



USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DA NECESSIDADE HÍDRICA DO ALGODOEIRO

Ziany Neiva Brandão¹; Valdinei Sofiatti²; José Renato Cortez Bezerra³; Bergson Guedes Bezerra⁴; João Henrique Zonta⁵

1 Embrapa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA/ CNPA
Caixa Postal 171 - Rua Oswaldo Cruz, 1143 – 58.428-095 – Campina Grande - PB, Brasil
ziany@cnpa.embrapa.br; ²vsofiatti@cnpa.embrapa.br; ³renato@cnpa.embrapa.br; ⁴bergson.bezerra@gmail.com;
⁵zonta@cnpa.embrapa.br

RESUMO - Métodos que calculam a evapotranspiração real da cultura (ET_c) a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de fornecer uma estimativa precisa para grandes áreas. Neste contexto, foi instalado experimento em 2008 no município de Apodi, RN, com o objetivo de estimar a ET_c no algodoeiro irrigado e fazer a validação do SEBAL - *Surface Energy Balance Algorithm for Land*, com dados obtidos em campo através da Razão de Bowen. Foi plantado o cultivar BRS 187 8H, numa área de 4,6 ha, com espaçamento de 0,9m entre linhas. A ET_c foi estimada através de 3 imagens do satélite Landsat 5, obtidas aos 34DAE, 50DAE e 82DAE. A razão de Bowen e a evapotranspiração de referência (ET₀) foram calculadas utilizando dados meteorológicos e de equipamentos instalados na área experimental. Após o cálculo da ET_c com dados de campo e a estimativa da ET_c obtida pelo algoritmo Sebal, os dados foram submetidos à análise comparativa para avaliação do erro nos dados estimados e validação da ET_c obtida pelo SEBAL. Observou-se que a ET_c estimada a partir do algoritmo SEBAL apresenta resultados semelhantes àqueles obtidos através da razão de Bowen, com erro máximo de 13,3%, sendo os valores de ET_c superestimados em pequena magnitude, abrindo caminho para seu uso na avaliação da necessidade hídrica do algodoeiro.

Palavras-chave: *Evapotranspiração, razão de Bowen, método SEBAL.*

INTRODUÇÃO

Em geral, para um adequado manejo hídrico de culturas irrigadas, são utilizados métodos micrometeorológicos como o das correlações turbulentas, da razão de Bowen, métodos indiretos como proposto por FAO 56-Pemnan-Montheith e medidas diretas com lisímetros. Entretanto, apesar de precisos, esses métodos dependem da instalação de equipamentos como sensores ou lisímetros na área, podendo se tornar uma tarefa trabalhosa e de elevado custo. Neste contexto, os métodos que calculam a evapotranspiração a partir de imagens de satélites se mostram muito úteis, pois são capazes de estimar com boa precisão a evapotranspiração real da cultura (ET_c) em grandes áreas, mesmo que essa possuam grande heterogeneidade (BRANDÃO, 2009).

O consumo de água no sistema solo-planta-atmosfera pode ser estimado por meio de imagens de satélite sem a necessidade de quantificação de complexos processos hidrológicos (BASTIAANSEN, 2000), fornecendo uma boa estimativa da evapotranspiração. Gavilán e Berengena (2007) compararam dados da ET_c obtidos com a técnica da razão de Bowen com medidas lisimétricas em áreas que apresentam fortes eventos advectivos e constataram que os mesmos foram superestimados em até 5,7% quando apenas dados diurnos foram considerados. Algoritmos como o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), têm sido aplicados com êxito em diversos ecossistemas para estimativa da ET_c (BASTIAANSEN, 2000; BEZERRA et al., 2008). Nesse algoritmo, a ET_c é estimada a partir da quantificação da densidade de fluxo de calor latente - LE, obtido como resíduo da equação do balanço de energia - BE. Segundo Tasumi (2003), a estimativa da ET obtida pelo método SEBAL indica alto potencial em áreas agrícolas quando comparada às medidas lisimétricas, resultando em informações com boa precisão para o gerenciamento dos recursos hídricos, tendo sido obtidos erros médios em torno de 2,5%.

O déficit hídrico ou excesso de umidade durante a formação das estruturas reprodutivas do algodoeiro podem comprometer a produtividade da cultura uma vez que leva a abscisão dos botões florais e de maçãs jovens. Conseqüentemente, o conhecimento da evapotranspiração real da cultura - ET_c é de fundamental importância no algodoeiro irrigado. Assim, o objetivo desse trabalho foi a validação do método SEBAL para a estimativa da ET_c no algodoeiro irrigado.

METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em condições de campo, sendo instalado no município de Apodi, Rio Grande do Norte. A área experimental, com coordenadas centrais de 5°37'21" S e 37°48'57" W, possui altitude média de 130 m, sendo apresentada na Figura 1 como composição RGB: 543 de imagens do sensor TM Landsat-5, aos 34, 50 e 82 dias após a emergência do algodoeiro (DAE).

O clima da região é caracterizado como tropical quente e semiárido com predominância do tipo BSw'h', da classificação climática de Köppen. Foi plantado a cultivar BRS 187 8H, numa área de 4,6 ha, com espaçamento de 0,9m entre linhas. Os solos da área experimental foram classificados como Cambissolo Eutrófico e os resultados da análise química, antes da correção e instalação do experimento, são apresentados na Tabela 1.

A evapotranspiração real da cultura foi obtida através de três imagens do satélite Landsat 5 nos dias 01 de novembro (34 DAE), 17 de novembro (50 DAE) e 19 de dezembro (82 DAE) do ano de 2008.

O suprimento de água às plantas e o manejo da irrigação foi baseado na demanda hídrica local com ênfase na evapotranspiração real da cultura (ET_c) medida pela estação micrometeorológica instalada no campo. Para estimativa da evapotranspiração da cultura, foi utilizado o método do balanço de energia baseado na Razão de Bowen. A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada utilizando os dados coletados na estação meteorológica de Apodi-RN, localizada na área experimental. Foram considerados três estádios fenológicos, coincidindo com as imagens obtidas, assim identificados: Época 1: botões florais (01/11/2008); Época 2: floração (17/11/2008); e Época 3: frutificação (19/12/2008). Foram determinados o saldo de radiação – R_n , medido com saldo radiômetro NR-LITE (Campbell Sci., Logan-UT, USA) e o fluxo de calor no solo – G , medido através de placas HFP01SC-L Hukseflux Self-Calibrating Soil Heat Flux Plate (Campbell Sci., Logan-UT, USA).

Os dados foram obtidos a cada 5 segundos e, as médias de 20 minutos, armazenadas num datalogger CR1000 (Campbell Sci., Logan-UT, USA). Também foram coletados dados da constante psicrométrica γ ($kPa\ ^\circ C^{-1}$) e das temperaturas máxima e mínima diárias, e determinados os gradientes de temperatura, ΔT ($^\circ C$), e de pressão de vapor, Δe (kPa), acima do dossel vegetativo, obtidos através das temperaturas seca e úmida em dois níveis (0,5 m e 1,5 m) acima do dossel.

Para a determinação da ET_c usando o método da Razão de Bowen, o fluxo de calor latente (LE) foi determinado com a seguinte equação:

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (1)$$

Em que: β é a razão de Bowen.

Considerado apenas o período diurno, quando $R_n - G > 0$ (PEREZ et al., 1999), a razão de Bowen (β) foi calculada pela seguinte equação:

$$\beta = \gamma (\Delta T / \Delta e) \quad (2)$$

A ET_c foi então calculada dividindo-se o valor de LE (equação 1) por L , que é o calor latente de vaporização ($2,5\ MJ\ kg^{-1}$).

A evapotranspiração de referência (ET_0) diária foi calculada mediante o método FAO 56-Penman-Monteith (Allen et al., 1998), com base em dados meteorológicos coletados na estação

meteorológica de Apodi-RN (5°37'37"S; 37°49'54"W; 150 m) pertencente à rede de estações automáticas do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, segundo expressão:

$$ET_{0-24} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3)$$

Em que: T é a temperatura média diária do ar [°C];

e_s é a pressão de saturação [kPa]; e_a é a pressão atual de vapor [kPa];

$e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor [kPa];

u_2 é a velocidade média do vento a 2 metros de altura, [m s⁻¹]; e

Δ é a tangente à curva de pressão de vapor [kPa °C⁻¹].

A velocidade média diária do vento a 2 m de altura foi determinada através da seguinte equação (ALLEN et al., 1998):

$$u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln(z(67,8) - 5,42)} \quad (4)$$

Em que: u_{10} é a velocidade do vento coletada a 10 m de altura e z é a altura de coleta.

