

## **Radiation and energy balance in dwarf coconut tree with Landsat 8 images in the State of Ceará, Brazil**

Antônio H. de C. Teixeira<sup>\*</sup>, Janice F. Leivas<sup>\*\*</sup>, Fábio R. de Miranda<sup>\*\*\*</sup>, Gustavo Bayma-Silva<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Ph.D.; Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM, Av. Soldado Passarinho, 303, Fazenda Jardim Chapadão, Campinas – SP - Brasil. Email: heriberto.teixeira@embrapa.br (Corresponding author)

<sup>\*\*</sup> Dr.; Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM.

<sup>\*\*\*</sup> Ph.D.; Embrapa Agroindústria Tropical - CNPAT.

<sup>\*\*\*\*</sup> M.Sc.; Embrapa Monitoramento por Satélite – CNPM.

Received 18 July 2017; accepted 20 September 2017

### **Abstract**

Aiming to subsidize the rational management of irrigated dwarf coconut trees with different ages, Landsat 8 images (L8) and climatic data were used through the SAFER algorithm throughout the year 2016 to model the radiation and energy balance of the crop, in the municipality of Camocim, State of Ceará, Northeast Brazil. Despite the similar patterns in the trends of energy balance components among areas with different plant ages throughout the year, evaporative fraction values (Eff) showed limits of 0.58 in the area with plants from three years to 1, 50 in the area with five-year-old plants. The results indicated the need to control the vegetation between the rows in the rainy season with mulching, with consequent moisture conservation in the root zone during drier periods. The algorithm proved to have a strong sensitivity to quantify the energy and mass changes in irrigation plot scales by the union of remote sensing and climatic data.

Keywords: saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo, *Cocos nucifera* L.

## **Balancos de radiação e energia em coqueiro anão com imagens Landsat 8 no Estado do Ceará, Brasil**

### **Resumo**

Objetivando subsidiar o manejo racional da cultura do coqueiro anão irrigado com diferentes idades, imagens Landsat 8 (L8) e dados climáticos foram usadas através do algoritmo SAFER, ao longo do ano de 2016, para a modelagem dos balanços de radiação e de energia da cultura, no município de Camocim, Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. Apesar dos padrões similares nas tendências dos componentes do balanço de energia entre as áreas com diferentes idades das plantas, ao longo do ano, os valores da fração evaporativa ( $E_f$ ) apresentaram limites de 0,58 na área com plantas de três anos a 1,50 na área com plantas de cinco anos de idade. Os resultados indicaram a necessidade de controle da vegetação nas entrelinhas na época chuvosa com cobertura morta, com consequente conservação da umidade na zona das raízes nos períodos mais secos. O algoritmo provou ter forte sensibilidade para quantificar as trocas de energia e de massa nas escalas de parcelas de irrigação pela união do sensoriamento remoto e dados climáticos.

Palavras-Chave: saldo de radiação, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, fluxo de calor no solo, *Cocos nucifera* L.

### **1. Introdução**

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é uma palmeira tropical de grande importância econômica cultivada entre as latitudes 20° N e 20° S distribuída principalmente na faixa litoral do Brasil. Aliados aos aspectos positivos do mercado, a cultura do coqueiro

anão-verde, dependendo dos manejos adotados, pode florescer com aproximadamente dois anos de idade e atingir mais de 200 frutos planta<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Souza et al., 2011).

As quantificações e análises das trocas de energia e massa na escala de parcelas da cultura são escassas (Roupsard et al., 2006; Miranda et al., 2007),

ganhando mais importância no Brasil com às recentes ocorrências de escassez hídrica natural em algumas regiões de cultivo e competição por água com outros setores. Nestas circunstâncias o uso do sensoriamento remoto por imagens de satélites é relevante para subsídio ao manejo da água, podendo ser aplicado em diferentes escalas espaciais e temporais das culturas irrigadas (Silva et al., 2012; Teixeira et al., 2014).

O uso da equação de Penman-Monteith (PM) tem sido sugerido para aplicação com índices de vegetação remotamente obtidos, tais como o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI) e o Índice de Vegetação Melhorado (EVI), em conjunto com dados climáticos (Cleugh et al., 2007; Nagler et al., 2013). A equação PM é também destacada na obtenção do coeficiente de cultura (Kamble et al., 2013), que é a razão da evapotranspiração atual (ET) pela de referência ( $ET_0$ ) com a cultura sob ótimas condições de umidade na zona das raízes (Allen et al., 1998).

O objetivo do atual trabalho foi a aplicação do

algoritmo SAFER, o qual é baseado na equação PM (Teixeira, 2010), com imagens Landsat 8 (L8) em conjunto com dados climáticos, cobrindo as diferentes fases fenológicas do coqueiro anão no ano de 2016, para a quantificação dos componentes dos balanços de radiação e energia. Os resultados podem subsidiar critérios para decisões gerenciais no manejo da cultura, no Nordeste do Brasil, em particular no estado do Ceará, considerando-se a escassez hídrica natural e competição por água entre os diferentes setores.

## 2. Material e métodos

### Área de estudo e dados utilizados

A Figura 1 mostra a localização da área cultivada com a cultura do coqueiro anão na fazenda Boa Esperança, da empresa comercial Ducoco Alimentos S.A., no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil, e a estação agrometeorológica usada na modelagem em conjunto com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto.

