das espatas.  
14 Freitas et al. (2014), ao estudarem a evaporação de água no solo, verificaram relação direta  
15 entre as diferentes frações de cobertura do solo e a redução nas taxas de evaporação, onde um  
16 solo coberto com até 50% do seu total proporcionou reduções variando entre 17 e 30%, o que  
17 é justificado pela redução na quantidade de energia que chega ao solo. Já os máximos valores  
18 de  $K_e$  foram observados durante o estágio de maturação dos frutos, quando se tinha a reposição  
19 diária de água no solo através da irrigação (figura 3) e disponibilidade energética elevada  
20 (figura 2), acarretando na maior evaporação de água no solo, influenciada principalmente pela  
21  $\theta$ ,  $U_R$ ,  $u_2$ ,  $R_g$  e pelas temperaturas do solo e do ar.

22 A variabilidade do  $K_{cb}$  ao longo da fase reprodutiva do açazeiro assemelha-se ao  
23 padrão do  $K_c$ , demonstrando-se máxima no estágio de fruto verde quando o conteúdo  
24 volumétrico de água no solo está acima da faixa de umidade crítica que correspondente ao  
25 limite da AFD em decorrência da grande quantidade de chuvas no período que proporciona  
26 maior absorção de água e nutrientes acarretando em maior taxa de transpiração.

27 Observou-se que os valores de  $K_{cb}$  oscilariam consideravelmente principalmente  
28 durante os estádios de pré-floração, floração e fruto verde, que é quando se tem uma maior  
29 quantidade de água no solo que favorece as atividades fotossintéticas das folhas, acarretando  
30 na maior abertura dos poros estomáticos que reduzem a resistência estomática favorecendo a  
31 maior taxa de transpiração (Silva et al. 2017). Essas condições de suprimento hídrico abundante  
32 favorecem a translocação e produção de fotoassimilados que são destinados a produção dos  
33 frutos do açazeiro, que tem sobretudo no estágio de fruto verde o ganho no crescimento do  
34 fruto (Fan et al. 2015) e conseqüentemente maiores valores de produtividade da água.

1 Durante os estádios de fruto preto e maturação observou-se que as maiores oscilações  
2 percentuais ocorreram para o Ke e foram influenciadas pelas variações no conteúdo de água do  
3 solo como resultado da menor frequência e intensidade de eventos de chuva e da utilização de  
4 uma lamina empírica bruta de irrigação, atrelados à elevada demanda energética da atmosfera,  
5 padrão esse relatado por Allen e Pereira (2009) que observaram em seus estudos variações  
6 bruscas no Ke em função da variação na frequência de molhamento do solo, ocasionando  
7 maiores perdas de água por evaporação e menores por transpiração, quando comparado aos  
8 estádios anteriores, em função do aumento da T,  $u_2$  e DPV e da redução da chuva e da UR que  
9 influenciaram diretamente para que o período dispusesse de menor disponibilidade de água no  
10 solo (Wijewardana et al. 2019).

11 Ao analisar os coeficientes de cultivo Ke e Kcb verifica-se que do total de água aplicada  
12 pela irrigação no período menos chuvoso do ano, 25,93% correspondeu a taxa utilizada pela  
13 evaporação e 74,07% foram utilizados pela transpiração do açazeiro, isso significa que durante  
14 os períodos de irrigação o processo de evaporação de água no solo consumiu um total de 85,90  
15 mm na primeira safra e 65,49 mm na segunda safra.

16 Essa água transferida para a atmosfera por evaporação não participa dos processos de  
17 assimilação de CO<sub>2</sub> pela planta (Steduto et al. 2007), o que acarreta redução na eficiência da  
18 evapotranspiração, porém esse processo pode incrementar a eficiência da transpiração, desde  
19 que as condições climáticas não promovam elevada diferença no déficit de pressão de vapor  
20 entre o interior da folha e a atmosfera, e que as condições vento não influenciem na redução  
21 das trocas gasosas (Tanner e Sinclair 1983).