Utilizando-se as imagens de satélite, a evapotranspiração real da cultura (ET_c) foi estimada através da seguinte equação (em mm dia⁻¹):

$$ET_c = FET_{0-24} ET_{0-24} \quad (5)$$

Em que: FET_{0-24} é a fração da evapotranspiração de referência diária

A FET_{0-24} pode ser considerada igual à fração da evapotranspiração de referência horária (TREZZA, 2002), dada por:

$$FET_{0-h} = ET_{c-h} / ET_{0-h} \quad (6)$$

Em que: ET_{c-h} é a evapotranspiração real da cultura em base horária;

ET_{0-h} é a evapotranspiração de referência em base horária.

Tanto a $ET_{0,24}$ como a $ET_{0,h}$ foram calculadas pelo método da FAO 56-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) através dos dados coletados na estação meteorológica local. A $ET_{c,h}$ (mm h^{-1}) foi obtida, em cada pixel da imagem, como:

$$ET_{c,h} = 3600 LE / L \quad (7)$$

Em que: LE (W m^{-2}) é a densidade de fluxo de calor latente, estimado como ($LE = R_n - G - H$);

L (J kg^{-1}) é o calor latente de vaporização da água.

A densidade de fluxo de calor no solo (W m^{-2}) foi estimada segundo Bastiaanssen (2000), como:

$$G = [Ts (0,0038 + 0,0074 \alpha)(1 - 0,98 NDVI^4)] R_n \quad (8)$$

Em que: T_s é a temperatura da superfície ($^{\circ}\text{C}$);

α é o albedo da superfície;

$NDVI$ – (*Normalized Difference Vegetation Index*).

O saldo de radiação (W m^{-2}) foi obtido segundo critérios do SEBAL (SILVA et al., 2005). A densidade de fluxo de calor sensível H (W m^{-2}) foi obtida através de processo iterativo, usando a metodologia descrita por Allen et al. (2002), sendo dado por:

$$H = \rho \cdot c_p \cdot dT / r_{ah} \quad (9)$$

Em que: ρ é a densidade do ar (kg m^{-3});

c_p é o calor específico do ar ($1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}$);

dT (K) é a diferença de temperatura entre a superfície e um nível de referência;

r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (seg m^{-1}).

A r_{ah} depende da velocidade de fricção (u^*), que é estimada para a condição de atmosfera neutra dada como sendo (ALLEN et al., 2002):

$$u^* = \left((k \cdot u_z) / \ln \left(\frac{z_x}{z_{0m}} \right) \right) \quad (10)$$

Em que: k é constante de von Karman

u_z é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) na altura z_x ;

z_{0m} é o coeficiente de rugosidade (m): estimado através da altura média da vegetação.

Assim, a resistência aerodinâmica corrigida aos efeitos de turbulência de origem térmica, será dada por:

$$r_{ah} = \left[\left(\ln(z_2/z_1) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_{0,1})} \right) / (k \cdot u^*) \right] \quad (11)$$

Em que: z_1 e z_2 são as alturas, em metros, acima do dossel da cultura;

$\psi_{h(z_2)}$ e $\psi_{h(z_{0,1})}$ são as funções adimensionais para correções da estabilidade para o transporte de calor a 2,0 m e 0,1 m, respectivamente, calculadas em função do comprimento de Monin-Obukhov, pixel a pixel, de acordo com Allen et al. (2002).

Os dados foram submetidos à análise comparativa para avaliação do erro nos dados estimados e validação da ETc obtida pelo SEBAL como preditiva da demanda hídrica do algodoeiro.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o ciclo do algodoeiro, a ETc variou de 4,2 mm dia⁻¹, logo após a semeadura, até 9,3 mm dia⁻¹, no período de máximo NDVI. Este comportamento bastante variável já foi observado por Rodrigues (2003) no algodoeiro herbáceo cultivar BRS 201, assim como por Bezerra (2007) no algodoeiro BRS 200 – Marrom. Foi observada também uma grande variação dentro de uma mesma fase fenológica, que pode ser decorrente das condições meteorológicas locais, conforme demonstrado pela variação da ET₀ durante o ciclo da cultura (Figura 2). Os valores do coeficiente de cultivo (Kc) foram de 1,09; 0,90 e 1,08 para as épocas 1, 2 e 3, respectivamente (Tabela 2). Os mais altos valores para a ETc foram observados após os eventos de irrigação devido às condições ideais de umidade do solo, ou seja, a evapotranspiração da cultura (ETc) tornou-se igual a evapotranspiração potencial da cultura (ETpc), além de uma maior evaporação de água diretamente da superfície do solo. Segundo Perez et al. (1999), a técnica de razão de Bowen possui uma limitação na determinação da ETc em dias chuvosos e em áreas recém irrigadas, o que torna ainda mais importante a utilização de outros métodos para determinação de ETc, visto que estes são os períodos de maior magnitude desta variável.