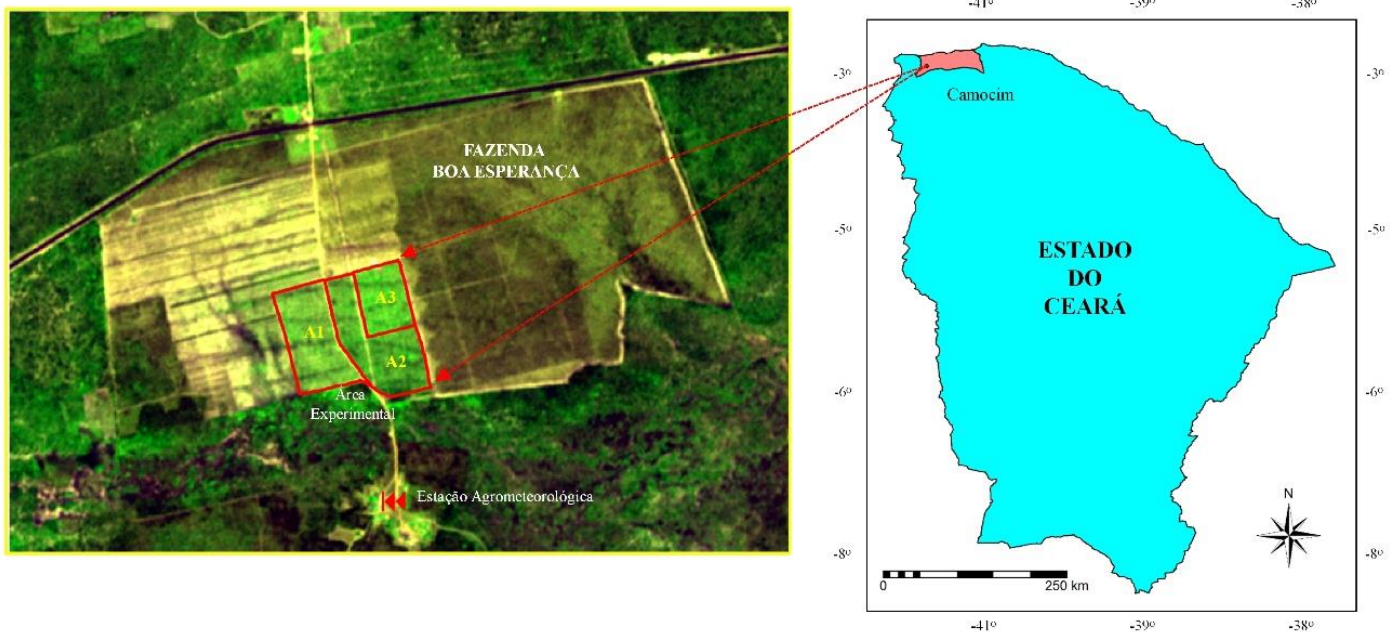


Figura 1 - Localização da área cultivada com a cultura do coqueiro anão na fazenda Boa Esperança, da empresa comercial Ducoco Alimentos S.A., no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil, e a estação agrometeorológica usada na modelagem.

O município de Camocim se localiza na mesorregião do Noroeste Cearense, inserido na bacia do Coreaú. As condições ambientais são as do semiárido predominante no Nordeste brasileiro, marcado por dois períodos definidos, um seco - longo e outro úmido - curto e irregular, com concentração das

chuvas no primeiro semestre (Keltling, 2010). O regime térmico da região é caracterizado por temperaturas elevadas e amplitudes reduzidas, pela proximidade à linha do equador, com os valores máximos variando de 29,4°C (março) a 30,7°C (novembro); e mínimos de

21,2 °C a 23,7 °C, registrados em julho e de janeiro a março (Moraes et al., 2006).

A área experimental está localizada em solo classificado como Neossolo Quartzarênico. As plantas de coqueiro anão verde (*Cocos nucifera L.*), cv. Jiqui, foram plantadas em 2013 (área A1), 2012 (área A2) e 2011 (área A3) no espaçamento triangular de 10 m x 10 m, onde antes era ocupada por coqueiros gigante, com o mesmo espaçamento. As plantas, com altura média de 5 m em 2016, são irrigadas diariamente por micro aspersão, com um emissor por planta, com vazão média de 70 L/h. As adubações são realizadas três vezes por ano, aplicando-se apenas composto orgânico e os cachos são colhidos a cada 21 dias. A emissão de inflorescências é maior nos meses de setembro a dezembro (cerca de 1,6 inflorescências por mês) e menor nos meses de maio-junho (cerca de 1,4 inflorescências por mês).

Uma estação agrometeorológica foi instalada na fazenda (Figura 1), a qual foi usada em conjunto com imagens L8 adquiridas em diferentes condições

termo hídricas do ano de 2016. Os dados de radiação solar global ( $R_G$ ), temperatura do ar ( $T_a$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foram usados em conjunto com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, o albedo da superfície ( $\alpha_0$ ) e o índice da diferença de vegetação normalizado (NDVI) na estimativa da razão  $ET/ET_0$ . Na presença de nebulosidade para alguns dias de revisita do L8, interpolações sucessivas dos pixels de  $\alpha_0$  e NDVI foram aplicadas para a obtenção de  $ET/ET_0$  e usadas com os dados climáticos diários, permitindo o acompanhamento dos estágios fenológicos em intervalos de 16 dias ao longo do ano.

#### Modelagem dos componentes dos balanços de radiação e energia

A Figura 2 apresenta o fluxograma para a modelagem dos componentes dos balanços de radiação e energia na cultura do coqueiro anão através do uso conjunto de imagens L8 e dados climáticos com aplicação do SAFER.