22 As distintas condições climáticas observadas entre os experimentos proporcionaram  
23 maior evaporação da água do solo na primeira safra conforme observados pelos resultados dos  
24 microlisímetros, o que pode ter contribuído para a redução da disponibilidade de água no solo  
25 próximo à touceira do açazeiro, e conseqüentemente influenciado na transpiração do açazeiro.  
26 Sob tais condições de menor disponibilidade de água no solo próximo à planta, alguns estudos  
27 realizados com outras palmeiras, como os de Passos et al (2005) para o coqueiro e de Viana et  
28 al (2019) para palma de óleo, comprovaram que as plantas adotam a estratégia de fechar  
29 parcialmente os estômatos com a finalidade de reduzir a perda de água pela transpiração. Os  
30 resultados sugerem que essa estratégia pode também ter sido adotada pelo açazeiro, o que  
31 propiciou que a PAC fosse 13,6% superior na segunda safra quando comparado à primeira  
32 safra.

33 Motivo pelo qual, faz-se necessário a adoção de técnicas de manejo que visem reduzir  
34 essa perda de água aumentando a eficiência de utilização pela transpiração. Uma solução seria

1 a utilização de resíduos vegetais afim de favorecer a melhor cobertura do solo, utilizando folhas  
2 e cachos secos do próprio açazeiro, bem como de outras espécies, principalmente durando os  
3 meses de julho a novembro que é quando se tem a maior demanda hídrica da atmosfera.

4 Portanto, a presente pesquisa evidencia a importância de um correto manejo de irrigação  
5 do ponto de vista ambiental e econômico, pois fornece dados capazes de auxiliar o uso racional  
6 dos recursos hídricos, aplicando as reais demandas de água para o açazeiro, evitando possíveis  
7 estresses hídricos que levem a queda de produtividade e conseqüentemente, em aumentos dos  
8 custos de produção e em inutilização do real potencial produtivo do açazeiro.

#### 9 **4.4 CONCLUSÃO**

10 Os resultados dessa pesquisa ao longo dos dois anos de experimento, demonstraram que  
11 o emprego do balanço de energia com base na razão de Bowen apresenta resultados  
12 satisfatórios, propiciando estimar o consumo hídrico total do açazeiro que variou entre 1130,22  
13 mm na safra 1 e 999,49 mm na safra 2.

14 A diferença na demanda atmosférica durante as duas safras do açazeiro proporcionaram  
15 um consumo hídrico diário médio ( $ET_c$ ) de  $3,69 \text{ mm dia}^{-1}$  na primeira safra e de  $3,28 \text{ mm dia}^{-1}$   
16 na segunda safra, demonstrando a importância do correto manejo da irrigação no açazeiro, pois  
17 permite projetar de forma adequada protocolos de gerenciamento de água mais adequados as  
18 necessidades hídricas da cultura.

19 Os coeficientes de cultivo simples ( $K_c$  1,08) e dual ( $K_e$  0,21 e  $K_{cb}$  0,84) do açazeiro  
20 são resultados imprescindíveis para a expansão do cultivo irrigado, pois permite aumentar a  
21 eficiência do uso da água pela cultura, o que conseqüentemente acarreta em ganhos econômicos  
22 para o produtor.