Na Tabela 2, quando avaliados os valores de ET_0 , pode-se observar que os valores médios de ET_0 para 16 dias não diferiram muito da ET_0 calculada no dia da passagem do satélite, apresentando um erro máximo de 2,66% na época 1, o que abre caminho para uso do algoritmo Sebal para a estimativa da ET_c diária em todas as fases do desenvolvimento da cultura. Já com relação à ET_c medida através da Razão de Bowen e a ET_c estimada através da imagem de satélite, verificou-se erros maiores, chegando até a 13,3%, sendo a ET_c calculada pelo algoritmo Sebal sendo sempre superestimada. Feitosa e Silva (2006) encontraram uma superestimativa da ET_c obtida com o algoritmo Sebal quando comparada com a ET_c determinada em campo, sendo sua pesquisa realizada na área do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho (cidade-estado). Outros autores como Bezerra et al. (2008), validando o algoritmo SEBAL em algodão irrigado no município de Barbalha – CE, encontraram uma diferença que variou de 6,2% a 20,0% quando comparadas à evapotranspiração medida com o algoritmo Sebal e estimada pela razão de Bowen.

É importante observar que a validação feita por Bastiaanssen et al. (1998) baseou-se em dados coletados em áreas desérticas e de oásis e, dessa forma, para as nossas condições edafoclimáticas, mais estudos deverão ser feitos no âmbito de tornar o algoritmo mais preciso e confiável visto que algumas de suas fórmulas de abrangência empírica foram desenvolvidas para condições diferentes de nossa realidade.

CONCLUSÕES

A ET_c estimada a partir do algoritmo SEBAL apresenta resultados semelhantes àqueles obtidos através da razão de Bowen e condizentes com valores encontrados na literatura.

O algoritmo Sebal pode ser utilizado na avaliação da necessidade hídrica do algodoeiro devido à sua boa precisão na estimativa da ET_c .

AGRADECIMENTOS

A FINEP pelo suporte financeiro dessa pesquisa, a ENPARN e a Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements** - Rome, Italy, 1998. (FAO Irrigation and drainage paper 56.).
- ALLEN, R., BASTIAANSEN, W., WATERS, R., TASUMI, M., TREZZA R. **Surface Energy Balance Algorithms for Land**. Advanced Training and Users Manual, Idaho. 2002.
- BASTIAANSEN, W. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100. 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M.; A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1, validation. **Journal of Hydrology**, v. 212/213, p.213-229, 1998.
- BEZERRA, B. G. SILVA, B. B. Da, FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária usando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 305-317, 2008.
- BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e rentabilidade do algodoeiro BRS 200 - Marrom, Irrigado**. 2007. 88 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais)– Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- BRANDÃO, Z. N. **Estimativa da produtividade e estado nutricional da cultura do algodão irrigado via técnicas de sensoriamento remoto**. 2009. 152 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2009.
- FEITOSA, J. R. P.; SILVA, B. B. Validação do algoritmo Sebal no Perimetro Irrigado Senador Nilo Coelho Petrolina-PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBMET, 2006. 1 CD-ROM.
- GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ration-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.
- PEREZ, P. J.; CASTELVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. L. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.

RODRIGUES, M. F. G. **Necessidades Hídricas, Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, Cultivar BRS 201**. 2003. 132 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

SILVA, B. B. da.; LOPES, G. M.; AZEVEDO P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

TASUMI, M. **Progress in operacional estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. Boise,;University of Idaho., 2003. 355 p.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control**. 247f. Thesis (Doctor of Philosophy in Biological and Agricultural Engineering). Utah State University. Logan, Utah, 2002.