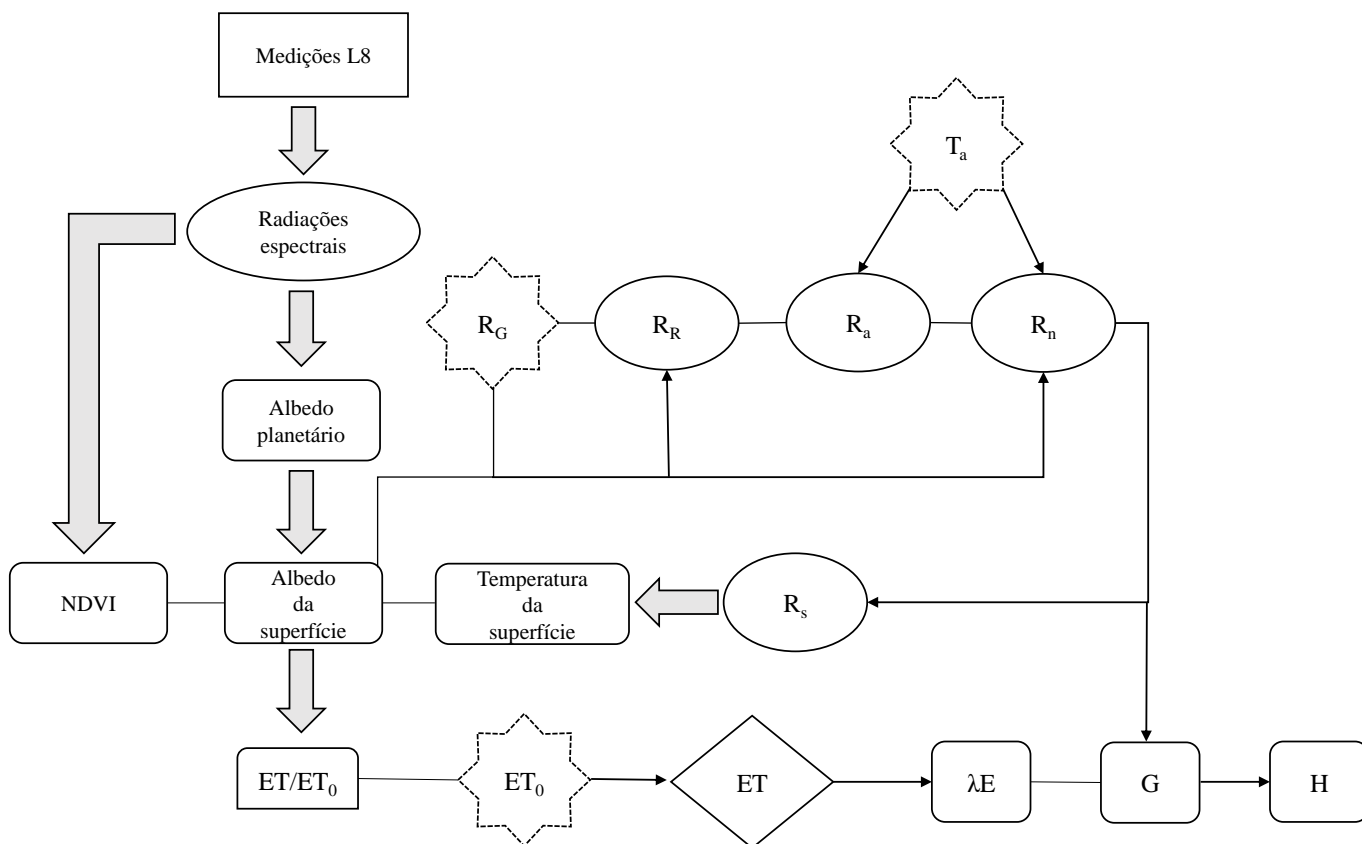


Figure 2 - Fluxograma para a obtenção dos componentes dos balanços de radiação e energia na cultura do coqueiro anão com aplicação do algoritmo SAFER.

As bandas 1 a 7 foram usadas na determinação de  $\alpha_0$  e NDVI, enquanto que a  $T_0$  foi obtida como resíduo no balanço de radiação (Teixeira et al., 2016). A opção de estimativa da  $T_0$  sem a região termal do L8 (método residual) foi devido a problemas nos pixels algumas imagens das bandas 10 e 11 (resolução espacial de 100 m), enquanto que trazendo todos os resultados a uma melhor resolução espacial de 30 m. Além disso, as bandas de 1 a 7 do L8 foram reamostradas para pixels de 5 m com a utilização de uma imagem RapidEye obtida no ano de 2014 (imagem do lado esquerdo da Figura 1).

Todos os coeficientes de regressão para obtenção dos parâmetros apresentados na Figura 2 foram determinados nas condições semiáridas do Nordeste do Brasil, com medições simultâneas do satélite Landsat e de balanços de radiação e energia em campo, envolvendo condições contrastantes de diferentes agros-ecossistemas e termo hídricas ao longo de vários anos (Teixeira et al., 2008; Teixeira, 2010).

Seguindo a Figura 2, as radiações espectrais ( $L_b$ ) foram computadas a partir dos números digitais (DN):

$$L_b = aDN + b \quad (1)$$

onde os coeficientes de regressão a e b foram obtidos nos meta arquivos.

O albedo planetário para cada banda do L8 ( $\alpha_{pb}$ ) foi calculado como:

$$\alpha_{pb} = \frac{L_b \pi d^2}{R_{Tb} \cos \varphi} \quad (2)$$

onde  $L_b$  é a radiação espectral para os comprimentos de onda da banda b ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ), d é a distância relativa Terra-Sol;  $R_{Tb}$  é a irradiância solar média no topo da atmosfera para cada banda ( $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ) e  $\varphi$  é o ângulo zenital.

$R_{Tb}$  para cada uma das bandas de 1 a 7 do sensor L8 foi calculada de acordo com a lei de Planck, integrando a radiação nos intervalos de comprimento de onda e considerando suas frações no espectro solar, assumindo o Sol com um corpo negro. Então para toda a faixa do visível o albedo planetário ( $\alpha_p$ ) foi obtido com a soma total dos valores de  $\alpha_{pb}$  para cada banda de acordo com seus pesos ( $w_b$ ) (Teixeira et al., 2017).

$$\alpha_p = \sum w_b \alpha_{pb} \quad (3)$$

Para a estimativa de  $\alpha_0$ , correções atmosféricas dos valores de  $\alpha_p$  tanto para a passagem do satélite como para 24 horas foram aplicadas através de regressões obtidas de medições conjuntas prévias de campo e por sensoriamento remoto (Teixeira et al., 2008, 2014).

A radiação atmosférica ( $R_a$ ) foi calculada através da lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_a = \sigma \varepsilon_A T_a^4 \quad (4)$$

em que  $T_a$  foi medida na estação agrometeorológica e a emissividade atmosférica ( $\varepsilon_A$ ) foi calculada como (Teixeira et al., 2014, 2017):

$$\varepsilon_A = a_A (\ln \tau_{sw})^{b_A} \quad (5)$$

onde  $a_A$  e  $b_A$  são os coeficientes de regressão de 0,94 e 0,11.

Com a  $R_G$  obtida na estação agrometeorológica e  $\alpha_0$  por sensoriamento remoto, os valores diários da radiação solar refletida pela superfície cultivada ( $R_R$ ) foi estimada:

$$R_R = \alpha_0 R_G \quad (6)$$

Os valores diários de  $R_n$  foram calculados através da equação de Slob (Bruin e Stricker, 2000).

$$R_n = (1 - \alpha_0) R_G - a_L \tau_{sw} \quad (7)$$

onde  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica que no atual trabalho foi considerada como a razão da  $R_G$  para a radiação solar no topo da atmosfera e o coeficiente de regressão  $a_L$  foi obtido através da sua relação com  $T_a$  (Teixeira et al., 2008).

Tendo-se  $R_G$ ,  $R_R$ ,  $R_a$  e  $R_n$ , a radiação de ondas longas emitida pela superfície cultivada ( $R_s$ ) foi obtida como resíduo no balanço de radiação:

$$R_s = R_G - R_R + R_a - R_n \quad (8)$$

A razão da ET para a  $ET_0$ , indicador de umidade na zona das raízes,  $ET_r$ , foi modelada no momento da passagem do satélite:

$$ET_r = \exp \left[ a_{sf} + b_{sf} \left( \frac{T_0}{\alpha_0 NDVI} \right) \right] \quad (9)$$

onde  $a_{sf}$  e  $b_{sf}$  são os coeficientes de regressão (Teixeira, 2010).