## 1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2 Abdelkhalik A, Pascual B, Nájera I, Domene MA, Baixauli C, Pascual-Seva N (2019) Effects  
3 of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet  
4 pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. **Irrig Sci** 38:89–104.  
5 <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>
- 6 Abrisqueta I, Abrisqueta JM, Tapia LM, Munguía JP, Conejero W, Vera J, Ruiz-Sánchez MC  
7 (2013) Basal crop coefficients for early-season peach trees. **Agric Water Manag** 121:158–163.  
8 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.001>
- 9 Aguiar AG, Martins PFS, Simões AV (2017) Efeitos da intensidade do desbaste de estipes de  
10 açazeiros (*Euterpe oleracea* Mart.) nativos na composição de parcelas de produção em várzea  
11 do estuário amazônico. **Rev Cienc Agrar** 60:358-365. <https://doi.org/10.4322/rca2709>
- 12 Allen RG, Pereira LS (2009) Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and  
13 height. **Irrig Sci** 28:17-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
- 14 Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop Evapotranspiration: Guidelines for  
15 Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper** 56. Rome, 300p.
- 16 Barbosa M, Lobato A, Pereira T, Viana G, Barbosa J, Coelho K (2017) Antioxidant system is  
17 insufficient to prevent cell damages in *Euterpe Oleracea* exposed to water deficit. **Emir J Food**  
18 **Agric** 29:206-211. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2016-09-1217>
- 19 Barr AG, King KM, Gillespie TJ, Den Hartog G, and Neumann HH (1994) A comparison of  
20 Bowen ratio and eddy correlation sensible and latent heat flux measurements above a deciduous  
21 forest. **Boundary Layer Meteorol** 71:21 – 41. doi:10.1007/BF00709218
- 22 Bencke CSC, Morellato LPC (2002) Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia  
23 de plantas, sua interpretação e representação. **Rev Bras Bot** 3:269-276.  
24 <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-84042002000300003>
- 25 Billesbach DP, Arkebauer TJ (2012) First long-term, direct measurements of  
26 evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills. **Agric For Meteorol**  
27 156:104-110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.001>
- 28 Canalis-Ide F, Zubelzu S, Rodríguez-Sinobas L (2019) Irrigation systems in smart cities coping  
29 with water scarcity: The case of Valdebebas, Madrid (Spain). **J Environ Manage** 247:187–  
30 195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.062>
- 31 Chai Q, Gan Y, Zhao C, Xu HL, Waskom RM, Niu Y, Siddique KHM (2015). Regulated deficit  
32 irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agron Sustain Dev** 36(3).  
33 <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>
- 34 Chebbi W, Boulet G, Dantec VL, Chabaane ZL, Fanise P, Mougnot B, Ayari H (2018)  
35 Analysis of evapotranspiration components of a rainfed olive orchard during three contrasting  
36 years in a semi-arid climate. **Agric For Meteorol** 256-257:159–178.  
37 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.02.020>
- 38 Conforto EC, Contin DR (2009) Desenvolvimento do açazeiro de terra firme, cultivar Pará,  
39 sob atenuação da radiação solar em fase de viveiro. **Bragantia** 68:979-983.  
40 <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400018>

- 1 Consoli S, Milani M, Cirelli G, Barbagallo S, Marzo A, Vanella D, Toscano A (2018) Energy  
2 and water balance of a treatment wetland under mediterranean climatic conditions. **Ecol Eng**  
3 116:52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.029>
- 4 Consoli S, Papa R (2013) Corrected surface energy balance to measure and model the  
5 evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions. **Irrig**  
6 **Sci** 31:1159-1171. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0395-4>
- 7 Dag A, Ben-Gal A, Yermiyahu U, Basheer L, Nir Y, Kerem Z (2008) The effect of irrigation  
8 level and harvest mechanization on virgin olive oil quality in a traditional rain-fed “Souri” olive  
9 orchard converted to irrigation. **J Sci Food Agric** 88:1524–1528. doi:10.1002/jsfa.3243
- 10 Dicken U, Cohen S, Tanny J (2013) Examination of the Bowen ratio energy balance technique  
11 for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosyst Eng** 114:397-405.  
12 <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.11.001>
- 13 Dinc N, Aydinsakir K, Isik M, Bastug R, Ari N, Sahin A, Buyuktas D (2018) Assessment of  
14 different irrigation strategies on yield and quality characteristics of drip irrigated pomegranate  
15 under mediterranean conditions. **Irrig Sci** 36:87–96. [https://doi.org/10.1007/s00271-017-0565-](https://doi.org/10.1007/s00271-017-0565-5)  
16 5
- 17 Domínguez-Niño JM, Oliver-Manera J, Girona J, Casadesús J (2020) Differential irrigation  
18 scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture  
19 sensors. **Agric Water Manag** 228:105880. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105880>
- 20 Doorenbos J, Pruitt WO (1977) Crop Water Requirement: Food and Agriculture Organization  
21 of the United Nations. **FAO Irrigation and Drainage Paper** 24, Rome, 144.
- 22 Euser T, Luxemburg WMJ, Everson CS, Mengistu MG, Clulow AD, Bastiaanssen WGM  
23 (2014) A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb  
24 temperature profiles. **Hydrol Earth Syst Sci** 18:2021-2032. [https://doi.org/10.5194/hess-18-](https://doi.org/10.5194/hess-18-2021-2014)  
25 2021-2014
- 26 Fan X, Hu H, Huang G, Huang F, Li Y, Palta J (2015) Soil inoculation with *Burkholderia* sp.  
27 LD-11 has positive effect on water-use efficiency in inbred lines of maize. **Plant Soil** 390:337–  
28 349. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2410-z>
- 29 Fausto MA, Machado NG, Nogueira JS, Biudes MS (2014) Net radiation estimated by remote  
30 sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. **J Appl Remote Sens** 8:083541.  
31 <https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083541>
- 32 Flumignan DL, Faria RT, Lena BP (2012) Test of a microlysimeter for measurement of soil  
33 evaporation. **Eng Agricola** 32:80-90. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000100009>
- 34 Foong SF (1993) Potential evaporation, potential yields and leaching losses of oil palm. In:  
35 Basiron Y, Jalani S, Chang KC, Cheah SC, Henson IE, Kamarudin N, Paranjothy K, Rajanaidu  
36 N, Tayeb D (eds) Proceeding of the 1991 **PORIM** international palm oil conference.  
37 Agriculture Palm Oil Research Institute, Kuala Lumpur, pp 105–119
- 38 Fraga CIM, Sanches L, Pinto Junior OB, Curado LFA, Gaio DC (2015) Condutância do dossel,  
39 condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens* Pohl  
40 (vochysiaceae) no pantanal brasileiro. **Rev Bras Meteorol** 30:275–284.  
41 <https://doi.org/10.1590/0102-778620130102>