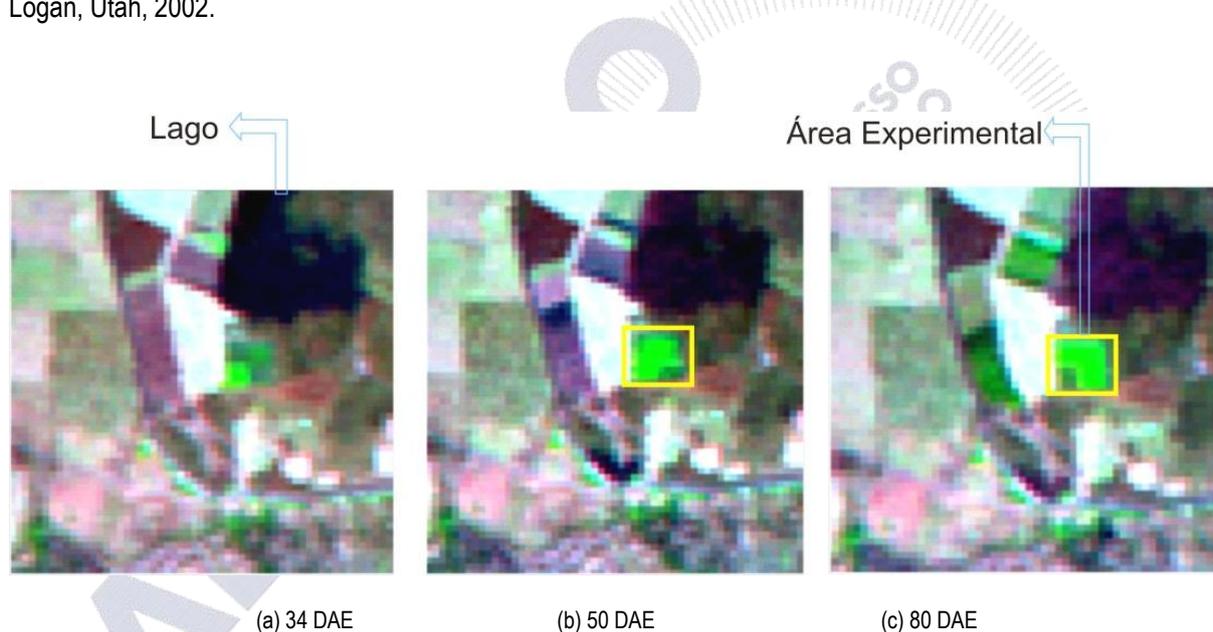


Figura 1: Imagens do sensor TM Landsat-5, em composição RGB: 543, para as três datas de avaliação da área experimental na estação da ENPARN, no município de Apodi, RN.

Tabela 1: Características químicas do solo, coletado em três profundidades, no campo experimental localizado em Apodi, RN.

Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	MO (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	H ⁺ + Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	SB (cmol _c dm ⁻³)	CTC (cmol _c dm ⁻³)
0-20	6,20	3,92	23,69	0,83	0,69	5,00	2,40	2,47	8,92	11,40
20-40	6,10	2,40	20,92	0,63	0,54	5,80	2,90	2,14	9,87	12,01
40-60	6,20	2,40	20,92	0,53	0,40	6,50	2,50	1,82	9,93	11,74

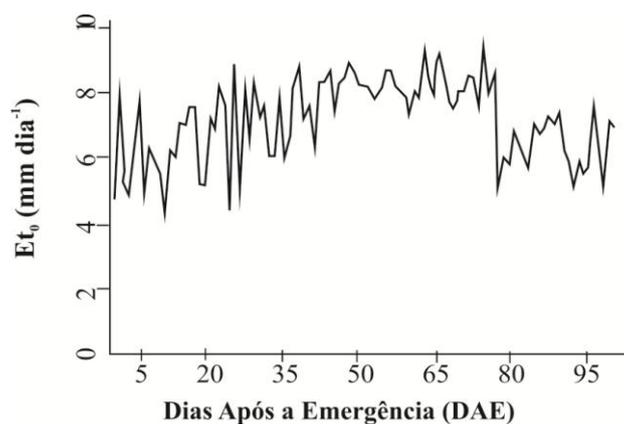


Figura 2: Evolução temporal da evapotranspiração de referência para o algodoeiro irrigado.

Tabela 2. Consumo hídrico em cada fase fenológica do algodoeiro irrigado, onde são apresentados a média da ET_0 num período de 16 dias dentro de cada fase e a ET_0 estimada pelo método FAO 56-Penman-Montheith, a ET_c medida pela razão de Bowen, o K_c e a ET_c estimada pelo algoritmo SEBAL, obtidos na data de passagem do satélite.

Data/Fase	ET_0 (média) (mm dia ⁻¹)	ET_0 (mm dia ⁻¹)	Razão de Bowen ET_c - (mm dia ⁻¹)	K_c	SEBAL ET_c - (mm dia ⁻¹)
Época 1	7,3	7,5	8,2	1,09	8,5
Época 2	8,0	8,0	7,2	0,90	8,0
Época 3	7,8	7,9	8,5	1,08	8,8