Os valores da  $ET_0$ , calculados com os dados da estação agrometeorológicas pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), foram multiplicados pelas imagens resultantes da Eq. 9, fornecendo os valores da ET pixel a pixel nas parcelas e então transformado em unidades de energia para obtenção de  $\lambda E$ :

$$ET = ET_r ET_0 \quad (10)$$

Para os valores diários de G, a seguinte equação foi aplicada (Teixeira, 2010):

$$\frac{G}{R_n} = a_G \exp(b_G \alpha_0) \quad (11)$$

onde  $a_G$  e  $b_G$  são coeficientes de regressão.

Após obtenção de  $R_n$ ,  $\lambda E$  e G, H foi estimado

como resíduo na equação do balanço de energia (Teixeira et al., 2017)

$$H = R_n - \lambda E - G \quad (12)$$

Então um indicador de umidade na zona das raízes foi obtido, a fração evaporativa ( $E_f$ ):

$$E_f = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (13)$$

Na área A2, as lâminas de irrigação aplicadas foram monitoradas utilizando um hidrômetro, instalado no início de uma das linhas laterais do sistema de irrigação.

### 3. Resultados e discussão

#### Forçantes climáticas

A precipitação (P) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) são apresentadas na Figura 3.

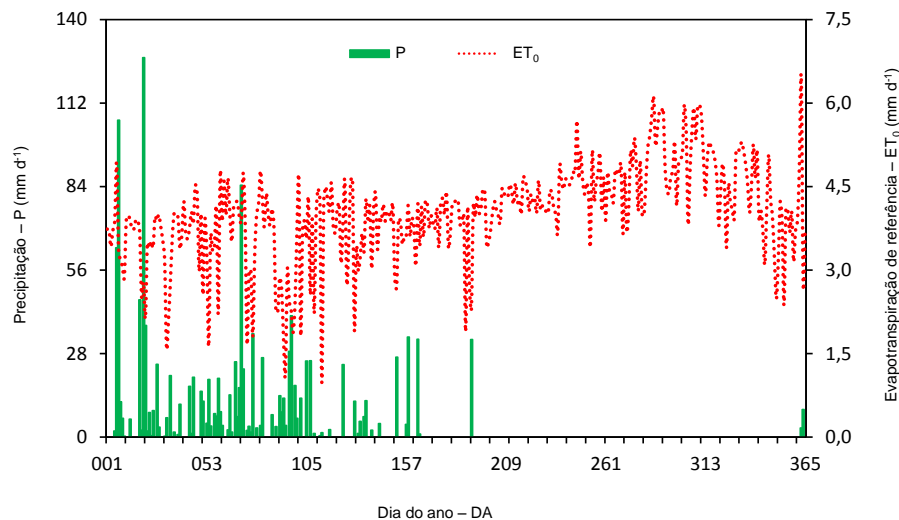


Figure 3 - Tendências dos valores diários da precipitação (P) e da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) durante o ano de 2016 no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

Ao longo do ano de 2016, a variação de P foi mais acentuada que aquela para  $ET_0$ , com as chuvas concentrando-se totalmente no primeiro semestre do ano com vários valores diários acima de 30 mm, sendo que de julho (DA 191) até o final do ano não ocorreram precipitações, caracterizando-se como um período climaticamente muito seco, de acordo com o padrão climatológico (Kelting, 2010), evidenciando a irrigação como um fator decisivo para a produção comercial da cultura do coqueiro anão na região.

Com relação à demanda atmosférica, como a localização é próxima do equador, a amplitude da  $ET_0$  durante o ano é pequena, com os valores mais elevados ocorrendo a partir de setembro (DA 245), quando coincide com o período naturalmente mais seco do ano, com as médias ultrapassaram  $5,0 \text{ mm d}^{-1}$ , intensificando o déficit no balanço hídrico climático. Nestas condições o sol está próximo da posição zenital e sob condições de baixas nebulosidades, o que acarreta em grandes demandas de irrigação, a qual deve

ser realizada baseada nos requerimentos hídricos da cultura, considerando-se o manejo racional da água.

Nas condições de valores elevados tanto de P como de  $ET_0$  no primeiro semestre, a cultura está em situações de maiores fluxos hídricos, e com menor demanda de irrigação, entretanto no segundo semestre, a ausência de chuvas em conjunto com o crescimento contínuo da demanda atmosférica podem resultar em deficiência de água na zona das raízes das plantas se os requerimentos hídricos da cultura não forem satisfeitos

via irrigação.

#### *Balço de radiação na cultura do coqueiro anão*

A Tabela 1 apresenta os valores médios trimestrais dos componentes do balanço de radiação no cultivo de coqueiro anão irrigado, envolvendo diferentes condições termo hídricas ao longo de 2016, no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

Tabela 1 - Valores médios trimestrais dos componentes do balanço de radiação no cultivo de coqueiro anão irrigado no ano de 2016: radiação solar global incidente ( $R_G$ ); radiação solar refletida ( $R_R$ ); radiação de ondas longas emitida pela a atmosfera ( $R_a$ ); e radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $R_s$ ).

Trimestre	$R_G$ (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	$R_R$ (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	$R_a$ (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	$R_s$ (MJ m <sup>2</sup> d <sup>-1</sup> )
<b>Primeiro</b>	16,4	3,2	36,6	42,4
<b>Segundo</b>	17,1	3,3	35,5	42,2
<b>Terceiro</b>	20,1	3,8	35,1	42,7
<b>Quarto</b>	17,1	3,5	37,1	43,5
<i>Média</i>	17,6	3,4	36,1	42,7

A radiação solar global incidente ( $R_G$ ), considerada a soma das radiações direta e difusa do sol, integrada em todos os comprimentos de ondas curtas, apresentou variações ao longo do ano, com os maiores valores no terceiro trimestre, no final da estação chuvosa. Esta condição proporcionaria maior produção de biomassa com boas condições de umidade no solo com a água remanescente das chuvas e aquela proveniente da irrigação. Os menores níveis de  $R_G$  ocorreram no primeiro trimestre, no início da estação chuvosa da região.

Os valores da radiação solar refletida ( $R_R$ ) seguiram a tendência de  $R_G$ , mas  $R_R$  foi também afetada pelas condições de umidade do solo, conforme pode ser visto pelas médias da Tabela 1 em que para um mesmo nível de  $R_G$  no segundo e no quarto trimestres, os valores de  $R_R$  neste último, foram superiores. Isto diferenciou o albedo da superfície ( $\alpha_0 = R_R/R_G$ ), que para os respectivos trimestres foram de 0,19 e 0,20.

Os valores diários de  $\alpha_0$  do estudo corrente são superiores aos reportados por Silva et al (2012), com estes últimos entre 0,14 a 0,18 para coqueiros sob as condições semiáridas no estado da Paraíba, entretanto para o momento da passagem do satélite. A relação de  $\alpha_0$  com as condições de umidade do solo está de acordo

com estudos em diferentes agros-ecossistemas (Li et al., 2006; Teixeira, 2010; Silva et al., 2012; Teixeira et al., 2014).