- 1 Freitas LPS, Gava R, Faria TR, Rezende R, Vieira PVD (2014) Soil evaporation under different  
2 straw mulch fractions. **Afr J Agric Res** 9:1793-1800. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7854>
- 3 Friedrich K, Molders N, Tetzlaff G (2000) On the Influence of Surface Heterogeneity on the  
4 Bowen-Ratio: A Theoretical Case Study. **Theor Appl Climatol** 65:181-196.  
5 <https://doi.org/10.1007/s007040070043>
- 6 Garcia VA, Barbedo CJ (2016) Estudo fenológico de *Bactris gasipaes* Kunth, *Euterpe edulis*  
7 Mart. e *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman no Vale do Ribeira, SP, Brasil. **Hoehnea**  
8 43:135-149. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-40/2015>
- 9 Gavilán P, Berengena J (2007) Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for  
10 measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrig Sci** 25:127-140.  
11 <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0040-1>
- 12 Girona J, Del Campo J, Mata M, Lopez G, Marsal J (2010) A comparative study of apple and  
13 pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. **Irrig Sci** 29:55–63.  
14 <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0217-5>
- 15 Guo Y, Sun L (2011) Surface energy fluxes and control of evapotranspiration from a *Carex*  
16 *lasiocarpa* mire in the Sanjiang Plain, Northeast China. **Int J Biometeorol** 56:221–232.  
17 <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0415-8>
- 18 Heilman JL, Mcinnes KJ, Savage MJ, Gesh RW, Lascano RJ (1994) Soil and canopy energy  
19 balance in a west Texas vineyard. **Agric For Meteorol** 71:99-114.  
20 [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90102-3)
- 21 Homma AKO, Muller AA, Muller CH, Ferreira CAP, Figueirêdo FJC, Viegas IJM, Lemos WP  
22 (2005) **Sistema de produção do açaí. Sistema de produção**. Versão eletrônica. Retrieved  
23 from <https://www.infoteca>  
24 [.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/408196/1/SISTEMAPROD4ONLINE.pdf](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/408196/1/SISTEMAPROD4ONLINE.pdf) accessed  
25 Oct 26, 2019.
- 26 Hou LG, Xiao HL, Si JH, Zhou MX, Yang YG (2010) Evapotranspiration and crop coefficient  
27 of *Populus euphratica* Oliv forest during the grow in season in the extreme arid region  
28 northwest China. **Agric Water Manag** 97:351-356.  
29 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.09.022>
- 30 Hu S, Zhao C, Li J, Wang F, Chen Y (2013) Discussion and reassessment of the method used  
31 for accepting or rejecting data observed by a Bowen ratio system. **Hydrol Process** 28:4506-  
32 4510. <https://doi.org/10.1002/hyp.9962>
- 33 Jazayeri SM, Rivera YD, Camperos-Reyes JE, Romero HM (2015) Physiological effects of  
34 water deficit on two oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) genotypes. **Agron Colomb** 33:164-173.  
35 <https://doi.org/10.15446/agron.-colomb.v33n2.49846>
- 36 Kiggundu N, Migliaccio KW, Schaffer B, Li Y, Crane JH (2012) Water savings, nutrient  
37 leaching, and fruit yield in a young avocado orchard as affected by irrigation and nutrient  
38 management. **Irrig Sci** 30:275–286 <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0280-6>
- 39 Kustas WP, Prueger JH, Hatfield JL, Ramalingam H, Hipps LE (2000) Variability in soil heat  
40 flux from a mesquite dune site. **Agric For Meteorol** 103:249-264.  
41 [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(00\)00131-3](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(00)00131-3)