A contabilidade de  $R_G$  e  $R_R$  fornece o balanço de radiação de ondas curtas, determinando a fração da radiação solar que é absorvida e convertida em energia pela cultura. Por vários processos, incluindo emissão, a superfície cultivada transfere esta energia em forma de ondas longas.

A atmosfera absorve parte da radiação de ondas longas emitida pela superfície ( $R_s$ ). Ao contrário de  $R_R$ , os níveis de  $R_s$  não acompanharam os de  $R_G$ , apresentando um retardamento com relação aos maiores valores, os quais aconteceram no quarto trimestre, diferente daqueles para  $R_G$  os quais foram para o terceiro trimestre. Parte de  $R_s$  volta para a superfície cultivada como radiação de ondas longas emitida pela a atmosfera ( $R_a$ ).

Os níveis de  $R_a$  são dependentes da temperatura do ar ( $T_a$ ) e da concentração de  $CO_2$ , vapor d'água e ozônio.  $R_s$  esteve sempre acima de  $R_a$ , numa faixa de 16 a 22% maior no primeiro e no terceiro trimestre, respectivamente. Então o saldo de radiação de ondas longas representou uma transferência de energia da superfície cultivada para a baixa atmosfera.



### Balço de energia na cultura do coqueiro anão

A Figura 4 apresenta as distribuiões espaciais dos valores diários médios trimestrais dos componentes do balço de energia no cultivo de coqueiro anão

irrigado, envolvendo diferentes condições termo hídricas e idades das plantas ao longo do ano de 2016, no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

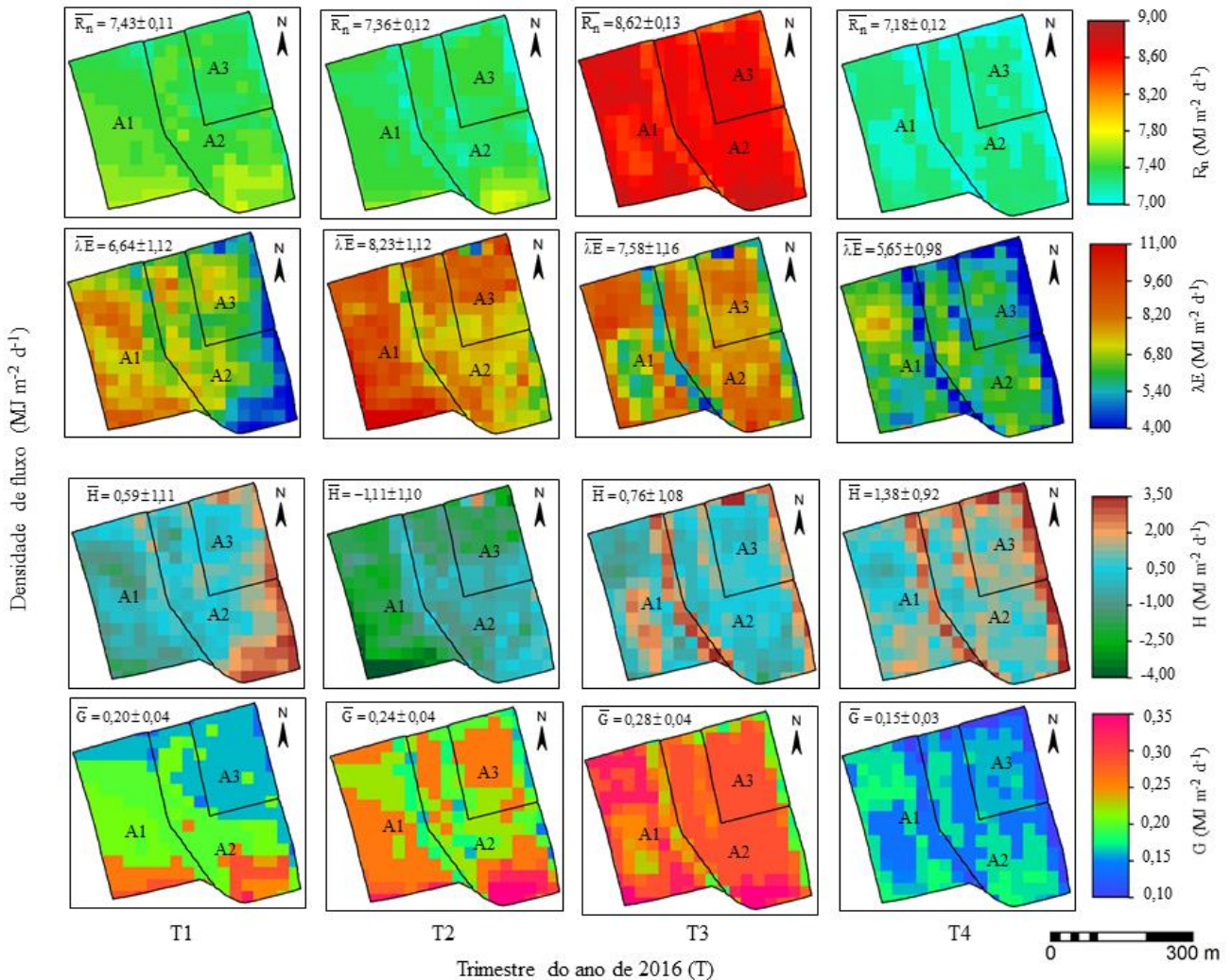


Figura 4 - Distribuição espacial dos valores diários médios trimestrais (T) no ano de 2016, dos componentes do balço de energia na cultura do coqueiro anão irrigado com três (A1), quatro (A2) e cinco (A3) anos de idade. Saldo de radiação ( $R_n$ ); fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ); fluxo de calor sensível (H), e fluxo de calor no solo (G).

O saldo de radiação ( $R_n$ ) representa a diferença entre as densidades de fluxos de energia que entram e saem na superfície cultivada envolvendo todos os comprimentos de onda. As frações de  $R_G$  transformada em  $R_n$  variaram de 45 a 42% do primeiro (T1) ao quarto (T4) trimestre, respectivamente, com média anual de 43%. Estes valores estão em concordância com os encontrados por Silva et al. (2012) para coqueiros anões e para outras fruteiras sob condições de irrigação no Nordeste do Brasil (Teixeira et al., 2008), o que fornece confiança na aplicação do SAFER com imagens L8 e dados climáticos no estudo corrente.