- 1 Machado NG, Sanches L, Silva LB, Novais JWZ, Aquino AM, Biudes MS, Pinto-Junior OB,  
2 Nogueira JS (2016) Soil nutrients and vegetation structure in a neotropical seasonal wetland.  
3 **Appl Ecol Environ Res** 13:289-305. [https://doi.org/10.15666/aeer/1302\\_289305](https://doi.org/10.15666/aeer/1302_289305)
- 4 Meijide A, Röhl A, Fan Y, Herbst M, Niu F, Tiedemann F, June T, Rauf A, Hölscher D, Knohl  
5 A (2017) Controls of water and energy fluxes in oil palm plantations: Environmental variables  
6 and oil palm age. **Agric For Meteorol** 239:71–85.  
7 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.02.034>
- 8 McNaughton KG, Jarvis PG (1983) Predicting effects of vegetation changes on transpiration  
9 and evaporation. In: Kozlowski TT (ed) Water deficit and plant growth **Academic Press**, New  
10 York, pp 1–47. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-424157-2.50007-0>
- 11 Niaghi AR, Jia X, Steele DD, Scherer TF (2019) Drainage water management effects on energy  
12 flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. **Agric Water Manag**  
13 225:105760. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105760>
- 14 Nizinski JJ, Galat G, Galat-Luong A (2014) Actual evapotranspiration and canopy resistance  
15 measurement of the savannah in the Kouilou basin (Congo-Brazzaville). **Russ J Ecol** 45:359–  
16 366. <https://doi.org/10.1134/s1067413614050191>
- 17 Nogueira AKM, Santana AC (2016) Benefícios socioeconômicos da adoção de novas  
18 tecnologias no cultivo do açaí no Estado do Pará. **Rev Ceres** 63:001-007.  
19 <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663010001>
- 20 Oliveira MSP (2002) Cultivo do açaizeiro para produção de frutos. Belém, PA: Embrapa  
21 Amazônia Oriental. Circular técnica 26, 18p.
- 22 Oliveira FJ, Farias PR, Silva AG, Rodrigues KC (2016) Distribuição espacial da leprose dos  
23 citros na Amazônia Oriental. **Rev Ciênc Agron** 47:56-68. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160007>
- 24
- 25 Ortega-Farias S, Poblete-Echeverria C, Brisson N (2010) Parameterization of a two-layer  
26 model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements. **Agric**  
27 **For Meteorol** 150:276–286. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.012>
- 28 Paço TA, Ferreira MI, Rosa RD, Paredes P, Rodrigues GC, Conceição N, Pacheco PA, Pereira  
29 LS (2011) The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the  
30 evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance  
31 measurements. **Irrig Sci** 30:115–126. <https://doi.org/10.1007/s00271-011-0267-3>
- 32 Pereira H (1957) Field measurements of water use for irrigation control in Kenya coffee. **J.**  
33 **Agric. Sci** 49:459-466. <https://doi.org/10.1017/S0021859600038466>
- 34 Pereira AR, Azevedo PV, Lourenço ERC, Saboya LMF, Bezerra JRC (2017)  
35 Evapotranspiração da cultura do gergelim irrigada na região da chapada do Apodí-RN. **Irriga**  
36 22:497-511. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n3p497-511>
- 37 Perez PJ, Castellvi F, Ibañez M, Rosell JI (1999) Assessment of reliability of Bowen ratio  
38 method for partitioning fluxes. **Agric For Meteorol** 97:141-50. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00080-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00080-5)
- 39

- 1 Passos CD, Passos EEM, Prado CHBA (2005) Comportamento sazonal do potencial hídrico e  
2 das trocas gasosas de quatro variedades de coqueiro-anão. **Revista Brasileira de Fruticultura**  
3 27:248-254. <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452005000200016>
- 4 Peters A, Groh J, Schrader F, Durner W, Vereecken H, Pütz T (2017) Towards an unbiased  
5 filter routine to determine precipitation and evapotranspiration from high precision lysimeter  
6 measurements. **J Hydrol** 549:731-740. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.015>
- 7 Prueger JH, Parry CK, Kustas WP, Alfieri JG, Alsina MM, Nieto H, Wilson TG, Hipps LE,  
8 Anderson MC, Hatfield JL, Gao F, Lynn G, McKee LG, McElrone A, Agam N, Los SA (2018)  
9 Crop Water Stress Index of an irrigated vineyard in the Central Valley of California. **Irrig Sci**  
10 37:297–313. <https://doi.org/10.1007/s00271-018-0598-4>
- 11 Rana G, Katerji N (1996) Evapotranspiration measurement for tall plant canopies: The sweet  
12 sorghum case. **Theor Appl Climatol** 54, 187–200. <https://doi.org/10.1007/BF00865161>
- 13 Rana G, Katerji N (2000) Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field  
14 under Mediterranean climate: A review. **Eur J Agron** 13:125-153.  
15 [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- 16 Rao AS (1989) Water requirements of young coconut palms in a humid tropical climate. **Irrig**  
17 **Sci** 10:245–249. <https://doi.org/10.1007/BF00257956>
- 18 Rogers JS, Allen LH, Calvert DJ (1983) Evapotranspiration for humid regions: developing  
19 citrus grove, grass cover. **Trans ASAE** 26:1778–1783. <https://doi.org/10.13031/2013.33842>
- 20 Savage MJ (2010) Field Evaluation of Polymer Capacitive Humidity Sensors for Bowen Ratio  
21 Energy Balance Flux Measurements. **Sensors** 10:7748–7771.  
22 <https://doi.org/10.3390/s100807748>
- 23 Silber A, Naor A, Cohen H, Bar-Noy Y, Yechieli N, Levi M, Noy M, Peres D, Duari K, Narkis  
24 S, Assouline S (2019) Irrigation of “Hass” avocado: effects of constant vs. temporary water  
25 stress. **Irrig Sci** 37:451–460. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>
- 26 Silva BB, Silva STA, Gomes HB (2011) Balanço de Radiação no Perímetro Irrigado São  
27 Gonçalo – PB mediante imagens Orbitais. **Rev Caatinga** 24:143-152. Retrieved from  
28 <http://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/sistema>. accessed feb 10, 2019.
- 29 Silva LDB, Lyra GB, Silva JBG, Pinho CF, Nascentes AL, Almeida GV, Folegatti MV (2016)  
30 Desempenho do método do balanço de energia - razão de bowen na estimativa da  
31 evapotranspiração de referência. **Irriga** 21:516-529.  
32 <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v21n3p516-529>
- 33 Silva PA, Cosme VS, Rodrigues KCB, Detmann KSC, Leão FM, Cunha RL, Buselli RAF,  
34 DaMatta FM, Pinheiro HA (2017) Drought tolerance in two oil palm hybrids as related to  
35 adjustments in carbon metabolism and vegetative growth. **Acta Physiol Plant** 39:58.  
36 <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2354-4>
- 37 Silva TJA, Folegatti MV, Silva CR, Alves Júnior J, Bonfim-Silva EM (2007) Balanço de  
38 energia e estimativa da evapotranspiração em culturas irrigadas de maracujazeiro pelo método  
39 da razão de Bowen. **Eng Agrícola** 27:392-403. [https://doi.org/10.1590/S0100-](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300008)  
40 [69162007000300008](https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300008)