Pela Figura 4 percebe-se que em geral não há distiniões nos valores de  $R_n$  entre as áreas de coqueiro anão com as diferentes idades, apresentando todas, desvios padrões muito baixos, representando de 1 a 2% dos valores médios dos pixels. A mais forte dependência na contabilidade das energias de ondas curtas e longas é com a radiação solar, como percebe-se os maiores valores de  $R_n$  e  $R_G$  no terceiro trimestre (ver Tabela 1 e Figura 4). Ficou claro que não se pode caracterizar diferenças espaciais nos valores de  $R_n$  de acordo com as idades das plantas. Então estas diferenças poderiam ser mais bem notadas

considerando-se as partições de energia entre as parcelas ao longo do ano.

Claramente podem ser vistas diferenças espaciais nos valores espaciais de  $\lambda E$  nas áreas A1, A2 e A3 da Figura 4, de acordo com o período do ano, com os desvios padrões representando de 14 a 17% dos valores médios. O limite inferior destas variações em termos percentuais aconteceu no segundo trimestre (T2), envolvendo o término do período chuvoso e início das irrigações. Em alguns pixels,  $\lambda E$  foi maior que  $R_n$ , com esta condição sendo mais percebida no T2 quando a razão média de  $\lambda E/R_n$  foi de 112%, principalmente na área A1 (coqueiros com 3 anos de idade).

De acordo com as variações espaciais de H, pode-se também distinguir os diferentes níveis de umidade na zona das raízes das plantas nas áreas A1, A2 e A3, com alguns pixels com valores negativos, principalmente no T2, dentro da A1, caracterizando advecção horizontal de calor das áreas mais secas e quentes nas vizinhanças das parcelas com coqueiros irrigados (ver também Figura 1). Esta advecção acarretou em pixels com valores mínimos de H de até  $-4,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , sendo fonte de energia adicional para a cultura, aumentando  $\lambda E$  acima de  $R_n$ .

Os menores níveis de H corresponderam aos

maiores de  $\lambda E$ , acontecendo principalmente na área A1, devido ao elevado teor de umidade na zona das raízes como efeito conjunto das chuvas acumuladas e início das irrigações aliados a advecção horizontal de calor. Os maiores valores positivos de H, correspondendo aos menores de  $\lambda E$  ocorreram no T4, principalmente na área A3, como consequência de um longo período de ausência de chuvas e provável não completo atendimento às exigências hídricas da cultura no manejo da irrigação.

O fluxo de calor no solo (G) foi o componente do balanço de energia que apresentou os valores inferiores, bem como as mais baixas variações espaciais. Entretanto os menores níveis de G destacados no T4 podem ser explicados pela maior fração da energia solar emitida pelos coqueirais em forma de  $R_s$  como resultado de uma temperatura da superfície elevada, mesmo com valores inferiores de  $R_G$ , quando comparado com o T3 (ver Figura 4 e Tabela 1).

A Figura 5 mostra as tendências dos valores diários de  $\lambda E$ , H e G nas áreas com coqueiro anão de três (A1), quatro (A2) e cinco (A3) anos de idade no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

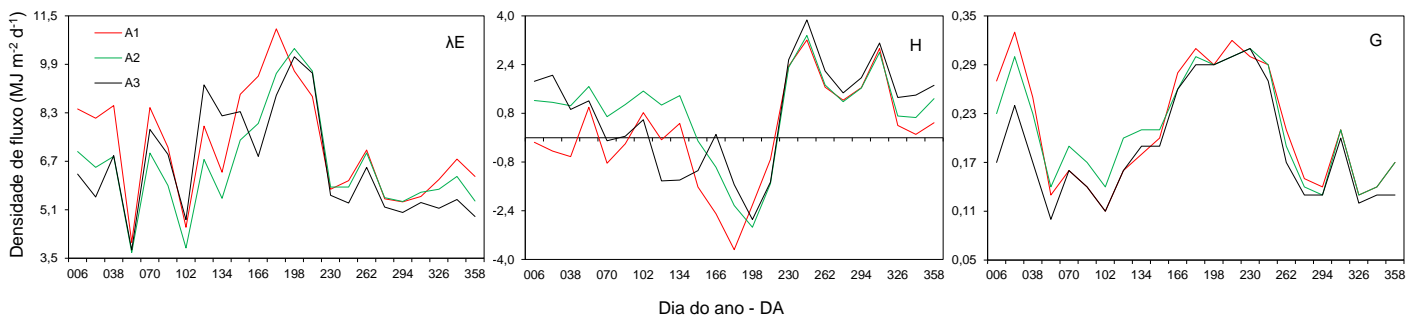


Figura 5 - Tendências dos valores diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível (H), e no solo (G) nas áreas de coqueiro anão com três (A1), quatro (A2) e cinco (A3) anos de idade, durante o ano de 2016 no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

Os maiores valores de  $\lambda E$  ocorreram da segunda quinzena de maio ao final de julho (DA 134 a 214), com pixels acima de  $11,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  nas áreas com plantas de três anos de idade (A1), e médias variando de  $6,6$  a  $7,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , para toda a área experimental.

Silva et al. (2012) encontraram valores de  $\lambda E$  acima de  $13,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  com a aplicação do algoritmo SEBAL em coqueiro anão irrigado na época mais quente da região semiárida do estado da Paraíba, enquanto que no estado de Sergipe, Azevedo et al. (2006), usando o método do balanço hídrico no solo,

reportaram médias de  $6,1$  a  $7,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para plantas com seis anos de idade, de acordo com a quantidade de água aplicada na irrigação. Também neste último estado, Souza et al. (2011) encontraram valores médios de  $9,6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  em uma faixa de  $4,9$  a  $13,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  através de medições lisimétricas, enquanto que Miranda et al. (2007) através do balanço hídrico no solo no litoral do Ceará reportaram um máximo de  $12,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  para plantio com três anos de idade, com média de  $9,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  no quarto ano de idade.

Uma das razões das ligeiras diferenças entre os valores de  $\lambda E$  resultantes de medições pontuais na



literatura com relação ao estudo corrente com sensoriamento remoto, é que neste último caso os resultados representam médias dos pixels.

Os valores mais elevados de  $\lambda E$  foram acompanhados pelos correspondentes mais negativos de H, evidenciando uma energia horizontal adicional à cultura neste período, quando após este, os valores de  $\lambda E$  decresceram e H passou a ter os maiores valores positivos. Os picos de  $\lambda E$  estão dentro da faixa encontrada por Folhes et al. (2009), de 7,4 a 14,7 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> com aplicação do modelo METRIC em fruteiras irrigadas nas condições semiáridas do Nordeste brasileiro, enquanto que valores negativos de H também foram constatados através de medições com um sistema das correlações turbulentas em pomar de laranja nas condições semiáridas do Mediterrâneo na Sicília, Itália (Consoli e PapA, 2013).

Apesar dos valores diários de G terem sido pequenos com relação aos outros componentes do balanço de energia, estes também tiveram oscilações ao longo do ano, começando maiores no início, mas

caindo na segunda metade de fevereiro (DA 023). Após este período observa-se uma curva simétrica, até apresentarem picos acima 0,30 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> de junho a agosto (DA 166-230), sem grandes distinções entre as áreas com diferentes idades de plantio. Os valores diários de G muito pequenos na cultura do coqueiro anão irrigado, em torno de zero, confirmam o fato de que em muitos casos no Nordeste do Brasil este componente pode ser desprezado nesta escala temporal (Teixeira et al., 2008, 2014; Bezerra et al., 2015), com poucos pixels chegando a valores em torno de 0,35 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

As análises das tendências da umidade nas zonas das raízes do coqueiro anão irrigado, ao longo do ano de 2016, foram realizadas pelos dos valores diários da fração evaporativa ( $E_f$ ), considerando as diferentes idades das plantas, através das médias dos pixels das áreas A1, A2 e A3, enquanto que a quantidade de água aplicada via irrigação foi monitorada com hidrômetro apenas na área A2 (Figura 6).

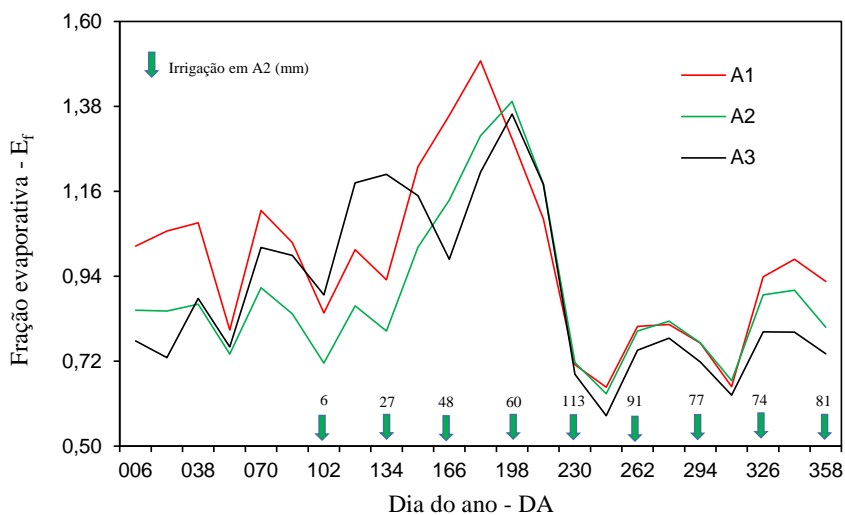


Figura 6 - Tendências da fração evaporativa ( $E_f$ ) nas áreas de coqueiro anão com três (A1), quatro (A2) e cinco (A3) anos de idade, durante o ano de 2016, no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil. As setas verdes representam as lâminas de irrigação acumuladas nos 30 dias anteriores na área A2.

Apesar dos padrões similares nas tendências dos componentes do balanço de energia ao longo do ano, entre as áreas com diferentes idades das plantas, os valores da  $E_f$  apresentaram limites de 0,58 (DA 246, 02 de setembro) na área A3 (cinco anos de idade) a 1,50 (DA 182, 30 de junho) na área A1 (três anos de idade). Com exceção do período de 17 de agosto (DA 230) a 05 de novembro (DA 310), quando a  $E_f$  chegou a ficar abaixo de 0,65, as condições de umidade na zona das raízes se apresentaram boas, com médias de

0,89 (área A2) a 0,98 (área A1). Mesmo que a irrigação tenha sido monitorada com hidrômetro apenas na área A2, pelo comportamento similar da  $E_f$  em todas as áreas no período de ausência das chuvas, considera-se que não houve grandes diferenças no manejo da irrigação entre as áreas.

Os valores mais baixos de  $E_f$  no período de DA 230 a 310 podem significar um não atendimento da irrigação aos requerimentos hídricos da cultura neste período. Uma explicação para isto poderia ser que ao

término do período chuvoso, as irrigações acumuladas prévias de 108 mm entre 16 de maio a 16 de junho não foram suficientes para compensar a água evapotranspirada e drenada, tornando a umidade zona das raízes em um certo nível de estresse hídrico. Miranda et al. (2004) reportaram que mais de 80% das raízes absorventes do coqueiro anão situam-se até a profundidade de 0,60 m em solo do tipo Neossolo Quartzarênico.

Entretanto, deve-se salientar que no primeiro semestre toda a superfície apresentava cobertura vegetal, pois durante o período chuvoso havia boas condições de umidade no solo, tanto sob os coqueiros, quanto nas entrelinhas. No entanto, no período climaticamente mais seco (a partir do DA 195) as espécies das entrelinhas secaram, devido à irrigação localizada apenas sob os coqueiros. Em virtude do largo espaçamento do plantio, os valores de fração do solo coberto pela cultura e fração do solo molhada pelo sistema de irrigação, estimados a partir de medições no campo, correspondiam a apenas 0,45 e 0,32, respectivamente. Esta condição reduz a  $\lambda E$  aumentando  $H$ , e então diminuindo  $E_f$ .

De acordo com Rouspard et al. (2006), a partição dos fluxos de energia e de massa entre as plantas de coqueiro e as espécies nas entrelinhas é de considerável importância para a compreensão dos requerimentos hídricos e dos mecanismos de competição. Estes autores, através de medições separadas de evapotranspiração (ET) e da transpiração (T) em coqueiros com espécies nas entrelinhas, encontraram que transpiração representou 68% da ET, para uma cobertura da superfície pela cultura de 75%.

Consoli e Papa (2013) reportaram valores médios inferiores da  $E_f$  de 0,62 através de medições de campo em pomares de laranja nas condições semiáridas do Mediterrâneo na Sicília, Itália. Nas condições semiáridas do Nordeste do Brasil, Bezerra et al. (2015), aplicando o método da razão de Bowen em cultura do algodoeiro irrigado encontraram valores entre 0,58 a 0,81. Entretanto, Silva et al. (2012) reportaram valor médio da  $E_f$  de 0,85, em plantio de coqueiro anão irrigado, plantado no espaçamento de 7,5 m x 7,5 m em triângulo, portanto mais adensado que o plantio do corrente estudo.