- 1 Silva VPR, Azevedo PV, Silva BB (2007) Surface energy balance and evapotranspiration of a  
2 mango orchard grown in a semiarid environment. **Agron J** 99:1391-1396.  
3 <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0232>
- 4 Sinclair TR, Holbrook NM, Zwieniecki MA (2005) Daily transpiration rates of woody species  
5 on drying soil. **Tree Physiol** 25:1469–1472. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.11.1469>
- 6 Sousa IF, Netto AOA, Campeche LFMS, Barros AC, Silva VPR, Azevedo PV (2011) Lisímetro  
7 de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. **Rev**  
8 **Bras de Eng Agrícola e Ambient** 15:526–532. [https://doi.org/10.1590/S1415-](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500014)  
9 [43662011000500014](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500014)
- 10 Souza LAS, Jardim MAG (2007) Produção foliar de mudas de açazeiro (*Euterpe oleracea*  
11 Mart.) em área de vegetação secundária no Nordeste Paraense. **Rev Bras. Biociênc.** 5:225-227.  
12 Retrieved from <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/viewFile/222/215>.  
13 accessed Jul 02, 2019.
- 14 Souza PJOP, Rodrigues JC, Sousa AML, Lima RT, Rocha EJP, Ortega-Farias S (2016) Water  
15 requirement estimate for the reproductive period of mango orchards in the Northeast of the state  
16 of Pará, Brazil. **Rev Bras Frutic** 3:311. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016311>
- 17 Souza PJOP, Rodrigues JC, Sousa AML, Souza EB (2018) Diurnal Energy Balance in a Mango  
18 Orchard in the Northeast of Pará, Brazil. **Rev Bras Meteorol** 33:537-546.  
19 <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786333012>
- 20 Souza RORM, Amaral MACM, Silvestre WVD, Sacramento TM (2013) Avaliação econômica  
21 da irrigação em pomares de açaí. **Rev Bras Agric Irrig** 7:54–65.  
22 <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v7n100004>
- 23 Steduto PTC, Hsiao TC, Fereres E (2007) On the conservative behavior of biomass water  
24 productivity. **Irrig Sci** 25:189-207. <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- 25 Taiz L, Zeiger E (2009) **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre.
- 26 Tanner CB, Sinclair TR (1983) Efficient water use in crop production: research or re-research?  
27 In: Taylor HM, Jordan WA, Sinclair TR (eds) **Limitations to efficient water use in crop**  
28 **production**. ASA, Madison, pp 1–27
- 29 Taylor NJ, Mahohoma W, Vahrmeijer JT, Gush MB, Allen RG, Annandale JG (2014) Crop  
30 coefficient approaches based on fixed estimates of leaf resistance are not appropriate for  
31 estimating water use of citrus. **Irrig Sci** 33:153–166. [http://dx.doi.org/10.1007/s00271-014-](http://dx.doi.org/10.1007/s00271-014-0455-z)  
32 [0455-z](http://dx.doi.org/10.1007/s00271-014-0455-z)
- 33 Teixeira AHC, Bastiaanssen WGM (2012) Five methods for interpret Field measurements of  
34 energy fluxes over a micro-sprinkler irrigated mango orchard. **Irrig Sci** 30:13-28.  
35 <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-010-0256-y>
- 36 Tsai JL, Tsuang BJ, Lu PS, Chang KH, Yao MH, Shen Y (2010) Measurements of  
37 Aerodynamic Roughness, Bowen Ratio, and Atmospheric Surface Layer Height by Eddy  
38 Covariance and Tethersonde Systems Simultaneously over a Heterogeneous Rice Paddy. **J**  
39 **Hydrometeorol** 11:452-466. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JHM1131.1>

- 1 Viana JL, Zolin CA, Silva VQR, Souza AP (2019) Physiological and productive responses of  
2 irrigated oil palm in early development phase. **Irriga** 24:405-423.  
3 <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p405-423>
- 4 Vieira AH, Ramalho AR, Rosa Neto C, Cararo DC, Costa JNM, Vieira Júnior JR, Wadt PGS,  
5 Souza VF (2018) Cultivo do Açaizeiro (*Euterpe oleracea* Martius) no Noroeste do Brasil:  
6 Embrapa Rondônia. Sistemas de produção 36, 90 p.
- 7 Wijewardana C, Alsajri, FA, Irby JT, Krutz LJ, Golden B, Henry WB, Gao W, Reddy KR  
8 (2019) Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential  
9 and spectral features, **J Plant Interact** 14:533-543.  
10 <http://dx.doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>
- 11 Xu G, Xue X, Wang P, Yang Z, Yuan W, Liu X, Lou C (2018) A lysimeter study for the effects  
12 of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize. **Agric**  
13 **Water Manag** 208:1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.040>
- 14 Zwart SJ, Bastiaanssen WGM (2004) Review of measured crop water productivity values for  
15 irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agric Water Manag** 69:115–133.  
16 <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>