Os resultados indicam que o manejo da cultura do coqueiro anão nas condições estudadas deve atentar para o controle das ervas invasoras nas entrelinhas na época chuvosa, como por exemplo pelo emprego de cobertura morta, concentrando o consumo da água disponível apenas para as plantas de coqueiro. Por outro lado, o emprego da cobertura morta ajudaria a conservação da umidade na zona das raízes nos

períodos climaticamente mais secos, reduzindo estresse hídrico nestas condições.

#### 4. Conclusões

O uso conjunto de imagens Landsat 8 e dados climáticos permitiu a quantificação e análises dos componentes dos balanços de radiação e de energia em nível de parcelas de irrigação do coqueiro anão com diferentes idades durante o ano de 2016, no município de Camocim, estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

O saldo de radiação ( $R_n$ ) foi mais fortemente influenciado pelos níveis de radiação solar que pelas características das plantas com diferentes épocas de plantio, mas as condições hídricas e de vegetação foram bem identificadas pelas partições da energia disponível. Foi demonstrado que os valores diários dos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), sensível ( $H$ ) e no solo ( $G$ ) na cultura podem ser estimados através de medições das radiações nas faixas do visível e infravermelho próximo juntamente com dados climáticos medidos próximos à cultura. Em algumas ocasiões, em pixels bem irrigadas, foi verificada advecção horizontal de calor proveniente das vizinhanças da área estudada, elevando  $\lambda E$  acima de  $R_n$ , e proporcionando valores negativos de  $H$ .

Analisando-se a fração evaporativa ( $E_f$ ) houve diferenças expressivas nos valores de  $E_f$  entre os períodos chuvoso e seco, independentemente da idade do plantio, evidenciando a necessidade de controle da vegetação nas entrelinhas na época chuvosa, visando a conservação da umidade na zona das raízes para um nível ótimo nos períodos mais secos. As análises realizadas podem contribuir para um manejo racional de irrigação da cultura, fornecendo confiança na aplicação do SAFER com imagens Landsat 8 e dados climáticos na cultura do coqueiro anão sob as condições semiáridas do estado do Ceará.

#### Referências

- Allen R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Azevedo, P.V., Sousa, I.F., Silva, B.B. da, Silva, V. de P.R., 2006 Water-use efficiency of dwarf-green coconut (*Cocos nucifera* L.) orchards in northeast Brazil. Agricultural Water Management 84, 259-264.
- Bezerra, B.G., Bezerra, J.R.C., Silva, B.B. da, Santos, C.A.C dos, 2015. Surface energy exchange and evapotranspiration from cotton crop under full

- irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State. *Brazilian Semi-Arid. Bragantia* 74, 120-128.
- Bruin, H.A.R. de, Stricker, J.N.M., 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological Science* 45, 391-406.
- Consoli, S., Papa, R., 2013 Corrected surface energy balance to measure and model the evapotranspiration of irrigated orange orchards in semi-arid Mediterranean conditions. *Irrigation Science* 31, 1159-1171.
- Cleugh, H.A., Leuning, R., Mu, Q., Running, S.W., 2007. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment* 106, 285-304.
- Folhes, M.T., Rennó, C.D., Soares, J.V., 2009. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management* 96, 1398-1409.
- Kamble, B., Kilic A., Hubard, K., 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing* 5, 1588-1602.
- Kelting, F.M.S., 2010. O Clima e a Paisagem da Bacia Hidrográfica do Litoral: Estado do Ceará. *Boletim Goiano de Geografia* 29, 83-99.
- Li, S.-G., Eugster, W., Asanuma, J., Kotani, A., Davaa, G., Oyunbaatar, D., Sugita, M., 2006. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 89-106.
- Miranda, F.R., Montenegro, A.A.T., Lima, R.N., Rosseti, A.G., Freitas, J.A.D., 2004. Distribuição do sistema radicular de plantas jovens de coqueiro-anão sob diferentes frequências de irrigação. *Revista Ciência Agronômica* 35, 309-318.
- Miranda, F.R., Gomes, A.R.M., Oliveira, C.H.C. de, Montenegro, A.A.T., 2007. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo do coqueiro anão-verde na região litorânea do Ceará. *Revista Ciência Agronômica* 38, 129-135.
- Moraes, J.O., Freire, G.S., Pinheiro, L.S., Souza, M.J.N., Carvalho, A.M., Pessoa, P.R.S., Oliveira, S.H.M., 2006. Erosão e Progradação no Litoral Brasileiro. MMA, Brasília.
- Nagler, P.L., Glenn, E.P., Nguyen, U., Scott, R.L., Doody, T., 2013. Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. *Remote Sensing* 5, 3849-3871.
- Roupsard, O., Bonnefond, J.-M., Irvine, M., Berbigier, P., Nouvellon, Y., Dauzat, J., Taga, S., Hamel, O., Jourdan, C., Saint-André, L., Mialet-Serra, I., Labouisse, J.-P., Epron, D., Joffre, R., Braconnier, S., Rouzière, A., Navarro, M., Bouillet, J.-P., 2006. Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 139, 252-268.
- Silva, B.B. da, Braga, A.C., Braga, C.C., Oliveira, L.M.M. de, Galvíncio, J.D., Montenegro, S.M.G.L., 2012. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 1218-1226.
- Sousa, I.F., Netto, A.O.A., Campeche, L.F.M.S., Barros, A.C., Silva, V. de P.R., Azevedo, P.V. de, 2011. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado. *Revista Brasileira Agrícola de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15, 526-532.
- Teixeira, A.H de C., Bastiaanssen, W.G.M., Moura, M.S.B., Soares, J.M., Ahmad, M.-ud-D., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127.
- Teixeira, A. H de C., 2010. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. *Remote Sensing* 2, 1287-1319.
- Teixeira, A.H de C., Hernandez, F.B.T., Lopes, H.L., Scherer-Warren, M., Basso, L.H., 2014 A comparative study of techniques for modeling the spatiotemporal distribution of heat and moisture fluxes in different agroecosystems in Brazil, in: Petropoulos, G.G. (Ed.), *Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content*. 1ed. CRC Group, Taylor and Francis, Boca Raton, pp. 169-191.
- Teixeira, A.H. de C., Leivas, J.F., Silva, G.B., 2016. Options for using Landsat and RapidEye satellite images aiming the water productivity assessments in mixed agro-ecosystems. *Proceedings of SPIE* 9998, 99980A-1-99980A-11.
- Teixeira, A.H. de C., Leivas, J.F., Hernandez, F.B.T., Franco, R.A.M. 2017. Large-scale radiation and energy balances with Landsat 8 images and agrometeorological data in the Brazilian semiarid region. *Journal of Applied Remote Sensing* 11, 016030-1 - 016030-15.